

ผลงานลำดับที่ 2

เรื่อง ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ด้วย
ไบโอชาร์ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตพืช
Study on increasing the efficiency of biofertilizer
LDD 12 by using biochar to increase soil fertility
and crop yield

โดย

นางจันจิรา แสงสีเหลือง

เอกสารประกอบการขอประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง
ผู้เชี่ยวชาญด้านบำรุงดินด้วยอินทรีย์วัตถุ
(นักวิชาการเกษตรเชี่ยวชาญ)
ตำแหน่งเลขที่ 5
กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
กรมพัฒนาที่ดิน

คำนำ

ประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนและมรสุม ซึ่งเป็นสภาพที่เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์ในดินส่งเสริมให้อัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในดินเกิดอย่างรวดเร็ว ทำให้พื้นที่เกษตรกรรมส่วนใหญ่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุค่อนข้างต่ำ มีผลผลิตเฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่ของการเพาะปลูกพืชชนิดต่าง ๆ ยังอยู่ระดับต่ำ เนื่องมาจากพื้นที่เกษตรกรรมมีความเสื่อมโทรม สาเหตุมาจากการใช้ประโยชน์ทรัพยากรที่ดินอย่างต่อเนื่อง ขาดการปรับปรุงบำรุงดินที่ถูกต้อง การใช้สารเคมี และการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตด้วยการเผาในที่โล่งแจ้ง อีกทั้งสภาพการเปลี่ยนแปลงทางภูมิอากาศโลก มีผลกระทบโดยตรงต่อการเพาะปลูก และผลผลิตพืช ก่อให้เกิดปัญหาการชะล้างพังทลายของดิน ดินเสื่อมความอุดมสมบูรณ์ และสภาพแวดล้อมระบบนิเวศดินขาดสมดุล ดังนั้นแนวทางการพัฒนางานด้านการบำรุงดินด้วยการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากมวลชีวภาพของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนโดยไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้วัสดุมีรูพรุนและคาร์บอนคงตัวสูง สามารถเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน มีบทบาทต่อกระบวนการทางชีวเคมีในดิน การหมุนเวียนธาตุอาหาร การแลกเปลี่ยนประจุบวก และการดูดซับประจุของธาตุอาหารพืชในดิน และคุณสมบัติเด่นเป็นคาร์บอนที่มีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดิน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ลดความหนาแน่นรวมของดิน ช่วยอุ้มน้ำรักษาความชื้นได้ดี รวมทั้งมีปริมาณธาตุอาหาร เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ในดิน ช่วยป้องกันจุลินทรีย์ในดินจากผู้ล่า และความแห้งแล้งจากการระเหยของน้ำ และยังเป็นแหล่งคาร์บอน พลังงาน และแร่ธาตุต่าง ๆ ให้กับจุลินทรีย์ดิน ส่งผลต่อประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในดิน และการหมุนเวียนธาตุอาหารพืช การนำมาใช้ประโยชน์เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถสร้างธาตุอาหาร หรือช่วยให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์กับพืช เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน ได้แก่ แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ สามารถตรึงก๊าซไนโตรเจนในอากาศ และเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแอมโมเนียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช แบคทีเรียละลายฟอสเฟตเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม มีกลไกการละลายโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปแร่ธรรมชาติ และแบคทีเรียสร้างฮอโมน ได้แก่ ออกซิน จิบเบอเรลลิน และไซโตไคนิน ช่วยกระตุ้นการเจริญของรากขนอ่อน และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวรากพืช ทำให้ความสามารถในการดูดน้ำ และธาตุอาหารเพิ่มมากขึ้น ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตและเพิ่มผลผลิตพืช และส่งเสริมระบบนิเวศดินสร้างสมดุลของกลุ่มจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ทางการเกษตร

ดังนั้น งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อศึกษาการใช้ น้ำกากส่าและกากน้ำตาลในการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ผลิตเป็นปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว การศึกษาอัตราส่วนและระยะเวลาการบ่มของไบโอชาร์กับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

ในการดูดซับจุลินทรีย์ และศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเจริญเติบโต ผลผลิต และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้า 2 รอบในแปลงทดลอง จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์และปุ๋ยชีวภาพ สำหรับวางแผนการส่งเสริมการเพิ่มประสิทธิภาพด้านบำรุงดินด้วยคาร์บอนเสถียรสูงทนทานต่อการย่อยสลายจากกระบวนการจุลินทรีย์ และเพิ่มธาตุอาหารพืชจากธรรมชาติด้วยปุ๋ยชีวภาพ เป็นข้อมูลช่วยในการตัดสินใจจากการใช้ไบโอชาร์เป็นปัจจัยการผลิตด้านบำรุงดินระยะยาวในแปลงปลูก สามารถนำองค์ความรู้วิธีการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์และปุ๋ยชีวภาพไปส่งเสริมขยายผลสู่นักวิชาการ หน่วยงานภาครัฐ ภาคเอกชน และเกษตรกร นำไปใช้ประโยชน์ต่อยอดประยุกต์ใช้กับพืชชนิดต่าง ๆ ในพื้นที่เกษตรกรรม

จันจิรา แสงสีเหลือง

กรกฎาคม 2568

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	(1)
สารบัญ	(3)
สารบัญตาราง	(5)
สารบัญภาพ	(7)
สารบัญตารางผนวก	(8)
แบบการเสนอผลงาน ระดับเชี่ยวชาญ	1
ส่วนที่ 1 ข้อมูลบุคคล/ตำแหน่ง	1
ส่วนที่ 2 ผลงานที่เป็นผลการปฏิบัติงานหรือผลสำเร็จของงาน	3
1. ชื่อเรื่อง	3
2. ระยะเวลาการดำเนินการ	3
3. ความรู้ ความชำนาญงาน หรือความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ที่ใช้ใน การปฏิบัติงาน	3
4. สรุปสาระสำคัญ ขั้นตอนการดำเนินการ และเป้าหมายของงาน	39
4.1 บทคัดย่อ และคำสำคัญ	39
4.2 Abstract and Keywords	41
4.3 หลักการและเหตุผล	43
4.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	44
4.5 การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง	44
4.6 วิธีดำเนินการ	55
4.7 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	73
4.8 สรุปและเสนอแนะ	140
5. ผลสำเร็จของงาน	146
6. การนำไปใช้ประโยชน์/ผลกระทบ	147
7. ความยุ่งยากและซับซ้อนในการดำเนินการ	148
8. ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินการ	148
9. ข้อเสนอแนะ	149
10. การเผยแพร่ผลงาน	149

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
11. ผู้มีส่วนร่วมในผลงาน	150
เอกสารอ้างอิง	152
ภาคผนวก	174
ภาคผนวก ก	175
ภาคผนวก ข	182
ภาคผนวก ค	184

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลผลิตที่ได้รับจากกระบวนการไพโรไลซิส	8
2	ชนิดและสมบัติของไบโอชาร์ที่ใช้อุณหภูมิในการเผาต่างกัน	14
3	องค์ประกอบสารอินทรีย์ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพ ของไบโอชาร์แกลบ	49
4	อัตราการใช้ไบโอชาร์แกลบในลักษณะเนื้อดินที่แตกต่างกัน	51
5	ประเทศผู้ผลิตไบโอชาร์ และชนิดของวัตถุดิบที่นำมาผลิตไบโอชาร์	52
6	สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว	56
7	สมบัติทางเคมีของไบโอชาร์แกลบ	60
8	ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ	75
9	ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟตตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ	77
10	ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ	79
11	ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอโมนตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ	81
12	ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ	85
13	ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระและแบคทีเรียสร้างฮอโมน ในไบโอชาร์แกลบ	90
14	ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟตและแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม ในไบโอชาร์แกลบ	92
15	ค่าการนำไฟฟ้าและความเป็นกรดเป็นด่างของดินก่อนและหลังการทดลอง จากการปลูกคะน้ารอบที่ 1	98
16	สมบัติทางเคมีของดินก่อนและหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1	103
17	ค่าการนำไฟฟ้าและความเป็นกรดเป็นด่างของดินหลังการทดลองจากการปลูก คะน้ารอบที่ 2 เปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1	106
18	สมบัติทางเคมีของดินหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 เปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1	113

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
19	ความหนาแน่นรวมและปริมาณน้ำในดินหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 เปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1	117
20	ปริมาณแบคทีเรียในดินหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 เปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1	120
21	ความสูงของต้นคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2	125
22	ค่าความเขียวของใบคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2	127
23	ขนาดพื้นที่ใบคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2	130
24	น้ำหนักแห้งต่อต้นคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2	132
25	น้ำหนักต้นคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2	134
26	ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2	139
27	ฐานข้อมูลอัตราการใช้ไบโอชาร์แกลบ และระยะเวลาคงทนของไบโอชาร์ในดินต่อการเจริญเติบโตของพืชและสมบัติดิน	143
28	สถานที่แหล่งผลิตไบโอชาร์ในประเทศไทย	144

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แบบเตาเผาไบโอชาร์แบบตั้ง ขนาดบรรจุ 50 ลิตร	9
2	แบบเตาเผาไบโอชาร์แบบตั้ง ขนาดบรรจุ 250 ลิตร	10
3	แบบเตาเผาเตาชั้นเดียวแนวตั้ง โดยใช้ถัง 200 ลิตร	10
4	แบบเตาเผาเตา 2 ชั้น โดยใช้ถัง 100 ลิตร วางอยู่ด้านในถัง 200 ลิตร	11
5	แบบเตาเผาเตาชั้นเดียวแนวนอน โดยใช้ถัง 200 ลิตร	12
6	แบบเตาเผาเตาชั้นเดียวแนวตั้ง โดยใช้ท่อปูนขนาด 80 เซนติเมตร	12
7	แบบเตาเผาไบโอชาร์ขนาดอุตสาหกรรม	13
8	กลไกการตรึงจุลินทรีย์ด้วยไบโอชาร์	24
9	ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของไบโอชาร์แกลบ กำลังขยาย 350 เท่า (A) 2,000 เท่า (B)	45
10	ลักษณะเตาเผาแบบท่อปูนสำหรับการผลิตไบโอชาร์แกลบ	48
11	แผนผังแปลงทดลองภาคสนาม	64
12	แสดงระยะปลูก พื้นที่เก็บข้อมูล และพื้นที่เก็บเกี่ยวคะแนนในแปลงย่อย	65
13	แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย	72
14	ลักษณะของเซลล์แบคทีเรียในรูพรุนไบโอชาร์แกลบ กำลังขยาย 4,000 เท่า (A) 8,000 เท่า (B)	95
15	ลักษณะเซลล์แบคทีเรียบนพื้นผิวและช่องว่างรูพรุนของไบโอชาร์แกลบ ภายหลังการทดลอง กำลังขยาย 4,000 เท่า (A) และ (B)	122

สารบัญตารางผนวก

ตารางผนวกที่		หน้า
1	ค่าเกณฑ์กำหนดที่สำคัญของไบโอชาร์	175
2	องค์ประกอบทางเคมีของอาหารเลี้ยงเชื้อเห็ดแต่ละตำรับการทดลอง	176
3	ปริมาณแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12	177
4	การประเมินค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้า รอบที่ 1	178
5	การประเมินค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้า รอบที่ 2	180

แบบการเสนอผลงาน

ระดับเชี่ยวชาญ

ส่วนที่ 1 ข้อมูลบุคคล/ตำแหน่ง

ชื่อผู้ขอประเมิน นางจันจิรา แสงสีเหลือง

ตำแหน่งปัจจุบัน นักวิชาการเกษตรชำนาญการพิเศษ

หน้าที่ความรับผิดชอบของตำแหน่งปัจจุบัน

1. วิจัย แยก และคัดเลือกจุลินทรีย์ย่อยสลายสารเคมีทางการเกษตร และกำจัดโลหะหนักที่ตกค้างในดินและน้ำ พัฒนาเป็นเทคโนโลยีการบำบัดสารมลพิษทางดินและน้ำ เพื่อลดการปนเปื้อนสารมลพิษสู่ผลผลิตทางการเกษตร และการผลิตทางการเกษตรอย่างยั่งยืน
2. ศึกษา วิจัย กลไกการย่อยสลายการเปลี่ยนรูปโครงสร้างของสารเคมีทางการเกษตร และโลหะหนัก เพื่อลดมลพิษทางดินและน้ำ
3. วิจัย แยก คัดเลือกจุลินทรีย์ดินควบคุมศัตรูพืช เพื่อลดการใช้สารเคมีทางการเกษตร และลดการปนเปื้อนโลหะหนักในดินและน้ำ
4. วิเคราะห์จุลินทรีย์จัดการมลพิษทางดินและน้ำ เพื่อสนับสนุนงานทางวิชาการ
5. ปฏิบัติงานอื่น ๆ ตามที่ได้รับมอบหมาย

ตำแหน่งที่จะแต่งตั้ง นักวิชาการเกษตรเชี่ยวชาญ

หน้าที่ความรับผิดชอบของตำแหน่งที่จะแต่งตั้ง

1. ศึกษา วิเคราะห์ วิจัย กำหนดวิธีการประเมินผล และพัฒนาเกี่ยวกับงานวิชาการด้านบำรุงดิน โดยใช้อินทรีย์วัตถุและวัสดุอื่น ๆ มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางชีวภาพด้านจุลินทรีย์ ในการแปรสภาพอินทรีย์วัตถุได้เป็นผลิตภัณฑ์อินทรีย์สารประกอบด้วยธาตุอาหาร และสารเสริมการเจริญเติบโตของพืช สำหรับเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน รวมถึงการกำหนดคุณภาพ มาตรฐาน และพัฒนาระบบฐานข้อมูลของผลิตภัณฑ์อินทรีย์สารและชีวภาพ สำหรับบำรุงดิน เพื่อพัฒนา หรือแก้ไขปัญหาทรัพยากรดิน ให้มีความเหมาะสมกับพื้นที่
2. ให้คำปรึกษา แนะนำ และควบคุมทางวิชาการเกี่ยวกับงานบำรุงดินด้วยอินทรีย์วัตถุ เป็นที่ปรึกษาของกรมพัฒนาที่ดินในงานวิชาการด้านบำรุงดินด้วยอินทรีย์วัตถุ เพื่อสนับสนุนการดำเนินงานของหน่วยงาน และใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณากำหนดนโยบาย แผนงาน และมาตรการปฏิบัติงานในพื้นที่ ให้เป็นไปตามหลักวิชาการ

3. เป็นผู้แทนกรมพัฒนาที่ดินในการประชุมทางวิชาการด้านบำรุงดิน ทั้งในประเทศและต่างประเทศ ติดต่อประสานงาน และร่วมมือทางวิชาการด้านบำรุงดินกับผู้เชี่ยวชาญ และองค์การระหว่างประเทศ เพื่อชี้แจงข้อมูลแลกเปลี่ยนความคิดและข้อเสนอแนะทางวิชาการ เพื่อให้เกิดความร่วมมือในทางวิชาการ

4. ปฏิบัติงานอื่น ๆ ตามที่ได้รับมอบหมาย เพื่อสนับสนุนให้กรมพัฒนาที่ดินในภาพรวมบรรลุภารกิจที่กำหนดไว้

ส่วนที่ 2 ผลงานที่เป็นผลการปฏิบัติงานหรือผลสำเร็จของงาน

1. เรื่อง ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ด้วยไบโอชาร์ ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตพืช

Study on increasing the efficiency of biofertilizer LDD 12 by using biochar to increase soil fertility and crop yield

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

ทะเบียนวิจัย 59 - 59 - 03 - 12 - 020000 - 005 - 104 - 01 - 23

สถานที่ดำเนินการ ห้องปฏิบัติการจุลินทรีย์ กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
กรมพัฒนาที่ดิน

แปลงทดลองพื้นที่ ตำบลดอนแร่ อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี

3. ความรู้ ความชำนาญงาน หรือความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ที่ใช้ในการปฏิบัติงาน

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ผู้จัดทำได้มีการประยุกต์ใช้ความรู้ด้านเกษตรศาสตร์ สาขาพืชศาสตร์ และสาขาปฐพีศาสตร์ ความรู้ด้านการจัดการวัสดุเหลือใช้ในการบำรุงดิน และการใช้ประโยชน์ความรู้ด้านจุลชีววิทยาทางดิน และความรู้ด้านสถิติเพื่อการวิจัยทางการเกษตร มีรายละเอียดดังนี้

3.1 ความรู้ด้านเกษตรศาสตร์ สาขาพืชศาสตร์ และสาขาปฐพีศาสตร์

3.1.1 คะน้า

กะน้า (*Brassica oleracea*) เป็นพืชผักใบเขียวที่รับประทานทั่วไป โดยบริโภคส่วนของใบ และลำต้น มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปเอเชียและปลูกกันมากในประเทศจีน ฮองกง ไต้หวัน มาเลเซีย และประเทศไทย ผักกะน้าเป็นผักอายุ 2 ปี แต่ปลูกเป็นผักฤดูเดียวอายุเก็บเกี่ยวประมาณ 45 - 55 วัน (สุตชล, 2555)

1) ปริมาณธาตุอาหารกับคุณภาพผักกะน้า (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 เมื่อพิจารณาธาตุอาหารที่สะสมในผลผลิต 1 ตัน มีธาตุอาหารติดไปกับผลผลิต ดังนี้ ไนโตรเจน 0.5 - 2.7 กิโลกรัม

ฟอสฟอรัส 0.2 - 1.7 กิโลกรัม โพแทสเซียม 1.7 - 2.8 กิโลกรัม แคลเซียม 0.3 - 1.1 กิโลกรัม แมกนีเซียม 0.2 - 0.6 กิโลกรัม และกำมะถัน 0.1 - 0.2 กิโลกรัม

2) ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของคะน้า

สำหรับความเข้มข้นของธาตุอาหารที่เพียงพอเหมาะสมของธาตุอาหาร ได้แก่ ธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุ ในใบดัชนีของคะน้าที่ระยะใกล้เก็บเกี่ยว มีพิสัยความเข้มข้นของธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ปริมาณไนโตรเจน 4.0 - 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณฟอสฟอรัส 0.3 - 0.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณโพแทสเซียม 3.0 - 4.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง พิสัยความเข้มข้นของธาตุอาหารรอง ได้แก่ ปริมาณแคลเซียม 3.0 - 4.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง และพิสัยความเข้มข้นของจุลธาตุ ได้แก่ ปริมาณโบรอน 50 - 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง

3) ความต้องการปุ๋ยตามคำแนะนำตามผลวิเคราะห์ธาตุอาหารพืช สำหรับปุ๋ยเคมีที่แนะนำให้ใช้มี 2 แบบ คือ พิจารณาจากผลการวิเคราะห์ดินและเนื้อดิน ตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร (2548)

(1) คำแนะนำตามผลการวิเคราะห์ดิน การใช้ปุ๋ยธาตุอาหารหลัก ประกอบด้วยอัตรา 10 - 20 กิโลกรัมของ N ต่อไร่ อัตรา 5 - 10 กิโลกรัมของ P_2O_5 ต่อไร่ และอัตรา 5 - 15 กิโลกรัมของ K_2O ต่อไร่ ตามระดับของปริมาณอินทรีย์วัตถุ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

(2) คำแนะนำตามลักษณะเนื้อดิน ใช้อัตราเดียวกัน คือ ก) ดินเหนียว ใส่อัตรา 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 สำหรับวิธีให้นั้นให้แบ่งปุ๋ยออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน ครั้งแรกใส่หลังจากถอนแยก และครั้งที่สองใส่หลังจากครั้งแรกสองสัปดาห์

3.1.2 สมบัติดินในพื้นที่ศึกษา (กรมพัฒนาที่ดิน, 2557; กรมพัฒนาที่ดิน, 2562ก)

ดังนี้

ชุดดินปราณบุรี (Pr) กลุ่มชุดดินที่ 36

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

วัตถุต้นกำเนิด ตะกอนน้ำพา

สภาพพื้นที่ ค่อนข้างราบเรียบถึงลูกคลื่นลอนลาดเล็กน้อย

ความลาดชัน 1 - 5 เปอร์เซ็นต์

การระบายน้ำ ดี

การซึมผ่านได้ของน้ำ ปานกลางถึงดี

ไหลบ่าของน้ำบนผิวดิน ปานกลาง

ลักษณะสมบัติของดิน เป็นกลุ่มชุดดินที่เกิดจากวัตถุดินกำเนิดดินพวก ตะกอนลำนํ้า หรือการสลายตัวผุพังอยู่กับที่ หรือการสลายตัวผุพังแล้วถูกเคลื่อนย้ายมาที่บึงของวัสดุ เนื้อหยาบ พบบริเวณพื้นที่ดอน ที่มีสภาพพื้นที่เป็นลูกคลื่นลอนลาดจนถึงเนินเขา เป็นดินลึกที่มีการระบายน้ำดีถึงดีปานกลาง มีเนื้อดินเป็นพวกดินร่วนละเอียดที่มีเนื้อดินบนเป็นดินร่วนปนทราย หรือดินร่วน ส่วนดินล่างเป็นดินร่วนเหนียวปนทรายหรือดินร่วนเหนียว ดินมีสีน้ำตาล สีเหลือง หรือ สีแดง และอาจพบจุดประสีต่าง ๆ ในชั้นดินล่าง ดินมีความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติค่อนข้างต่ำถึง ปานกลาง ดินชั้นบนส่วนใหญ่จะมีปฏิกิริยาเป็นกรดจัดถึงเป็นกลาง ส่วนดินล่างจะมีปฏิกิริยาดินเป็น กรดปานกลางถึงเป็นด่างปานกลาง ดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำถึงปานกลาง

3.2 ความรู้ด้านการจัดการวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในการปรับปรุงบำรุงดิน

3.2.1 ไบโอชาร์ (biochar)

1) ความหมายของไบโอชาร์ หรือถ่านชีวภาพ จากแหล่งต่าง ๆ ดังนี้

ไบโอชาร์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการปรับปรุงดินที่ได้จากกระบวนการ ย่อยสลายเชิงความร้อนของชีวมวล หรือสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นสารประกอบของสิ่งมีชีวิตที่ย่อยสลายได้ ตามธรรมชาติ เช่น ต้นไม้ เศษใบไม้ และกิ่งไม้ เป็นต้น เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่ว เปลือกผลไม้ เหง้ามันสำปะหลัง เศษอาหารในครัวเรือน และมูลสัตว์ เป็นต้น กระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อนนี้เรียกว่า ไพโรไลซิส (pyrolysis) (ศิริลักษณ์ และ อรสา, 2556)

ไบโอชาร์ คือ ถ่านหินที่มีรูพรุน ได้มาจากซากต้นไม้จากการนำเอาซากพืช เหล่านี้ ใส่เข้าไปในเครื่องที่มีความร้อนด้วยอุณหภูมิสูงมาก สารจะถูกให้ความร้อนผ่านกระบวนการ ย่อยสลายด้วยการให้ความร้อนทางเคมีเรียกว่า ไพโรไลซิส สารจากสิ่งมีชีวิตเหล่านั้นจะถูกเปลี่ยนไป เป็นวัตถุที่มีลักษณะกลมเหมือนถ่านหิน (Lehmann, 2007)

ไบโอชาร์ คือ ผลผลิตที่ได้จากการนำมวลชีวภาพผ่านกระบวนการ แยกสลายด้วยความร้อนที่เรียกว่า ไพโรไลซิส สภาวะไร้ออกซิเจน หรือใช้อากาศออกซิเจน ในระหว่างการเผาไหม้ ได้ถ่านชีวภาพมีความคงตัวสูง (Xu et al., 2011)

ไบโอชาร์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงจากเศษวัสดุเหลือใช้ ทางการเกษตร หรือการทำปศุสัตว์ เช่น แกลบ ชังข้าวโพด ต้นข้าวโพด ชานอ้อย และมูลสัตว์ เป็นต้น

นำมาผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีด้วยความร้อน โดยจำกัดปริมาณ หรือปราศจาก ก๊าซออกซิเจนในการเผาไหม้ ได้เป็นถ่านชีวภาพที่อุดมไปด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก (Lehmann and Joseph, 2009)

ไบโอชาร์ คือ ถ่านที่มีลักษณะเป็นเนื้อละเอียด และเต็มไปด้วยรูพรุน เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของชีวมวลในสภาวะที่มีก๊าซออกซิเจนอย่างจำกัด ถูกให้ความร้อนผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยการให้ความร้อนทางเคมีเรียกว่า ไพโรไลซิส ซึ่งเป็น กระบวนการการให้ความร้อนที่นิยมใช้ โดยจะเปลี่ยนชีวมวลที่ถูกให้ความร้อนในสภาวะที่ไม่มีอากาศ ให้กลายเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ สามารถผลิตได้จากวัสดุจากธรรมชาติ (Sohi *et al.*, 2010)

ไบโอชาร์ คือ วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน ซึ่งผลิตโดยกระบวนการไพโรไลซิส ของชีวมวล และนำไปใช้เพื่อให้คาร์บอนที่กักเก็บอยู่นั้นถูกกักเก็บไว้เป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอน หรือ แทนที่คาร์บอนฟอสซิล ไม่ได้ถูกสร้างมาเพื่อเผาเพื่อผลิตพลังงาน (International Biochar Initiative, 2012)

ไบโอชาร์ คือ ถ่านที่มีลักษณะเป็นเนื้อละเอียดและเต็มไปด้วยรูพรุน เป็นวัสดุอินทรีย์ที่อุดมด้วยคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและอากาศ เรียกว่า การแยกสลายด้วยความร้อน หรือกระบวนการไพโรไลซิส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน หรือ มีออกซิเจนน้อยมาก (Rawat *et al.*, 2019)

นิยามความหมายของผู้เขียน ไบโอชาร์ คือ วัสดุคาร์บอนที่มีลักษณะ เป็นผง เม็ด หรือก้อนสีดำ มีรูพรุน ผลิตจากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนของชีวมวล (biomass) ซึ่งเป็นการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิระหว่าง 350 องศาเซลเซียส ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ โดยที่คาร์บอนที่อยู่ในวัสดุนั้นถูกเก็บรักษาไว้ในรูปของ "แหล่งสะสมคาร์บอน" ระยะยาว การประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ที่เกี่ยวข้องกับดินในเกษตรกรรม (ตัวอย่างเช่น การนำไปผสมลงดินโดยตรง หรือผสมเพิ่มเติมในปุ๋ย สารบำรุงพืช วัสดุปรับปรุงดิน หรือ เศษวัสดุทางการเกษตร) มีความปลอดภัยและมีคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงดิน พืช และ สภาพแวดล้อมทางการเกษตร ในการฟื้นฟูพื้นที่ดินเสื่อมโทรม และช่วยเพิ่มการเก็บกักคาร์บอนในดิน

2) กระบวนการไพโรไลซิส แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

(1) กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (torrefaction) เป็นกระบวนการ แยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า ใช้ระยะเวลานาน โดยใช้อุณหภูมิระหว่าง 250 - 500 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน จะได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ ได้แก่ น้ำมันชีวภาพ 30 เปอร์เซ็นต์ แก๊สสังเคราะห์ 35 เปอร์เซ็นต์ และไบโอชาร์ 35 เปอร์เซ็นต์

ทอร์รีแฟคชั่น (torrefaction) หมายถึง กระบวนการปรับปรุงคุณภาพ และการเปลี่ยนรูปชีวมวล โดยกระบวนการทางเคมีความร้อน โดยให้ความร้อนแก่ชีวมวลใน

สภาวะไร้ออกซิเจน หรือจำกัดออกซิเจน (อากาศ) ในช่วงอุณหภูมิ 200 - 300 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสต่อนาที่ ใช้เวลาประมาณ 30 - 120 นาที ทำให้สมบัติต่าง ๆ ของชีวมวลดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชัน ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จะมีสถานะเป็นของแข็ง และส่วนที่เหลือจะมีสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ (Bach and Skreiberg, 2016; Tumuluru *et al.*, 2011) ได้ถ่านทอรรีไฟด์ (torrefied biomass) เป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟคชัน มีลักษณะสีน้ำตาลเข้ม หรือสีดำ และมีความมันเงา (นนทปรีชา, 2562)

(2) กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) เป็นการผลิตไบโอชาร์ที่ใช้เวลาน้อย เนื่องจากการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็วที่ใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้เป็นวินาที ใช้อุณหภูมิการเผาตั้งแต่ 400 - 600 องศาเซลเซียส จะได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพ 75 เปอร์เซ็นต์ แก๊สสังเคราะห์ 13 เปอร์เซ็นต์ และไบโอชาร์ 12 เปอร์เซ็นต์

ซึ่งทั้ง 2 กระบวนการนี้จะได้ผลผลิตแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมัน หรือน้ำส้มควันไม้ แก๊สสังเคราะห์ และไบโอชาร์ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้ามีอุณหภูมิประมาณ 250 - 500 องศาเซลเซียส จะให้สัดส่วนไบโอชาร์สูงสุด ผลผลิตที่ได้รับจากกระบวนการไพโรไลซิสแสดงดังตารางที่ 1 (Tomczyk *et al.*, 2020; Verheijen *et al.*, 2010; พินิจฉณ, 2558) ซึ่งการผลิตไบโอชาร์สามารถใช้วัสดุหลากหลายประเภท เช่น เศษไม้ เปลือกไม้ ชังข้าวโพด ต้นข้าวโพด แกลบ ฟางข้าว เปลือกถั่ว ผักผลไม้ เศษอาหาร มูลสัตว์ และกากตะกอน เป็นต้น ซึ่งชนิดวัสดุอินทรีย์ คุณสมบัติของวัสดุอินทรีย์ อุณหภูมิ และระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิส จะมีผลโดยตรงต่อสมบัติ รูพรุน และเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวของไบโอชาร์ (Gwenzi *et al.*, 2018; ประไพพิศ และคณะ, 2557)

ตารางที่ 1 ผลผลิตที่ได้รับจากกระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน	ระยะเวลาการเผา	สัดส่วนผลผลิต (เปอร์เซ็นต์)		
				น้ำมันชีวภาพ	แก๊สสังเคราะห์	ไบโอชาร์
แยกสลายแบบช้า	250 - 500	บรรยากาศ	วินาที - ชั่วโมง	30	35	35
แยกสลายแบบเร็ว	400 - 600	สุญญากาศ	วินาที	75	13	12
แปรสภาพเป็นแก๊ส	700 - 1500	สูงกว่าบรรยากาศ	วินาที - นาที	8	85	10

ที่มา: Tomczyk *et al.* (2020)

3) การผลิตไบโอชาร์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส สามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงดังนี้

(1) ช่วงก่อนไพโรไลซิส (pre - pyrolysis) เป็นช่วงเริ่มเผาไหม้อุณหภูมิปกติจนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 200 องศาเซลเซียส ช่วงนี้มีการระเหยของความชื้น และสารประกอบบางชนิดในวัตถุดิบ เนื่องจากความร้อนมีการทำลายพันธะทางเคมีของกลุ่มไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydro peroxide) กลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl groups) และกลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl) (Cardenas-Aguilar *et al.*, 2017)

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

(3) ช่วงสร้างวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก (formation of carbonaceous products) ซึ่งอุณหภูมิอาจจะน้อย หรือมากกว่า 500 องศาเซลเซียส สารประกอบที่มีพันธะทางเคมีแข็งแรง อาทิ ลิกนิน จะเริ่มสลายตัวในช่วงนี้ (Lee *et al.*, 2017) จากการศึกษาอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิส มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับโครงสร้างไบโอชาร์ รวมถึงสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของไบโอชาร์ เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มสูงขึ้น มีผลให้ค่าพื้นที่ผิว สัดส่วนของคาร์บอน ความเป็นกรดเป็นด่าง และสารระเหยบางชนิดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ขณะที่ค่าความสามารถ

ในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและหมู่ฟังก์ชันบางชนิดบนพื้นผิวจะลดลง (Asadullah *et al.*, 2007; Jindo *et al.*, 2014)

4) แบบเตาเผาไบโอชาร์

ปัจจุบันมีการพัฒนาประดิษฐ์เตาเผาไบโอชาร์เพื่อนำไบโอชาร์มาใช้ประโยชน์ในการผลิตไบโอชาร์เพื่อใช้ในการปรับปรุงดิน รูปแบบเตาเผาไบโอชาร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมานี้สามารถควบคุมอุณหภูมิและอากาศที่จะเข้าสู่เตาได้ ตัวอย่างเตาเผาไบโอชาร์ ดังนี้

(1) แบบเตาเผาไบโอชาร์แบบตั้ง ขนาดบรรจุ 50 ลิตร (ภาพที่ 1) ทำการใส่เศษซากพืชในช่องวงนอก ส่วนช่องที่กกลางตรงกลางถึงใส่เศษกิ่งไม้แห้งเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ควรเกิน 1 นิ้ว เกิดความร้อนประมาณ 350 องศาเซลเซียส เช่น ผลิตภัณฑ์แบบเตาบีบซี (BEBC Stove) เป็นเตาพลังงานชีวมวลผลิตแก๊สหุงต้ม และไบโอชาร์ระดับครัวเรือน



ภาพที่ 1 แบบเตาเผาไบโอชาร์แบบตั้ง ขนาดบรรจุ 50 ลิตร

ที่มา: อรสา (2558)

(2) แบบเตาเผาไบโอชาร์แบบตั้ง ขนาดบรรจุ 250 ลิตร (ภาพที่ 2) ใช้เศษซากพืชประมาณ 35 กิโลกรัมต่อครั้ง หลังจากผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ประมาณ 4 ชั่วโมง ได้ผลผลิตไบโอชาร์ประมาณ 10 กิโลกรัม และน้ำส้มควันไม้



ภาพที่ 2 แบบเตาเผาไปโอชาร์แบบตั้ง ขนาดบรรจุ 250 ลิตร

ที่มา: Burnette (2013)

(3) แบบเตาเผาเตาชั้นเดียวแนวตั้ง โดยใช้ถัง 200 ลิตร (ภาพที่ 3) ที่มีการจุดไฟจากด้านล่าง และไฟจะลุกจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน มีท่อระบายอากาศ 2 ท่อ และบริเวณด้านล่างจะมีท่อที่มีช่องเพื่อรองรับน้ำสัมน้ำมัน เริ่มจากจุดไฟเมื่อไฟลุกติดถ่านเชื้อเพลิงได้ประมาณ 30 นาที ปิดปากปล่องทั้ง 2 ด้าน โดยใช้ดินเหนียวอุด หรือใช้ผ้าชุบน้ำอุดไว้ เพื่อไม่ให้อากาศเข้าไปในเตาชีวภาพ



ภาพที่ 3 แบบเตาเผาเตาชั้นเดียวแนวตั้ง โดยใช้ถัง 200 ลิตร

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2560)

(4) แบบเตาเผาเตา 2 ชั้น โดยใช้ถัง 100 ลิตร วางอยู่ด้านในถัง 200 ลิตร (ภาพที่ 4) เป็นแบบแนวตั้ง มีรูปแบบการเผาวัสดุคล้ายกับเตาเผาแบบที่ 2 แต่มีความแตกต่างกันที่วัสดุของเตา ซึ่งมีการนำถังขนาดเล็กมาต่อเป็นปล่องไฟเพิ่มเติม เพื่อช่วยเร่งกระบวนการเผาไหม้ ให้เกิดเร็วขึ้น และช่วยเพิ่มออกซิเจนในการเผาไหม้



ภาพที่ 4 แบบเตาเผาเตา 2 ชั้น โดยใช้ถัง 100 ลิตร วางอยู่ด้านในถัง 200 ลิตร

ที่มา: International Biochar Initiative (2017)

(5) แบบเตาเผาเตาชั้นเดียวแนวนอน โดยใช้ถัง 200 ลิตร (ภาพที่ 5) หลักการเผาจะเหมือนกับการเผาถ่านหุงต้ม โดยการจุดไฟจากด้านหน้าเตา เมื่อไฟติดถ่านเชื้อเพลิง ประมาณ 30 นาที ให้สังเกตว่าถ่านไหม้ไฟเปลี่ยนเป็นสีฟ้าใส ให้ปิดปากเตาและปล่องไฟที่อยู่บน ตัวเตาเผาไปโอชาร์ เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศเข้าไปภายในเตาเผา มีการออกแบบโดยศูนย์เครือข่าย ปรากฏชาวบ้านเกษตรกรกลุ่มจุลินทรีย์บ้านดอนผิงแดด อำเภอบ้านลาด จังหวัดเพชรบุรี



ภาพที่ 5 แบบเตาเผาเตาชั้นเดียวแนวนอน โดยใช้ถัง 200 ลิตร

ที่มา: ศูนย์เครือข่ายปราชญ์ชาวบ้าน (2558)

(6) แบบเตาเผาเตาชั้นเดียวแนวตั้ง โดยใช้ท่อปูนขนาด 80 เซนติเมตร (ภาพที่ 6) บรรจุแกลบดิบ 50 กิโลกรัม โดยการจุดไฟจากด้านหน้าเตา เมื่อไฟติดถ่านเชื้อเพลิง ประมาณ 30 นาที ให้สังเกตว่าถ่านไฟเปลี่ยนเป็นสีฟ้าใส ให้ปิดปากเตาและปล่องไฟที่อยู่ใต้ ตัวเตาเผาไบโอชาร์ ได้ผลผลิตไบโอชาร์แกลบ 25 กิโลกรัม แหล่งผลิตเครือข่ายกองทุนที่ช่วยน้องและเพื่อน จังหวัดชัยนาท



ภาพที่ 6 แบบเตาเผาเตาชั้นเดียวแนวตั้ง โดยใช้ท่อปูนขนาด 80 เซนติเมตร

ที่มา: บ้านไร่ของเรา (2564)

(7) แบบเตาเผาไบโอชาร์ขนาดอุตสาหกรรม (ภาพที่ 7) แหล่งวัตถุดิบจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากตะกอนอุตสาหกรรมเกษตร ขนาดบรรจุ 12 - 40 ลูกบาศก์เมตร ได้ผลผลิตถ่านชีวภาพอยู่ที่ประมาณ 1 : 3 เช่น การผลิตถ่านกะลามะพร้าวจะได้รับถ่านชีวภาพ 280 - 330 กิโลกรัม จากกะลามะพร้าว 1,000 กิโลกรัม



ภาพที่ 7 แบบเตาเผาไบโอชาร์ขนาดอุตสาหกรรม

ที่มา: บริษัท เบสตัน กรุ๊ป จำกัด (2567)

5) ชนิดและสมบัติของไบโอชาร์

ไบโอชาร์ที่ผลิตจากชนิดวัสดุอินทรีย์และอุณหภูมิการเผาที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งไบโอชาร์จะมีองค์ประกอบของธาตุอาหารหลัก ได้แก่ คาร์บอน 38.30 - 87.50 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 0.10 - 5.20 เปอร์เซ็นต์ ฟอสฟอรัส 0.03 - 1.20 เปอร์เซ็นต์ และโพแทสเซียม 1.00 - 2.65 เปอร์เซ็นต์ ธาตุอาหารรอง ได้แก่ แคลเซียม 0.01 - 4.50 เปอร์เซ็นต์ และแมกนีเซียม 0.10 - 6.20 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของไบโอชาร์จากการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ไบโอชาร์มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่สูงขึ้นด้วย เช่น การเผาเปลือกถั่วลิสงที่อุณหภูมิ 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส มีผลให้ไบโอชาร์มีสมบัติเป็นด่างเพิ่มขึ้น มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 7.80 8.60 และ 10.6 ตามลำดับ เช่นเดียวกับการเผาต้นข้าวโพดที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ไบโอชาร์มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 9.60 และ 10.10 ตามลำดับ และจากข้อมูลพบว่า ไบโอชาร์จากซังข้าวโพดมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงที่สุดมากถึง 252 - 419 เซนติโมลของประจุต่อกิโลกรัม และไบโอชาร์จากกากตะกอนจะมี

ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำสุด 0.50 เซนติโมลของประจุต่อกิโลกรัม และไบโอชาร์ที่ผลิตมาจากเนื้อไม้ เช่น ไม้เนื้อแข็ง และไม้ยูคาลิปตัส จะมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงกว่าวัสดุชนิดอื่น แสดงรายละเอียดชนิดและสมบัติของไบโอชาร์ที่ใช้คุณสมบัติในการเผาต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ชนิดและสมบัติของไบโอชาร์ที่ใช้คุณสมบัติในการเผาต่างกัน

ชนิด ถ่านชีวภาพ ¹	อุณหภูมิ (°C)	pH	Total						CEC Cmol kg ⁻¹	C/N ratio	O/C ratio
			C (%)	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)			
เปลือกถั่วลิสง	300	7.80	68.30	1.91	-	-	-	-	-	-	0.29
เปลือกถั่วลิสง	500	8.60	82.00	2.70	0.30	-	-	-	-	30.37	0.03
เปลือกถั่วลิสง	700	10.60	83.80	1.14	-	-	-	-	-	-	0.12
ซากอ้อย	< 500	8.63	74.00	1.00	0.24	2.00	0.17	0.32	69.60	74.02	0.23
เปลือกสั้ม	< 500	8.75	66.40	2.13	0.25	1.86	1.04	0.28	68.30	31.20	0.32
มูลวัว	380	8.20	62.10	0.10	-	-	-	-	39.00	621	0.27
กากตะกอน	380	8.50	38.30	5.20	-	-	-	-	0.500	7.37	0.25
ไม้ไผ่	600	6.38	87.50	0.20	-	-	-	-	75.70	489	0.07
ซังข้าวโพด	350	9.39	60.40	1.20	-	-	-	-	419	51.00	0.29
	600	9.42	70.60	1.07	-	-	-	-	252	66.00	0.10
ต้นข้าวโพด	400	9.60	51.10	1.34	0.25	1.34	-	-	-	38.10	-
	500	10.10	48.40	0.55	0.44	2.65	-	-	-	88.00	-
ฟางข้าวสาลี	425	10.40	46.70	0.59	-	2.60	1.00	0.60	-	79.20	-
ซากโกโก้	500	10.30	84.40	1.02	0.03	-	0.06	2.30	-	82.80	0.10
มะพร้าว	< 500	8.86	76.50	0.20	-	-	-	-	-	427	-
ไม้สน	< 500	8.47	53.20	0.40	-	-	-	-	-	143	-
ยูคาลิปตัส	350	7.00	82.40	0.57	0.06	-	-	-	4.69	144	0.12
ไม้เนื้อแข็ง	600	-	63.80	0.22	-	-	-	-	-	290	0.60
สนจีน	-	8.38	66.70	2.21	-	-	-	-	31.60	30.20	-
แกลบ	< 500	9.60	64.50	0.70	0.20	1.00	0.01	0.10	-	88.40	-
ฟางข้าว ²	-	9.68	54.00	10.50	1.20	2.40	4.50	6.20	8.20	51.40	-

ที่มา: ¹ Ahmad *et al.* (2014)

² ดัดแปลงมาจาก Shenbagavalli and Mahimairaja (2012)

3.2.2 การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์ทางการเกษตร

ไบโอชาร์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ มีสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน (ประไพพิศ และคณะ, 2557) โดยไบโอชาร์มีอิทธิพลต่อสมบัติทางเคมีดิน เช่น ปฏิกริยากับประจุบวก ประจุลบ และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ ในดิน (Zhu *et al.*, 2017) จากรายงานของ Xueyong *et al.* (2018) พบว่า การใช้ไบโอชาร์ในการปรับปรุงบำรุงดินมีความสัมพันธ์กับอนุภาคดินเหนียว อนุภาคทรายแป้ง ความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน อินทรีย์วัตถุในดิน (Revell *et al.*, 2012) ความเป็นกรดเป็นด่าง (Xu *et al.*, 2012) ความหนาแน่นรวม (Cabeza *et al.*, 2018) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Albuquerque *et al.*, 2014) และพื้นที่ผิวจำเพาะของไบโอชาร์ (Tomczyk *et al.*, 2020) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จำเป็นต่อการนำไบโอชาร์ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงบำรุงดิน เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน

1) การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์ต่อการปรับปรุงสมบัติทางเคมีดิน

(1) การดูดซับธาตุอาหาร ไบโอชาร์มีศักยภาพในการดูดซับธาตุอาหาร (Gwenzi *et al.*, 2018) เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสทำให้ผลิตภัณฑ์ไบโอชาร์เป็นผลึกคาร์บอนรูพรุนสูง มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคดินเหนียวมากกว่า 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม คุณสมบัตินี้ทำให้ไบโอชาร์มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลทั้งประจุบวกและประจุลบของสารอาหารของพืช และโมเลกุลของน้ำ (Atkinson *et al.*, 2010) ความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารมีความเกี่ยวข้องอย่างสูงกับสมบัติของไบโอชาร์ ซึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันกรดบนพื้นผิวและความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Tomczyk *et al.*, 2020) ดังนั้นกลไกในการดูดซับธาตุอาหารของไบโอชาร์ สามารถอธิบายได้จากความสามารถในการดูดซับของสารที่มีขั้วและไม่มีขั้ว การดูดซับทางเคมีที่เกิดจากโครงสร้างอะโรมาติก (aromatic rings) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) (Ding *et al.*, 2010) และการดูดซับธาตุอาหารของไบโอชาร์ขึ้นอยู่กับค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity, CEC) ของไบโอชาร์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นจากการเกิดออกซิเดชันเป็นหลัก อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับการกระจายของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวไบโอชาร์ ซึ่งประจุลบบนพื้นผิวไบโอชาร์เกี่ยวข้องกับหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิเลต (carboxylate) และฟีนอเลต (phenolate) เป็นหลัก ส่วนประจุบวกมาจากกลุ่มออกซิเนียม (oxinium) ซึ่งเป็นอะตอมที่พบมากในสารอินทรีย์ที่นอกเหนือจากคาร์บอนและไฮโดรเจน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และฮาโลเจน (Mia *et al.*, 2017) และจากผลการศึกษาของ Glaser *et al.* (2002) พบว่า ไบโอชาร์นอกจากมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ยังมีหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ เช่น คาร์บอนิล (carbonyl) ฟีนอลิกไฮดรอกซิล (phenolic hydroxyl) อีเทอร์ (ether) และไฮดรอกซิล (hydroxyl) เป็นต้น โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของธาตุ Ca^{2+} Mg^{2+} และ K^{+} เพิ่มขึ้นหลังจากการใส่ไบโอชาร์ลงดิน เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนของธาตุประจุบวกที่เป็นต่างระหว่างไบโอชาร์กับ Al^{3+}

ที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน (Yuan and Xu, 2011) ปริมาณการเพิ่มขึ้นของธาตุประจุบวกแต่ละชนิดในดิน ขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุประจุบวกแต่ละชนิดในไบโอชาร์ และจากคุณสมบัติของไบโอชาร์ มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง จากการแยกตัวของกลุ่มฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบน พื้นผิวของไบโอชาร์ บ่งชี้ถึงการเพิ่มความสามารถในการกักเก็บธาตุไอออนบวก เช่น Ca^{2+} Mg^{2+} K^{+} และ NH_4^{+} (Alling *et al.*, 2014; Cheng *et al.*, 2018) ดังนั้นการใช้ไบโอชาร์ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินได้ เพิ่มการกักเก็บธาตุอาหาร และลดการสูญเสียธาตุอาหารจากการชะล้าง นอกจากนี้คุณสมบัติในการดูดซับธาตุอาหารยังมีรายงานการวิจัยการใช้ไบโอชาร์เป็นปุ๋ยปลดปล่อยช้า (slow - release fertilizer) (Wang *et al.*, 2022) จากสมบัติของไบโอชาร์ในการคายการดูดซับธาตุอาหารได้ เนื่องจากมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับแร่ธาตุอาหาร การควบคุมความเข้มข้นของธาตุอาหารในดิน การเพิ่มธาตุอาหารในระบบชีวภาพ โดยต้องพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหาร เช่น ชนิดของดิน ชนิดวัสดุ และสภาวะไฟโรไลซิส รวมถึงการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ด้วย มีงานวิจัยรายงานว่าดินดำที่ผสมไบโอชาร์ 0 1 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ จะปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้เท่ากับ 36 37 39 และ 41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า การประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ที่ผ่านกระบวนการไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส สามารถปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่ 32 28 และ 69 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Ding *et al.*, 2010)

(2) ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (soil pH buffering capacity: pHBC) เป็นตัวกำหนดความเป็นกรดของดิน หากดินมีค่า pHBC สูงขึ้น หมายความว่าดินจะมีความเป็นกรดต่ำลง (Brady and Weil, 2010) โดยทั่วไปการสะสมของกรดในดินอาจเกิดจากการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนที่มากเกินไป ทำให้ดินเกิดความเป็นกรดเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถปรับแก้ได้โดยการใส่ปูน แต่อย่างไรก็ตามการใส่ปูนเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ไบโอชาร์ไม่เพียงแต่แก้ไขความเป็นกรดของดินเท่านั้น แต่การใส่ไบโอชาร์ยังช่วยเพิ่มค่า pHBC ของดิน และยับยั้งการกลับมาเป็นกรดของดินอีกด้วย (Shi *et al.*, 2017) ซึ่งไบโอชาร์ที่ได้มาจากกระบวนการไฟโรไลซิสจะทำให้หมู่ฟังก์ชันที่แสดงความเป็นกรดถูกกำจัดออก เช่น หมู่คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล หรือฟอร์มิล (formyl) เป็นต้น (Weber and Quicker, 2018) อีกทั้งไบโอชาร์มีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเป็นด่างของดิน จากคุณสมบัติทางเคมีที่มีความเป็นด่าง ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุอินทรีย์ที่นำมาใช้ผลิตจากเศษวัสดุทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ เช่น ไม้ไผ่ กะลามะพร้าว แกลบ ไม้ยูคาลิปตัส และไม้ลั่นจี่ ที่ผลิตโดยวิธีไฟโรไลซิสมีสมบัติเป็นด่าง มีความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 7.5 - 10.4 (ประไพพิศ และคณะ, 2557) ไบโอชาร์จากฟางข้าว ข้าวโพด ถั่วลิสง และถั่วเหลือง ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 9.4 8.6 และ 7.7 ตามลำดับ (Yuan and Xu, 2011) อีกทั้งค่า pHBC ของดินยังขึ้นอยู่กับค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่สูงขึ้น บ่งชี้ว่าดินสามารถเป็นแหล่งแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้มากขึ้น โดยทั่วไปแล้วไบโอชาร์จะมีประจุลบจำนวน

มากบนพื้นผิว ซึ่งได้มาจากการแยกตัวของกลุ่มฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจน ทำให้ไบโอชาร์มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง เมื่อใส่ลงในดินจะช่วยเพิ่มค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน ซึ่งเป็นกลไกที่ชัดเจนของการเพิ่มขึ้นของค่า pHBC ที่เกิดจากการใช้ไบโอชาร์ โดยกลไกที่เกี่ยวข้อง คือ การแลกเปลี่ยนประจุของคาร์บอกซิล และประจุลบอื่น ๆ บนพื้นผิวของไบโอชาร์ พร้อมกับการปล่อยประจุบวกที่เป็นต่าง กลไกนี้ได้รับการยืนยันจากการศึกษาโดยใช้ attenuated total reflectance (ATR) - FTIR การลดลงของความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่มีประสิทธิภาพของดินในระหว่างการจำลองการเป็นกรดของดิน จากการใช้สเปกตรัม ATR - FTIR กับไบโอชาร์ พบว่า จุดสูงสุดของการดูดซับของสารอินทรีย์หมู่คาร์บอกซิล และตำแหน่ง คือ - COO - เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ความเข้มสูงสุดของหมู่คาร์บอกซิลในสเปกตรัมของ ATR - FTIR เพิ่มขึ้น แต่ตำแหน่งของ - COO - ลดลง เมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารแขวนลอยลดลง แสดงให้เห็นว่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของคาร์บอกซิลบนพื้นผิวของไบโอชาร์ เกิดขึ้นจากการลดลงของค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารแขวนลอย (Shi *et al.*, 2017) เมื่อใส่ไบโอชาร์ลงไปในดิน สารอินทรีย์ที่มีประจุลบจะจับกับไฮโดรเจนไอออนในดิน เพื่อสร้างกลุ่มโมเลกุลที่เป็นกลาง และลดประจุลบบนพื้นผิวดิน โดยค่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน แสดงถึงประสิทธิภาพของประจุลบในดิน ณ ความเป็นกรดเป็นด่างของดินในขณะนั้น เช่น การใส่ไบโอชาร์จากถั่วลิสง มีผลต่อการลดลงของค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินสูงกว่าประมาณ 78 - 130 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับปูนขาว ซึ่งชี้ให้เห็นว่าไบโอชาร์ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนโปรตอนของสารอินทรีย์ประจุลบอย่างมาก และทำให้ดินมีความต้านทานต่อการเกิดกรดมากยิ่งขึ้น (Shi *et al.*, 2018)

จากรายงานวิจัยการปรับความเป็นกรดของดินด้วยการใช้ปูนมาร์ลเปรียบเทียบกับการใช้ไบโอชาร์ พบว่า ไบโอชาร์สามารถแก้ไขความเป็นกรดของดิน และยังช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเป็นด่างของดิน และช่วยยับยั้งการกลับมาเป็นกรดของดินอีกด้วย (Xu *et al.*, 2012; Shi *et al.*, 2017) ซึ่งมีความสำคัญมากโดยเฉพาะในดินที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกต่ำ (Shi *et al.*, 2018) จากรายงานการใช้ไบโอชาร์จากฟางข้าวและถั่วลิสง มีผลทำให้ดินมีค่าความสามารถการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเป็นด่างของดินเพิ่มขึ้น 85 - 200 เปอร์เซ็นต์ ภายหลังจากการใช้ไบโอชาร์ลงในดิน (Shi *et al.*, 2017) และมีรายงานการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์จากเศษพืชตระกูลถั่วสามารถเพิ่มค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ส่งผลให้ผลผลิตพืชเพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ (Jeffery *et al.*, 2017) และการใส่ไบโอชาร์กลบลงในดินกรด ส่งผลให้สมบัติของดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินเพิ่มขึ้น มีค่าระหว่าง 6.9 - 7.7 สูงกว่าดินก่อนการทดลองมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 5.8 (บรรเจิดลักษณ์ และ รติกร, 2560) อีกทั้งการใส่ไบโอชาร์ลงไปในดินมีผลทำให้ประจุบวกของฟอสฟอรัสและไนโตรเจนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยปกติค่าความเป็นด่างและองค์ประกอบอินทรีย์

ของไบโอชาร์ เช่น ปริมาณเถ้า ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน โพแทสเซียม และธาตุอาหารรองอื่น ๆ เป็นประโยชน์ทางการเกษตรทั้งในระยะสั้นถึงระยะยาว เมื่อไบโอชาร์ที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูง ถูกนำไปใช้กับดิน ช่วยลดความเป็นกรดของดิน และช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารได้ (Karhu *et al.*, 2011) อีกทั้งดินที่มีส่วนผสมไบโอชาร์ เช่น ไบโอชาร์จากฟางข้าวและถั่วลิสง ยังช่วยยับยั้งการเพิ่มขึ้นของ Al^{3+} ที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน (Shi *et al.*, 2018) โดยปกติ Al^{3+} ที่แลกเปลี่ยนได้ในดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างลดลง แต่เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถการต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน และความต้านทานต่อการเป็นกรดจากการใส่ไบโอชาร์จะช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของ Al^{3+} ที่แลกเปลี่ยนได้ในดินกรด และผลการยับยั้งการเพิ่ม Al^{3+} ที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไบโอชาร์ ซึ่งให้เห็นว่า พื้นผิวของไบโอชาร์สามารถจับกับอะลูมินัม ช่วยลด Al^{3+} ที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน และช่วยลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียมในดินกรดที่มีผลต่อพืช (Qian *et al.*, 2013)

การใช้ประโยชน์จากไบโอชาร์ลดความเป็นกรดของดิน ช่วยบรรเทาความเป็นพิษของอะลูมินัม และเพิ่มธาตุอาหารในดิน ซึ่งทำให้ผลผลิตพืชเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในดินกรด ในภูมิภาคเขตร้อนและกึ่งเขตร้อนที่มีธาตุอาหารในดินต่ำ การประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ส่งผลให้ผลผลิตพืชเพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ (Jeffery *et al.*, 2017) และจากรายงานการใช้ไบโอชาร์จากคาโนลาและเศษซากของพืชตระกูลถั่ว อัตรา 7.50 ตันต่อเฮกตาร์ (ประมาณ 1.25 ตันต่อไร่) ทำให้ผลผลิตของคาโนลาในดินกรดเพิ่มขึ้น 91 และ 67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของผลผลิตพืชนั้นเป็นผลมาจากความสามารถในการเพิ่มค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน และปริมาณธาตุอาหารในไบโอชาร์ (Jeffery *et al.*, 2017; Cornelissen *et al.*, 2018) ประเทศอินโดนีเซียมีรายงานการศึกษาการใช้ไบโอชาร์จากเปลือกไม้ อัตรา 1.76 ตันต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยเคมีและปุ๋ยคอก ส่งผลให้ผลผลิตของข้าวและข้าวฟ่างในดินกรดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และการใช้ไบโอชาร์เปลือกไม้ อัตรา 2.40 ตันต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยเคมี มีผลให้ผลผลิตข้าวโพดในดินกรดเพิ่มขึ้นมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว (Yamato *et al.*, 2006) ประเทศเคนยา มีรายงานการใช้ไบโอชาร์จากไม้เนื้ออ่อน อัตรา 1.60 ตันต่อไร่ และร่วมกับปุ๋ยเคมี ช่วยเพิ่มผลผลิตข้าวโพดและถั่วเหลืองในดินกรด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญ (Katterer *et al.*, 2019) และประเทศไทย มีรายงานการวิจัยพัฒนาและฟื้นฟูดินทรายด้วยไบโอชาร์จากวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ เช่น เปลือกทุเรียน กะลามะพร้าว ฝักหางนกยูง และฝักสำโรง มีองค์ประกอบคาร์บอน 48.30 - 50.35 เปอร์เซ็นต์ มีความเป็นด่างสูงระหว่าง 9.00 - 10.59 ทำให้ดินกรดมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินเพิ่มสูงขึ้น และการใช้ไบโอชาร์ร่วมกับปุ๋ยหมัก มีผลทำให้การเจริญเติบโตของพืชเพิ่มขึ้นมากกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์ (พินิจถน, 2558) จากรายงานของบรรเจิดลักษณ์ และ รติกร (2560) พบว่า การใช้ไบโอชาร์ อัตรา 500 - 3,000 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มผลผลิตพืชผักอินทรีย์ และ

เพิ่มอินทรีย์วัตถุในดินกรด และจากรายงานของเจษฎา และคณะ (2561) พบว่า การใช้ไบโอชาร์กลับร่วมกับปุ๋ยคอกในพื้นที่ดินกรด อัตรา 1.0 ตันต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยหมัก ทำให้ข้าวโพดหวานมีความสูงต้น ความยาวฝัก เส้นผ่าศูนย์กลางฝัก น้ำหนักฝักสด ผลผลิตรวมต่อไร่ และค่าความหวานของฝักสดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการติดตามการใช้ประโยชน์ในพื้นที่เกษตร จากการใส่ไบโอชาร์ อัตรา 1.60 ตันต่อไร่ ภายหลังการใส่ไบโอชาร์ลงดิน 12 เดือน สามารถรักษาระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดิน และเพิ่มผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (Singh *et al.*, 2018) ขณะที่การใส่ไบโอชาร์ อัตรา 1.50 ตันต่อไร่ ภายหลังการใส่ไบโอชาร์ลงดิน 24 เดือน สามารถรักษาระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดิน และเพิ่มผลผลิตข้าวสาลี (Zhao *et al.*, 2014) เช่นเดียวกับการใส่ไบโอชาร์ อัตรา 3.20 ตันต่อไร่ หลังจากการใส่ไบโอชาร์ลงดินระยะเวลานาน 36 เดือน สามารถรักษาระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดิน และเพิ่มผลผลิตข้าว (Huang *et al.*, 2019)

นอกจากคุณสมบัติของไบโอชาร์แล้ว อัตราการใช้ไบโอชาร์มีผลต่อการรักษาสสมบัติทางเคมีดินด้วยเช่นกัน การใส่ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ อีกทั้งการใช้ไบโอชาร์ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินและสภาพอากาศ พบว่า ผลกระทบจากการใช้ไบโอชาร์มีแนวโน้มที่จะเป็นบวกมากขึ้น หากมีการประยุกต์ใช้สำหรับพื้นที่ดินกรด ดินที่มีการชะล้างสูง เนื้อดินหยาบ หรือเนื้อดินหยาบปานกลาง (Crane-Droesch *et al.*, 2013) แต่ผลบวกของไบโอชาร์ต่อผลผลิตพืชจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเป็นกรดของดิน หากเกิดการชะล้างต่างของไบโอชาร์ออกไปจากดิน โดยเฉพาะหลังจากการใช้พื้นที่ระยะเวลายาวนาน ดังนั้นการใส่ถ่านชีวภาพซ้ำในพื้นที่เดิมจึงมีความจำเป็น ทั้งนี้เพื่อรักษาผลบวกต่อผลผลิตในพืชระยะยาว (Cornelissen *et al.*, 2018)

(3) การเพิ่มแหล่งคาร์บอนและอินทรีย์วัตถุของดิน ไบโอชาร์เป็นวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอนผลิตจากมวลชีวภาพจากการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส องค์ประกอบโครงสร้างของไบโอชาร์ภายในส่วนใหญ่จะมีคาร์บอนประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในรูปของโครงสร้างเป็นคาร์บอนอะมอร์ฟัส (amorphous carbon, a - C) อยู่ในสถานะกึ่งเสถียร (metastable) และมีธาตุอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เป็นต้น ทำให้ไบโอชาร์เป็นแหล่งคาร์บอนที่มีความเสถียรทนทานต่อการย่อยสลายในดิน ทั้งการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ และการสลายตัวทางความร้อน ซึ่งสมบัติที่ชัดเจนของไบโอชาร์ที่มีโครงสร้างคาร์บอนที่ประกอบด้วยส่วนผลึกที่มีพื้นผิวสูง พื้นที่ภายในของไบโอชาร์ช่วยดูดซับอินทรีย์วัตถุที่ละลายน้ำได้ และสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ (พินิจภณ, 2558) เช่นเดียวกับรายงานของ Feng *et al.* (2021) พบว่า ไบโอชาร์เป็นแหล่งคาร์บอนในดิน ช่วยส่งเสริมการสะสมอินทรีย์วัตถุในดิน มีผลต่อการปลดปล่อยและการกักเก็บของกรดฮิวมิก (humic acid) และกรดฟุลวิก (fulvic acid) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของอินทรีย์วัตถุ เนื่องจากมีความเสถียรในดิน การดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำในดิน และมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของไบโอชาร์ที่เพิ่มขึ้น

บ่งชี้ว่า การใช้ไบโอชาร์เพิ่มระดับการควบแน่นของกรดฮิวมิก ลดระดับการเกิดออกซิเดชันของกรดฮิวมิก และเพิ่มลักษณะอะโรมาติกของกรดฮิวมิก สามารถเพิ่มอินทรีย์คาร์บอนและเพิ่มความเสถียรของโครงสร้างกรดฮิวมิกในชั้นดินระหว่าง 20 ถึง 40 เซนติเมตร จากการตรวจวิเคราะห์โมเลกุลของสารด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (fourier transform infrared spectroscopy: FTIR) (Yang *et al.*, 2024a) ทั้งนี้ไบโอชาร์มีความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนในดิน ช่วยปรับปรุงดิน และเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร เมื่อนำไบโอชาร์ลงดินจากลักษณะความเป็นรูพรุน จะช่วยกักเก็บน้ำธาตุอาหารในดิน และเป็นที่อยู่ให้กับจุลินทรีย์สำหรับทำกิจกรรมเพื่อสร้างธาตุอาหารให้ดิน เมื่อดินมีความอุดมสมบูรณ์จะส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรเพิ่มขึ้น การใส่ไบโอชาร์ยังช่วยเพิ่มคาร์บอนให้กับดิน ป้องกันการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสารชีวภาพขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ และช่วยให้พืชดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างช้า ๆ ในขณะที่พืชสังเคราะห์แสง เพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของพืชให้ดีขึ้น ทำให้พืชเจริญเติบโตและมีคุณภาพผลผลิตที่ดีขึ้น (Uvarov, 2000) จากรายงานของชฎาภา (2564) การใส่ไบโอชาร์แกลบ 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยเคมี 100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการปลูกข้าวแบบขังน้ำของดินร่วนเหนียวปนทราย ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของการสะสมปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 2.02 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนของดิน 1.85 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณอินทรีย์วัตถุของดิน 3.19 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวที่มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 1.85 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนของดิน 1.68 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณอินทรีย์วัตถุของดิน 2.94 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่า การใส่ไบโอชาร์แกลบช่วยส่งเสริมการเพิ่มของอินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุของดิน และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง การใส่ไบโอชาร์แกลบ 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยเคมี 100 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนของดิน และปริมาณอินทรีย์วัตถุของดิน ต่ำกว่าการปลูกข้าวแบบขังน้ำ มีค่า 0.62 0.53 และ 0.91 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่การใส่ไบโอชาร์ร่วมด้วยยังคงมีค่าสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว มีค่า 0.52 0.45 และ 0.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากระบบดินนาแบบน้ำขังจะมีการสะสมอินทรีย์วัตถุในดินสูง และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเป็นด่างของดินจากกรดให้เป็นกลาง และยังพบการตรึงไนโตรเจนในสภาพน้ำขัง (Kirk, 2004) ขณะที่การปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้งจะทำให้ผลพลอยได้ที่เกิดจากการขังน้ำสูญเสียไป เกิดการสูญเสียไนโตรเจน อินทรีย์วัตถุในดินลดลง และเกิดปัญหาความเป็นกรดเป็นด่างของดินไม่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามการจัดการดินทั้ง 2 รูปแบบ จากการใส่ไบโอชาร์แกลบก็ยังส่งผลต่อการเพิ่มอินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุของดิน เช่นเดียวกับรายงานของเกศศิรินทร์ และคณะ (2558) พบว่า การใส่ไบโอชาร์ อัตรา 1,000 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มการสะสมอินทรีย์วัตถุในดินสูงมากกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์อย่างมีนัยสำคัญ และการใส่ไบโอชาร์ร่วมกับปุ๋ยเคมีในการปลูกข้าว มีผลทำให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว

(จิตินิภา, 2558) และการใส่ไบโอชาร์ร่วมกับการจัดการปุ๋ย ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นธาตุอาหารในพืช ผลผลิต และอินทรีย์วัตถุของดินสูงกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์ (สายชล และคณะ, 2563) อีกทั้งในพื้นที่ดินกรดจากการใช้ไบโอชาร์ อัตรา 500 - 3,000 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มผลผลิตพืชผักอินทรีย์ในพื้นที่ดินกรด และช่วยเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดิน (บรรเจิดลักษณ์ และ รติกร, 2560) ซึ่งไบโอชาร์เป็นอินทรีย์คาร์บอนรูปที่มีเสถียรภาพสูง แม้ว่าจะสลายตัวเล็กน้อยในช่วงแรก แต่ส่วนที่เหลือจะทนทานต่อการย่อยสลายด้วยกระบวนการจุลินทรีย์ (Major *et al.*, 2010)

2) การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์ต่อการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน

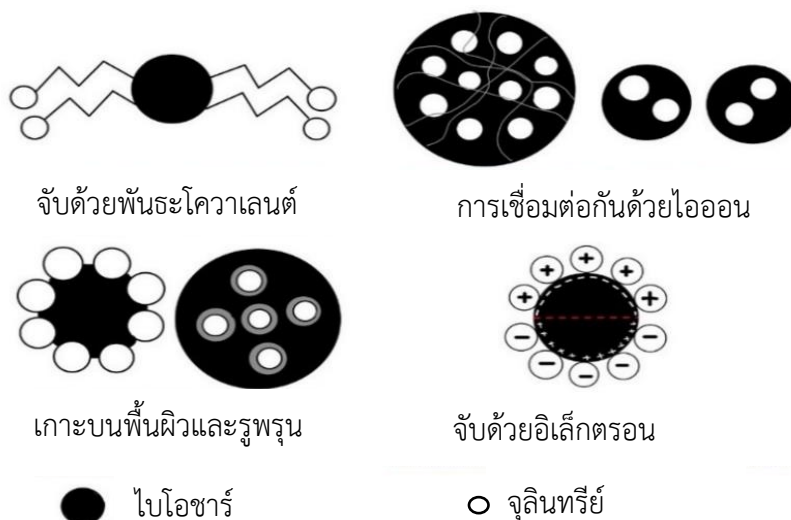
ไบโอชาร์เป็นวัสดุอินทรีย์ที่อุดมด้วยคาร์บอน ซึ่งผลิตจากชีวมวล หรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ หรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ใบไม้ กิ่งไม้ พางข้าว เหม้ามันสำปะหลัง ช้างและต้นข้าวโพด มูลสัตว์ และกากตะกอนของเสีย เป็นต้น การผลิตไบโอชาร์ด้วยวิธีการแยกสลายอย่างช้า มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการผลิตไบโอชาร์ เนื่องจากได้ผลผลิตประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งมวลชีวภาพ (Abdelhafez *et al.*, 2017) มีการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์ในการกักเก็บคาร์บอนในรูปอินทรีย์คาร์บอนคงตัวสูงในการปรับปรุงดิน เนื่องจากมีคุณสมบัติรูพรุนตามธรรมชาติช่วยให้สามารถอุ้มน้ำ รวมถึงเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ที่เป็นตัวสร้างอาหารในดิน และส่งเสริมการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน เช่น ไบโอชาร์จากกลบ มีความชื้น 4.96 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 8.70 และค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน 17.57 เซนติโมลของประจุต่อกิโลกรัม เมื่อใส่ไบโอชาร์ลงดินทำให้ความหนาแน่นรวมของดินลดลง ดินมีค่าความพรุน ค่าความชื้น ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ปริมาณคาร์บอน ปริมาณฟอสฟอรัส ปริมาณโพแทสเซียม และปริมาณแคลเซียมในดินเพิ่มขึ้น (Masulili *et al.*, 2010) ทั้งนี้ดินภายหลังการใส่ไบโอชาร์มีค่าความสามารถในการนํ้าในสภาพที่อิ่มตัวเพิ่มขึ้นถึง 88 เปอร์เซ็นต์ สีของดินมีสีคล้ำขึ้น ค่าความหนาแน่นรวมของดินลดลง 9 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความพรุนเพิ่มขึ้นจาก 45.70 เปอร์เซ็นต์ เป็น 50.60 เปอร์เซ็นต์ (Oguntunde *et al.*, 2008) อีกทั้งการใส่ไบโอชาร์ อัตรา 3.20 และ 4.80 ตันต่อไร่ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี dry sieving method มีปริมาณของขนาดเม็ดดิน 2 - 5 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้น 28.10 - 29.50 เปอร์เซ็นต์ และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี wet sieving method การใส่ไบโอชาร์ อัตรา 1.60 3.20 และ 4.80 ตันต่อไร่ ช่วยเพิ่มการเสถียรของเม็ดดินขนาด 0.50 - 1.00 มิลลิเมตร และ 0.25 - 0.50 มิลลิเมตร อยู่ที่ 4.40 และ 22.20 เปอร์เซ็นต์ (Yang *et al.*, 2024b) อีกทั้งการใส่ไบโอชาร์ช่วยเพิ่มปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดิน ส่งเสริมกระบวนการสร้างมวลของเม็ดดิน เพิ่มการเกาะยึดระหว่างอนุภาคดิน ทำให้เกิดการก่อตัวของเม็ดขนาดเล็ก แรงการรวมตัวของเม็ดดินขนาดเล็กก่อตัวเป็นเม็ดดินขนาดใหญ่ และเกิดการดูดยึดของอิเล็กตรอนระหว่างอนุภาคเม็ดดินเพิ่มขึ้น (Sheng *et al.*, 2023) และจากรายงานของ Joseph *et al.* (2019) ทำการศึกษาผลของไบโอชาร์ต่อโครงสร้างดิน การกักเก็บอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนของดินที่มีการชะล้างพังละลายสูง

และจากรายงานในประเทศจีน พบว่า การใช้ไบโอชาร์ อัตรา 10 20 และ 30 ตันต่อเฮกตาร์ หรือ 1.60 3.22 และ 4.80 ตันต่อไร่ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดดิน ที่ระดับความลึก 0 - 10 และ 10 - 20 เซนติเมตร มีการเพิ่มขึ้นของเม็ดดินขนาด 2.00 - 0.50 มิลลิเมตร ที่ระดับความลึก 0 - 10 เซนติเมตร อยู่ที่ 31.30 27.60 และ 31.00 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ระดับความลึก 10 - 20 เซนติเมตร คือ 29.90 23.20 และ 30.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ประกอบกับการศึกษาผลของไบโอชาร์ด้วยไอโซโทปตรวจจับคาร์บอนของ Angers and Recous (1997) และ Tang *et al.* (2011) พบว่า เม็ดดินขนาดเล็กถูกสร้างอยู่ในเม็ดดินขนาดใหญ่ ดินที่มีคาร์บอนจะเกิดการสร้างเม็ดดินขนาดใหญ่ได้มาก และเม็ดดินขนาดเล็กจะมีปริมาณน้อยลง เพราะส่วนมากถูกกลไกการสร้างตัวของเม็ดดินโดยการเชื่อมตัวของเม็ดดินขนาดเล็กไปอยู่ในเม็ดดินขนาดใหญ่

3) การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์ต่อการปรับปรุงสมบัติทางชีวภาพของดิน

วัสดุอินทรีย์ที่ผลิตเป็นไบโอชาร์จะมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้นจาก 7.6 เป็น 9.7 (Lehmann *et al.*, 2011) โดยไบโอชาร์ที่ผลิตภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำจะมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง ขณะที่ไบโอชาร์ที่ผลิตในสภาวะอุณหภูมิสูงมากกว่า 600 องศาเซลเซียส จะมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำ และไบโอชาร์ที่ผลิตจากวัสดุแตกต่างกันก็มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพการใช้แตกต่างกัน (Lehmann, 2007) โดย Saranya *et al.* (2011) ได้ศึกษาวิจัยการใช้ไบโอชาร์จากต้นอาคาเซียที่มาจากประเทศอินเดีย และสหรัฐอเมริกา พบว่าไบโอชาร์จากไม้อาคาเซียจากสหรัฐอเมริกามีประสิทธิภาพเป็นวัสดุรองรับเชื้อ *Azospirillum lipoferum* สูงกว่าไบโอชาร์ที่ผลิตจากไม้อาคาเซียจากอินเดีย อีกทั้งไบโอชาร์มีศักยภาพเป็นวัสดุรองรับจุลินทรีย์ได้เท่าเทียมกับเวอร์มิคูไลท์ (vermiculite) ลิกไนต์ (lignite) พีทมอส (peat moss) และปุ๋ยหมัก (compost) (Lauren and Crowley, 2014; Bashan, 1998) ซึ่งกระบวนการตรึงเซลล์จุลินทรีย์เป็นเทคโนโลยีชีวภาพที่จุลินทรีย์ถูกตรึงอยู่ในพื้นที่เฉพาะ เพื่อรักษากิจกรรมของจุลินทรีย์โดยธรรมชาติ (Karel *et al.*, 1985) ซึ่งไบโอชาร์มีสมบัติเป็นวัสดุในการตรึงเซลล์จุลินทรีย์ ดังภาพที่ 8 กลไกการตรึงจุลินทรีย์ด้วยไบโอชาร์ เช่น การเกาะบนพื้นผิวและรูพรุน ผ่านการดูดซับ ปฏิกิริยาระหว่างไฟฟ้าสถิต การสร้างการเชื่อมต่อดัวยไอออน และการจับกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) (Liu *et al.*, 2020; Vasilieva *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2014) โดยการดูดซับพื้นผิวและช่องว่างของรูพรุนขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของแรงที่ไม่จำเพาะ เช่น การยึดเกาะระหว่างพื้นผิวและรูพรุนของไบโอชาร์ และจุลินทรีย์กลุ่มฟังก์ชัน เช่น - OH และ - COOH (Wu *et al.*, 2022) จุลินทรีย์มีแนวโน้มที่จะเกาะติดกับวัสดุพาหะโดยการผลิตสารยึดเกาะนอกเซลล์ ซึ่งช่วยให้จุลินทรีย์เจริญ สามารถแพร่กระจายได้ทั่วทั้งพื้นผิว และรูพรุนด้านในของวัสดุพาหะ (Li *et al.*, 2022) จากกระบวนการตรึงเซลล์จุลินทรีย์ด้วยไบโอชาร์สามารถรักษาสภาพเซลล์จุลินทรีย์โดยธรรมชาติ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรและสิ่งแวดล้อม (Yang *et al.*, 2020a, 2020b) และจากรายงานของ Chen *et al.* (2021) การใช้

ไบโอชาร์เป็นตัวพาในการตรึง *Bacillus cereus* WHX-1 เพื่อฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโครเมียม พบว่าพื้นผิวที่หยาบและมีรูพรุนของไบโอชาร์เป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์ ลดการสูญเสียจุลินทรีย์ในดิน ช่วยรักษากิจกรรมและเพิ่มประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในดิน อีกทั้งการใช้ไบโอชาร์ในการตรึงเซลล์แบคทีเรียที่ละลายฟอสเฟต *Pseudomonas* sp. เมื่อใส่ลงในดินสามารถส่งเสริมการเพิ่มมวลชีวภาพของข้าวโพด และกระตุ้นการงอกเร็วขึ้น อีกทั้งไบโอชาร์ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาเชื้อ *Pseudomonas* sp. ได้นานมากกว่าหัวเชื้อที่ใส่ในพีทมอสเป็นวัสดุรองรับ (Glodowska *et al.*, 2016) โดยจุลินทรีย์ละลายฟอสฟอรัสทั้งกลุ่มแบคทีเรียและเชื้อรา สามารถคงความหนาแน่นของเชื้อในการเก็บรักษาสูงบนไบโอชาร์แกลบ ซึ่งไบโอชาร์มีศักยภาพสูงสุดในการเก็บรักษาจำนวนประชากรจุลินทรีย์ไว้ได้นานมากกว่า 6 เดือน (Husna *et al.*, 2019) และรายงานของ Steinbeiss *et al.* (2009) พบว่า การใช้ไบโอชาร์ช่วยเพิ่มปริมาณของยีสต์ ซึ่งยีสต์จะช่วยสนับสนุนให้มีเชื้อราในดินเพิ่มมากขึ้น ขณะที่กลูโคสในไบโอชาร์จะช่วยขยายปริมาณของแบคทีเรียแกรมลบ และการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์ยังต้องขึ้นกับชนิดและปริมาณของไบโอชาร์ในดิน และชนิดดิน ซึ่งการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะช่วยยืดอายุการอยู่รอดของ *Burkholderia* sp. และ *Bacillus* sp. ในการเก็บรักษา ช่วยส่งเสริมจุลินทรีย์เพิ่มความเป็นประโยชน์ธาตุอาหารในดิน ช่วยเพิ่มชีวมวลและผลผลิตพืช (Kumar *et al.*, 2017) และจากรายงานของ Yao *et al.* (2012) พบว่า การใช้ไบโอชาร์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพจุลินทรีย์ในการตรึงไนโตรเจนทางชีวภาพของพืชตระกูลถั่ว และจากการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ร่วมกับเชื้อราที่ย่อยสลายฟอสฟอรัสลงไปในดิน ส่งเสริมการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชหลายชนิด เช่น ถั่วเหลือง และถั่วเขียว เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ที่ไม่มีการใช้ไบโอชาร์ (Xu *et al.*, 2012) ซึ่งการใช้ไบโอชาร์ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของเชื้อราไมคอร์ไรซาในพืชตระกูลถั่ว ทำให้ดินบริเวณรากพืชเหมาะสมสำหรับการอยู่อาศัย (Zheng *et al.*, 2012) เนื่องจากไบโอชาร์มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน ส่งผลทางอ้อมต่อเชื้อราไมคอร์ไรซาผ่านกิจกรรมของจุลินทรีย์อื่น ๆ ในดิน และเป็นที่พักพิงอาศัยให้เชื้อราชนิดอื่น ๆ (Cowie *et al.*, 2012)



ภาพที่ 8 กลไกการตรึงจูลินทรียด้วยไปโอลาร์

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Yang *et al.* (2020a, 2020b)

3.2.3 กากน้ำตาล (molasses)

1) กากน้ำตาล หรือโมลาส เป็นน้ำตาลที่ได้จากน้ำอ้อยเป็นวัสดุที่เหลือจากกระบวนการทำให้เกิดการตกผลึกเป็นน้ำตาลทรายแล้ว โดยกากน้ำตาลจะมีส่วนผสมของน้ำตาลอยู่ แต่มีระดับต่ำกว่าที่จะสกัดเป็นน้ำตาลได้อีก โดยในการผลิตที่ใช้อ้อย 1 ตัน จะได้กากน้ำตาลประมาณ 45 - 60 กิโลกรัม กากน้ำตาลเป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำตาล สามารถจำแนกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ กากน้ำตาลที่ได้จากการผลิตน้ำตาลทรายขาว มีปริมาณน้ำตาลอยู่ประมาณ 50 - 60 เปอร์เซ็นต์ หรือมีปริมาณของแข็งเมื่อเจือจางด้วยน้ำในอัตราส่วน 1 : 1 อยู่ประมาณ 42 องศาบริกซ์ กากน้ำตาลที่ได้จากการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์มีปริมาณน้ำตาลประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์ และกากน้ำตาลที่ได้จากการนำน้ำอ้อยมาย่อยด้วยกรด แล้วระเหยให้เข้มข้นเป็นน้ำเชื่อม มีปริมาณน้ำตาลประมาณ 77 เปอร์เซ็นต์ (Paturaul, 1989)

2) องค์ประกอบทางเคมีของกากน้ำตาล

กากน้ำตาลลักษณะเหนียวข้นสีน้ำตาลเข้ม มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 5.09 - 5.25 และค่าการนำไฟฟ้าค่อนข้างสูง 7.50 - 13.79 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร แสดงว่ามีความเข้มข้นของเกลือสูง ไนโตรเจน 0.80 เปอร์เซ็นต์ ฟอสฟอรัส 0.13 - 0.19 เปอร์เซ็นต์ โพแทสเซียม 2.50 - 4.10 เปอร์เซ็นต์ แคลเซียม และแมกนีเซียม 1.10 - 1.40 และ 0.40 - 0.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อีกทั้งมีคาร์โบไฮเดรต 1,355.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ไขมัน

46.78 กรัมต่อลิตร ไฮโดรเจน 5.83 เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจน 37.55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอน 55.15 เปอร์เซ็นต์ และน้ำตาลรีเวิร์ส 267.92 กรัมต่อลิตร (เสาวรส, 2560)

3.2.4 น้ำกากสำ (spent wash)

1) น้ำกากสำ หมายถึง น้ำกากสำที่เกิดจากกระบวนการนำทิ้งที่ออกจากหมักในการกลั่นสุรา โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักสุรา ได้แก่ กากน้ำตาล มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในปริมาณความเข้มข้นสูง มีสีน้ำตาลเข้มซึ่งเกิดจากสารคาราเมล (caramel) ในน้ำกากสำสารคาราเมลนี้เกิดจากปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (polymerization) ในกระบวนการผลิตน้ำตาล ดังนั้นสารคาราเมลจึงมีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่ไม่ทราบโครงสร้างที่แน่นอน โดยทั่วไปเรียกสารประกอบพวกนี้ว่า เมลานอยดิน (melanoidins) มีสีน้ำตาล ซึ่งสารเมลานอยดินจะอยู่ในสภาพคอลลอยด์ และมีประจุลบ (Kato and Tsuchida, 1981)

2) แหล่งที่มาของน้ำกากสำ เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการในการผลิตสุรา จะต้องใช้วัตถุดิบในการผลิต คือ กากน้ำตาล และข้าวเหนียว โดยนำมาหมักในถังหมักในอัตราความเข้มข้นที่เหมาะสม พร้อมกับใส่เชื้อยีสต์ หรือเชื้อหมัก เมื่อหมักได้นาน 48 ชั่วโมง เชื้อยีสต์จะเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทิลแอลกอฮอล์ 51.10 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 48.90 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำตาล โดยประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ของน้ำตาลเหล่านี้เท่านั้นที่จะเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์ นอกนั้นจะถูกยีสต์นำไปใช้ในการเจริญเติบโต และเปลี่ยนเป็นผลพลอยได้อื่น โดยการแยกเอาแอลกอฮอล์ออกจากของเหลวรวมทำได้โดยใช้วิธีการกลั่น เพราะจุดเดือดของแอลกอฮอล์อยู่ที่อุณหภูมิ 78.50 องศาเซลเซียส แต่ของเหลวอื่น ๆ หรือน้ำจะมีอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้ไอน้ำแยกเอาแอลกอฮอล์ออกในขั้นตอนการกลั่นจะมีน้ำกากสำทิ้งประมาณ 9.50 ลูกบาศก์เมตรของแอลกอฮอล์ 95 ดีกรี จะมีสีน้ำตาลไหม้ และน้ำกากสำอีกส่วนหนึ่งจะได้จากการล้างถังหมัก (ฐปน และคณะ, 2552)

3) องค์ประกอบทางเคมีของน้ำกากสำ

น้ำกากสำ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ น้ำกากสำสด มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 4.5 - 5.0 มีสารอาหาร และวิตามินรวม เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ในส่วนน้ำกากสำที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมาแล้วเหมาะสำหรับการใช้กับพืช โดยเฉพาะปาล์มน้ำมัน เพราะมีสารอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่พืชต้องการ หากนำไปตากแห้งจะมีองค์ประกอบ ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส : โพแทสเซียม อยู่ที่ 4 : 1 : 6 เปอร์เซ็นต์ โดยองค์ประกอบทางเคมีของน้ำกากสำของโรงงานสุรา มีค่าบีโอดี 27,475 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดี 118,098 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณของแข็ง 75,829 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนโตรเจน 935 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟอสฟอรัส 115.20 มิลลิกรัมต่อลิตร โพแทสเซียม 4,763 มิลลิกรัมต่อลิตร ซัลเฟต 3,763 มิลลิกรัมต่อลิตร กลูโคส 10.30 กรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 3.60

(ไพจิตร, 2552) น้ำกาส่ามีคุณสมบัติข้อดี คือ เป็นสารอินทรีย์ไม่มีโลหะหนักปนเปื้อน มีคุณค่าด้านโปรตีนจากยีสต์ มีความหวานจากน้ำตาล และมีธาตุอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อยู่ค่อนข้างสูง อีกทั้งยังมีธาตุอาหารโพแทสเซียมอยู่ในปริมาณมาก (ประวิทย์ และคณะ, 2550)

4) การใช้ประโยชน์น้ำกาส่าทางการเกษตร

การใช้ประโยชน์น้ำกาส่าสำหรับการผลิตพืช มีการนำมาใช้ประโยชน์โดยตรงสำหรับการปลูกอ้อย เช่น การใส่น้ำกาส่าอัตรา 50 ลูกบาศก์เมตรต่อเฮกตาร์ ร่วมกับปุ๋ยเคมี 55 เปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจน 72 เปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัส และ 100 เปอร์เซ็นต์ของโพแทสเซียม ส่งผลให้ผลผลิตอ้อยสูงขึ้นมากกว่าการไม่ใส่น้ำกาส่า (Gomez, 2000) และการใส่น้ำกาส่า อัตรา 25 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมี มีผลให้เส้นผ่าศูนย์กลาง ความสูงของอ้อย และปริมาณธาตุอาหารพืชในดินเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการไม่ใส่น้ำกาส่า (ประวิทย์ และคณะ, 2550) และการใส่น้ำกาส่า อัตรา 30 60 และ 90 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ ให้ผลผลิตเฉลี่ย 32.5 31.3 30.0 ตันต่อไร่ ตามลำดับ อีกทั้งการใส่น้ำกาส่าที่อัตราสูง 60 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของดิน ช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า โพแทสเซียม แมกนีเซียม แอมโมเนียม เหล็ก และกำมะถันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และการใส่น้ำกาส่าในอัตราต่ำกว่า 90 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียในดินแตกต่างกันทางสถิติจากการไม่ใส่น้ำกาส่า (ทัศนีย์, 2551) และการใช้ประโยชน์จากน้ำกาส่ามาเป็นแหล่งธาตุอาหารพืชสำหรับการปลูกพืช เช่น มันสำปะหลัง และข้าว เป็นต้น และจากสมบัติของน้ำกาส่าที่มีความเป็นกรดเป็นด่างสูง ค่าซีโอดี และค่าบีโอดีสูง มีองค์ประกอบของยีสต์ แอมโมเนีย และฟอสเฟต สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้โดยตรง เช่น การปล่อยน้ำกาส่าเข้านาข้าว ซึ่งจะใช้ใส่ในฤดูแล้ง หรือขณะที่นาข้าวอยู่หลังการเก็บเกี่ยว เป็นต้น (ไพจิตร, 2552) และการใส่น้ำกาส่าเพื่อเพิ่มคุณค่าสารอาหาร โดยเฉพาะไนโตรเจนและโพแทสเซียมเหมาะที่จะใช้กับพืชล้มลุก หรือไม้ยืนต้น เช่น ข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย ปาล์มน้ำมัน และพืชผัก เป็นต้น (ทัศนีย์ และ สมบูรณ์, 2547) และจากการศึกษาการใช้ประโยชน์น้ำกาส่าในเชิงเกษตรกรรม พบว่า น้ำกาส่ามีความสำคัญในการใช้เป็นสารปรับปรุงดินในพื้นที่เพาะปลูก นอกจากนั้นยังเกิดประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมเป็นการลดการใช้ปุ๋ยเคมีในการเพาะปลูก (รัชฎา และ วิสาข, 2563)

3.3 ความรู้ด้านจุลชีววิทยาทางดิน

3.3.1 ปุ๋ยชีวภาพ

ความหมายของปุ๋ยชีวภาพ จุลินทรีย์ในดินเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีบทบาทสำคัญในการเกิดกระบวนการต่าง ๆ ในดิน ทั้งในด้านการหมุนเวียนธาตุอาหาร ซึ่งทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ในดิน รวมทั้งแปรสภาพสารอินทรีย์ให้เป็นธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์กับพืช นอกจากนี้ยังใช้ในการเจริญเพิ่มจำนวนเซลล์ของจุลินทรีย์อีกด้วย สำหรับการนำ

จุลินทรีย์มาใช้ประโยชน์ในด้านการเพิ่มธาตุอาหารให้กับพืช ทั้งที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ และการแปรสภาพธาตุอาหารโดยจุลินทรีย์ เรียกว่า ปุ๋ยชีวภาพ โดยความหมายของปุ๋ยชีวภาพ มีดังนี้

ปุ๋ยชีวภาพ ตามพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2518 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550 หมายถึง ปุ๋ยที่ได้จากการนำจุลินทรีย์ที่มีชีวิตที่สามารถสร้างธาตุอาหาร หรือช่วยให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์กับพืช มาใช้ในการปรับปรุงบำรุงดินทางชีวภาพ ทางกายภาพ หรือทางชีวเคมี การนำมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรนั้น ส่วนใหญ่จะเน้นเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน และการเจริญเติบโตของพืช

3.3.2 ผลผลิตก้นปุ๋ยชีวภาพ พต. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2562ข)

1) คุณสมบัติของปุ๋ยชีวภาพ พต. 12

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

แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ (nitrogen fixation bacteria, NFB) เป็นจุลินทรีย์ที่อยู่อย่างอิสระในดิน สามารถตรึงก๊าซไนโตรเจนในอากาศ และเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแอมโมเนียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช โดยกระบวนการจากกิจกรรมเอนไซม์ไนโตรจีเนส (nitrogenase) ได้แก่ *Azotobacter tropicalis* โดยการตรึงไนโตรเจนทางชีวภาพ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ โดยไนโตรเจนอนินทรีย์ที่เป็นผลลัพธ์จากการตรึงทางชีวภาพนี้ คือ แอมโมเนีย (ammonia) และเมื่อได้รับโปรตอนจะเป็นไอออนแอมโมเนียม (NH_4^+) เอนไซม์หลักที่ทำหน้าที่คือ เอนไซม์ไนโตรจีเนส การตรึงไนโตรเจนทางชีวภาพเป็นการรีดักชันก๊าซไดไนโตรเจนไปสู่รูปแอมโมเนีย แต่เนื่องจากก๊าซไดไนโตรเจนมีความเสถียรมากปฏิกิริยารีดักชันนี้ จึงต้องใช้พลังงานค่อนข้างสูง (16 ATP) โดยมีไดอะแกรมของปฏิกิริยา ดังนี้



เมื่อพิจารณาเฉพาะการเกิด 2NH_3 จะใช้ 6 โปรตอน และ 6 อิเล็กตรอน เท่านั้น ที่ให้แก่ก๊าซไดไนโตรเจน แต่ในปฏิกิริยาจะมีการรีดักชัน หรือให้อิเล็กตรอน 2 ตัว แก่โปรตอน 2 ตัว เพื่อเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ด้วยเสมอรวมทั้งหมดแล้ว ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) ก๊าซไดไนโตรเจน จำนวน 1 โมเลกุล ใช้อิเล็กตรอน 8 ตัว และพลังงาน 16 ATP โดยต้องใช้ 2 ATP ต่ออิเล็กตรอน 1 ตัว (ธงชัย, 2557)

แบคทีเรียละลายฟอสเฟต (phosphate solubilizing bacteria, PSB) และเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส เป็นจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตกรดอินทรีย์ปลดปล่อยออกมาละลายสารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟตที่อยู่ในรูปไม่ละลาย เช่น หินฟอสเฟต ให้อยู่ในรูปที่พืชดูดใช้ได้ จุลินทรีย์จะช่วยละลายฟอสเฟต จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะสร้างกรดอินทรีย์ หรือเอนไซม์ฟอสฟาเตส

(phosphatases) ออกมาละลายฟอสเฟตในดินที่ละลายยาก และฟอสเฟตจากหินฟอสเฟต ให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ การเพิ่มความเข้มข้นของธาตุฟอสฟอรัสในดินทำได้โดยการใส่หินฟอสเฟต ร่วมกับการใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต ได้แก่ *B. unamae*

แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม (potassium solubilizing bacteria, KSB) มีกลไกการละลายโพแทสเซียมด้วยจุลินทรีย์ โดยโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปแร่ธรรมชาติมี 3 รูป คือ 1) รูปที่ตรึงไว้ด้วยอนุภาคของคอลลอยด์ 2) รูปที่แลกเปลี่ยนได้ และ 3) รูปที่ละลายน้ำได้ของโพแทสเซียมในธรรมชาติ สามารถเป็นประโยชน์กับพืชได้ 3 วิธี คือ การสลายตัวทางกายภาพ การสลายตัวทางเคมี และการสลายตัวทางชีวภาพ ซึ่งในทางชีวภาพจุลินทรีย์สามารถสร้างกรดอินทรีย์ ออกมาละลายโพแทสเซียมออกจากแร่ดินเหนียวบางชนิดได้ บทบาทสำคัญของจุลินทรีย์ดินต่อความเข้มข้นของโพแทสเซียมในดิน ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการอิมมูบิไลเซชัน (immobilization) โดยการปลดปล่อยกรดอินทรีย์ เช่น กรดแลคติก (lactic acid) และกรดซิตริก (citric Acid) เป็นต้น หรือกรดอนินทรีย์ เช่น กรดคาร์บอนิก (carbonic acid) และกรดซัลฟูริก (sulfuric acid) เป็นต้น ที่ปลดปล่อยกรดอินทรีย์ช่วยละลายแร่ธาตุที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบในกลุ่มไมก้า (mica) เช่น ไบโอไทต์ (biotite) มัสโคไวต์ (muscovite) และกลุ่มของเฟลด์สปาร์ (feldspar) เช่น ไมโครไคลน์ (microcline) ออโทเคลส (orthoclase) เป็นต้น ให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ได้แก่ *B. subtilis*

แบคทีเรียสร้างสารเสริมการเจริญเติบโต หรือฮอโมนพืช (plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) ฮอโมนที่แบคทีเรียสร้าง ได้แก่ ออกซิน (auxins) จิบเบอเรลลิน (gibberellin) และไซโตไคนิน (cytokinin) ช่วยกระตุ้นการเจริญของรากขนอ่อน และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวราก ทำให้ความสามารถในการดูดน้ำและธาตุอาหารเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ *A. chroococcum*

2) ประสิทธิภาพการเพิ่มความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชด้วยปุ๋ยชีวภาพ

พด. 12

ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถสร้างธาตุอาหาร หรือช่วยให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์กับพืช เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน และสร้างฮอโมนส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ประกอบด้วยจุลินทรีย์ 4 ประเภท (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551) จุลินทรีย์ที่ให้ธาตุอาหารไนโตรเจนเป็นจุลินทรีย์ที่อยู่อย่างอิสระในดินสามารถตรึงก๊าซไนโตรเจนในอากาศ และเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแอมโมเนียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชโดยกิจกรรมเอนไซม์ไนโตรจีเนส ได้แก่ แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ *A. tropicalis* เป็นจุลินทรีย์ที่อยู่อย่างอิสระในดินสามารถตรึงก๊าซไนโตรเจนในอากาศ และเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแอมโมเนียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชโดยกิจกรรมเอนไซม์ไนโตรจีเนส มีค่าการตรึงไนโตรเจน 1,246 นาโนโมลเอทิลีนต่อต้นต่อชั่วโมง ในการทดสอบกับข้าวโพด (พิกุล และ ดารารัตน์, 2552) แบคทีเรียละลายสารประกอบฟอสเฟต *B. unamae*

มีประสิทธิภาพละลายในดินที่มีสภาพเป็นกรด กลาง และด่างเล็กน้อย ให้อยู่ในรูปฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้น 14.27 เปอร์เซ็นต์ 13.76 เปอร์เซ็นต์ และ 48.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ฉวีวรรณ, 2552) แบคทีเรียละลายสารประกอบโพแทสเซียม *B. subtilis* เป็นจุลินทรีย์ที่ปลดปล่อยกรดอินทรีย์ช่วยละลายแร่ธาตุที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ สามารถละลายโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้น 9.02 เปอร์เซ็นต์ (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) และแบคทีเรียสร้างสารเสริมการเจริญเติบโตของพืช *A. chroococcum* สามารถสร้างออกซิน 56.18 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วยกระตุ้นการงอกเมล็ดพืช และส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Leaungvutiviroj *et al.*, 2010) มีผลกระตุ้นการงอกของเมล็ดข้าว และคะน้าจาก 76.67 เปอร์เซ็นต์ และ 60 เปอร์เซ็นต์ เป็น 93.33 เปอร์เซ็นต์ ช่วยกระตุ้นการเจริญของรากขนอ่อน และเพิ่มพื้นที่ผิวราก ทำให้มีความสามารถในการดูดน้ำและธาตุอาหารเพิ่มมากขึ้น จุลินทรีย์ดังกล่าวสามารถเจริญที่อุณหภูมิระหว่าง 30 - 35 องศาเซลเซียส และเจริญในสภาพที่มีความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 6 - 8 (พิมพ์ธิดา และคณะ, 2552)

3) วิธีการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร

(1) วัสดุสำหรับขยายเชื้อ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2562ข)

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

(2) วิธีการขยายเชื้อ

(2.1) ผสมปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 และรำข้าวในน้ำ 1 ปี๊บ (20 ลิตร)

คนให้เข้ากันนาน 5 นาที

(2.2) รดสารละลายปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ลงบนกองปุ๋ยหมัก และคลุกเคล้าให้เข้ากัน ปรับความชื้นให้ได้ 70 เปอร์เซ็นต์ โดยตรวจสอบความชื้นด้วยการกำปุ๋ยหมักเป็นก้อน และไม่มีน้ำไหลออกมา เมื่อคลายมือออกปุ๋ยหมักยังคงสภาพเป็นก้อนอยู่ได้

(2.3) ตั้งกองปุ๋ยหมักเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้มีความสูง 50 เซนติเมตร และใช้วัสดุคลุมกองปุ๋ยเพื่อรักษาความชื้น

(2.4) กองปุ๋ยหมักไว้ในที่ร่มเป็นระยะเวลา 4 วัน แล้วจึงนำไปใช้

(3) ผลจากการขยายเชื้อด้วยวิธีการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 บนกองปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัม และคลุกเคล้าให้เข้ากัน ปรับความชื้นให้ได้ 70 เปอร์เซ็นต์ บ่มเป็นระยะเวลา 4 วัน สามารถเพิ่มปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียละลายฟอสเฟต แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม และแบคทีเรียสร้างสารเสริมการเจริญเติบโตของพืช ได้ปริมาณเชื้อสูงสุด 1.40×10^8 3.90×10^{13} 6.10×10^{12} และ 1.07×10^{14} CFU ต่อกรัม ตามลำดับ (ฉวีวรรณ, 2552)

4) การใช้ประโยชน์ปุ๋ยชีวภาพ พต. 12 สำหรับการผลิตพืช ดังนี้

ข้าว จากรายงานของปณิชา และ วิลาวลัย (2553) พบว่า การใช้ปุ๋ยชีวภาพ พต. 12 สามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมีลง 25 - 50 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลผลิตข้าวหอมมะลิ และข้าวพันธุ์ กข. เฉลี่ย 572 และ 746 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้น 3 และ 6 เปอร์เซ็นต์

ยางพารา จากรายงานของอุซุกร และ วรภา (2552) พบว่า การใช้ปุ๋ยชีวภาพ พต. 12 ขยายเชื้อ อัตรา 5 กิโลกรัมต่อต้น มีแนวโน้มทำให้เปอร์เซ็นต์ของเนื้อยางพาราเพิ่มขึ้น 56.8 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มความหนาของเปลือกยางพาราสูงสุด 5.8 มิลลิเมตร ทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำสุด และการใช้ปุ๋ยชีวภาพ พต. 12 ร่วมกับหินฟอสเฟต อัตรา 124 กิโลกรัมต่อไร่ และโพแทสเซียม เฟลด์สปาร์ อัตรา 127 กิโลกรัมต่อไร่ ช่วยเพิ่มระดับปริมาณอินทรีย์วัตถุ และฟอสฟอรัสในดินได้ สูงสุด เท่ากับ 0.76 เปอร์เซ็นต์ และ 11.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และช่วยให้สูญเสีย โพแทสเซียมในดินต่ำสุด

กะหล่ำปลี จากรายงานของประพิน และ กฤษณะ (2552) พบว่า การใช้ ปุ๋ยชีวภาพ พต. 12 อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับการใช้หินฟอสเฟต อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ และ แร่เฟลด์สปาร์ อัตรา 68 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้ผลผลิตกะหล่ำปลีสูงสุด 9,248 กิโลกรัมต่อไร่

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จากรายงานของอำพร และ ไชยยา (2552) พบว่า การใช้ปุ๋ยชีวภาพ พต. 12 สามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมีลง 25 - 50 เปอร์เซ็นต์ มีผลผลิต อยู่ในช่วง 1352.70 - 1,356.50 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งผลผลิตที่ได้จะต่ำกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีอัตราเต็มเล็กน้อยที่ให้ ผลผลิต 1,489.30 กิโลกรัมต่อไร่

หยัารูชี จากรายงานของฉวีวรรณ (2552) พบว่า การใช้ปุ๋ยชีวภาพ พต. 12 อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยคอก อัตรา 500 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้มีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง ของหยัารูชีสูง เท่ากับ 10,117 และ 2,598 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ

3.4 ความรู้ด้านสถิติเพื่อการวิจัยทางการเกษตร

สถิติวิจัย หมายถึง ศาสตร์ที่ว่าด้วยหลักการและระเบียบและวิธีการทางสถิติที่ใช้ ในการเก็บรวบรวม การนำเสนอ การวิเคราะห์ และการตีความหมายของตัวเลขเหล่านั้น (จรัญ, 2534; กรมวิชาการเกษตร, 2553)

การประมาณค่าและการทดสอบ ในการวิเคราะห์ข้อมูล ปกติจะไม่วิเคราะห์ข้อมูล ประชากร (population) เนื่องจากจำนวนประชากรมักจะมีจำนวนมากสิ้นเปลืองเงินและเวลา ดังนั้น จึงมักจะวิเคราะห์ข้อมูลตัวอย่าง (sample) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของประชากรแล้วนำผลวิเคราะห์นั้น มาอ้างอิงว่าเป็นคุณสมบัติของประชากรค่าวิเคราะห์ต่าง ๆ ทางสถิติจากตัวอย่างนี้ เรียกว่า ค่าสถิติ (statistic) ซึ่งโดยขบวนการทางสถิติเหมือนกัน ถ้าวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลของประชากรค่าวิเคราะห์ เหล่านี้ เรียกว่า พารามิเตอร์ (parameter)

3.4.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของการทดลอง

1) ทรีทเมนต์ (treatment) คือ สิ่งหรือวิธีการที่เราปฏิบัติต่อสิ่งทดลองเพื่อวัดผลเปรียบเทียบกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2) หน่วยทดลอง (experiment unit) หมายถึง หน่วยที่เล็กที่สุดของวัตถุหรือวัสดุในการทดลองที่ได้รับทรีทเมนต์อย่างเดียวกัน หน่วยการทดลองแต่ละหน่วยอาจเป็นหน่วยเดียว หรืออาจเป็นกลุ่มของวัสดุการทดลอง เช่น

หน่วยเดียว หมายถึง สิ่งหนึ่งหรือกลุ่มหนึ่งของสิ่งทดลอง ซึ่งได้รับทรีทเมนต์เดียวกันในการกระทำครั้งใดครั้งหนึ่ง เช่น ต้นถั่วแต่ละกระถาง คือ 1 หน่วยทดลอง

หน่วย หรือกลุ่ม หมายถึง ในการทดลองเกี่ยวกับพืช มักจะหมายถึงพื้นดินแปลงเล็ก ๆ ที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าค่อนข้างยาว เรียกว่า แปลงย่อย (plot) หนึ่งแปลงย่อยอาจเท่ากับการปลูกข้าว 4 แถว ๆ ละ 20 ต้น เพราะฉะนั้น 1 หน่วยการทดลอง มีต้นข้าวเท่ากับ 80 ต้น เป็นต้น

3) ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (experimental error) ในการทดลองเกี่ยวกับพืช ถึงแม้จะให้แต่ละหน่วยการทดลองได้รับทรีทเมนต์อย่างเดียวกัน มีการดูแลรักษาเหมือนกันหมดทุกอย่าง ซึ่งคาดว่าผลลัพธ์ที่ได้ เช่น ผลผลิตควรจะมีความเท่ากัน แต่มักจะไม่เป็นไปตามคาดการณ์ ตัวอย่างเช่น เมื่อปลูกพันธุ์พืชชนิดเดียวกันในสิ่งแวดล้อมเหมือนกัน เช่น ปลูกถั่วเหลือง 2 แปลง อยู่ติดกัน ระยะปลูกเท่ากัน ขนาดแปลงเท่ากัน ปลูกพร้อมกัน มีการดูแลปฏิบัติเหมือนกันทุกประการ แต่ความเป็นจริงมักจะเป็นไปไม่ได้ ทั้งนี้เพราะมีปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความแตกต่างทั้งของพันธุ์พืชนั้น ๆ อิทธิพลของดิน อุณหภูมิ ความชื้น แสงสว่าง รวมทั้งสาเหตุอื่น ๆ ทำให้ผลผลิตของทั้ง 2 แปลงแตกต่างกัน

3.4.2 หลักสำคัญในการวางแผนงานทดลอง

1) การทำซ้ำ (replication) ควรทำการทดสอบทรีทเมนต์ (treatment) ใดก็ตามมากกว่า 1 ครั้ง (1 ซ้ำ) เพื่อใช้ประมาณค่าของ experimental error เพราะค่านี้คำนวณได้จากความแตกต่างที่เกิดจากผลที่ได้อย่างน้อยสองหน่วยทดลองที่มีการดูแลปฏิบัติเหมือนกันทุกประการ

2) การสุ่มเลือก (randomization) กำหนดให้ทรีทเมนต์ที่ทำการศึกษานั้นได้รับการสุ่มเลือกในโอกาสที่เท่า ๆ กัน รวมทั้งได้รับการปฏิบัติที่เท่า ๆ กัน เช่น ถ้าทุกแปลงมีการใส่ปุ๋ยก็ควรได้รับการใส่ในอัตราที่เท่ากัน และในเวลาเดียวกัน เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อ

(1) การขจัดความลำเอียง (bias) ที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจทั้งก่อให้เกิดความแน่ใจว่าทุกทรีทเมนต์ที่ใช้ทดสอบไม่ได้เสียเปรียบกัน

(2) เพื่อให้ค่า experimental error ที่คำนวณได้เป็นค่าประมาณที่ถูกต้อง

(3) ทำให้ผู้ทดลองสามารถสรุปผลได้ด้วยความมั่นใจว่าทรีทเมนต์ที่ทำการทดสอบนั้น มีความแตกต่างกันจริงที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ หรือ 99 เปอร์เซ็นต์

ใช้สัญลักษณ์ * แทนระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ หรือระดับความเป็นไปได้ 0.05 หมายถึง ในการทดลอง 100 ครั้ง โอกาสที่จะสรุปสมมุติฐานผิดมีเพียง 5 ครั้ง

ใช้สัญลักษณ์ ** แทนระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์ หรือระดับความเป็นไปได้ 0.01 หมายถึง ในการทดลอง 100 ครั้ง โอกาสที่จะสรุปสมมุติฐานผิดมีเพียง 1 ครั้ง

3.4.3 งานวิจัยนี้ใช้แผนการทดลองปัจจัยเดียวที่เป็นรูปแบบมาตรฐาน 2 แบบ ดังนี้

1) การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD)

เป็นแผนการทดลองที่มีลักษณะง่าย สะดวกทั้งในแง่การปฏิบัติ และการคำนวณ เหมาะสำหรับหน่วยทดลองที่มีความสม่ำเสมอมากไม่มีความแตกต่างเนื่องจากปัจจัยอื่น ๆ เช่น อายุ น้ำหนัก สภาพแวดล้อม ต่าง ๆ ฯลฯ หรือถ้ามีก็น้อยมาก หน่วยทดลองแต่ละหน่วยมีโอกาสได้รับทรีทเมนต์เท่ากัน จึงมักใช้กับการทดลองในห้องปฏิบัติการหรือเรือนทดลอง ซึ่งนอกจากจะกำหนดให้หน่วยทดลองสม่ำเสมอแล้ว ยังสามารถควบคุมไม่ให้เกิดความแปรปรวนในปัจจัยอื่น ๆ ได้ด้วยการสุ่มและแผนผังการทดลอง การสุ่มอาจทำได้ง่ายด้วยการจับฉลาก หรือการใช้ตารางเลขสุ่ม การวิเคราะห์ผลการทดลอง

(1) การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์วาเรียนซ์ (analysis of variance) เป็นการวิเคราะห์หาความแปรปรวน ซึ่งเกิดจากแหล่งต่าง ๆ ภายในการทดลอง สำหรับ CRD มีแหล่งความแปรปรวน 2 ชนิด คือ ความแปรปรวนที่เกิดจากทรีทเมนต์ และความคลาดเคลื่อนของการทดลอง ซึ่งเรียกว่า experimental error

คำนวณ degree of freedom (df)

$$\text{total df} = t \times r - 1$$

$$\text{treatment df} = t - 1$$

$$\text{error} = (tr - 1) - (t - 1)$$

ตัวอย่าง การจัดกลุ่มตัวเลขของแต่ละทรีทเมนต์ลงในรูปตารางการทดลอง 5 ทรีทเมนต์ 4 ซ้ำ

$$(t = 5, r = 4)$$

ทรีทเมนต์/ซ้ำ	1	2	3	4	รวม	ค่าเฉลี่ย
1	X11	X12	X13	X14	T1	$\bar{T}_1$
2	X21	X22	X23	X24	T2	$\bar{T}_2$
3	X31	X32	X33	X34	T3	$\bar{T}_3$
4	X41	X42	X43	X44	T4	$\bar{T}_4$
5	X51	X52	X53	X54	T5	$\bar{T}_5$
รวม					G	$\bar{X}$

(2) คำนวณผลรวม ค่าเฉลี่ยของแต่ละทรีทเมนต์ ผลรวมทั้งหมด (G) และค่าเฉลี่ย ทั้งหมด ($\bar{X}$)

(3) คำนวณค่าความแปรปรวนที่เกิดจากแหล่งต่าง ๆ

ค่า sum of square (SS)

correction factor (CF) = G^2/rxt

total SS = $(X_{11}^2 + X_{12}^2 + \dots + X_{54}^2) - CF$

treatment SS = $(T_1^2 + T_2^2 + \dots + T_5^2 - CF)/r$

error SS = total SS - treatment SS

ค่า mean square (MS)

treatment MS = treatment SS/treatment df

error MS = error SS/error df

ค่า F - value = treatment MS/error df

(4) คำนวณค่า coefficient of variation (CV) เพื่อชี้ให้เห็นถึงระดับความน่าเชื่อถือของการทดลองนั้น ๆ

$$CV = \sqrt{\frac{\text{error MS}}{\bar{X}}} \times 100$$

(5) ค่า F ถ้าใส่เครื่องหมายต่าง ๆ

(5.1) ใส่เครื่องหมาย ** บนค่า F ที่คำนวณได้ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของทรีทเมนต์อย่างน้อย 1 คู่ มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซนต์

(5.2) ใส่เครื่องหมาย * บนค่า F ที่คำนวณได้ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของทรีทเมนต์อย่างน้อย 1 คู่ มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

(5.3) ใส่เครื่องหมาย ns ไว้บนค่า F แสดงว่ายังไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะยอมรับว่าทรีทเมนต์เหล่านั้นแตกต่างกัน

2) การทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (randomized complete block design, RCBD)

แผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (RCBD) โดยธรรมชาติหน่วยทดลองทั่ว ๆ ไปโดยเฉพาะในไร่ มักไม่มีความสม่ำเสมอมากนัก ถ้าทำการทดลองโดยไม่จัดการกับหน่วยทดลองให้มีความใกล้เคียงกัน หรือแตกต่างกันน้อยที่สุดแล้ว ย่อมเกิดความแปรปรวนในการทดลองมากจนกระทั่งไม่สามารถตรวจสอบว่าทรีทเมนต์ต่าง ๆ ในการทดลองนั้นให้ผลแตกต่างกันอย่างไรหรือไม่ จึงจำเป็นต้องทำการจัดกลุ่มของหน่วยทดลองให้ภายในกลุ่มมีความแตกต่างกันน้อยที่สุด แต่แตกต่างกันมากที่สุดระหว่างกลุ่ม เรียกว่า บล็อก (block)

(1) การจัดบล็อกมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความแปรปรวนของการทดลองให้น้อยลง มีหลักการที่ต้องพิจารณา คือ

(1.1) ต้นเหตุของความแปรปรวนในหน่วยทดลอง เช่น ความอุดมสมบูรณ์ของดิน หรือความลาดเอียงของพื้นที่ เป็นต้น

(1.2) การจัดรูปร่างและทิศทางของบล็อก โดยยกตัวอย่างเฉพาะเรื่องความอุดมสมบูรณ์ของดินเท่านั้น ซึ่งสามารถนำไปใช้กับความแปรปรวนอันเกิดจากต้นเหตุอื่น ๆ ได้ การสุ่มและแผนผังการทดลอง ทำการสุ่มแยกกันทีละบล็อก ในแต่ละบล็อกจะต้องมีครบทุกทรีทเมนต์ เช่น

เมื่อดินมีทิศทางของความอุดมสมบูรณ์ของดินทางเดียว ให้จัดบล็อกเป็นรูปร่างแคบและยาว ให้ด้านยาวของบล็อกตั้งฉากกับทิศทางของความอุดมสมบูรณ์ของดิน

เมื่อดินมีความอุดมสมบูรณ์ 2 ทิศทาง ทางหนึ่งมากกว่าอีกทางหนึ่ง จัดบล็อกเป็นรูปร่างแคบและยาว ให้ด้านยาวของบล็อกตั้งฉากกับทิศทางที่มีความอุดมสมบูรณ์มากกว่า

เมื่อดินมีความอุดมสมบูรณ์แตกต่างกันเป็น 2 ทิศทางตั้งฉากกัน ใช้วิธีจัดบล็อกให้เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เมื่อไม่รู้ทิศทางอุดมสมบูรณ์ของดิน ควรจัดบล็อกให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมากที่สุด

(2) การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลในแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์มีความแปรปรวนจาก 3 แหล่ง คือ ความแปรปรวนที่เกิดจากบล็อก ทรีทเมนต์ และความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการปฏิบัติ

ตัวอย่างการทดลอง 5 ทรีทเมนต์ A B C D E ทำ 4 บล็อก (ซ้ำ) ($t = 5, r = 4$) การกรอกตัวเลขลงในตาราง

ทรีทเมนต์/ซ้ำ	1	2	3	4	รวม	ค่าเฉลี่ย
1 = A	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	T ₁	$\bar{T}_1$
2 = B	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	T ₂	$\bar{T}_2$
3 = C	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	X ₃₄	T ₃	$\bar{T}_3$
4 = D	X ₄₁	X ₄₂	X ₄₃	X ₄₄	T ₄	$\bar{T}_4$
5 = E	X ₅₁	X ₅₂	X ₅₃	X ₅₄	T ₅	$\bar{T}_5$
รวม	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	G	$\bar{X}$

(3) คำนวณผลรวม ค่าเฉลี่ยของแต่ละทรีทเมนต์ ผลรวมของซ้ำ ผลรวมทั้งหมดและค่าเฉลี่ย

(4) คำนวณ degree of freedom (df)

$$\text{total df} = t \times r - 1$$

$$\text{replication df} = r - 1$$

$$\text{treatment df} = t - 1$$

$$\text{error df} = (t - 1)(r - 1)$$

(5) คำนวณค่าความแปรปรวนที่เกิดจากแหล่งต่าง ๆ

ค่า sum of square (SS)

$$\text{correction factor (CF)} = G^2/t \times r$$

$$\text{total SS} = (X_{11}^2 + X_{12}^2 + \dots + X_{54}^2) - CF$$

$$\text{replication SS} = (R_1^2 + R_2^2 + \dots + R_4^2) - CF$$

$$\text{treatment SS} = (T_1^2 + T_2^2 + \dots + T_5^2)/r - CF$$

$$\text{error SS} = \text{total SS} - \text{replication SS} - \text{treatment SS}$$

ค่า mean square (MS)

$$\text{replication MS} = \text{replication SS}/r-1$$

$$\text{treatment MS} = \text{treatment SS}/t-1$$

$$\text{error MS} = \text{error SS}/(t-1)(r-1)$$

ค่า F - Value

$$F = \text{treatment MS}/\text{error MS}$$

3.4.4 งานวิจัยนี้ใช้แผนการทดลองมากกว่าปัจจัยเดียว 1 แบบ ดังนี้

1) การทดลองแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย (2 - factors factorial experiment) เป็นการทดสอบที่มีความสนใจในปัจจัยทั้งสองเท่า ๆ กัน ต้องการทดสอบด้วยความเที่ยงตรงเท่า ๆ กัน ก็อาจจะใช้การทดลองชนิดนี้ได้ factorial experiment หมายถึง การทดลองที่มีกลุ่มของทรีทเมนต์ (treatment) ที่ทำการทดลองเป็นการรวมตัวของปัจจัยที่ต้องการทดสอบ

ปัจจัย (factor) หมายถึง ชนิดหรือประเภทของทรีทเมนต์ ใช้อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่แทนปัจจัยในการศึกษา เช่น ปัจจัย A แทนพันธุ์ข้าว และปัจจัย B แทนอัตราปุ๋ยไนโตรเจน

ระดับ (level) หมายถึง ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยที่ศึกษา ใช้อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็ก และมีตัวเลขกำกับแทนระดับของปัจจัยที่ศึกษา เช่น ปัจจัย A มี 2 ระดับ ใช้ a_1 และ a_2 แทนพันธุ์ กข. และ พันธุ์หอมมะลิ ปัจจัย B มี 2 ระดับ ใช้ b_1 และ b_2 แทนอัตราปุ๋ยไนโตรเจน 5 กิโลกรัมต่อไร่ และ 10 กิโลกรัมต่อไร่

ทรีทเมนต์คอมบินชัน (treatment combination) หมายถึง การรวมกันของระดับต่าง ๆ ของปัจจัย ตัวอย่างเช่น ปัจจัย A แทนพันธุ์ข้าว 2 พันธุ์ ปัจจัย B แทนอัตราปุ๋ยไนโตรเจน 2 ระดับ ได้ทรีทเมนต์คอมบินชัน ดังนี้

	a_1	a_2
b_1	$a_1 b_1$	$a_2 b_1$
b_2	$a_1 b_2$	$a_2 b_2$

การเรียกชื่อแฟคทอเรียลของการทดลองที่ปัจจัย A มี a ระดับ และปัจจัย B มี b ระดับ ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ที่มี r ซ้ำ ซึ่งจะเรียกชื่อการทดลองเป็น $a \times b$ factorial in CRD

งานวิจัยนี้ใช้แผนการทดลอง factorial experiment ที่จัดในรูปแบบ completely randomized design (CRD)

2) การทดลองสองปัจจัย รูปแบบเชิงเส้นของการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย โดยปัจจัย A มี a ระดับ และปัจจัย B มี b ระดับที่ใช้แผนการทดลองแบบ CRD ทำ r ซ้ำ

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$$i = 1, 2, \dots, a$$

$$j = 1, 2, \dots, b$$

$$k = 1, 2, \dots, r$$

τ_i แทนอิทธิพลหลักของปัจจัย A

β_j แทนอิทธิพลหลักของปัจจัย B

$(\tau\beta)_{ij}$ แทนอิทธิพลร่วมของปัจจัย A และ B

แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ค่า sum of square

total SS = treatment SS (SST) + error SS (SSE)

เมื่อทดลองเป็นแบบแฟคทอเรียลสองปัจจัยค่า sum of square ของ
ทรีทเมนต์จะมีค่าดังนี้ คือ $SST = SS(A) + SS(B) + SS(AB)$
ตารางแสดงผลรวมจาก r ซ้ำของข้อมูลการทดลองสองปัจจัย

ปัจจัย A	ปัจจัย B				รวม
	1	2	...	b	
1	Y_{11}	Y_{12}	...	Y_{1b}	$Y_{1..}$
2	Y_{21}	Y_{22}	...	Y_{2b}	$Y_{2..}$
.			...		
a	Y_{a1}	Y_{a2}	...	Y_{ab}	$Y_{a.}$
รวม	$Y_{.1.}$	$Y_{.2.}$	...	$Y_{.b.}$	$Y_{..}$

กำหนดให้

Y_{ij} แทนผลรวมของข้อมูลจากระดับที่ i ของ A และระดับ j ของ B

$Y_{i..}$ แทนผลรวมของข้อมูลระดับที่ i ของ A

$Y_{.j.}$ แทนผลรวมของข้อมูลระดับที่ j ของ B

$Y_{...}$ แทนผลรวมของข้อมูลทั้งหมด

วิธีคำนวณ ค่า sum of square ของอิทธิพลต่าง ๆ

$$CT = (Y_{...})^2 / abr$$

$$\text{total SS} = \sum Y_{ijk}^2 - CT$$

$$\text{treatment SS (SST)} = \sum Y_{ij.}^2 / r - CT$$

$$\text{error SS (SSE)} = \text{total SS} - \text{SST}$$

$$SS(A) = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i..}^2}{br} - CT$$

$$SS(B) = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{ar} - CT$$

$$SS(AB) = \text{SST} - SS(A) - SS(B)$$

3.5 ความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ที่ใช้ในการปฏิบัติงาน

การดำเนินการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้ความเชี่ยวชาญและประสบการณ์จากการจัดทำคู่มือด้านการบำรุงดินด้วยอินทรีย์วัตถุ และด้านเทคโนโลยีชีวภาพในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ และผลิตภัณฑ์อินทรีย์สารของหน่วยงานกรมพัฒนาที่ดิน สำหรับเป็นเอกสารเผยแพร่และอ้างอิงให้กับนักวิชาการและเกษตรกร นำไปใช้ประโยชน์ (แสดงเอกสารเผยแพร่ที่ภาคผนวก ค ข้อ 3. - 14.) ดังนี้

3.5.1 คู่มือ สารเร่งจุลินทรีย์เพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตทางการเกษตร ปี 2550 สัดส่วนร้อยละ 10

3.5.2 คู่มือ มหัศจรรย์สารเร่ง พด. 7 สำหรับผลิตสารป้องกันแมลงศัตรูพืช ปี 2550 สัดส่วนร้อยละ 15

3.5.3 คู่มือ การจัดการอินทรีย์วัตถุ เพื่อปรับปรุงบำรุงดินและเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน ปี 2551 สัดส่วนร้อยละ 10

3.5.4 คู่มือ จุลินทรีย์สำหรับพืชปรับปรุงบำรุงดิน พด. 11 ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ปี 2551 สัดส่วนร้อยละ 15

3.5.5 คู่มือ ผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีชีวภาพ กรมพัฒนาที่ดิน เพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร สัดส่วนร้อยละ 10

3.5.6 คู่มือ การจัดการอินทรีย์วัตถุ เพื่อปรับปรุงบำรุงดินและเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน ปี 2558 สัดส่วนร้อยละ 15

3.5.7 คู่มือ แนะนำการจัดการขยะ เพื่อส่งเสริมการใช้สารอินทรีย์ลดการใช้สารเคมี ปี 2561 สัดส่วนร้อยละ 15

3.5.8 คู่มือ การใช้ผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีชีวภาพ กรมพัฒนาที่ดิน เพื่อส่งเสริมการใช้สารอินทรีย์ลดการใช้สารเคมี ปี 2562 สัดส่วนร้อยละ 10

3.5.9 คู่มือ การผลิตและการใช้สารบำบัดน้ำเสียจัดกลิ่นเหม็น ชูปเปอร์ พด. 6 ปี 2566 สัดส่วนร้อยละ 10

3.5.10 คู่มือ Soil Biotechnology for Increasing crop Production in Thailand สัดส่วนร้อยละ 10

3.5.11 คู่มือ Soil Biotechnology in Thailand ปี 2559 สัดส่วนร้อยละ 10

3.5.12 คู่มือ Organic Matter and Soil Biotechnology Management in Thailand ปี 2559 สัดส่วนร้อยละ 10

4. สรุปสาระสำคัญ ขั้นตอนการดำเนินการ และเป้าหมายของงาน

4.1 บทคัดย่อ และคำสำคัญ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้กากส่าและกากน้ำตาลในการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ศึกษาอัตราส่วนและระยะเวลาการบ่มของไบโอชาร์แกลบกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลวในการดูดซับจุลินทรีย์ และศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเจริญเติบโต ผลผลิต และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้าในแปลงทดลอง ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการจุลินทรีย์ กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน และแปลงทดลองจังหวัดราชบุรี ดำเนินการในชุดดินปรมาณบุรี ปลูกคะน้า ระหว่างตุลาคม พ.ศ. 2558 ถึง กันยายน พ.ศ. 2559 แปลงทดลองวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (RCBD) 7 ดำรับการทดลอง 3 ซ้ำ ประกอบด้วย ดำรับการทดลองที่ 1 ควบคุม ดำรับการทดลองที่ 2 ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ดำรับการทดลองที่ 3 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 4 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ พบว่า การผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสม ประกอบด้วยน้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (เตรียมปริมาตร 100 ลิตร ประกอบด้วยน้ำกากส่า 10 ลิตร : กากน้ำตาล 5 ลิตร : น้ำ 85 ลิตร) ใส่หัวเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เติมออกซิเจนเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียสร้างฮอโมน แบคทีเรียละลายฟอสเฟต และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 6.779 6.450 7.973 และ 8.273 log CFU ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และใช้ไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร แขนาน 1 ชั่วโมง มีปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจน - แบบอิสระ แบคทีเรียสร้างฮอโมน แบคทีเรียละลายฟอสเฟต และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 5.310 5.770 7.200 และ 6.040 log CFU ต่อกรัม ตามลำดับ และในสภาพแปลงทดลอง พบว่า การใช้ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่บ่มด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้สมบัติทางเคมีของดินภายหลังการทดลอง มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน 1.83 1.67 และ 1.76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณโพแทสเซียมสะสมในดินสูงขึ้น 81.67 130.67 และ 150.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ลดความหนาแน่นรวมของดิน 1.50 1.45 และ 1.43 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และเพิ่มปริมาณน้ำในดิน เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุม และการใช้ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่บ่มด้วย

ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งเสริมการเจริญเติบโตของคะน้า ได้แก่ ความสูงต้น ความเขียวใบ ขนาดพื้นที่ใบ และน้ำหนักแห้งต้นเพิ่มสูงขึ้น และให้ผลผลิตคะน้า ในการปลูกรอบที่ 2 สูงสุด 2,928 กิโลกรัมต่อไร่ สูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดิน 2,624 กิโลกรัมต่อไร่ เพิ่มขึ้นคิดเป็น 11.58 เปอร์เซ็นต์ และลดการใช้ปุ๋ยเคมีได้ 25 เปอร์เซ็นต์ ให้รายได้สุทธิ เพิ่มขึ้นเท่ากับ 52,820.30 บาทต่อไร่ สูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินที่ให้รายได้สุทธิ 46,560.40 บาทต่อไร่ เพิ่มขึ้นคิดเป็น 13.44 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: ไบโอสาร์แกลบ ปุ๋ยชีวภาพ คะน้า

4.2 Abstract and Keywords

The purposes of this research were to study the use of spent wash and molasses for microbial propagation of LDD 12 liquid biofertilizer, to investigate the optimal ratio and incubation period of rice husk biochar for microorganism absorption from LDD 12 liquid biofertilizer, and to assess the efficiency of microorganism - absorbed biochar on soil fertility, plant growth, yield, and economic return in Chinese kale cultivation. The experiments were conducted in the laboratory of the Soil Biotechnology Division, LDD, and in a field in Ratchaburi province between October 2015 to September 2016. The soil series in the field was Pran Buri series. The experiment was arranged in a randomized complete block design (RCBD) with 7 treatments and 3 replications. Treatment 1 was the control. Treatment 2 used only chemical fertilizer at the recommended rate according to soil analysis. Treatment 3 used 75 % of the recommended chemical fertilizer rate and biofertilizer with microorganisms propagated using compost at a rate of 300 kg/rai. Treatment 4 used 75 % of the recommended chemical fertilizer rate and LDD 12 liquid biofertilizer at a rate of 300 l/rai. Treatments 5, 6, and 7 used 75 % of the recommended chemical fertilizer rate and LDD 12 microorganisms absorbed into biochar at rates of 1,000, 1,500, and 2,000 kg/rai, respectively. The results showed that the use of 10 liters of spent wash, 5 liters of molasses, 85 liters of water, and 0.1 gram of LDD 12 biofertilizer was the best ratio when incubated with oxygen for 24 hours. The microorganisms, such as free - living nitrogen - fixing bacteria, plant growth - promoting rhizobacteria, phosphate - solubilizing bacteria, and potassium - solubilizing bacteria, were produced 6.779, 6.450, 7.973, and 8.273 log CFU per ml, respectively. In addition, the ratio 1 : 2 by volume of rice husk biochar and LDD 12 liquid biofertilizer incubated for 1 hour produced free - living nitrogen - fixing bacteria, plant growth - promoting rhizobacteria, phosphate - solubilizing bacteria, and potassium - solubilizing bacteria at 5.310, 5.770, 7.200, and 6.040 log CFU per gram, respectively. For the field test, Treatments 5, 6, and 7 positively affected soil fertility, including organic matter content, with values of 1.83 %, 1.67 %, and 1.76 %, respectively, and available potassium content, with increases of 81.67 mg/kg, 130.67 mg/kg, and 150.67 mg/kg, respectively, all of which were superior to the control plot. Additionally, soil bulk density was lower than the

control plot by 1.50 g/cm³, 1.45 g/cm³, and 1.43 g/cm³, respectively, and the amount of water in the soil increased. Among the treatments, Treatment 6 most effectively promoted Chinese kale growth, including height, leaf greenness, leaf area, and dry weight. It yielded 2,928 kilograms per rai in the second planting, which was higher than the other treatments and 11.58 % greater than Treatment 2, which used the full recommended rate of chemical fertilizer at 2,624 kilograms per rai. Consequently, the use of chemical fertilizer could be reduced by 25 %, and the net income was 52,820.30 baht per rai, which was higher than the income from using chemical fertilizer according to soil analysis (46,560.40 baht per rai), resulting in a 13.44 % increase in net income.

Keywords: rice husk biochar, biofertilizer, Chinese kale

4.3 หลักการและเหตุผล

ไบโอชาร์เป็นวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากมวลชีวภาพผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนโดยไม่ใช้ออกซิเจนที่อุณหภูมิเกิน 300 องศาเซลเซียส ลักษณะเนื้อละเอียด รุปรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีความสำคัญในการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน เพิ่มการดูดซับธาตุอาหาร ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินในการกักเก็บคาร์บอนในรูปคงตัวสูง ลดความหนาแน่นรวมของดิน และเพิ่มความชื้นในดิน ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการทางชีวเคมีในดิน จุดเด่นของไบโอชาร์ที่มีรุปรุนสูง อุดมรักษาความชื้นได้ดี และดูดซับธาตุอาหาร ส่งผลดีต่อประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในดิน เนื่องจากไบโอชาร์มีอนุภาคมีพื้นผิวภายในและรุปรุนสูง เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งรุปรุนเหล่านี้จะช่วยป้องกันจุลินทรีย์ในดินจากผู้ล่า และความแห้งแล้งจากการระเหยของน้ำ อีกทั้งยังเป็นแหล่งคาร์บอน แหล่งพลังงาน แร่ธาตุ ช่วยเก็บน้ำ และละลายสารต่าง ๆ เพื่อใช้สำหรับเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ ดังนั้นรุปรุนในไบโอชาร์จึงเป็นแหล่งอาศัยที่ดีของจุลินทรีย์ดินเหมาะสมต่อการเพิ่มปริมาณเชื้อ และการสืบพันธุ์ มีส่วนสำคัญช่วยให้เกิดความสมดุลของระบบนิเวศดิน

กรมพัฒนาที่ดินส่งเสริมผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ พด. 12 ประกอบด้วย จุลินทรีย์ 4 ชนิด ได้แก่ จุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ 231 นาโนโมลเอมิลินต่อต้นต่อชั่วโมง จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตที่มีประสิทธิภาพการละลายหินฟอสเฟต 48.22 เปอร์เซ็นต์ จุลินทรีย์ละลายโพแทสเซียมที่มีประสิทธิภาพการละลายแร่เฟลด์สปาร์ 9.02 เปอร์เซ็นต์ และจุลินทรีย์ผลิตฮอร์โมนพืชที่มีประสิทธิภาพผลิตฮอร์โมนออกซิน 56.18 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดการใช้ปุ๋ยเคมีสำหรับการผลิตพืชได้ 25 เปอร์เซ็นต์ (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) โดยมีคำแนะนำเกษตรกรขยายเชื้อจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมักนาน 4 วัน ก่อนนำไปหว่านในแปลง หรือรองกันหลุมก่อนการปลูกพืช ต้องนำไปใช้ทันทีที่ไม่สามารถเก็บรักษาได้ และปัญหาการฟุ้งกระจายจากการนำปุ๋ยหมักขยายเชื้อหว่านในแปลง ดังนั้นการพัฒนาวิธีการขยายเชื้อชนิดเหลวที่มีต้นทุนการผลิตต่ำจากวัสดุเหลือใช้อุตสาหกรรมเกษตร เช่น น้ำกากส่า และกากน้ำตาล จะสามารถลดต้นทุนการผลิต และสะดวกรวดเร็ว เป็นปุ๋ยชีวภาพชนิดเหลวที่มีวิธีการผลิตง่ายต่อการนำไปปฏิบัติ จึงมีความสำคัญและจำเป็นในการประยุกต์ใช้ปุ๋ยชีวภาพในพื้นที่ขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ลดปริมาณและต้นทุนจากการใส่ปุ๋ยเคมี เป็นแรงจูงใจให้เกษตรกรหันมาใส่ปุ๋ยชีวภาพกันมากขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุปรับปรุงดินชนิดต่าง ๆ ได้สะดวก เช่น ไบโอชาร์เป็นแหล่งอาศัยและส่งเสริมความเป็นประโยชน์ของจุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ

ดังนั้นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ด้วยไบโอชาร์แก่ลบต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตพืช ด้วยการใช้กากส่าและกากน้ำตาลในการขยายเชื้อจุลินทรีย์ผลิตเป็นปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว การศึกษาอัตราส่วนและระยะเวลาการบ่มของไบโอชาร์แก่ลบกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในการดูดซับเซลล์จุลินทรีย์ และการศึกษา

ประสิทธิภาพของไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเจริญเติบโต ผลผลิต และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกพืช เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญสำหรับการปรับปรุงดินด้วยไบโอชาร์และปุ๋ยชีวภาพที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ สามารถนำองค์ความรู้วิธีการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์และปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ไปส่งเสริมขยายผลสู่นักวิชาการ หน่วยงานภาครัฐ ภาคเอกชน และเกษตรกร นำไปใช้ประโยชน์ต่อยอดประยุกต์ใช้ในพื้นที่เกษตรกรรม และเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างยั่งยืนต่อไป

4.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

4.4.1 เพื่อศึกษาการใช้น้ำกาฬและกากน้ำตาลในการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12

4.4.2 เพื่อศึกษาอัตราส่วนและระยะเวลาการบ่มของไบโอชาร์แกลบกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในการดูดซับจุลินทรีย์

4.4.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเจริญเติบโต และผลผลิตของคะน้าในแปลงทดลอง

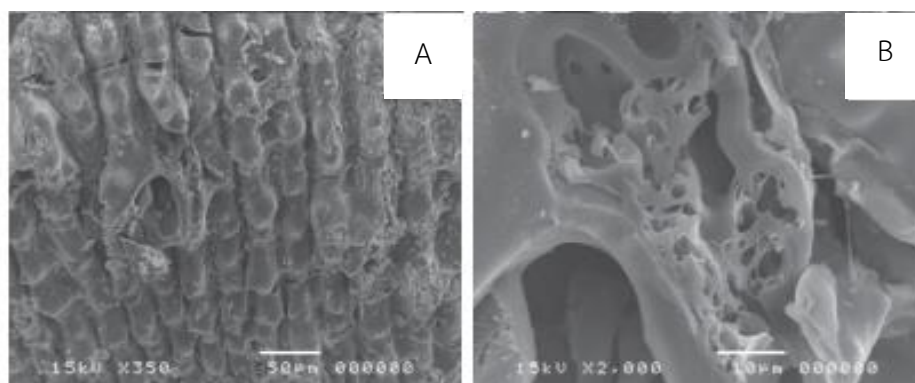
4.5 การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

4.5.1 ไบโอชาร์แกลบ

1) คุณสมบัติทางเคมีของไบโอชาร์แกลบ

คุณสมบัติทางเคมีของไบโอชาร์แกลบ ดังนี้ ความชื้น 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 ไฮโดรเจน 2.21 เปอร์เซ็นต์ และซัลเฟอร์ 0.02 เปอร์เซ็นต์ (ประภัสสร และคณะ, 2563)

(1) ความเป็นรุกรานของไบโอชาร์แกลบ วัสดุแกลบเมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะมีรุกรานสูงขึ้น และมีโครงสร้างคาร์บอนเสถียรเพิ่มสูงขึ้น (Purevsuren *et al.*, 2003) จากรายงานของประภัสสร และคณะ (2563) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรุกราน พบว่า ไบโอชาร์แกลบมีพื้นที่ผิว 7.16 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรุกราน 0.0052 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม แสดงดังภาพที่ 9 ลักษณะโครงสร้างรุกรานของไบโอชาร์แกลบ กำลังขยาย 350 เท่า (A) 2,000 เท่า (B)



ภาพที่ 9 ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของไบโอชาร์แกลบ กำลังขยาย 350 เท่า (A) 2,000 เท่า (B)

ที่มา: ประภัศร และคณะ (2563)

(2) ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ไบโอชาร์แกลบมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 9.27 - 9.60 (ประไพพิศ และคณะ, 2557) ซึ่งความเป็นกรดเป็นด่างเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในทางการเกษตร เพื่อเป็นสารปรับปรุงบำรุงดิน ดังนั้นกระบวนการผลิตไบโอชาร์จะทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของไบโอชาร์เพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลตั้งต้นที่นำมาใช้ผลิตไบโอชาร์ เนื่องจากการให้ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิสจะทำให้หมู่ฟังก์ชันที่แสดงความเป็นกรดถูกกำจัดออก เช่น หมู่คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล หรือฟอร์มิล เป็นต้น (Weber and Quicker, 2018)

(3) ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ไบโอชาร์แกลบมีค่า 178.71 เซนติโมลของประจุต่อกิโลกรัม (ประภัศร และคณะ, 2563) ซึ่งจำนวนของประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ เช่น แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) โพแทสเซียมไอออน (K^+) โซเดียมไอออน (Na^+) และแอมโมเนียม (NH_4^+) ที่อยู่ในดิน หรือไบโอชาร์ ซึ่งค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนนั้นสามารถใช้อธิบายเกี่ยวกับความอุดมสมบูรณ์ของดินได้ เนื่องจากธาตุอาหารจะต้องอยู่ในรูปของประจุเกือบทั้งหมดที่สามารถถูกดูดซึมโดยต้นพืชและจุลินทรีย์ ดังนั้นค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนจึงใช้สำหรับอธิบายลักษณะทางโครงสร้างของพื้นผิว และหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวดินของไบโอชาร์ได้ (Weber and Quicker, 2018)

2) การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์แกลบเพื่อปรับปรุงดิน

ไบโอชาร์แกลบภายใต้อุณหภูมิและเวลากระบวนการไพโรไลซิสที่เหมาะสม จะมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 9.27 ค่าการนำไฟฟ้า 270.00 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน 178.71 เซนติโมลของประจุต่อกิโลกรัม ความสามารถในการอุ้มน้ำ

มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 31.16 - 31.28 เปอร์เซ็นต์ และค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 70.00 - 74.00 ซึ่งมีคุณสมบัตินำมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตร เมื่อพิจารณาเกณฑ์มาตรฐานสำหรับ ไบโอชาร์ที่ใช้ในดินของ World Biochar Certificate (2023) (ตารางผนวกที่ 1) สำหรับการนำไปทดลองด้านการปลูกพืช จากการใช้ไบโอชาร์แกลบทดสอบปลูกต้นคะน้า มีแนวโน้มการเจริญเติบโตพืชดีกว่าการไม่ใช้ไบโอชาร์ มีค่าความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการผลิตไบโอชาร์แกลบที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม จะส่งผลให้ไบโอชาร์แกลบมีคุณสมบัติที่ดีสามารถแก้ไขปัญหาคอนเดนของดิน (ประภัสสร และคณะ, 2563) และผลการศึกษาของ Liang *et al.* (2006) พบว่า การใช้ไบโอชาร์ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการทางชีวเคมีในดิน และการหมุนเวียนธาตุอาหาร ซึ่งปริมาณของไบโอชาร์สูงจะมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและประจุลบได้ดีที่ผิวของไบโอชาร์ จะมีผลต่อการดูดซับธาตุอาหารเข้าไปในอนุภาคของไบโอชาร์ ซึ่งการแลกเปลี่ยนอยู่ภายใต้อุณหภูมิ ความชื้น และการมีปฏิสัมพันธ์ร่วมกันของพื้นที่ผิวไบโอชาร์ และอนุภาคดินเหนียว ตัวอย่างเช่น จากรายงานการใช้ไบโอชาร์แกลบในการปรับปรุงบำรุงดิน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน และเพิ่มผลผลิตข้าวไร่ ในพื้นที่ทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ในระหว่างปี 2007 ช่วงฤดูฝน พบว่า การใช้ไบโอชาร์แกลบอัตรา 640 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับการใช้ปุ๋ยเคมี ช่วยเพิ่มสภาพน้ำของดินและการอิมมัตด้วยน้ำในช่วงบนของดิน และเพิ่มการหมุนเวียนในท่อลำเลียงน้ำและอาหารในไซเลม (xylem) ของต้นข้าว ทำให้ผลผลิตข้าวสูงขึ้นในพื้นที่ที่มีฟอสฟอรัสต่ำ และช่วยในการตอบสนองต่อไนโตรเจน และปุ๋ยเคมีไนโตรเจน และฟอสฟอรัส (Hidetoshi *et al.*, 2009) ซึ่งให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับรายงานของ Liang *et al.* (2006) การใส่ไบโอชาร์ลงดินช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน และสามารถเพิ่มความจุความชื้นสนามของดินด้วย (Joseph *et al.*, 2007) และจากรายงานของ Masulili *et al.* (2010) การใช้ไบโอชาร์แกลบที่มีความชื้น 4.96 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 8.70 และค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน 17.57 เซนติโมลของประจุต่อกิโลกรัม และเมื่อใส่ลงดินอัตรา 15 ตันต่อเฮกตาร์ หรือประมาณ 2.45 ตันต่อไร่ มีผลให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินลดลง ค่าความพรุน ความชื้น ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณฟอสฟอรัส ปริมาณโพแทสเซียม และปริมาณแคลเซียมที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น อีกทั้งคุณสมบัติด้านรูพรุนพื้นที่ผิว และกักเก็บความชื้นสูงขึ้น ส่งเสริมความเป็นประโยชน์ทางชีวภาพในดินและบริเวณรากพืช เช่น การใช้ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับเชื้อจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต ส่งผลต่อการดูดใช้ฟอสฟอรัสของพืช ส่งเสริมการเจริญเติบโต สร้างมวลชีวภาพ และเพิ่มผลผลิตพืช และช่วยเก็บรักษาความมีชีวิตรอดของจุลินทรีย์ในสภาพแวดล้อมได้นานถึง 6 เดือน (Husna *et al.*, 2019)

3) การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์แกลบเป็นวัสดุพาหะของปุ๋ยชีวภาพ

คุณภาพของปุ๋ยชีวภาพประการหนึ่งที่สำคัญนั้น หากพิจารณาจากวัสดุพาหะที่มีประสิทธิภาพสำหรับการผลิตปุ๋ยชีวภาพ เพื่อการส่งเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในดิน จากการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์เป็นวัสดุพาหะ ซึ่งคุณสมบัติเด่นของไบโอชาร์ คือ มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ในดิน สามารถเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยให้กับเซลล์จุลินทรีย์ที่มีขนาด 0.5 - 5 ไมโครเมตร ประกอบด้วยแบคทีเรียเป็นส่วนใหญ่ เชื้อรา แอคติโนมัยซิส และสาหร่าย มีขนาด 2 - 20 ไมโครเมตร ซึ่งในไบโอชาร์มีขนาดรูพรุนที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ สามารถปกป้องเซลล์จุลินทรีย์จากพวกสัตว์นักล่า และความแห้งแล้ง อีกทั้งให้คาร์บอนเป็นแหล่งพลังงาน และแร่ธาตุ จากโครงสร้างรูพรุนพื้นที่ผิวสูงสามารถดูดซับอินทรีย์วัตถุที่ละลายน้ำ ก๊าซ และสารอนินทรีย์ ซึ่งเป็นทั้งแหล่งอาหารและแหล่งที่อยู่อาศัยที่ดีเยี่ยมสำหรับจุลินทรีย์ในการเคลื่อนย้าย เติบโต และขยายพันธุ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแบคทีเรียแอคติโนมัยซิส และเชื้อรา เช่น อาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซา (Thies and Rillig, 2009) ด้วยคุณสมบัติของไบโอชาร์แกลบมีโครงสร้างรูพรุนที่เหมาะสมกับแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์ และมีคาร์บอนอยู่ด้วย ใช้เป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ จากการศึกษาเพื่อใช้เป็นวัสดุพาหะของปุ๋ยชีวภาพ ได้แก่ แบคทีเรียละลายฟอสเฟต และแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ พบว่า ไบโอชาร์แกลบช่วยคงความมีชีวิตรอดของแบคทีเรียได้สูงสุดใน 6 สัปดาห์ มีปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟต 3.3×10^7 CFU ต่อกรัม และแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ 5.4×10^7 CFU ต่อกรัม คงความมีชีวิตรอดของแบคทีเรียได้ดีกว่าไบโอชาร์จากกะลามะพร้าว และเปลือกผลปาล์ม (Maftuah *et al.*, 2020) และจากการศึกษาการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์แกลบเป็นวัสดุพาหะในการตรึงเซลล์แบคทีเรีย *P. stutzeri* ใช้ประโยชน์ในการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน พบว่า มีความสามารถในการขจัดโลหะสูงสุดที่ 95 เปอร์เซ็นต์ของแคดเมียม และ 92 เปอร์เซ็นต์ของนิกเกิล มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าเซลล์อิสระ ซึ่งอาจเกิดจากการดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออน การเกิดภาวะเชิงซ้อน การตกตะกอน และการสะสมทางชีวภาพที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งเกิดจากตัวพาไบโอชาร์และแบคทีเรีย ไบโอชาร์แกลบทำหน้าที่เป็นทั้งตัวดูดซับและตัวพาที่ให้สารอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เป็นวิธีการที่มีความคุ้มค่าและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Manikandan and Nair, 2023) และจากรายงานของ El-Naggar *et al.* (2022) พบว่า การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์แกลบ อัตรา 1.6 - 4.8 ตันต่อไร่ มีผลให้อินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำได้ในดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากไบโอชาร์แกลบช่วยเพิ่มความเสถียรของคาร์บอนในดิน ช่วยเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดินที่ละลายน้ำได้ และเพิ่มความหลากหลายของชุมชนจุลินทรีย์ในดิน ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่ม Proteobacteria มีปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้น 14.2 เปอร์เซ็นต์ และพบแบคทีเรียแกรมลบที่อยู่ในกลุ่ม Planctomycetes และกลุ่ม Crenarchaeota เป็นพวกชอบอุณหภูมิสูง มีปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้น 84.7 และ 35.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายหลังการใส่ไบโอชาร์ในดินป่าไผ่ระยะเวลา 262 วัน ซึ่งชี้ให้เห็น

ได้ว่าไบโอชาร์แกลบมีโครงสร้างรูพรุนที่เหมาะสมในการเป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์ มีแหล่งคาร์บอนที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ และเป็นวัสดุพาหะของปุ๋ยชีวภาพในการส่งเสริมระบบนิเวศทางชีวภาพในดินได้เป็นอย่างดี

4) กระบวนการผลิตไบโอชาร์แกลบด้วยเตาเผาแบบท่อปูน

ฐานข้อมูลการผลิตไบโอชาร์แกลบที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเตาเผาแบบท่อปูน สำหรับงานวิจัยนี้ แสดงดังภาพที่ 10 ลักษณะเตาเผาแบบท่อปูน สำหรับการผลิตไบโอชาร์แกลบ มีขั้นตอนการผลิตไบโอชาร์แกลบ ดังนี้

- (1) ใส่ตะแกรงเหล็กลงในเตาเผาให้อยู่ในระดับเหนือท่ออากาศเข้าด้านล่าง
- (2) ใส่แกลบลงในเตาเผาเกลี่ยให้เรียบเสมอ จนระดับผิวบนของแกลบอยู่ต่ำกว่าท่ออากาศด้านบน 2 - 3 เซนติเมตร ใช้แกลบประมาณ 50 กิโลกรัม
- (3) ใส่ฟางข้าวหนาประมาณ 10 เซนติเมตร ลงไปบนแกลบ เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาแกลบ
- (4) จุดไฟที่ฟางข้าว 4 - 5 จุด ทั้งบริเวณรอบ ๆ ขอบเตา และตรงกลาง เมื่อแกลบติดดีแล้วจึงปิดฝาถัง
- (5) เมื่อแกลบไหม้จนหมด หรือไฟไหม้มาถึงตะแกรงเหล็ก แสดงว่าแกลบเปลี่ยนสภาพ สังเกตได้จากควันไฟสีขาวเริ่มเปลี่ยนเป็นสีฟ้า ให้ปิดฝาท่ออากาศเข้าด้านล่าง และปล่อยควัน และอีก 5 - 10 นาที ควันไฟสีฟ้าจะอ่อนลงเป็นควันใส สภาวะที่ใช้ในการเผาอุณหภูมิ 400 - 450 องศาเซลเซียส
- (6) รอให้เตาเย็นลงทิ้งไว้ข้ามคืน เปิดนำไบโอชาร์ไปใช้ประโยชน์



ภาพที่ 10 ลักษณะเตาเผาแบบท่อปูนสำหรับการผลิตไบโอชาร์แกลบ

ที่มา: การผลิตไบโอชาร์แกลบจากงานวิจัยฉบับนี้

5) องค์ประกอบสารอินทรีย์ คุณสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของไบโอชาร์แกลบ

คุณสมบัติของไบโอชาร์แกลบจากสถานะที่ใช้ในการเผาอุณหภูมิ 400 - 450 องศาเซลเซียส ด้วยเตาเผาแบบท่อปูนซีเมนต์ สำหรับงานวิจัยนี้จากค่าวิเคราะห์ไบโอชาร์แกลบ มีคุณสมบัติประกอบด้วยค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 9.60 มีสมบัติเป็นด่าง ค่าการนำไฟฟ้า 0.50 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด 64.50 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 0.70 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 0.20 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด 1.00 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณแคลเซียมทั้งหมด 0.01 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมด 0.10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณกำมะถันทั้งหมด 0.10 เปอร์เซ็นต์ และจากรายงานของ Asadi *et al.* (2021) ไบโอชาร์แกลบจะมีองค์ประกอบของไฮโดรเจน 27.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซิลิกา 169.20 กรัมต่อกิโลกรัม ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน 21.9 เซนติโมลของประจุต่อกิโลกรัม ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area; SSA) 26.90 ตารางเมตรต่อกิโลกรัม และเถ้า 36.70 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบสารอินทรีย์ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของไบโอชาร์แกลบ

สมบัติของไบโอชาร์แกลบ	ค่าวิเคราะห์
ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง	9.60
ค่าการนำไฟฟ้า (dS/m)	0.50
ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (%)	64.50
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (%)	0.70
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (%)	0.20
ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (%)	1.00
ปริมาณแคลเซียมทั้งหมด (%)	0.01
ปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมด (%)	0.10
ปริมาณกำมะถันทั้งหมด (%)	0.10
¹ ไฮโดรเจน (mg/kg)	27.30
¹ ซิลิกา (g/kg)	169.20
¹ ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cmol/kg)	21.90
¹ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ(m ² /g)	26.90
¹ เถ้า (%)	36.70

ที่มา: ¹Asadi *et al.* (2021)

6) การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์กลบในลักษณะเนื้อดินที่แตกต่างกัน

ไบโอชาร์กลบสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน และเพิ่มผลผลิตพืช จากรายงานการนำไบโอชาร์ไปใช้ประโยชน์ในลักษณะเนื้อดินที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4) ดังนี้ การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์ในเนื้อดินทรายปนดินร่วนสำหรับการปลูกข้าว จากการใช้ไบโอชาร์กลบ อัตรา 1.6 ตันต่อไร่ ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นผลผลิตข้าว เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน ได้แก่ ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณฟอสฟอรัส ปริมาณโพแทสเซียม ปริมาณแคลเซียม และช่วยเพิ่มปริมาณน้ำในดิน (Masulili *et al.*, 2010) ส่วนในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย จากการใช้ไบโอชาร์กลบ อัตรา 0.5 - 1.92 ตันต่อไร่ ส่งผลต่อการเพิ่มผลผลิตข้าว ด้านสมบัติดินเพิ่มค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด และลดความหนาแน่นรวมของดิน (Oladele, 2019) สำหรับในเนื้อดินร่วนเหนียว จากการใช้ไบโอชาร์กลบ อัตรา 1.6 และ 3.6 ตันต่อไร่ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพต้นข้าวโพด ด้านสมบัติดินเพิ่มค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด ปริมาณไนโตรเจน ปริมาณฟอสฟอรัส และเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ (Singh *et al.*, 2018) และในสภาพดินกรด จากการใช้ไบโอชาร์กลบ อัตรา 1.6 ตันต่อไร่ สำหรับการปลูกถั่วเหลือง สามารถเพิ่มมวลชีวภาพต้นและราก เพิ่มผลผลิตถั่วเหลือง ด้านสมบัติดินเพิ่มค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (Oka *et al.*, 1993) ในดินเปรี้ยวจัด จากการใช้ไบโอชาร์กลบ อัตรา 3 ตันต่อไร่ เพิ่มผลผลิตสำหรับการปลูกขมิ้นชัน ด้านสมบัติดินเพิ่มค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณฟอสฟอรัส ปริมาณโพแทสเซียม และปริมาณแคลเซียม (บรรเจิดลักษณ์ และ นวลจันทร์, 2560) ในดินต่าง จากการใช้ไบโอชาร์กลบ อัตรา 3.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของดิน สำหรับการปลูกถั่วเลนทิลสามารถเพิ่มมวลชีวภาพของราก และลดความหนาแน่นรวมของดิน (Abrishamkesh *et al.*, 2015) และรายงานการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ดินเค็ม พบว่า การใช้ไบโอชาร์กลบ อัตรา 3,200 กิโลกรัมต่อไร่ สำหรับการปลูกข้าว สามารถลดค่าการนำไฟฟ้าของดิน ช่วยลดความเค็มของดิน เพิ่มปริมาณธาตุอาหารในดิน ได้แก่ ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม และเพิ่มผลผลิตข้าว ทั้งนี้เนื่องจากไบโอชาร์มีความสามารถในการดูดซับประจุของโซเดียม และลดความเป็นพิษของโซเดียมในดินเค็มได้ (Wijitkosum, 2020) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการใช้ไบโอชาร์กลบ อัตรา 600 กิโลกรัมต่อไร่ สำหรับการปลูกข้าวในพื้นที่ดินเค็ม ช่วยเพิ่มผลผลิตข้าว อีกทั้งสามารถลดค่าการนำไฟฟ้า ลดความหนาแน่นรวมของดิน และเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสในดิน (วุฒิชัย และคณะ, 2567)

ตารางที่ 4 อัตราการใช้ไบโอชาร์กลับในลักษณะเนื้อดินที่ต่างกัน

อัตราการใช้	ลักษณะเนื้อดิน	พืช	ผลต่อพืชและสมบัติดิน	แหล่งที่มา
1.6 ตันต่อไร่	ดินทรายปน ดินร่วน	ข้าว	เพิ่มผลผลิตเมล็ด เพิ่ม pH CEC OC เพิ่ม P K Ca เพิ่มปริมาณน้ำในดิน	Masulili <i>et al.</i> (2010)
0.5 - 2 ตันต่อไร่	ดินร่วนเหนียว ปนทราย	ข้าว ข้าวโพด	เพิ่มผลผลิต เพิ่ม pH CEC OC Total N C/N ratio ลดความหนาแน่นรวมของดิน	Oladele (2019)
1.6 และ 3.2 ตันต่อไร่	ดินร่วนเหนียว	ข้าวโพด	เพิ่มมวลชีวภาพต้น เพิ่ม pH Total C N P เพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ	Singh <i>et al.</i> (2018)
1.6 ตันต่อไร่	ดินกรด	ข้าวโพด	เพิ่มความสูง น้ำหนักแห้งต้น และผลผลิต เพิ่ม pH P K Ca Mg	Mehnaz <i>et al.</i> (2022)
1.6 ตันต่อไร่	ดินทราย ดินกรด	ถั่วเหลือง	เพิ่มมวลชีวภาพต้น ราก และ ผลผลิต เพิ่ม pH CEC OC	Oka <i>et al.</i> (1993)
3 ตันต่อไร่	ดินเปรี้ยวจัด	ขมิ้นชัน	เพิ่มผลผลิต เพิ่ม pH OM P K Ca	บรรเจิดลักษณ์ และ นวลจันทร์ (2560)
3.3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ดินต่าง	ถั่ว	เพิ่มมวลชีวภาพของราก ลดความหนาแน่นรวมของดิน	Abrishamkesh <i>et al.</i> (2015)
3.2 ตันต่อไร่	ดินเค็ม	ข้าว	เพิ่มผลผลิตข้าว เพิ่ม P K ลดค่า EC	Wijitkosum (2020)
600 กิโลกรัม ต่อไร่ ร่วมกับ ปุ๋ยเคมี	ดินเค็ม	ข้าว	เพิ่มผลผลิตข้าว เพิ่ม P ลดค่า EC ลดความหนาแน่นรวมของดิน	วุฒิชัย และคณะ (2567)

7) ประเทศที่นิยมการใช้ไบโอชาร์และชนิดของวัตถุดิบที่นำมาผลิตไบโอชาร์

ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์เพื่อปรับปรุงดินกันอย่างแพร่หลายจากการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร กากตะกอนของเสีย และของเสียจากฟาร์ม มาผลิตเป็นไบโอชาร์ในระดับอุตสาหกรรม และมีกำลังการผลิตเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งความต้องการไบโอชาร์ในตลาดที่เพิ่มขึ้นนั้น เนื่องมาจากคุณสมบัติในการกักเก็บคาร์บอนระยะยาวในดิน ปัจจุบันมีนวัตกรรมการผลิตไบโอชาร์ที่ทันสมัยในระดับอุตสาหกรรม มีหลายประเทศที่มีการผลิตไบโอชาร์เพื่อใช้ประโยชน์ภายในประเทศและการส่งออก แสดงรายละเอียดประเทศผู้ผลิตไบโอชาร์ และชนิดของวัตถุดิบที่นำมาผลิตไบโอชาร์ดังตารางที่ 5 ดังนี้ ประเทศในทวีปเอเชียที่นิยมใช้ไบโอชาร์ ได้แก่ ประเทศจีน อินเดีย ญี่ปุ่น มาเลเซีย ออสเตรเลีย และสิงคโปร์ มีรายงานส่วนแบ่งตลาดไบโอชาร์เอเชียแปซิฟิก คาดการณ์การเติบโตของปริมาณและรายได้ในระดับภูมิภาคและประเทศ โดยชนิดของวัตถุดิบที่นำมาผลิตไบโอชาร์ส่วนใหญ่ ได้แก่ วัตถุดิบที่มาจากกากตะกอนน้ำเสีย เศษอาหาร ของเสียจากฟาร์ม และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร รวมทั้งไบโอชาร์ที่ได้จากเศษเหลือจากการผลิตพลังงาน ส่วนประเทศในทวีปยุโรปที่นิยมใช้ไบโอชาร์ ได้แก่ ประเทศสหราชอาณาจักร เยอรมนี ฟินแลนด์ สเปน นอร์เวย์ อิตาลี เดนมาร์ก และสวีเดนแลนด์ มีรายงานส่วนแบ่งตลาดไบโอชาร์สูง และใช้วัตถุดิบที่ผลิตมาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น เมล็ดพืช ถั่วองุ่น เปลือกไม้ ขี้เลื่อย เศษอาหาร มูลสัตว์ และกากตะกอนของเสียอุตสาหกรรมเกษตร เป็นต้น

ตารางที่ 5 ประเทศผู้ผลิตไบโอชาร์ และชนิดของวัตถุดิบที่นำมาผลิตไบโอชาร์

ประเทศ	ชนิดของวัตถุดิบ	แหล่งที่มา
เอเชีย		
จีน อินเดีย	- วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร	Asia Pacific
ญี่ปุ่น มาเลเซีย	- ของเสียจากฟาร์ม	Biochar Market
ออสเตรเลีย	- กากตะกอนน้ำเสีย	(2023)
สิงคโปร์	- เศษอาหาร	
สหรัฐอเมริกา	- กิ่งและเศษไม้	Kai (2021)
	- วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร	
	- ของเสียจากฟาร์ม	
	- กากตะกอนน้ำเสีย	

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ประเทศ	ชนิดของวัตถุดิบ	แหล่งที่มา
ยุโรป		
สหราชอาณาจักร	- วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น	European Biochar
เยอรมนี ฟินแลนด์	เมล็ดพืช ถั่วองุ่น เปลือกไม้ ชี้อ้อย	Foundation
สเปน นอร์เวย์	- กากตะกอนของเสียอุตสาหกรรมเกษตร	(2012)
อิตาลี เดนมาร์ก	- เศษอาหาร	
สวีตเซอร์แลนด์	- มูลสัตว์	

4.5.2 การใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้อุตสาหกรรมเกษตรสำหรับเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์

1) การใช้ประโยชน์กากน้ำตาลสำหรับเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์

กากน้ำตาล มีองค์ประกอบแหล่งอาหารสำคัญที่มีประโยชน์ต่อจุลินทรีย์ คือ สารอินทรีย์คาร์บอน เนื่องจากเป็นแหล่งอาหารสำคัญของจุลินทรีย์ หรือเป็นตัวเริ่มต้น สูงถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ประโยชน์ของกากน้ำตาลนอกจากเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ระยะเริ่มต้นแล้ว กากน้ำตาลยังทำหน้าที่ดูดน้ำเลี้ยงออกจากเซลล์พืชหรือเซลล์สัตว์ ทำให้เซลล์เหี่ยวและแตก จึงง่ายต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ส่งผลให้กระบวนการหมักของปุ๋ยน้ำเกิดได้รวดเร็วขึ้น (พูนสุข, 2558) และจากรายงานของจันจิรา และคณะ (2559) ศึกษาวิธีการขยายปริมาณหัวเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว พบว่า เชื้อจุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน สามารถขยายปริมาณเชื้อในน้ำที่มีส่วนผสมของกากน้ำตาลความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และเติมออกซิเจนในถังขยายเชื้อนาน 48 ชั่วโมง สามารถเพิ่มปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ 6.62 log CFU ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียสร้างฮอร์โมน 6.74 log CFU ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียละลายฟอสเฟต 8.19 log CFU ต่อมิลลิลิตร และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 8.53 log CFU ต่อมิลลิลิตร โดยส่งเสริมให้มีการใช้ประโยชน์จากกากน้ำตาลความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ในการขยายเชื้อจุลินทรีย์จากสารเร่งซุปเปอร์ พด. 6 เพื่อเป็นแหล่งอาหารและพลังงานสำหรับการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2562ข) และจากรายงานของอภิเชษฐ และคณะ (ม.ป.ป.) การศึกษาสูตรอาหารในการผลิตแบคทีเรียกรดแลกติก *Lactobacillus acidophilus* TISTR 1338 โดยใช้แหล่งคาร์บอนจากกากน้ำตาล และแหล่งไนโตรเจนจากกากเซลล์ยีสต์ ทดแทนการเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ De Man Rogosa and Sharpe (MRS) พบว่า แหล่งคาร์บอน และแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย คือ ปริมาณกากน้ำตาลที่มีความเข้มข้น 11 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณกากเซลล์ยีสต์ที่มีความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้ปริมาณเซลล์สูงสุดเท่ากับ 2.14×10^9 CFU ต่อมิลลิลิตร

เป็นเวลา 22 ชั่วโมง และปริมาณความเข้มข้นของกากน้ำตาล 2 เปอร์เซ็นต์ เป็นแหล่งอาหารและเป็นแหล่งคาร์บอนต่อการเจริญเติบโตของ *A. vinelandii* สูงที่เวลาเลี้ยงเชื้อ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปริมาณเชื้อลดลง (การุจิร, 2556)

2) การใช้ประโยชน์น้ำกากส่าสำหรับเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์

น้ำกากส่า มีองค์ประกอบของธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญของจุลินทรีย์ สามารถใช้เป็นแหล่งอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ จากรายงานของ Omar *et al.* (2002) พบว่าความเข้มข้นของน้ำกากส่ามีผลต่อการเจริญเติบโตเชื้อตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ เพื่อผลิตเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อจากน้ำกากส่า เพื่อเป็นวัสดุปรับปรุงดินในการเพิ่มผลผลิตถั่วปากอ้า (faba bean) ภายใต้การจัดการน้ำระบบชลประทาน จากการใส่เชื้อจุลินทรีย์ที่ตรึงไนโตรเจนอิสระ ได้แก่ *A. brasilense*, *B. polymyxa* และ *A. chroococcum* ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำกากส่า 6 8 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในการขยายปริมาณหัวเชื้อ ทดสอบโดยการคลุกเมล็ด และใส่ลงดิน 0.5 1.0 และ 1.5 ตัน ในพื้นที่ 2.62 ไร่ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของผลผลิตถั่วปากอ้า สูงกว่าค่ารับควบคุม 33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทดสอบการคลุกเมล็ด และการใส่ลงดินรวมกับการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนที่ 2 ระดับ คือ อัตราครึ่งหนึ่ง และอัตราเต็มจากอัตราแนะนำ พบว่า การใส่จุลินทรีย์ทุกระดับความเข้มข้นรวมกับการใส่ปุ๋ยเคมีอัตราครึ่งหนึ่งของอัตราแนะนำ ส่งผลต่อการเพิ่มผลผลิตถั่วปากอ้า 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ารับควบคุม และจากการศึกษาการใช้กากส่าในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ เป็นส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อ *P. tolaasii* ซึ่งเป็นเชื้อสร้างสารส่งเสริมการเจริญเติบโต ส่งเสริมการละลายของฟอสเฟต ผลิตฮอร์โมน และสร้างสารปฏิชีวนะ พบว่า การใส่น้ำกากส่าสำหรับเลี้ยงเชื้อจากธรรมชาติ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สาร $MgSO_4$ 0.1 กรัมต่อลิตร และสาร KH_2PO_4 1 กรัมต่อลิตร มีผลให้ลดการใส่ปริมาณสารเคมีลง 25 เปอร์เซ็นต์ และการใส่น้ำกากส่าสำหรับเลี้ยงเชื้อจากธรรมชาติที่ราคาถูก เป็นการประยุกต์ใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพเพื่อลดต้นทุนการผลิต (Emilce *et al.*, 2009) และจากการศึกษาการใช้ประโยชน์น้ำกากส่าเพื่อผลิตปุ๋ยชีวภาพตรึงไนโตรเจนละลายฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และสร้างฮอร์โมนพืช พบว่า การใช้อัตราส่วนของน้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผสมกับ $MgSO_4$ 0.1 กรัมต่อลิตร และ KH_2PO_4 1 กรัมต่อลิตร ผสมให้เข้ากัน แล้วใส่หัวเชื้อจุลินทรีย์จากปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน อัตรา 1 เปอร์เซ็นต์ แล้วเติมออกซิเจนด้วยเครื่องปั๊มออกซิเจน เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ 3.10×10^6 CFU ต่อมิลลิลิตร ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟต 7.08×10^8 CFU ต่อมิลลิลิตร ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 7.94×10^8 CFU ต่อมิลลิลิตร และปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมน 2.51×10^6 CFU ต่อมิลลิลิตร ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์คงที่ได้นาน 21 วัน และจากการทดสอบประสิทธิภาพในแปลงทดลอง พบว่า การใส่ปุ๋ยชีวภาพชนิดเหลวจากน้ำกากส่าทุก 4 เดือน ร่วมกับการใส่ปุ๋ยเคมี 50 เปอร์เซ็นต์

อย่างต่อเนื่อง 2 ปี มีผลต่อการสะสมปริมาณโพแทสเซียมในดิน และการสะสมปริมาณไนโตรเจนในใบอ้อยสูงสุดที่อายุ 6 เดือน เพิ่มผลผลิตอ้อยสด 18.40 ตันต่อไร่ เพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลผลิตน้ำตาล 3.09 ตันต่อไร่ เพิ่มขึ้น 31.49 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม ขณะที่การใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดิน 100 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลผลิตอ้อยสด 18.80 ตันต่อไร่ ให้ผลผลิตน้ำตาล 3.21 ตันต่อไร่ (จันจิรา และ นวลจันทร์, 2562)

4.6 วิธีดำเนินการ

4.6.1 วัสดุอุปกรณ์

- 1) เครื่องวัดความเขียวใบ (chlorophyll meter : SPAD - 502 model) (Minolta Co., Ltd., JAPAN)
- 2) เครื่องวัดพื้นที่ใบ (leaf area meter) (CID Bio - Science, CI203)
- 3) อาหาร Burk's N - free medium
- 4) อาหาร Pikovskaya's agar medium
- 5) อาหาร sucrose minimal salts agar medium
- 6) อาหาร glucose peptone agar
- 7) ไบโอสชาร์แกลบ (rice husk biochar)
- 8) ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 (bio - fertilizer LDD 12)
- 9) น้ำกากส่า (distillery slop)
- 10) กากน้ำตาล (molasses)
- 11) ปุ๋ยเคมี (chemical fertilizer) ได้แก่ สูตร 46 - 0 - 0 สูตร 0 - 46 - 0 และสูตร 0 - 0 - 60
- 12) เมล็ดพันธุ์คะน้ายอด (Chinese kale)

4.6.2 วิธีดำเนินการ

1) การทดลองที่ 1 การศึกษาอัตราส่วนผสมของน้ำกากส่าต่อกากน้ำตาลที่เหมาะสม สำหรับเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อในการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในห้องปฏิบัติการ

(1) วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ประกอบด้วย 8 ตำรับการทดลอง จำนวน 3 ซ้ำ ดังนี้

ตำรับการทดลองที่ 1 = น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์

ตำรับการทดลองที่ 2 = กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์

ตำรับการทดลองที่ 3 = น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล

5 เปอร์เซ็นต์

ตำรับการทดลองที่ 4 = น้ำกากส่า 20 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล
5 เปอร์เซ็นต์

ตำรับการทดลองที่ 5 = น้ำกากส่า 30 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล
5 เปอร์เซ็นต์

ตำรับการทดลองที่ 6 = น้ำกากส่า 40 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล
5 เปอร์เซ็นต์

ตำรับการทดลองที่ 7 = น้ำกากส่า 50 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล
5 เปอร์เซ็นต์

ตำรับการทดลองที่ 8 = น้ำกากส่า 95 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล
5 เปอร์เซ็นต์

(2) ขั้นตอนการดำเนินงาน

(2.1) นำวัสดุที่ใช้ในการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ได้แก่ น้ำกากส่า และกากน้ำตาล ไปทำการทดสอบวิเคราะห์ธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ธาตุอาหารรอง ได้แก่ แคลเซียม และแมกนีเซียม ความเป็นกรดเป็นด่าง และค่าการนำไฟฟ้า รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

ชนิดวัสดุ	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	pH	EC
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(1 : 1)	(dS/m)
น้ำกากส่า	0.080	0.01	0.30	0.11	0.05	4.85	8.48
กากน้ำตาล	0.725	0.07	0.62	-	-	4.87	20.81

(2.2) การเตรียมการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ดังนี้

ตำรับการทดลอง 1 ใส่ น้ำ 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

มิลลิลิตร นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 0.20 กรัม แล้วนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง

(2.3) ปริมาณธาตุอาหารที่ใช้ในการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว เมื่อประเมินองค์ประกอบทางเคมีของอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวในแต่ละตำรับการทดลอง รายละเอียดในตารางผนวกที่ 2

(2.4) ปริมาณแบคทีเรียแต่ละชนิดในผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน ประกอบด้วยแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ 7.792 log CFU ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียละลายฟอสเฟต 8.982 log CFU ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 8.897 log CFU ต่อมิลลิลิตรและแบคทีเรียสร้างฮอโมน 7.944 log CFU ต่อมิลลิลิตร รายละเอียดในตารางผนวกที่ 3

(3) การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ตัวอย่าง

ทำการเก็บตัวอย่างภายหลังการหมักขยายเชื้อที่เวลา 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

(3.1) ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ทั้ง 4 ชนิด ดังนี้

(3.1.1) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ (nitrogen fixing bacteria, NFB) ตรวจนับเชื้อโดยวิธี dilution plate count method ทำการเลี้ยงเชื้อในอาหาร selective media สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่มีแหล่งไนโตรเจนในสูตรอาหาร Burk's N - free medium (Weaver and Danso, 1994) โดยทำการเกลี่ยเชื้อให้กระจายไปทั่วบนอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน

(3.1.2) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟต (phosphate solubilizing bacteria, PSB) ตรวจนับเชื้อโดยวิธี dilution plate count method ทำการเลี้ยงเชื้อในอาหาร selective media สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อ Pikovskaya's agar medium (Gaur, 1990) โดยทำการเกลี่ยเชื้อให้กระจายไปทั่วบนอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 - 4 วัน สังเกตวงใสรอบโคโลนี

(3.1.3) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม (potassium solubilizing bacteria, KSB) ตรวจนับเชื้อโดยวิธี dilution plate count method ทำการเลี้ยงเชื้อในอาหาร selective media สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อ sucrose minimal salts agar medium ที่มี dihydrogen potassium phosphate เป็นส่วนประกอบ และมี bromothymol blue ผสมอยู่ (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) เพื่อเป็นดัชนีบ่งชี้การผลิกรดอินทรีย์ของจุลินทรีย์ โดยทำการ

เกลี่ยเชื้อให้กระจายไปทั่วบนอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 - 4 วัน และสังเกตการเปลี่ยนสีของอาหารจากสีเขียวเป็นสีเหลือง

(3.1.4) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนให้พืช (plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) ตรวจนับเชื้อโดยวิธี dilution plate count method ทำการเลี้ยงเชื้อในอาหาร selective media สูตรอาหาร glucose peptone agar (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) โดยทำการเกลี่ยเชื้อให้กระจายไปทั่วบนอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน

(3.2) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของอาหารเลี้ยงเชื้อ ทำการเก็บตัวอย่างอาหารเลี้ยงเชื้อ 5 มิลลิลิตร วัดค่าด้วยเครื่องวัดความเป็นกรดเป็นด่าง (pH meter)

(4) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

2) การทดลองที่ 2 การศึกษาอัตราส่วนและระยะเวลาการบ่มของไบโอชาร์แกลบ กับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในห้องปฏิบัติการ

(1) วางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 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 น้ำหนักต่อปริมาตร

อัตราส่วนที่ 2 ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

อัตราส่วน 1 : 3 น้ำหนักต่อปริมาตร

อัตราส่วนที่ 3 ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

อัตราส่วน 1 : 4 น้ำหนักต่อปริมาตร

ปัจจัยที่ 2 ระยะเวลาการบ่มไบโอชาร์แกลบในปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จำนวน 3 ช่วงเวลา ดังนี้

ช่วงที่ 1 ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

ช่วงที่ 2 ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

ช่วงที่ 3 ระยะเวลา 6 ชั่วโมง

(2) ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

(2.1) นำไบโอชาร์แกลบที่ผลิตเพื่อใช้ทดสอบไปวิเคราะห์ธาตุอาหารก่อนการทดลอง ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด 64.50 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 0.70 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 0.20 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด 1.00 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณแคลเซียมทั้งหมด 0.01 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมด 0.10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณกำมะถันทั้งหมด 0.10 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 9.6 และค่าการนำไฟฟ้า 0.50 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สมบัติทางเคมีของไบโอชาร์แกลบ

ชนิด	Total							pH	EC
	C	N	P	K	Ca	Mg	S	(1 : 1)	(dS/m)
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		
ไบโอชาร์แกลบ	64.50	0.70	0.20	1.00	0.01	0.10	0.10	9.60	0.50

(2.2) การเตรียมปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ดังนี้

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

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

(2.3) การเตรียมการบ่มไบโอชาร์แกลบในปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในการดูดซับจุลินทรีย์ กำหนดระยะเวลาบ่ม 3 ช่วงเวลา ได้แก่ บ่มระยะเวลา 1 3 และ 6 ชั่วโมง ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวมีระยะเวลาบ่มนานมากเพียงพอที่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จะแทรกซึมเข้าไปในพื้นรูพรุนของไบโอชาร์ รายละเอียดดังนี้

(2.3.1) อัตราส่วนที่ 1 คือ ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร บรรจุไบโอชาร์แกลบจำนวน 100 กรัม ในปิ๊งเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเติมปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จำนวน 200 มิลลิลิตร ดำเนินการจำนวน

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

(2.3.2) อัตราส่วนที่ 2 คือ ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 3 น้ำหนักต่อปริมาตร บรรจุไบโอชาร์แกลบจำนวน 100 กรัม ในปิ๊งเกอร์ ขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเทปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จำนวน 300 มิลลิลิตร ดำเนินการจำนวน 3 ชุดการทดลอง โดยกำหนดระยะเวลาการบ่มไบโอชาร์แกลบกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ดังนี้ ชุดการทดลองที่ 1 ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 2 ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และชุดการทดลองที่ 3 ระยะเวลา 6 ชั่วโมง

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

(3) การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ตัวอย่าง

(3.1) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิด ดังนี้

(3.1.1) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ (nitrogen fixing bacteria, NFB) ตรวจนับเชื้อโดยวิธี dilution plate count method ทำการเลี้ยงเชื้อในอาหาร selective media สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่มีแหล่งไนโตรเจนในสูตรอาหาร Burk's N - free medium (Weaver and Danso, 1994) โดยทำการเกลี่ยเชื้อให้กระจายไปทั่วบนอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน

(3.1.2) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟต (phosphate solubilizing bacteria, PSB) ตรวจนับเชื้อโดยวิธี dilution plate count method ทำการเลี้ยงเชื้อในอาหาร selective media สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อ Pikovskaya's agar medium (Gaur, 1990) โดยทำการเกลี่ยเชื้อให้กระจายไปทั่วบนอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 - 4 วัน สังเกตวงใสรอบโคโลนี

(3.1.3) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม (potassium solubilizing bacteria, KSB) ตรวจนับเชื้อโดยวิธี dilution plate count method ทำการเลี้ยงเชื้อในอาหาร selective media สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อ sucrose minimal salts agar medium ที่มี dihydrogen potassium phosphate เป็นส่วนประกอบ และมี bromothymol blue

ผสมอยู่ (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) เพื่อเป็นดัชนีบ่งชี้การผลิตกรดอินทรีย์ของจุลินทรีย์ โดยทำการเกลี่ยเชื้อให้กระจายไปทั่วบนอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 - 4 วัน สังเกตการเปลี่ยนสีของอาหารจากสีเขียวเป็นสีเหลือง

(3.1.4) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนให้พืช (plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) ตรวจนับเชื้อโดยวิธี dilution plate count method) ทำการเกลี่ยเชื้อในอาหารแข็ง selective media สูตรอาหาร glucose peptone agar (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) โดยทำการเกลี่ยเชื้อให้กระจายไปทั่วบนอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน

(3.2) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

(4) การตรวจสอบการเข้าอาศัยของเซลล์จุลินทรีย์ภายในรูพรุนของไบโอชาร์เคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ดังนี้

(4.1) การเตรียมตัวอย่าง

(4.1.1) การเตรียมการบ่มไบโอชาร์เคลือบด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในการดูดซับจุลินทรีย์ นำตัวอย่างไบโอชาร์ใส่ช่องพลาสติกทึบแสง และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

(4.1.2) นำตัวอย่างไบโอชาร์เคลือบที่ผ่านการบ่มด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว แต่ละตำรับการทดลอง มาอบไล่ความชื้นในตัวอย่างให้มีความชื้นน้อยกว่า 6 เปอร์เซ็นต์ และนำตัวอย่างใส่โถแก้วดูดความชื้น (desiccator) เพื่อดูดความชื้น และนำตัวอย่างมาติดบนแท่นติดตัวอย่าง นำมาส่องกล้องเพื่อตรวจสอบการเข้าอาศัยภายในรูพรุนไบโอชาร์ของเซลล์แบคทีเรีย ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้ศึกษาพื้นผิวของตัวอย่าง โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุทำให้ได้ภาพ

(4.2) การเก็บข้อมูลภาพถ่าย

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

3) การทดลองที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์เคลือบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเจริญเติบโต และผลผลิตค่าน้ำในแปลง

(1) วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (randomized complete block design, RCBD) ประกอบด้วย 7 ดำรับทดลอง จำนวน 3 ซ้ำ ดังนี้

ดำรับการทดลองที่ 1 ไม่ใส่ปุ๋ย (control)

ดำรับการทดลองที่ 2 ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน

ดำรับการทดลองที่ 3 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตาม

ค่าวิเคราะห์ดิน + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12

ขยายเชื้อปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 4 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตาม

ค่าวิเคราะห์ดิน + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

อัตรา 300 ลิตรต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 5 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตาม

ค่าวิเคราะห์ดิน + ไบโอสชาร์กเกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ

พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 6 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตาม

ค่าวิเคราะห์ดิน + ไบโอสชาร์กเกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ

พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 7 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตาม

ค่าวิเคราะห์ดิน + ไบโอสชาร์กเกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ

พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่

หมายเหตุ งานวิจัยนี้ให้คำจำกัดความ “ไบโอสชาร์กเกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12” หมายถึง ไบโอสชาร์กเกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

(2) ขั้นตอนการดำเนินงาน

(2.1) การเตรียมปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก วิธีการตามคำแนะนำของกรมพัฒนาที่ดิน ส่วนผสมประกอบด้วยปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัม รำละเอียด 3 กิโลกรัม และหัวเชื้อจุลินทรีย์ 100 กรัม คลุกเคล้าให้เข้ากัน ปรับความชื้นให้ได้ 70 เปอร์เซ็นต์ บ่มไว้เป็นเวลา 4 วัน เมื่อวิเคราะห์ปริมาณเชื้อ ประกอบด้วยแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ 3.50×10^7 CFU ต่อกรัม แบคทีเรียละลายฟอสเฟต 1.63×10^9 CFU ต่อกรัม แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 2.40×10^9 CFU ต่อกรัม และแบคทีเรียสร้างฮอโมน 3.30×10^7 CFU ต่อกรัม

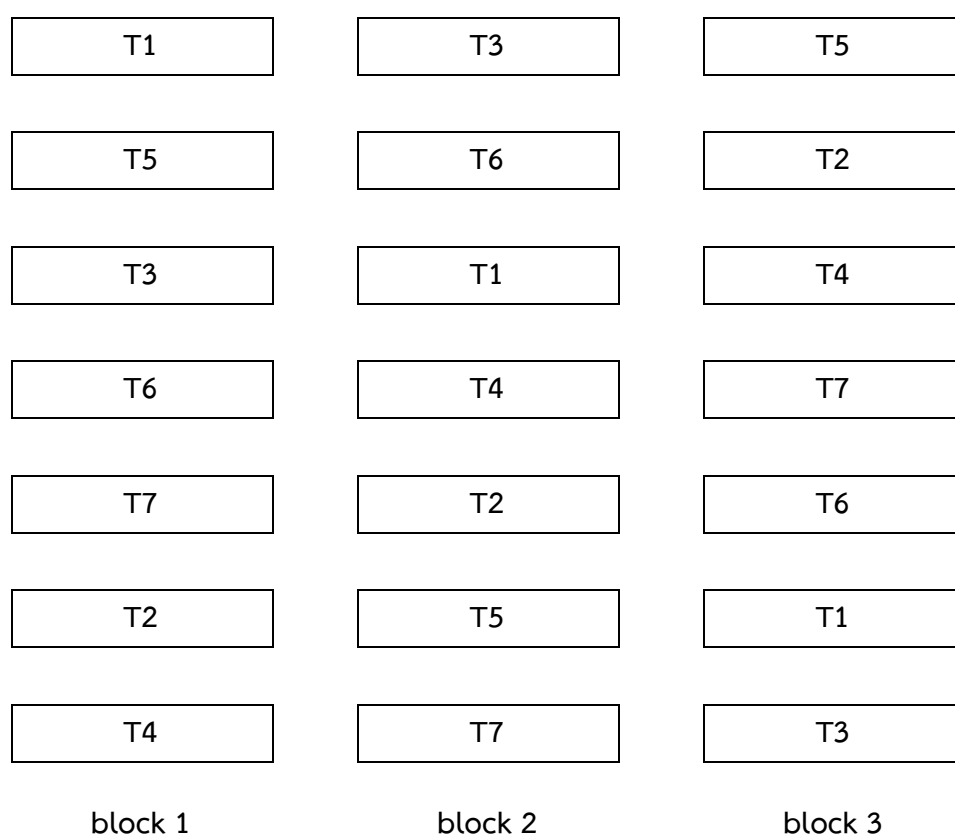
(2.2) การเตรียมปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ส่วนผสมการขยายเชื้อชนิดเหลวประกอบด้วยน้ำกากส่าความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ปรับปริมาตรด้วยน้ำครบ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หลังจากนั้นใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของ

กรมพัฒนาที่ดิน โดยใช้หัวเชื้อ 0.20 เปอร์เซ็นต์ แล้วเติมออกซิเจนด้วยเครื่องปั๊มออกซิเจนปลาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ตามผลการทดลองที่ 1 ศึกษาการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว)

(2.3) การเตรียมไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในอัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร ส่วนผสมประกอบด้วย ไบโอชาร์แกลบ 1 ส่วน ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว 2 ส่วน ผสมบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปใช้ประโยชน์ในแปลง

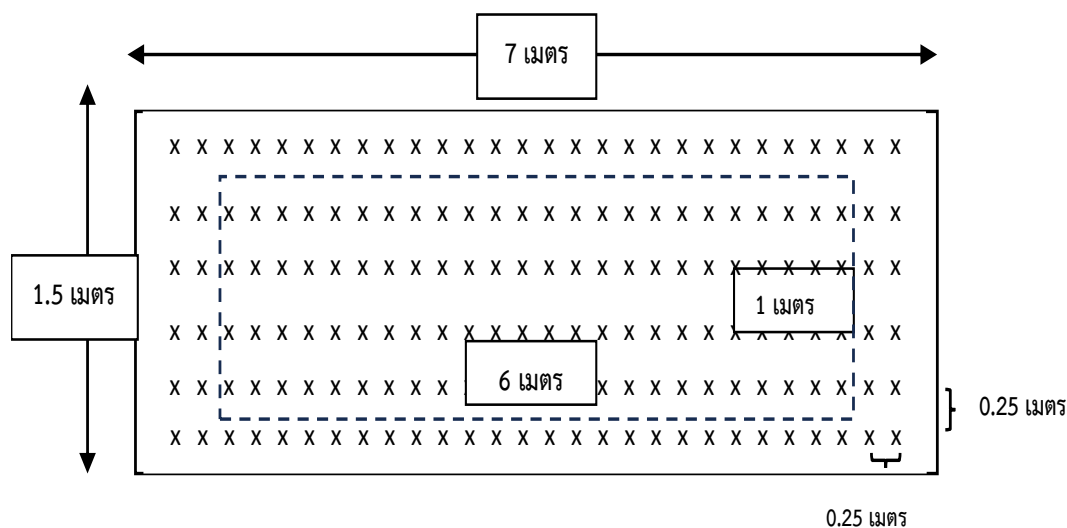
(2.4) การเตรียมแปลงทดลอง

(2.4.1) การวางแผนผังแปลงทดลองภาคสนาม แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แผนผังแปลงทดลองภาคสนาม

(2.4.2) เตรียมแปลงทดลองขนาด 1.5×7.0 เมตร จำนวน ทั้งหมด 21 แปลง ระยะระหว่างแปลง 1.0 เมตร พื้นที่เก็บข้อมูล 1.0×6.0 เมตร เว้นพื้นที่ขอบแปลง เป็นแนวแถวป้องกันไม่เก็บข้อมูล แสดงระยะปลูก พื้นที่เก็บข้อมูล และพื้นที่เก็บเกี่ยวคะแนนในแปลงย่อย ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดงระยะปลูก พื้นที่เก็บข้อมูล และพื้นที่เก็บเกี่ยวค่น้ำในแปลงย่อย

หมายเหตุ พื้นที่แปลงย่อยขนาด 1.5 x 7.0 เมตร

X หมายถึง ต้นค่น้ำระหว่างต้น 0.25 x 0.25 เมตร

--- หมายถึง ตำแหน่งพื้นที่เก็บเกี่ยว 1.0 x 6.0 เมตร

(2.5) ปลูกค่น้ำพันธุ์ยอด หยอดเป็นหลุมจำนวนแถว 6 แถว ระยะห่างระหว่างต้น 0.25 x 0.25 เมตร จำนวนต้น 28 ต้นต่อแถว และรวมทั้งหมด 168 ต้นต่อแปลงย่อย เมื่อค่น้ำอายุ 10 วัน ถอนแยกเหลือ 1 ต้นต่อหลุม และเก็บเกี่ยวผลผลิตค่น้ำที่อายุ 45 วัน ในพื้นที่เก็บเกี่ยว 1 x 6 เมตร จำนวน 96 ต้นต่อแปลงย่อย

(2.6) การใส่ปัจจัยการผลิต

การดำเนินงานทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง จำนวนการปลูก 2 รอบ ดังนี้ รอบที่ 1 ปลูกระหว่างเดือนธันวาคม - มกราคม และรอบที่ 2 ปลูกระหว่างเดือนเมษายน - พฤษภาคม

(2.6.1) การใส่ปัจจัยการผลิตจากการปลูกรอบที่ 1

โดยใช้อัตราปุ๋ยธาตุหลักสำหรับค่น้ำที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ดินตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร (2548) จากผลการวิเคราะห์ดินก่อนการทดลอง ดังนี้

ปริมาณอินทรีย์วัตถุ 1.51 เปอร์เซ็นต์ ต้องใช้ปุ๋ย
ไนโตรเจน 15 กิโลกรัมต่อไร่ : ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 32.61 กิโลกรัมต่อไร่ ในพื้นที่แปลงย่อย
10.50 ตารางเมตร ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 214.00 กรัมต่อแปลงย่อย

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 271.07 มิลลิกรัมต่อ
กิโลกรัม ต้องใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัส 5 กิโลกรัมต่อไร่ : ใช้สูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 10.87 กิโลกรัมต่อไร่
ในพื้นที่แปลงย่อย 10.50 ตารางเมตร ใช้สูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 71.33 กรัมต่อแปลงย่อย

ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ 157.00 มิลลิกรัม
ต่อกิโลกรัม ต้องใช้ปุ๋ยโพแทสเซียม 5 กิโลกรัมต่อไร่ : ใช้สูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 8.33 กิโลกรัมต่อไร่
ในพื้นที่แปลงย่อย 10.50 ตารางเมตร ใช้สูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 54.67 กรัมต่อแปลงย่อย

ดำเนินการทดลองที่ 1 แปลงควบคุมไม่ใส่ปัจจัย

ดำเนินการทดลองที่ 2 แบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1
เมื่อค่น้ำอายุ 10 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 107.00 กรัมต่อแปลงย่อย ร่วมกับสูตร 0 - 46 - 0
อัตรา 71.33 กรัมต่อแปลงย่อย และสูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 54.67 กรัมต่อแปลงย่อย ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมี
ห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 107.00 กรัมต่อแปลงย่อย

ดำเนินการทดลองที่ 3

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน
โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อค่น้ำอายุ 10 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25
กรัมต่อแปลงย่อย ร่วมกับสูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 53.50 กรัมต่อแปลงย่อย และสูตร 0 - 0 - 60 อัตรา
41.00 กรัมต่อแปลงย่อย ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา
80.25 กรัมต่อแปลงย่อย

- ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ที่ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก 300
กิโลกรัมต่อไร่ ใส่เพียงครั้งเดียวคลุกเคล้าลงดินให้ทั่วในแปลงก่อนปลูก

ดำเนินการทดลองที่ 4

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน
โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อค่น้ำอายุ 10 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25
กรัมต่อแปลงย่อย ร่วมกับสูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 53.50 กรัมต่อแปลงย่อย และสูตร 0 - 0 - 60 อัตรา
41.00 กรัมต่อแปลงย่อย ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา
80.25 กรัมต่อแปลงย่อย

- ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่
รดให้ทั่วแปลงก่อนปลูก

ตำราการทดลองที่ 5

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อคะน้ำอายุ 10 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25 กรัมต่อแปลงย่อย ร่วมกับสูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 53.50 กรัมต่อแปลงย่อย และสูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 41.00 กรัมต่อแปลงย่อย ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25 กรัมต่อแปลงย่อย

- ใส่ไบโอชาร์เกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ ใส่เพียงครั้งเดียวคลุกเคล้าลงดินให้ทั่วในแปลงก่อนปลูก

ตำราการทดลองที่ 6

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อคะน้ำอายุ 10 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25 กรัมต่อแปลงย่อย ร่วมกับสูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 53.50 กรัมต่อแปลงย่อย และสูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 41.00 กรัมต่อแปลงย่อย ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25 กรัมต่อแปลงย่อย

- ใส่ไบโอชาร์เกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ใส่เพียงครั้งเดียวคลุกเคล้าลงดินให้ทั่วในแปลงก่อนปลูก

ตำราการทดลองที่ 7

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อคะน้ำอายุ 10 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25 กรัมต่อแปลงย่อย ร่วมกับสูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 53.50 กรัมต่อแปลงย่อย และสูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 41.00 กรัมต่อแปลงย่อย ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25 กรัมต่อแปลงย่อย

- ใส่ไบโอชาร์เกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ใส่เพียงครั้งเดียวคลุกเคล้าลงดินให้ทั่วในแปลงก่อนปลูก

(2.6.2) การใส่ปัจจัยการทดลองจากการปลูกรอบที่ 2 ดังนี้

โดยใช้อัตราปุ๋ยธาตุหลักสำหรับคะน้ำที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ดินตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร (2548) ใช้ค่าวิเคราะห์ดินหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ำรอบที่ 1 เนื่องจากดำเนินการปลูกคะน้ำต่อเนื่องภายใน 2 เดือน โดยไม่มีการรบกวนพื้นที่ทดลอง ผลการวิเคราะห์ดิน ดังนี้

- ปริมาณอินทรีย์วัตถุ 1.52 - 2.02 เปอร์เซ็นต์ ต้องใช้
ปุ๋ยไนโตรเจน 15 กิโลกรัมต่อไร่ : ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 32.61 กิโลกรัมต่อไร่ ในพื้นที่แปลงย่อย
10.50 ตารางเมตร ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 214.00 กรัมต่อแปลงย่อย

- ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 274.97 - 311.00
มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ต้องใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัส 5 กิโลกรัมต่อไร่ : ใช้สูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 10.87
กิโลกรัมต่อไร่ ในพื้นที่แปลงย่อย 10.50 ตารางเมตร ใช้สูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 71.33 กรัมต่อแปลงย่อย

- ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ 116.67 - 254.00
มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ต้องใช้ปุ๋ยโพแทสเซียม 5 กิโลกรัมต่อไร่ : ใช้สูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 8.33
กิโลกรัมต่อไร่ ในพื้นที่แปลงย่อย 10.50 ตารางเมตร ใช้สูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 54.67 กรัมต่อแปลงย่อย

ดำเนินการทดลองที่ 1 แปลงควบคุมไม่ใส่ปัจจัย

ดำเนินการทดลองที่ 2

- ใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมี
ใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อค่น้ำอายุ 10 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 107 กรัมต่อแปลงย่อย ร่วมกับ
สูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 71.33 กรัมต่อแปลงย่อย และสูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 54.67 กรัมต่อแปลงย่อย
ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 107 กรัมต่อแปลงย่อย

ดำเนินการทดลองที่ 3

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน
โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อค่น้ำอายุ 10 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25
กรัมต่อแปลงย่อย ร่วมกับสูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 53.50 กรัมต่อแปลงย่อย และสูตร 0 - 0 - 60
อัตรา 41.00 กรัมต่อแปลงย่อย ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา
80.25 กรัมต่อแปลงย่อย

- ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ที่ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก 300
กิโลกรัมต่อไร่ ใส่เพียงครั้งเดียวคลุกเคล้าลงดินให้ทั่วแปลงก่อนปลูก

ดำเนินการทดลองที่ 4

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน
โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อค่น้ำอายุ 10 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25
กรัมต่อแปลงย่อย ร่วมกับสูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 53.50 กรัมต่อแปลงย่อย และสูตร 0 - 0 - 60
อัตรา 41.00 กรัมต่อแปลงย่อย ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา
80.25 กรัมต่อแปลงย่อย

- ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่
รดให้ทั่วแปลงก่อนปลูก

ตำรับการทดลองที่ 5

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อค่น้ำอายุ 10 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25 กรัมต่อแปลงย่อย ร่วมกับสูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 53.50 กรัมต่อแปลงย่อย และสูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 41.00 กรัมต่อแปลงย่อย ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25 กรัมต่อแปลงย่อย

- ไม่ใส่ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

ตำรับการทดลองที่ 6

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อค่น้ำอายุ 10 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25 กรัมต่อแปลงย่อย ร่วมกับสูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 53.50 กรัมต่อแปลงย่อย และสูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 41.00 กรัมต่อแปลงย่อย ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25 กรัมต่อแปลงย่อย

- ไม่ใส่ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

ตำรับการทดลองที่ 7

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อค่น้ำอายุ 10 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25 กรัมต่อแปลงย่อย ร่วมกับสูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 53.50 กรัมต่อแปลงย่อย และสูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 41.00 กรัมต่อแปลงย่อย ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใช้สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 80.25 กรัมต่อแปลงย่อย

- ไม่ใส่ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

(3) การเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูล

(3.1) การเก็บตัวอย่างดิน

การเก็บตัวอย่างดินก่อนการทดลองที่ระดับความลึก 0 - 30 เซนติเมตร โดยตัวอย่างดินแบบสุ่ม (composite sample) 15 จุด และนำมาผสมกันเพื่อส่งวิเคราะห์ และทำการเก็บตัวอย่างดินภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตจากการปลูกรอบที่ 1 และรอบที่ 2 โดยสุ่มเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0 - 30 เซนติเมตร จำนวน 3 จุดต่อแปลงย่อย และรวมตัวอย่างเป็น 1 ตัวอย่างต่อแปลงย่อย นำดินที่เก็บมาจากแปลงทดลอง ไปผึ่งให้แห้งในที่ร่ม จากนั้นบดให้ละเอียด และผสมคลุกเคล้าดินให้สม่ำเสมอ นำดินส่วนที่หนึ่งมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.0 และ 0.5 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีในห้องปฏิบัติการ

(3.2) การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน จากการเก็บตัวอย่างก่อนการทดลอง และดินภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และรอบที่ 2 ดังนี้

(3.2.1) ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) วัดด้วยเครื่อง pH meter อัตราส่วนระหว่างดินต่อน้ำเท่ากับ 1 : 1 (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2548)

(3.2.2) ค่าการนำไฟฟ้า (electron conductivity, EC) ด้วยการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดินที่สกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated extract) วัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง electrical conductivity meter (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2548)

(3.2.3) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter, OM) โดยวิธี Walkley and Black Titration (Walkley and Black, 1947)

(3.2.4) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P) โดยวิธี Bray II (0.1 N HCl + 0.03 N NH_4F) แล้วนำไปวัดค่า absorbance ด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 882 นาโนเมตร (Bray and Kurtz, 1945)

(3.2.5) ปริมาณโพแทสเซียม ปริมาณแคลเซียม และปริมาณแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ (available K Ca Mg) ด้วยวิธีการสกัดดินด้วยสารละลาย 1 N $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$ ที่ความเป็นกรดเป็นด่าง 7 แล้วนำไปวัดปริมาณด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2548)

(3.3) การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดิน

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดิน ครั้งที่ 1 จากการเก็บตัวอย่างดินก่อนการทดลองการปลูกรอบที่ 1 และครั้งที่ 2 เก็บตัวอย่างดินภายหลังการทดลองสิ้นสุดจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 โดยเก็บดินที่ระดับความลึก 0 - 20 เซนติเมตร ดังนี้

(3.3.1) ค่าความหนาแน่นรวมของดิน (bulk density, D_b) โดยการเก็บตัวอย่างดิน แบบไม่รบกวนโครงสร้าง (undisturbed core method) (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2548)

(3.3.2) ปริมาณน้ำในดิน (water content) โดยวิธีการคำนวณหาปริมาณน้ำในดินโดยวิธีตู้อบ (oven dry) (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2548)

(3.4) การวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียในดิน

การวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียในดิน ครั้งที่ 1 เก็บตัวอย่างดินก่อนการทดลองการปลูกรอบที่ 1 และครั้งที่ 2 เก็บตัวอย่างดินภายหลังการทดลองสิ้นสุดจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 โดยเก็บดินที่ระดับความลึก 0 - 15 เซนติเมตร ดังนี้

(3.4.1) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ (nitrogen fixing bacteria, NFB) ตรวจนับเชื้อโดยวิธี dilution plate count method ทำการเลี้ยงเชื้อในอาหาร selective media สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่มีแหล่งไนโตรเจนในสูตรอาหาร Burk's N - free medium (Weaver and Danso, 1994) โดยทำการเกลี่ยเชื้อให้กระจายไปทั่วบนอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน

(3.4.2) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟต (phosphate solubilizing bacteria, PSB) ตรวจนับเชื้อโดยวิธี dilution plate count method ทำการเลี้ยงเชื้อในอาหาร selective media สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อ Pikovskaya's agar medium (Gaur, 1990) โดยทำการเกลี่ยเชื้อให้กระจายไปทั่วบนอาหารเลี้ยงเชื้อ และบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 - 4 วัน สังเกตวงใสรอบโคโลนี

(3.4.3) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม (potassium solubilizing bacteria, KSB) ตรวจนับเชื้อโดยวิธี dilution plate count method ทำการเลี้ยงเชื้อในอาหาร selective media สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อ sucrose minimal salts agar medium ที่มี dihydrogen potassium phosphate เป็นส่วนประกอบ และมี bromothymol blue ผสมอยู่ (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) เพื่อเป็นดัชนีบ่งชี้การผลิกรดอินทรีย์ของจุลินทรีย์ โดยทำการเกลี่ยเชื้อให้กระจายไปทั่วบนอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน สังเกตการเปลี่ยนสีของอาหารจากสีเขียวเป็นสีเหลือง

(3.4.4) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนให้พืช (plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) ตรวจนับเชื้อโดยวิธี dilution plate count method ทำการเลี้ยงเชื้อในอาหาร selective media สูตรอาหาร glucose peptone agar (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) โดยทำการเกลี่ยเชื้อให้กระจายไปทั่วบนอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน

(3.5) การเก็บข้อมูลด้านการเจริญเติบโตและผลผลิตพืช

(3.5.1) ความสูงต้น ที่อายุเก็บเกี่ยว 45 วัน โดยวัดจากพื้นดิน ถึงปลายใบที่ยาวที่สุด สุ่มจำนวน 20 ต้นต่อแปลงย่อย แล้วหาค่าเฉลี่ย

(3.5.2) ค่าความเขียวของใบ (SPAD reading) ที่อายุเก็บเกี่ยว 45 วัน โดยวัดตำแหน่งใบที่ 2 - 3 จากปลายยอด สุ่มจำนวน 20 ต้นต่อแปลงย่อย แล้วหาค่าเฉลี่ย

(3.5.3) ค่าขนาดพื้นที่ใบ วัดด้วยเครื่องวัดพื้นที่ใบ ที่อายุเก็บเกี่ยว 45 วัน โดยวัดตำแหน่งใบที่ใหญ่ที่สุดของแต่ละต้น สุ่มจำนวน 20 ต้นต่อแปลงย่อย แล้วหาค่าเฉลี่ย

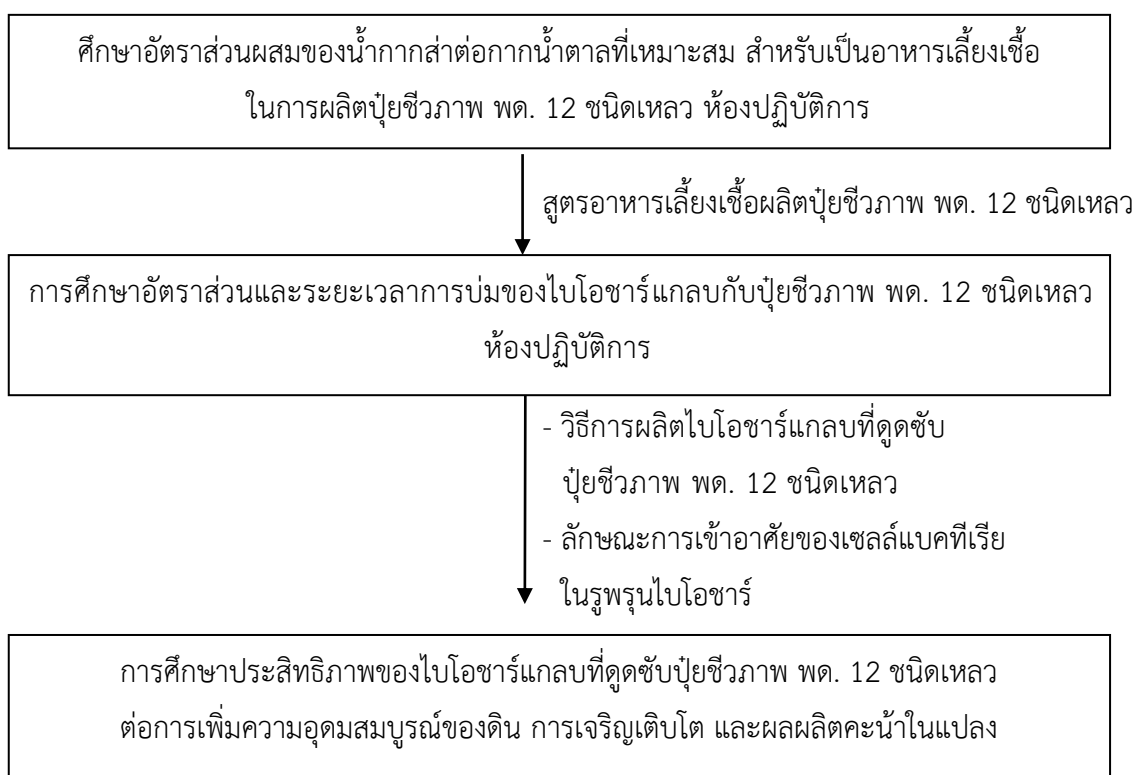
(3.5.4) น้ำหนักสดของต้นค่น้ำ ที่อายุเก็บเกี่ยว 45 วัน

(3.5.5) น้ำหนักแห้งของต้นคะน้า แยกใส่ซองกระดาษที่สะอาด นำมาชั่งน้ำหนักสดของต้นคะน้า แล้วนำเข้าเครื่องอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 วัน เพื่อหาน้ำหนักแห้งของต้นคะน้า

(3.6) เก็บข้อมูลผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการผลิตพืช ได้แก่ ค่าไถเตรียมแปลง ค่าแรงงานปลูก ค่าแรงใส่ปุ๋ยจ่ย ค่าปุ๋ยหมัก ค่าปุ๋ยเคมี และค่าไบโอชาร์ เป็นต้น

(3.7) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 13 แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย

4.7 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.7.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนผสมของน้ำกากส่าต่อกากน้ำตาลในการขยายเชื้อ ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

จากการศึกษาอัตราส่วนผสมของน้ำกากส่าต่อกากน้ำตาลในการขยายเชื้อ ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว โดยเปรียบเทียบส่วนผสมน้ำกากส่า 8 ตำรับการทดลอง ได้แก่ น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และน้ำกากส่า 10 20 30 40 50 และ 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ โดยทุกตำรับการทดลองใช้เชื้อจากต้นตอเดียวกันมีความสม่ำเสมอของปริมาณเชื้อเริ่มต้น จึงทำการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อเริ่มต้น 0 ชั่วโมง เพียงค่าเดียวเพื่อใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นในการเปรียบเทียบกับทุกตำรับการทดลอง และเมื่อนำไปขยายบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างในแต่ละตำรับการทดลองทุก 24 ชั่วโมง จนครบ 96 ชั่วโมง นำมาวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิด และการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่าง มีรายละเอียดดังนี้

1) การเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียในอาหารเลี้ยงเชื้อ

(1) ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ

จากการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อเริ่มต้นที่ 0 ชั่วโมง มีปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระเริ่มต้น เท่ากับ 4.922 log CFU ต่อมิลลิลิตร และจากการตรวจนับปริมาณเชื้อเมื่อเลี้ยงเชื้อนาน 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระแต่ละตำรับการทดลองของทุกช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 8 เมื่อแบ่งช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ คือ ในช่วงแรก 24 ชั่วโมง ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดจากตำรับการทดลองที่ 3 4 6 และ 7 การใช้น้ำกากส่า 10 20 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 6.661 - 7.079 log CFU ต่อมิลลิลิตร รองลงมา คือ ตำรับการทดลองที่ 2 การใช้กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และตำรับการทดลองที่ 5 การใช้น้ำกากส่า 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อ 6.479 และ 6.477 log CFU ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ แต่ทุกตำรับการทดลองให้ค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 1 การใช้น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ และตำรับการทดลองที่ 8 การใช้น้ำกากส่า 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อต่ำสุด 4.804 และ 4.676 log CFU ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ หลังจากนั้นปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระค่อนข้างคงที่ในช่วง 48 ชั่วโมง พบว่า ตำรับการทดลองที่ 2 การใช้กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และตำรับการทดลองที่ 3 4 5 และ 6 การใช้น้ำกากส่า 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 6.413 - 6.762 log CFU ต่อมิลลิลิตร แต่มีค่าสูงกว่า

เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 1 การใช้น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ และตำรับการทดลองที่ 7 การใช้น้ำกากส่า 50 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อ 3.985 และ 4.173 log CFU ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ขณะที่ตำรับการทดลองที่ 8 การใช้น้ำกากส่า 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อต่ำสุด 3.092 log CFU ต่อมิลลิลิตร และเมื่อเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยตำรับการทดลองที่ 2 การใช้กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อสูงสุด 5.374 log CFU ต่อมิลลิลิตร ไม่แตกต่างกันกับตำรับการทดลองที่ 3 การใช้น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อ 4.694 log CFU ต่อมิลลิลิตร ขณะที่ตำรับการทดลองที่ 8 การใช้น้ำกากส่า 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อต่ำสุด 1.173 log CFU ต่อมิลลิลิตร และปริมาณเชื้อลดลงอย่างต่อเนื่อง จนถึง 96 ชั่วโมง ตำรับการทดลองที่ 2 การใช้กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ตำรับการทดลองที่ 3 4 และ 5 การใช้น้ำกากส่า 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อสูงสุด ไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่าระหว่าง 2.979 - 3.475 log CFU ต่อมิลลิลิตร ขณะที่ตำรับการทดลองที่ 8 การใช้น้ำกากส่า 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อต่ำสุด 1.173 log CFU ต่อมิลลิลิตร

ตารางที่ 8 ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ

ตำรับการทดลอง	ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ (log CFU ต่อมิลลิลิตร)				
	0 ชม.	24 ชม.	48 ชม.	72 ชม.	96 ชม.
ปริมาณเชื้อเริ่มต้น	4.922	-	-	-	-
1 = น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์	-	4.804 c	3.985 b	3.497 cd	2.377 bc
2 = กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	6.479 b	6.540 a	5.374 a	3.377 a
3 = น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	6.779 ab	6.413 a	4.694 ab	3.475 a
4 = น้ำกากส่า 20 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	7.041 a	6.668 a	4.296 bc	2.979 ab
5 = น้ำกากส่า 30 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	6.477 b	6.762 a	4.288 bc	2.989 ab
6 = น้ำกากส่า 40 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	7.079 a	6.467 a	3.887 bcd	1.888 c
7 = น้ำกากส่า 50 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	6.661 ab	4.173 b	3.037 d	2.062 c
8 = น้ำกากส่า 95 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	4.676 c	3.092 c	1.173 e	1.173 d
F-test		**	**	**	**
CV (%)		4.31	7.07	15.14	15.43

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยใช้ DMRT

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

(2) ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟต

จากการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ 0 ชั่วโมง มีปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟตเริ่มต้น เท่ากับ 6.541 log CFU ต่อมิลลิลิตร และจากการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อทุก 24 ชั่วโมง จนครบ 96 ชั่วโมง พบว่า ทุกช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 9 พบว่า แบคทีเรียละลายฟอสเฟต เมื่อแบ่งช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อคือ ในช่วงแรก 24 ชั่วโมง ดำรับการทดลองที่ 3 น้ำกาส่า 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อสูงสุด 7.973 log CFU ต่อมิลลิลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับการทดลองที่ 4 และ 5 น้ำกาส่า 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ หรือดำรับการทดลองที่ 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 7.119 - 7.409 log CFU ต่อมิลลิลิตร แต่มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่น ๆ และในช่วง 48 ถึง 72 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อจะเพิ่มขึ้นจนค่อนข้างคงที่ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 8.184 - 9.723 และ 8.846 - 9.311 log CFU ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ โดยที่ 48 ชั่วโมง ดำรับการทดลองที่ 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และดำรับการทดลองที่ 5 น้ำกาส่า 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อสูงสุด 9.723 และ 9.445 log CFU ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และที่ 72 ชั่วโมง ดำรับการทดลองที่ 3 4 5 6 และ 7 น้ำกาส่า 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และดำรับการทดลองที่ 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 8.852 - 9.311 log CFU ต่อมิลลิลิตร โดยที่ช่วงเวลา 96 ชั่วโมง ยังคงมีปริมาณเชื้อสูงสุดในดำรับการทดลองที่ 3 4 และ 5 น้ำกาส่า 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 9.226 - 9.483 log CFU ต่อมิลลิลิตร มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดำรับการทดลองที่ 1 น้ำกาส่า 5 เปอร์เซ็นต์ ดำรับการทดลองที่ 6 7 และ 8 น้ำกาส่า 40 50 และ 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อต่ำสุดไม่แตกต่างกัน มีค่าระหว่าง 6.134 - 7.060 log CFU ต่อมิลลิลิตร จะเห็นได้ว่า ดำรับการทดลองที่ 1 น้ำกาส่า 5 เปอร์เซ็นต์ และดำรับการทดลองที่ 8 น้ำกาส่า 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟตเสื่อมต่ำสุดตลอดระยะเวลาการเลี้ยงเชื้อตั้งแต่ 24 - 96 ชั่วโมง

ตารางที่ 9 ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟตตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ

ตำรับการทดลอง	ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟต (log CFU ต่อมิลลิลิตร)				
	0 ชม.	24 ชม.	48 ชม.	72 ชม.	96 ชม.
ปริมาณเชื้อเริ่มต้น	6.541	-	-	-	-
1 = น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์	-	5.831 c	6.305 e	6.789 b	6.134 c
2 = กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	7.119 ab	9.723 a	8.852 a	8.318 b
3 = น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	7.973 a	7.775 cd	8.846 a	9.483 a
4 = น้ำกากส่า 20 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	7.409 ab	8.517 abcd	9.213 a	9.279 ab
5 = น้ำกากส่า 30 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	7.201 ab	9.445 ab	9.298 a	9.226 ab
6 = น้ำกากส่า 40 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	6.572 bc	8.184 bcd	9.311 a	7.060 c
7 = น้ำกากส่า 50 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	5.818 c	8.781 abc	9.136 a	6.801 c
8 = น้ำกากส่า 95 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	4.599 d	7.204 de	7.294 b	6.134 c
F-test		**	**	**	**
CV (%)		9.35	9.37	5.81	7.41

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยใช้ DMRT

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

(3) ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม

จากการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ 0 ชั่วโมง มีปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมเริ่มต้น เท่ากับ 6.639 log CFU ต่อมิลลิลิตร และจากการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อทุก 24 ชั่วโมง จนครบ 96 ชั่วโมง ดังตารางที่ 10 พบว่า แบคทีเรียละลายโพแทสเซียมในช่วงแรก 24 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อจะเพิ่มขึ้นสูงสุด คือ ดำรับการทดลองที่ 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อ 8.513 log CFU ต่อมิลลิลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับการทดลองที่ 3 น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อ 8.273 log CFU ต่อมิลลิลิตร แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับการทดลองอื่น ๆ และในช่วง 48 ถึง 76 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นสูงจนค่อนข้างคงที่ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) พบว่า เมื่อเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ดำรับการทดลองที่ 2 3 4 5 6 7 และ 8 มีค่าสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 8.094 - 9.433 log CFU ต่อมิลลิลิตร และที่ 76 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อเริ่มลดลง โดยดำรับการทดลองที่ 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ดำรับการทดลองที่ 3 และ 4 น้ำกากส่า 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 8.107 - 8.426 log CFU ต่อมิลลิลิตร แต่มีค่าสูงกว่าดำรับการทดลองที่ 8 น้ำกากส่า 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อต่ำสุด 7.058 log CFU ต่อมิลลิลิตร มีค่าไม่แตกต่างกับดำรับการทดลองที่ 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อต่ำสุด 6.506 log CFU ต่อมิลลิลิตร และปริมาณเชื้อลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 96 ชั่วโมง โดยดำรับการทดลองที่ 4 น้ำกากส่า 20 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อสูงสุด 7.756 log CFU ต่อมิลลิลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับการทดลองที่ 3 และ 6 น้ำกากส่า 10 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อ 7.184 และ 7.180 log CFU ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ แต่มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดำรับการทดลองอื่น ๆ มีค่าระหว่าง 6.456 - 6.962 log CFU ต่อมิลลิลิตร และทุกดำรับการทดลองมีปริมาณเชื้อสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดำรับการทดลองที่ 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อต่ำสุด 5.438 log CFU ต่อมิลลิลิตร จะเห็นได้ว่า ดำรับการทดลองที่ 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้มีปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมต่ำสุดตลอดระยะเวลาการเลี้ยงเชื้อตั้งแต่ 24 - 96 ชั่วโมง

ตารางที่ 10 ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ

ตำรับการทดลอง	ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม (log CFU ต่อมิลลิลิตร)				
	0 ชม.	24 ชม.	48 ชม.	72 ชม.	96 ชม.
ปริมาณเชื้อเริ่มต้น	6.639	-	-	-	-
1 = น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์	-	6.479 d	6.964 c	6.506 d	5.438 c
2 = กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	8.513 a	8.639 ab	8.107 ab	6.962 b
3 = น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	8.273 ab	8.094 b	8.179 ab	7.184 ab
4 = น้ำกากส่า 20 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	7.394 bcd	8.507 ab	8.426 a	7.756 a
5 = น้ำกากส่า 30 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	7.206 cd	8.345 ab	7.289 bcd	6.554 b
6 = น้ำกากส่า 40 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	7.165 cd	9.083 ab	7.311 bcd	7.180 ab
7 = น้ำกากส่า 50 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	7.607 abc	9.433 a	7.539 abc	6.699 b
8 = น้ำกากส่า 95 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	7.381 bcd	8.529 ab	7.058 cd	6.456 b
F-test		*	**	**	**
CV (%)		7.95	7.45	7.11	6.75

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยใช้ DMRT

* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

(4) ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอโมน

จากการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ 0 ชั่วโมง มีปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอโมนเริ่มต้น เท่ากับ 4.864 log CFU ต่อมิลลิลิตร และจากการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อทุก 24 ชั่วโมง จนครบ 96 ชั่วโมง ดังตารางที่ 11 พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) แบคทีเรียสร้างฮอโมน ในช่วงแรก 24 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้น ดำรับการทดลองที่ 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ดำรับการทดลองที่ 3 4 5 และ 6 น้ำกากส่า 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 6.196 - 6.668 log CFU ต่อมิลลิลิตร แต่มีค่าสูงกว่าดำรับการทดลองที่ 7 น้ำกากส่า 50 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และดำรับการทดลองที่ 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงที่สอง คือ 48 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อค่อนข้างคงที่ในดำรับการทดลองที่ 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ดำรับการทดลองที่ 3 4 และ 5 น้ำกากส่า 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อสูงสุดระหว่าง 6.596 - 6.929 log CFU ต่อมิลลิลิตร และในช่วง 72 ชั่วโมง ทุกดำรับการทดลองมีปริมาณเชื้อลดลง โดยดำรับการทดลองที่ 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ดำรับการทดลองที่ 3 และ 4 น้ำกากส่า 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเชื้อสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 4.709 - 5.397 log CFU ต่อมิลลิลิตร แต่มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดำรับการทดลองที่ 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อ 3.674 log CFU ต่อมิลลิลิตร และมีค่าสูงกว่าดำรับการทดลองที่ 6 7 และ 8 น้ำกากส่า 40 50 และ 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อต่ำสุดไม่แตกต่างกัน มีค่าระหว่าง 1.641 - 2.396 log CFU ต่อมิลลิลิตร และปริมาณเชื้อลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 96 ชั่วโมง โดยดำรับการทดลองที่ 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ดำรับการทดลองที่ 3 และ 4 น้ำกากส่า 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ยังคงปริมาณเชื้อสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 3.340 - 3.764 log CFU ต่อมิลลิลิตร รองลงมา คือ ดำรับการทดลองที่ 5 น้ำกากส่า 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และดำรับการทดลองที่ 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อ 2.551 และ 2.399 log CFU ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ขณะที่ดำรับการทดลองที่ 7 และ 8 น้ำกากส่า 50 และ 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อต่ำสุด 1.359 และ 1.576 log CFU ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 11 ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอโมนตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ

ตำรับการทดลอง	ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอโมน (log CFU ต่อมิลลิลิตร)				
	0 ชม.	24 ชม.	48 ชม.	72 ชม.	96 ชม.
ปริมาณเชื้อเริ่มต้น	4.864	-	-	-	-
1 = น้ำกาส่า 5 เปอร์เซ็นต์	-	5.459 bc	4.612 b	3.674 c	2.399 bc
2 = กาบน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	6.196 ab	6.888 a	5.397 a	3.340 a
3 = น้ำกาส่า 10 เปอร์เซ็นต์ + กาบน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	6.450 a	6.596 a	4.828 ab	3.764 a
4 = น้ำกาส่า 20 เปอร์เซ็นต์ + กาบน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	6.475 a	6.598 a	4.709 ab	3.585 a
5 = น้ำกาส่า 30 เปอร์เซ็นต์ + กาบน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	6.668 a	6.929 a	4.043 bc	2.551 b
6 = น้ำกาส่า 40 เปอร์เซ็นต์ + กาบน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	6.778 a	4.944 b	2.396 d	1.969 cd
7 = น้ำกาส่า 50 เปอร์เซ็นต์ + กาบน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	5.337 c	3.699 c	1.641 d	1.359 e
8 = น้ำกาส่า 95 เปอร์เซ็นต์ + กาบน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	-	6.158 ab	3.193 c	1.709 d	1.576 de
F-test		**	**	**	**
CV (%)		6.97	8.29	15.40	13.02

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยใช้ DMRT

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

จากการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิด ข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่า การใช้กากส่า 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีผลต่อการเจริญของ แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียสร้างฮอโมน แบคทีเรียละลายฟอสเฟต และแบคทีเรีย ละลายโพแทสเซียม ทั้งนี้เนื่องจากการใช้กากส่า 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อเริ่มต้นมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 4.95 มีผลให้สภาวะอาหารเลี้ยงเริ่มต้นมีค่าเป็นกรดจากการผสมกากส่าในอัตราส่วนสูงเกินไป ส่งผลต่อการเจริญของแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ *A. tropicalis* และแบคทีเรียสร้างฮอโมน *A. chroococcum* ที่สามารถเจริญได้ดีที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 6.0 - 7.0 ที่เวลาเลี้ยงเชื้อ 14 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะดังหมักมีปริมาณเชื้อสูงถึง 15.150 - 16.120 log CFU ต่อมิลลิลิตร (ฉวีวรรณ และคณะ, 2554) แต่เชื้อ *Azotobacter* ก็สามารถเจริญได้ดีในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มี ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง อยู่ระหว่าง 4.5 - 5.5 ถึง 9.0 เช่น เชื้อ *A. chroococcum* และเจริญได้ใน อาหารเลี้ยงเชื้อที่มีสภาพเป็นกรด มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 5.5 แต่สภาวะที่เหมาะสม คือ 7.2 - 8.2 (Saribay, 2003) ส่วนแบคทีเรียละลายฟอสเฟต *B. unamae* เจริญได้ที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ระหว่าง 4.5 - 7.5 (Jesus *et al.*, 2004) และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม *B. subtilis* เจริญได้ที่ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 5.0 - 10.0 แต่มีอัตราการเติบโตเหมาะสมสุดที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ระหว่าง 7.0 - 7.5 (Jadhav *et al.*, 2010) จากผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของ อาหารเลี้ยงเชื้อต่ำกว่า 5 ไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญของแบคทีเรียในปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 เนื่องจากการ เจริญของเชื้อถูกขัดขวางด้วยความเป็นกรดที่มากเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Gaudy and Gaudy (1980) พบว่า ความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อเป็นปัจจัยที่สำคัญ เมื่อต้องการเลี้ยง ขยายเชื้อให้ได้ปริมาณเซลล์จุลินทรีย์สูง ค่าความเป็นกรดเป็นด่างสำหรับการเจริญของแบคทีเรีย น้อยที่สุดและมากที่สุด อยู่ที่ประมาณ 5 และ 9 ตามลำดับ อีกทั้งแหล่งคาร์บอนเป็นปัจจัยที่สำคัญ ที่สุดที่จำเป็นต่อการเจริญของจุลินทรีย์ ซึ่งคาร์บอนเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างของสิ่งมีชีวิต รวมทั้งแบคทีเรีย โดยครึ่งหนึ่งของน้ำหนักแห้งของเซลล์แบคทีเรียเป็นคาร์บอน (Tortora *et al.*, 1995) และเมื่อพิจารณาระยะเวลาการเลี้ยงเชื้อ พบว่า แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ และแบคทีเรีย สร้างฮอโมน มีปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาการเลี้ยงเชื้อ 24 ชั่วโมง และลดลงเมื่อระยะเวลา เลี้ยงเชื้อเพิ่มขึ้นเป็น 48 ชั่วโมง ขณะที่แบคทีเรียละลายฟอสเฟต และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม มีปริมาณเชื้อลดลงเมื่อระยะเวลาเลี้ยงเชื้อเพิ่มขึ้นเป็น 72 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากอาหารเลี้ยงเชื้อ มีค่าเป็นกรดเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการเลี้ยงเชื้อที่เพิ่มขึ้น จากกรดอินทรีย์ที่ได้มาจากการบวกราย ย่อยสลายกลูโคส และภาพรวมของการเจริญของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิด จะมีระยะเจริญเติบโตของ เชื้อช่วง log phase ที่ 24 ชั่วโมง ภายหลังการใส่แบคทีเรียในอาหารเลี้ยงเชื้อเป็นระยะที่แบคทีเรีย มีการแบ่งตัวอย่างรวดเร็ว ระยะนี้มีการเจริญมากที่สุด โดยสารอาหารจะถูกใช้อย่างมากและรวดเร็ว

มีระยะ stationary phase ที่ 24 - 48 ชั่วโมง เป็นระยะที่แบคทีเรียมีจำนวนคงที่ไม่มีการเพิ่มจำนวน เนื่องจากอาหารถูกใช้ไปเกือบหมด และมีการขับของเสียที่เป็นพิษจากกระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) และระยะ death phase ที่ 72 ชั่วโมง แบคทีเรียจะมีการตายเนื่องจากอาหารที่ใช้เลี้ยงเซลล์หมดไป และเกิดการสะสมของเสียและสารพิษจากกระบวนการเมแทบอลิซึม

2) การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว

การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว (ตารางที่ 12) โดยค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อเริ่มต้น 0 ชั่วโมง ทุกตำรับการทดลอง มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ พบว่า ตำรับการทดลองที่ 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ และตำรับการทดลองที่ 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่า 6.17 และ 6.16 ตามลำดับ แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองอื่น ๆ ที่มีการเพิ่มสัดส่วนของน้ำกากส่า ส่งผลต่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างในอาหารเลี้ยงเชื้อเริ่มต้นมีแนวโน้มลดลง ในตำรับการทดลองที่ 3 4 5 6 7 และ 8 น้ำกากส่า 10 20 30 40 50 และ 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างเริ่มต้น 0 ชั่วโมง มีค่า 5.84 5.80 5.50 5.21 5.17 และ 4.95 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตำรับการทดลองที่ 8 การผสมน้ำกากส่า 95 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่ำสุด 4.95 เนื่องจากการใส่น้ำกากส่าหรือกากน้ำตาลมีสมบัติทางเคมีเป็นกรด มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างของวัสดุ 4.85 และ 4.87 ตามลำดับ การใส่ที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ และเจือจางด้วยน้ำเปล่า ในอัตรา 95 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สามารถยกระดับค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้นสูงกว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของน้ำกากส่า 10 20 30 40 50 และ 95 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ จึงมีผลให้การผสมน้ำกากส่าในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อความเข้มข้นของสารละลายในอาหารเลี้ยงเชื้อสูงกว่า จึงทำให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อลดลงต่ำกว่าการใส่น้ำกากส่า หรือกากน้ำตาลเพียงอย่างเดียว และภายหลังการใส่เชื้อจากการเก็บตัวอย่างอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว แต่ละตำรับการทดลองทุก 24 ชั่วโมง จนครบ 96 ชั่วโมง พบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวทุกช่วงเวลา มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อ แบ่งตามช่วงเวลาระยะเวลาการเลี้ยงเชื้อ พบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว ทุกช่วงเวลามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) ในช่วงแรก 24 ชั่วโมง ตำรับการทดลองที่ 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุด 5.39 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงกว่าตำรับการทดลองที่ 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และตำรับการทดลองที่ 3 น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่า 5.17 และ 5.11 ตามลำดับ และมีค่าสูงกว่าตำรับการทดลองอื่น ๆ มีค่าระหว่าง 4.36 - 4.47 และในช่วง 48 - 96 ชั่วโมง มีค่าลดลงค่อนข้างคงที่ โดยที่ 48 ชั่วโมง ตำรับการทดลองที่ 1

น้ำากาส่า 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุด 5.37 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงกว่าตำรับการทดลองที่ 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่า 4.85 และมีค่าสูงกว่าตำรับการทดลองที่ 3 น้ำากาส่า 10 เปอร์เซ็นต์ ผสม กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่า 4.53 มีค่าสูงกว่าตำรับการทดลองที่ 4 5 6 7 และ 8 ที่มีค่า ไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 4.20 - 4.33 โดยที่ 72 ชั่วโมง ตำรับการทดลองที่ 1 น้ำากาส่า 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุด 5.34 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าตำรับการทดลองที่ 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ตำรับการทดลองที่ 3 และ 5 น้ำากาส่า 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 4.69 - 4.88 แต่มีค่าสูงกว่าตำรับการทดลองอื่น ๆ มีค่าระหว่าง 3.92 - 4.71 และที่ 92 ชั่วโมง ตำรับการทดลองที่ 1 น้ำากาส่า 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุด 5.33 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงกว่าตำรับการทดลองที่ 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และตำรับการทดลองที่ 3 น้ำากาส่า 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่า 4.88 และ 4.86 ตามลำดับ และมีค่าสูงกว่าตำรับการทดลองอื่น ๆ มีค่าระหว่าง 3.97 - 4.72 สอดคล้องกับ รายงานของ Chinsamran and Suttisuwana (2015) พบว่า แบคทีเรียสามารถเจริญในกากน้ำตาล ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้เท่ากับ 12 องศาบริกซ์ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 5.0 ใส่หัวเชื้อ เริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์ และใช้ระยะเวลาหมัก 12 วัน และจากรายงานของ Bajpai and Sundara (1971) พบว่า สภาวะความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสมสำหรับการเจริญของแบคทีเรีย คือ ระดับที่เป็นกลาง ในช่วง 6.5 - 7.0 หรือกรดเล็กน้อย ในช่วง 5.5 - 6.5 อีกทั้งสอดคล้องกับ รายงานของ Seesawhea *et al.* (2017) พบว่า กระบวนการหมักที่มีองค์ประกอบของน้ำตาล แบคทีเรียสามารถใช้ น้ำตาลในการเจริญและการผลิตกรดอินทรีย์ ส่งผลต่อค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ของอาหารลดลง และจากรายงานของเสาวรส (2560) การใช้น้ำากาส่าที่ระดับความเข้มข้น 50 - 100 เปอร์เซ็นต์ และกากน้ำตาล 1 - 5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารในระบบการเลี้ยงเชื้อ สำหรับการผลิตมีเทน พบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของกากน้ำตาลและ น้ำากาส่า เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์มากเกินไปจะเกิดการย่อยสลายของแบคทีเรียอย่างรวดเร็ว จนเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยได้ ทำให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของระบบลดลง

ตารางที่ 12 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ

ตำรับการทดลอง	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง				
	0 ชม.	24 ชม.	48 ชม.	72 ชม.	96 ชม.
1 = น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์	6.17 a	5.39 a	5.37 a	5.34 a	5.33 a
2 = กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	6.16 a	5.17 b	4.85 b	4.88 b	4.88 b
3 = น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	5.84 b	5.11 b	4.53 c	4.69 bc	4.86 b
4 = น้ำกากส่า 20 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	5.80 c	4.36 c	4.20 d	3.92 e	3.97 f
5 = น้ำกากส่า 30 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	5.50 d	4.47 c	4.26 d	4.71 bc	4.72 c
6 = น้ำกากส่า 40 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	5.21 e	4.44 c	4.33 d	4.25 de	4.29 d
7 = น้ำกากส่า 50 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	5.17 e	4.43 c	4.27 d	4.42 cd	4.42 d
8 = น้ำกากส่า 95 เปอร์เซ็นต์ + กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	4.95 f	4.38 c	4.32 d	4.15 de	4.11 e
F-test	**	**	**	**	**
CV (%)	0.49	1.43	1.45	2.94	0.98

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยใช้ DMRT

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

จากการศึกษาอัตราส่วนผสมของอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสมสำหรับการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรีย จากการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้อุตสาหกรรมเกษตร ได้แก่ น้ำกากส่า และกากน้ำตาล เป็นแหล่งสารอาหารสำหรับเลี้ยงเชื้อพบว่า ระดับความเข้มข้นของน้ำกากส่าที่ระดับความเข้มข้น 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์สามารถส่งเสริมการขยายปริมาณแบคทีเรียได้ แต่การใช้น้ำกากส่าที่ระดับความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์

มีผลให้แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนเจริญได้ไม่ดี แต่พบว่าแบคทีเรียละลายฟอสเฟต และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม สามารถเจริญได้ทุกระดับความเข้มข้นของน้ำกาฬสำ และจะเห็นได้ว่าแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิด โดยดำรับการทดลองที่ 3 คือ การใส่น้ำกาฬสำความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกาฬน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ เป็นอัตราส่วนผสมที่เพิ่มปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ได้ทั้ง 4 ชนิด ได้เร็วที่ช่วงเวลา 24 ชั่วโมง จนถึง 48 ชั่วโมง ประกอบด้วยปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ 6.779 log CFU ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียสร้างฮอร์โมน 6.450 log CFU ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียละลายฟอสเฟต 7.973 log CFU ต่อมิลลิลิตร และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 8.273 log CFU ต่อมิลลิลิตร จึงเป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมกับการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อาจมีปริมาณเชื้อน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน ในผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณจุลินทรีย์ ประกอบด้วยแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ *A. tropicalis* แบคทีเรียละลายฟอสเฟต *B. unamae* แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม *B. subtilis* และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมน *A. chroococcum* มีปริมาณเชื้อ 7.792 8.982 8.897 และ 7.944 log CFU ต่อกกรัมตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของปุ๋ยชีวภาพ ตามพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2518 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550 ที่กำหนดไว้ว่า มีปริมาณจุลินทรีย์รับรองไม่น้อยกว่า 10^7 CFU ต่อกกรัม หรือ 7.00 log CFU ต่อกกรัม และจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิด ในปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว มีเพียงแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนออกซินมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ *A. tropicalis* และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนออกซิน *A. chroococcum* สามารถเจริญได้ดีที่สภาวะค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 6.0 - 7.0 สภาพควบคุมในถังหมักที่ระยะเวลาเลี้ยงเชื้อ 14 ชั่วโมง มีปริมาณเชื้อสูงถึง 15.150 - 16.120 log CFU ต่อมิลลิลิตร (ฉวีวรรณ และคณะ, 2554) แต่ *Azotobacter* ก็สามารถเจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 4.5 - 5.5 ถึง 9.0 เช่น *A. chroococcum* เจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีสภาพเป็นกรด 5.5 แต่ในสภาวะที่เหมาะสม มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ระหว่าง 7.2 - 8.2 (Saribay, 2003)

เมื่อพิจารณาการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้อุตสาหกรรมเกษตรจากน้ำกาฬสำและกาฬน้ำตาล เป็นแหล่งสารอาหารของจุลินทรีย์ สามารถเจริญได้ในแหล่งอาหารที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความต้องการสารอาหารของจุลินทรีย์แต่ละชนิด แหล่งอาหารของจุลินทรีย์มีองค์ประกอบทั่วไป ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก ซึ่งจุลินทรีย์จะใช้ในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน และกรดนิวคลีอิก เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริม เช่น แมงกานีส สังกะสี โคบอลต์ เป็นโคแฟกเตอร์ รวมทั้งสารอินทรีย์เป็นปัจจัยสำคัญที่จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญอีกด้วย และสามารถคงความมีชีวิตของจุลินทรีย์ได้นานมากขึ้น (Jadhav *et al.*, 2018) สอดคล้องกับรายงานของ

ไพจิตร (2552) พบว่า น้ำกากสำสด มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 4.5 - 5.0 มีสารอาหาร วิตามินรวม เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เพราะมีสารอาหาร ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม มีปริมาณ 4 : 1 : 6 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณซัลเฟต 3,763 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการประยุกต์ใช้น้ำกากสำเป็นแหล่งอาหาร สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น จากรายงานของ Nakajima-Kambe *et al.* (1999) เชื้อแบคทีเรีย *B. smithii* สามารถเจริญและกำจัดสีในน้ำกากสำ และการเจริญของเชื้อรา เช่น เชื้อ *Penicillium decumbens* *P. lignorum* และ *Aspergillus niger* เพื่อใช้ในระบบการบำบัดสีของน้ำกากสำ (Jimenez *et al.*, 2003) และสอดคล้องกับรายงานของ Emilce *et al.* (2009) ศึกษาการผลิตผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพจากการใช้น้ำกากสำและเนยแข็ง เป็นส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อ *P. tolaasii* เป็นเชื้อสร้างสารส่งเสริมการเจริญเติบโต ส่งเสริมการละลายของฟอสเฟต ผลิตฮอร์โมนพืช และสร้างสารปฏิชีวนะ (antibiotic) พบว่า การใส่น้ำกากสำสำหรับเลี้ยงเชื้อจากธรรมชาติ โดยการใส่ 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำกากสำ มีผลให้สามารถลดการใส่ปริมาณสารเคมีลง 25 เปอร์เซ็นต์ และการใส่น้ำกากสำสำหรับเลี้ยงเชื้อจากธรรมชาติที่ราคาถูก เป็นการประยุกต์ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ เพื่อลดต้นทุนการผลิต สอดคล้องกับรายงานวิจัยของจันจิรา และ นวลจันทร์ (2562) ศึกษาการใช้ประโยชน์น้ำกากสำเป็นแหล่งอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อผลิตปุ๋ยชีวภาพตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ ละลายฟอสฟอรัส ละลายโพแทสเซียม และสร้างฮอร์โมนพืช พบว่า การใช้อัตราส่วนของน้ำกากสำ 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 เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ เท่ากับ 3.10×10^6 CFU ต่อมิลลิลิตร (6.491 log CFU ต่อมิลลิลิตร) ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟต เท่ากับ 7.08×10^8 CFU ต่อมิลลิลิตร (8.850 log CFU ต่อมิลลิลิตร) ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม เท่ากับ 7.94×10^8 CFU ต่อมิลลิลิตร (8.899 log CFU ต่อมิลลิลิตร) และปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมน เท่ากับ 2.51×10^6 CFU ต่อมิลลิลิตร (6.399 log CFU ต่อมิลลิลิตร) ซึ่งปริมาณแบคทีเรียคงที่ได้นาน 21 วัน อีกทั้งจากรายงานของ Omar *et al.* (2002) พบว่า จากการศึกษาความเข้มข้นของน้ำกากสำต่อการเจริญของแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ ผลิตเป็นหัวเชื้อ biovinasse Inoculant ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินในการเพิ่มผลผลิตถั่วปากอ้า ภายใต้การจัดการน้ำระบบชลประทาน โดยใส่เชื้อจุลินทรีย์ที่ตรึงไนโตรเจนอิสระสายพันธุ์ *A. brasilense* *B. polymyxa* และ *A. chroococcum* ที่ขยายปริมาณหัวเชื้อระดับความเข้มข้นของน้ำกากสำ 6 8 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สามารถเพิ่มปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ และเพิ่มผลผลิตพืชได้ อีกทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพน้ำกากสำด้วยกากน้ำตาล เพื่อเป็นการเสริมแหล่งอาหารและพลังงานให้เหมาะสมสำหรับการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งกากน้ำตาลเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม

ผลิตน้ำตาลที่มีต้นทุนต่ำ (O-Thong *et al.*, 2012) โดยจากรายงานของ Chinsamran and Suttisuwan (2015) แบคทีเรียสามารถเจริญในกากน้ำตาลที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 5.0 จากหัวเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์ ใช้ระยะเวลาหมัก 12 วัน และจากรายงานของอภิเชษฐ และคณะ (ม.ป.ป.) พบว่า การศึกษาสูตรอาหารผลิตแบคทีเรียกรดแลกติก *L. acidophilus* TISTR 1338 โดยใช้แหล่งคาร์บอนจากกากน้ำตาล และแหล่งไนโตรเจนที่ได้จากกากเซลล์ยีสต์ทดแทนการเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ De Man Rogosa and Sharpe (MRS) พบว่า แหล่งคาร์บอนและแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย คือ ปริมาณกากน้ำตาลที่มีความเข้มข้น 11 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณกากเซลล์ยีสต์ที่มีความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้ปริมาณเซลล์สูงสุดเท่ากับ 2.14×10^9 CFU ต่อมิลลิลิตร ที่เวลา 22 ชั่วโมง สอดคล้องกับรายงานของเสาวรส (2560) การใช้น้ำกากสำที่ระดับความเข้มข้น 50 - 100 เปอร์เซ็นต์ และใส่กากน้ำตาล 1 - 5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารในการเลี้ยงเชื้อ

ดังนั้นจากผลการทดลองนี้จึงได้เลือกอัตราส่วนผสมของอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว คือ น้ำกากสำ 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ปรับปริมาตรด้วยน้ำครบ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หลังจากนั้นใส่หัวเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน โดยใช้หัวเชื้อ 0.10 เปอร์เซ็นต์ แล้วเติมออกซิเจนด้วยเครื่องปั๊มออกซิเจนปลาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ประกอบด้วยปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ $6.779 \log$ CFU ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียสร้างฮอโมน $6.450 \log$ CFU ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียละลายฟอสเฟต $7.973 \log$ CFU ต่อมิลลิลิตร และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม $8.273 \log$ CFU ต่อมิลลิลิตร จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

4.7.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนและระยะเวลาการบ่มของไบโอชาร์กลับกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

ผลจากการศึกษา 2 ปัจจัย ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 อัตราส่วนของไบโอชาร์กลับต่อปริมาตรของปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จำนวน 3 อัตราส่วน ได้แก่ อัตราส่วนที่ 1 คือ ไบโอชาร์กลับ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร อัตราส่วนที่ 2 คือ ไบโอชาร์กลับ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 3 น้ำหนักต่อปริมาตร และอัตราส่วนที่ 3 ไบโอชาร์กลับ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 4 น้ำหนักต่อปริมาตร และปัจจัยที่ 2 ระยะเวลาการดูดซับ 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ช่วงเวลา 3 ชั่วโมง และช่วงเวลา 6 ชั่วโมง นำตัวอย่างไบโอชาร์ในแต่ละตำรับการทดลองมาวิเคราะห์ปริมาณเชื้อ 4 ชนิด ได้แก่ แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียสร้างฮอโมน แบคทีเรียละลายฟอสเฟต และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม รายละเอียดมีดังนี้

1) ปริมาณแบคทีเรียในไบโอสาร์กลบ ดังนี้

(1) ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ จากการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระในไบโอสาร์กลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ทั้ง 3 อัตราส่วน ได้แก่ ไบโอสาร์กลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตรอัตราส่วน 1 : 3 น้ำหนักต่อปริมาตร และอัตราส่วน 1 : 4 น้ำหนักต่อปริมาตร พบว่า ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อ 5.270 5.270 และ 5.370 log CFU ต่อกรัม ตามลำดับ และระยะเวลาการดูดซับทั้ง 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 1 3 และ 6 ชั่วโมง พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระเฉลี่ย 5.130 5.350 และ 5.440 log CFU ต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 13)

(2) ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอโมน จากการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอโมนในไบโอสาร์กลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ทั้ง 3 อัตราส่วน ได้แก่ ไบโอสาร์กลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร อัตราส่วน 1 : 3 น้ำหนักต่อปริมาตร และอัตราส่วน 1 : 4 น้ำหนักต่อปริมาตร พบว่า ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอโมนมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อ 5.720 5.720 และ 5.690 log CFU ต่อกรัม ตามลำดับ และระยะเวลาการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลวของไบโอสาร์กลบ ทั้ง 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 1 3 และ 6 ชั่วโมง พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอโมนเฉลี่ย 5.710 5.830 และ 5.530 log CFU ต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 13)

จากผลการศึกษาอัตราส่วนและระยะเวลาการบ่มของไบโอสาร์กลบต่อการดูดซับเซลล์จุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสม คือ การใช้ไบโอสาร์กลบ 1 ส่วน ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว 2 ส่วน (อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร) ใช้ระยะเวลาดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว บ่มเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีผลให้ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ และแบคทีเรียสร้างฮอโมน มีปริมาณเชื้อ 5.310 และ 5.770 log CFU ต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม และใช้ระยะเวลาในการบ่มไบโอสาร์กลบน้อยที่สุด มีผลให้ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ และแบคทีเรียสร้างฮอโมนในไบโอสาร์มีค่าไม่แตกต่างกับการใช้ไบโอสาร์กลบต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ที่อัตราส่วน 1 : 3 น้ำหนักต่อปริมาตร หรือ 1 : 4 น้ำหนักต่อปริมาตร เป็นระยะเวลายบ่ม 3 หรือ 6 ชั่วโมง จากการใช้อัตราส่วนผสมสูงขึ้น และใช้ระยะเวลาการบ่มนานเพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณแบคทีเรียในไบโอสาร์กลบ

ตารางที่ 13 ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระและแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนในไบโอชาร์กลบ

อัตราส่วน ไบโอชาร์ต่อ ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว	ระยะเวลาการบ่ม (ชั่วโมง)							
	ปริมาณแบคทีเรีย ตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ (log CFU ต่อกรัม)				ปริมาณแบคทีเรีย สร้างฮอร์โมน (log CFU ต่อกรัม)			
	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	-
Hr (a)		ns				ns		
F-test Ratio (b)		ns				ns		
(a)*(b)		ns				ns		
CV (%)		5.34				6.35		

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
 โดยการใช้ DMRT
 ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ
 Hr ระยะเวลาการบ่ม (ชั่วโมง)
 Ratio อัตราส่วนไบโอชาร์ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว (น้ำหนักต่อปริมาตร)

(3) ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟต จากการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟตในไบโอสาร์เกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ทั้ง 3 อัตราส่วน ได้แก่ ไบโอสาร์เกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร อัตราส่วน 1 : 3 น้ำหนักต่อปริมาตร และอัตราส่วน 1 : 4 น้ำหนักต่อปริมาตร พบว่า ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟต มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อ 7.190 7.240 และ 7.320 log CFU ต่อกรัม ตามลำดับ และระยะเวลาการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลวของไบโอสาร์เกลบ ทั้ง 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 1 3 และ 6 ชั่วโมง พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟตเฉลี่ย 7.220 7.300 และ 7.240 log CFU ต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 14)

(4) ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม จากการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมในไบโอสาร์เกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ทั้ง 3 อัตราส่วน ได้แก่ ไบโอสาร์เกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร อัตราส่วน 1 : 3 น้ำหนักต่อปริมาตร และอัตราส่วน 1 : 4 น้ำหนักต่อปริมาตร พบว่า ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อ 5.560 5.500 และ 5.620 log CFU ต่อกรัม ตามลำดับ และระยะเวลาการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลวของไบโอสาร์เกลบ ทั้ง 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 1 3 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ที่ช่วงเวลาการดูดซับ 1 ชั่วโมง มีปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมเฉลี่ยสูงสุด 5.790 log CFU ต่อกรัม มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลา 3 ชั่วโมง มีปริมาณเชื้อ 5.380 log CFU ต่อกรัม และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับช่วงเวลา 6 ชั่วโมง มีปริมาณเชื้อ 5.510 log CFU ต่อกรัม (ตารางที่ 14)

จากผลการศึกษาอัตราส่วนและระยะเวลาการบ่มของไบโอสาร์เกลบต่อการดูดซับเซลล์จุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสม คือ การใช้ไบโอสาร์เกลบ 1 ส่วน ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว 2 ส่วน คิดเป็นอัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร ใช้ระยะเวลาดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว บ่มเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีผลให้ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟต และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม มีปริมาณเชื้อ 7.200 และ 6.04 log CFU ต่อกรัม ตามลำดับ โดยมีการใช้อัตราส่วนผสมและระยะเวลาในการบ่มน้อยที่สุด มีผลให้ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟต และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมในไบโอสาร์ มีค่าไม่แตกต่างกันกับการใช้ไบโอสาร์เกลบต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ที่อัตราส่วน 1 : 3 น้ำหนักต่อปริมาตร หรือ 1 : 4 น้ำหนักต่อปริมาตร เป็นระยะเวลาการบ่ม 3 หรือ 6 ชั่วโมง ซึ่งการใช้อัตราส่วนผสมสูง และระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณแบคทีเรียในไบโอสาร์เกลบ

ตารางที่ 14 ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟตและแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมในไบโอชาร์แกลบ

อัตราส่วน ไบโอชาร์ต่อ ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว	ระยะเวลาการบ่ม (ชั่วโมง)							
	ปริมาณแบคทีเรีย ละลายฟอสเฟต (log CFU ต่อกรัม)				ปริมาณแบคทีเรีย ละลายโพแทสเซียม (log CFU ต่อกรัม)			
	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	-
Hr (a)			ns				*	
F-test Ratio (b)			ns				ns	
(a)*(b)			ns				ns	
CV (%)			5.10				6.59	

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

โดยการใช้ DMRT

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

Hr ระยะเวลาการบ่ม (ชั่วโมง)

Ratio อัตราส่วนไบโอชาร์ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว (น้ำหนักต่อปริมาตร)

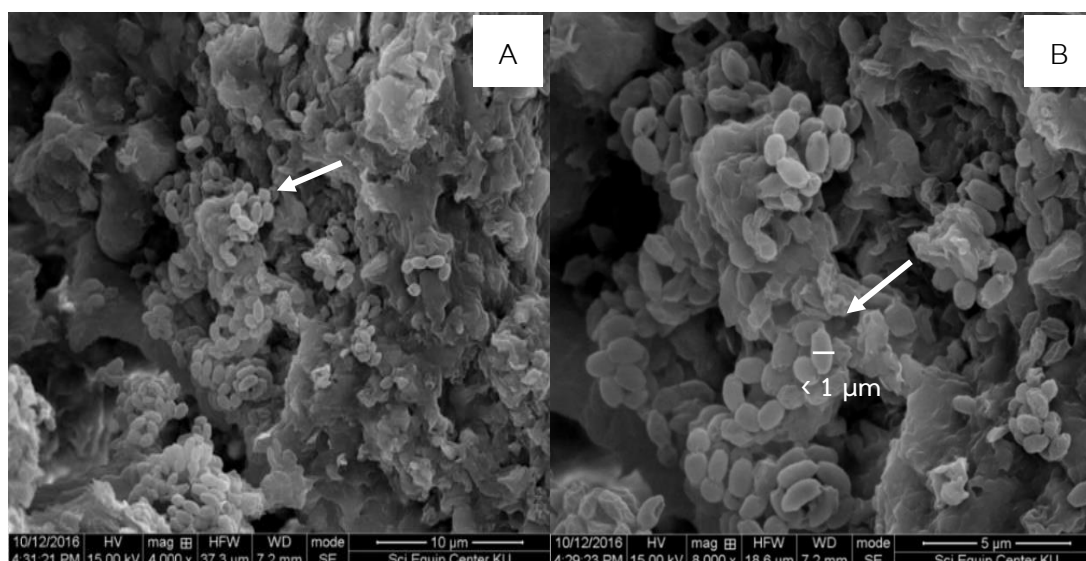
จากผลการศึกษาอัตราส่วนของไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับเซลล์จุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสม คือ การใช้ไบโอชาร์แกลบ 1 ส่วน ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว 2 ส่วน (อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร) ใช้ระยะเวลาดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีผลให้ปริมาณแบคทีเรียของปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียละลายฟอสเฟต แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม และแบคทีเรียสร้างฮอริโมน มีปริมาณเชื้อ 5.310 5.770 7.200 และ 6.040 log CFU ต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองเห็นได้ว่า การใช้ไบโอชาร์แกลบต่อปุ๋ยชีวภาพ

พด. 12 ชนิดเหลว ที่อัตราส่วน 1 : 3 น้ำหนักต่อปริมาตร หรือ 1 : 4 น้ำหนักต่อปริมาตร โดยการแช่ไบโอชาร์แกลบ เพื่อดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว เป็นระยะเวลา 3 หรือ 6 ชั่วโมง จากการใช้อัตราสูง และระยะเวลาเพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของแบคทีเรียในไบโอชาร์แกลบ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ไบโอชาร์แกลบ 1 ส่วน ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว 2 ส่วน (อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร) โดยใช้เวลาการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เป็นวิธีการที่เหมาะสม และไบโอชาร์แกลบสามารถดูดซับของเหลวเข้าภายในรูพรุนโดยใช้ระยะเวลาน้อยที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Maftuah *et al.* (2020) พบว่า การใช้ไบโอชาร์แกลบเป็นวัสดุพาหะของปุ๋ยชีวภาพ ประกอบด้วยแบคทีเรียละลายฟอสเฟต และแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ มีผลให้มีปริมาณเชื้อและสามารถคงความมีชีวิตรอดของแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดได้สูงสุดใน 6 สัปดาห์ มีปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟต เท่ากับ 7.518 log CFU ต่อกรัม และแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ เท่ากับ 7.739 log CFU ต่อกรัม มีปริมาณเชื้อสูงกว่าไบโอชาร์จากกะลามะพร้าว และเปลือกผลปาล์ม และสอดคล้องกับรายงานการใช้ไบโอชาร์เป็นวัสดุพาหะในการเก็บรักษา และตรึงเซลล์เชื้อ *B. cereus* WHX-1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโครเมียมได้ดีกว่าการใส่เชื้อแบบอิสระ เนื่องจากสมบัติของไบโอชาร์มีพื้นผิวที่หยาบ มีรูพรุนสูง เป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์ และลดการสูญเสียจุลินทรีย์ในดินได้ดี (Chen *et al.*, 2021) และจากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ไบโอชาร์แกลบมีโครงสร้างรูพรุนที่มีความคงตัวเหมาะสมเป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์ และมีแหล่งคาร์บอนที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ (อรสา, 2552) ซึ่งลักษณะโครงสร้างความเป็นรูพรุนของไบโอชาร์แกลบจะมีพื้นที่ผิว 7.16 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.0052 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม มีความสามารถในการดูดซับสารอาหารและเก็บรักษาความชื้น (ประภัสสร และคณะ, 2563) ส่งผลดีต่อจุลินทรีย์สามารถเจริญและเกิดกิจกรรมภายในรูพรุนของไบโอชาร์ (Chun *et al.*, 2004; Pimchuai *et al.*, 2010) โดยไบโอชาร์มีกลไกการตรึงจุลินทรีย์ที่เกิดจากการเกาะยึดบนพื้นผิวและรูพรุนผ่านการดูดซับ เกิดปฏิกิริยาระหว่างไฟฟ้าสถิต การสร้างกรดไอออน และการจับกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Liu *et al.*, 2020; Vasilieva *et al.*, 2021) ซึ่งจุลินทรีย์มีการเกาะติดกับวัสดุพาหะช่วยให้จุลินทรีย์เจริญเติบโต และแพร่กระจายได้ทั่วทั้งพื้นผิว และรูพรุนด้านในของไบโอชาร์ (Li *et al.*, 2022) กระบวนการตรึงเซลล์จุลินทรีย์ด้วยไบโอชาร์สามารถรักษาสภาพเซลล์จุลินทรีย์โดยธรรมชาติ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรและสิ่งแวดล้อม

จากข้อมูลผลการทดลองข้างต้นจึงเลือกวิธีการผลิตไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว คือ การใช้ไบโอชาร์แกลบ 1 ส่วน ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว 2 ส่วน (อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร) ใช้ระยะเวลามบปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลวในการดูดซับจุลินทรีย์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เป็นวิธีการที่เหมาะสมใช้ระยะเวลาน้อยที่สุด และมีปริมาณเชื้อสูงสุด จึงนำไปใช้ประโยชน์ในแปลงทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพต่อไป

2) การตรวจสอบการเข้าอาศัยของเซลล์แบคทีเรียภายในรูพรุนของไบโอชาร์
 แกลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำตัวอย่างจากการทดลองที่ 2 ไบโอชาร์แกลบ 1 ส่วน ต่อการดูดซับ
 ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว 2 ส่วน (อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร) บ่มนาน 1 ชั่วโมง
 นำตัวอย่างมาตรวจสอบการเข้าอาศัยของเซลล์จุลินทรีย์ภายในรูพรุนของไบโอชาร์ด้วยกล้อง
 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ลักษณะของเซลล์แบคทีเรียในรูพรุนไบโอชาร์แกลบที่กำลังขยาย
 4,000 เท่า และ 8,000 เท่า ดังภาพที่ 14 พบว่า ภายในช่องว่างของไบโอชาร์แกลบมีลักษณะ
 โครงสร้างรูพรุนสูง มีขนาดช่องว่างมากกว่า 5.0 ไมโครเมตร สามารถตรวจพบเซลล์แบคทีเรียที่มี
 ลักษณะเป็นวงรี หรือทรงกระบอก ยังคงรูปร่างเซลล์ความสมบูรณ์ และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ
 หนาแน่นภายในรูพรุนเป็นจำนวนมาก ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าเป็นแบคทีเรียที่มีรูปร่างลักษณะเป็นท่อน หรือรูปไข่
 โดยเซลล์แบคทีเรียจะมีส่วนกว้างเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5 - 4.0 ไมโครเมตร (นันทนา, 2549)
 ซึ่งโครงสร้างของไบโอชาร์แกลบมีลักษณะรูพรุน และการก่อตัวของช่องว่างคล้ายรังผึ้งที่จัดตัว
 เป็นระเบียบ มีรูช่องว่างกว้างซ่อนอยู่ใต้พื้นผิวไบโอชาร์แกลบ มีขนาดและการกระจายของรูพรุน
 สม่ำเสมอ และช่องว่างมีขนาดเฉลี่ย 10.64 ไมโครเมตร (Wangdi *et al.*, 2023) เนื่องจากวัสดุแกลบ
 เมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นในการผลิตไบโอชาร์ จะทำให้ไบโอชาร์แกลบมีโครงสร้าง
 คาร์บอนเสถียรเพิ่มสูงขึ้นและมีรูพรุนสูงขึ้น (Purevsuren *et al.*, 2003) อีกทั้งจากการวิเคราะห์
 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน พบว่า ไบโอชาร์แกลบมีพื้นที่ผิว 7.16
 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.0052 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม (ประภัสสร และคณะ, 2563)
 ทำให้เซลล์ของแบคทีเรียสามารถเข้าอาศัยที่พื้นที่ผิวและช่องว่างของไบโอชาร์แกลบได้ สอดคล้องกับ
 รายงานการวิจัย พบว่า ไบโอชาร์มีศักยภาพในการเป็นวัสดุรองรับจุลินทรีย์ได้เท่าเทียมกับเวอร์มิคูไลท์
 (vermiculite) ลิกไนต์ (lignite) พีทมอส (peat moss) และปุ๋ยหมัก (Bashan, 1998) และกลไก
 การตรึงจุลินทรีย์ด้วยไบโอชาร์จากกระบวนการตรึงจุลินทรีย์โดยการเกาะบนพื้นผิวและรูพรุน
 ผ่านการดูดซับ ปฏิกิริยาระหว่างไฟฟ้าสถิต การสร้างกรดไอออน และการจับโควาเลนต์ (Liu *et al.*, 2020;
 Vasilieva *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2014) และสอดคล้องกับรายงานของ Chen *et al.* (2021)
 พบว่า การใช้ไบโอชาร์เป็นตัวพาในการตรึง *B. cereus* จากการวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์
 อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบเซลล์จุลินทรีย์ในพื้นผิวที่หยาบ และรูพรุนของไบโอชาร์เป็นแหล่งอาศัย
 ของจุลินทรีย์ ลดการสูญเสียจุลินทรีย์ ช่วยรักษากิจกรรมของจุลินทรีย์ และเพิ่มประสิทธิภาพ
 ของจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งให้ผลสอดคล้องเช่นเดียวกับการใช้ไบโอชาร์ในการตรึงเซลล์แบคทีเรีย
 ละลายฟอสเฟต เช่น *Pseudomonas* sp. (Glodowska *et al.*, 2016)



ภาพที่ 14 ลักษณะของเซลล์แบคทีเรียในรูปฟลักไบโอชาร์แกลบ กำลังขยาย 4,000 เท่า (A)
8,000 เท่า (B)

4.7.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเจริญเติบโต และผลผลิตของคะน้าในแปลงทดลอง

จากการศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเจริญเติบโต และผลผลิตคะน้าในแปลงจากการปลูกทั้ง 2 รอบ มีรายละเอียดดังนี้

1) การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของดิน

(1) สมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง

จากการเก็บตัวอย่างดินก่อนการทดลองที่ระดับความลึก 0 - 15 เซนติเมตร โดยสุ่มจำนวน 15 จุด และนำมาคลุกเคล้าให้เข้ากันให้เป็น 1 ตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์สมบัติของดิน พบว่า ดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 8.27 ดินเป็นด่างปานกลาง ค่าการนำไฟฟ้าในดินจากการวัดด้วยอัตราส่วน 1 : 5 ของสารละลายดินก่อนการทดลอง มีค่าการนำไฟฟ้า 0.15 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร จัดเป็นดินไม่เค็ม (ตารางที่ 15) มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ 1.51 เปอร์เซ็นต์ จัดอยู่ในระดับต่ำ มีธาตุอาหารหลักในดิน ได้แก่ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 271.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับสูงมาก ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ 157.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับสูงมาก มีธาตุอาหารรองในดิน ได้แก่ ปริมาณแคลเซียมที่เป็นประโยชน์ 2,516.00

มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับสูง และปริมาณแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ 355.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับปานกลาง (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2548) (ตารางที่ 15) จากผลค่าวิเคราะห์ดินก่อนการทดลองจะเห็นได้ว่า ดินก่อนการทดลองมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินสูงมาก ดินมีค่าเป็นต่างจัดหากดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูงกว่า 7.20 ฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูป PO_4^{3-} เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งพืชดูดไปใช้ได้ยากที่สุด (ยงยุทธ, 2552) ขณะที่โพแทสเซียมในดินมีการสูญเสียจากการชะล้างมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณของโพแทสเซียมที่พืชดูดกลืนไปใช้ และมีปริมาณการสูญเสียเป็นอันดับสองรองจากไนโตรเจน (ปัทมา, 2547) แต่อย่างไรก็ตามการเจริญเติบโตของค่น้ำยังมีความจำเป็นต้องใช้ธาตุอาหารหลัก จากค่าวิเคราะห์ดินปริมาณธาตุอาหารหลักจากการใส่ปุ๋ยเคมีในการเพิ่มธาตุอาหารของต้นค่น้ำ คือ ต้องการไนโตรเจน 20 กิโลกรัมต่อไร่ ฟอสฟอรัส 5 กิโลกรัมต่อไร่ และโพแทสเซียม 5 กิโลกรัมต่อไร่ (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

(2) สมบัติทางเคมีของดินหลังการทดลองจากการปลูกค่น้ำรอบที่ 1

(2.1) ค่าการนำไฟฟ้าของดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูกค่น้ำรอบที่ 1 มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติระหว่างดำรับการทดลอง โดยมีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.14 - 0.16 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร (ตารางที่ 15) จะเห็นได้ว่า การใส่ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว 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 พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของดิน ภายหลังการทดลองไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.15 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร เมื่อนำเกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มีผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของดินอยู่ในระดับที่ไม่เค็ม (0 - 2 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร) แสดงให้เห็นได้ว่าการใส่ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 - 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ไม่ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของดินเปลี่ยนแปลงแตกต่างไปจากเดิม เนื่องจากสมบัติของไบโอชาร์แกลบ มีค่าการนำไฟฟ้าเพียง 0.50 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร อีกทั้งไม่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช สอดคล้องกับรายงานของประภัสสร และคณะ (2563) พบว่า ดินผสมไบโอชาร์แกลบ อัตรา 1,000 ตันต่อไร่ มีค่าการนำไฟฟ้าไม่แตกต่างกับดินที่ไม่ได้ใส่ไบโอชาร์แกลบ มีค่าการนำไฟฟ้าเพียง 0.03 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร และสอดคล้องกับรายงานของ Oladele (2019) พบว่า จากการศึกษการใช้ไบโอชาร์ 1 และ 2 ตันต่อไร่ ไม่ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าแตกต่างจากดินที่ไม่ใส่ในปีแรก แต่เห็นผลสามารถลดค่าการนำไฟฟ้าตามอัตราส่วนที่ใส่ไบโอชาร์เพิ่มขึ้นในปีที่ 3 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

(2.2) ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูกค่น้ำรอบที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการทดลอง มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p < 0.05$) พบว่า ดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ดำรับการทดลองที่ 3 และดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับ ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ หรือปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มสูงขึ้น มีค่าระหว่าง 8.47 - 8.50 มีค่าสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการทดลอง มีค่า 8.27 จัดได้ว่าดินเป็นด่างปานกลาง และมีค่าสูงกว่า ดำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับ ไบโอดีอาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 8.43 8.37 และ 8.33 สมบัติดินเป็นด่างปานกลาง (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2548) เมื่อพิจารณา จากดำรับการทดลองที่ 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับ ไบโอดีอาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 8.37 และ 8.33 ตามลำดับ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับ ดินก่อนการทดลอง มีค่า 8.27 (ตารางที่ 15) ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยนี้มีการจัดการไบโอดีอาร์แกลบที่มี สมบัติเป็นด่าง มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 9.60 ด้วยวิธีการแช่บ่มด้วยการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในอัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร นาน 1 ชั่วโมง ก่อนใส่ลงดิน เนื่องด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว มีสมบัติเป็นกรด ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 5.11 ส่งผลให้เมื่อใส่ไบโอดีอาร์แกลบ ที่ผ่านการบ่มปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ลงในดินต่างสามารถปลดปล่อยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในช่องรูพรุนออกมาภายนอกของไบโอดีอาร์ ด้วยสมบัติของไบโอดีอาร์ในการคายการดูดซับธาตุอาหาร อีกทั้งคุณสมบัติของปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 มีแบคทีเรียละลายสารประกอบฟอสเฟต *B. unamae* และ แบคทีเรียละลายแร่โพแทสเซียม *B. subtilis* ที่ผลิตกรดอินทรีย์แล้วปลดปล่อยละลายออกนอกเซลล์ (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) จึงเป็นผลส่งเสริมให้สามารถรักษาระดับค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ไม่แตกต่างกันกับดินก่อนการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าจะมีการใส่ไบโอดีอาร์ในอัตรา 1,000 - 2,000 ตันต่อไร่ อีกทั้งจากรายงานการศึกษาของ Abrishamkesh *et al.* (2015) พบว่า ไบโอดีอาร์ แกลบจากการเผาที่อุณหภูมิ 450 - 500 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 8.4 จากการใส่ อัตรา 0.4 -3.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงในเนื้อดินเหนียวปนทราย และสมบัติดินเป็นด่าง มีค่า ความเป็นกรดเป็นด่าง 7.9 ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรดเป็นด่าง เมื่อเปรียบเทียบกับ ดำรับควบคุม แต่กลับพบว่า การใส่ไบโอดีอาร์แกลบจากการเผาที่อุณหภูมิ 250 - 300 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 7.40 การใส่อัตรา 0.4 - 3.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลให้สมบัติดิน มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างลดลงต่ำกว่า 7.87 เนื่องจากไบโอดีอาร์แกลบที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 7.40 น่าจะถูกออกซิไดซ์มากกว่าไบโอดีอาร์ที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 8.40 เนื่องจากวัสดุที่เป็นกรด มากกว่า จึงส่งผลให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินลดลง

ตารางที่ 15 ค่าการนำไฟฟ้าและความเป็นกรดเป็นด่างของดินก่อนและหลังการทดลอง
จากการปลูกคะน้ารอบที่ 1

ดำรับการทดลอง	EC (1 : 5) (dS/m)	pH (1 : 1)
ดินก่อนการปลูกรอบที่ 1	0.15	8.27 d
1 = ไม้ใส่ปุ๋ย (control)	0.15	8.47 ab
2 = ปุ๋ยเคมี 100 เปอร์เซ็นต์	0.14	8.50 a
3 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่	0.14	8.50 a
4 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่	0.14	8.50 a
5 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ไบโอสชาร์กกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่	0.14	8.43 abc
6 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ไบโอสชาร์กกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่	0.16	8.37 bcd
7 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ไบโอสชาร์กกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่	0.14	8.33 cd
F-test	ns	*
CV (%)	8.30	0.79

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

โดยใช้ DMRT

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

(2.3) ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูก ค่ะน้ารอบที่ 1 (ตารางที่ 16) พบว่า ดำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของ อัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่า 1.85 2.02 และ 2.01 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จัดอยู่ในระดับปานกลาง มีค่าสูงกว่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุม ดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตาม ค่าวิเคราะห์ดิน ดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่าระหว่าง 1.52 - 1.59 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจาก สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า การใส่ไบโอชาร์แกลบ ที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลต่อการ สะสมปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มสูงขึ้นคิดเป็น 22.52 33.77 และ 33.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการทดลอง มีค่า 1.51 เปอร์เซ็นต์ จัดอยู่ในระดับต่ำ สามารถยกระดับอินทรีย์วัตถุของดินเพิ่มสูงขึ้นเป็น 1.85 - 2.02 เปอร์เซ็นต์ จัดว่าเป็นดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับปานกลาง

ค่าวิเคราะห์ดินภายหลังการทดลองจากการปลูกรอบที่ 1 จะเห็นได้ว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ ที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่ม การสะสมปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มสูงขึ้นคิดเป็น 22.52 - 33.77 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเพิ่มขึ้นตาม อัตราการใส่ไบโอชาร์แกลบ และมีค่าสูงกว่าดินที่ไม่ใส่ไบโอชาร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สอดคล้อง กับรายงานของนิชาภัทร (2562) พบว่า ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นตามอัตราการเติมไบโอชาร์ โดยใส่อัตรามากกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้นอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ และจากรายงานผลการศึกษาของ Schweikle *et al.* (2015) พบว่า ไบโอชาร์ ต่อซังข้าวโพดที่ผลิตโดยการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ด้วยวิธี Walkley and Black มีอินทรีย์วัตถุ 10.14 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็นอินทรีย์คาร์บอน 5.80 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ถูกออกซิไดซ์ได้ในไบโอชาร์มีปริมาณค่อนข้างต่ำ เพียง 7.44 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในไบโอชาร์ 78 เปอร์เซ็นต์ เป็นส่วนที่ไม่ถูกออกซิไดซ์ หรือถูกออกซิไดซ์ได้ยาก ซึ่งเป็นคาร์บอนส่วนใหญ่ที่อยู่ในรูปที่เสถียร ทนทานต่อการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ และการสลายตัวทางกายภาพ อีกทั้งไบโอชาร์ที่มีโครงสร้างคาร์บอนที่ประกอบด้วยส่วนผลึกที่มีพื้นผิวสูง พื้นที่ภายในของไบโอชาร์

ช่วยดูดซับอินทรีย์วัตถุที่ละลายน้ำได้ และสอดคล้องกับรายงานของ Tiyyon *et al.* (2011) พบว่าจากการวิเคราะห์สมบัติของไบโอชาร์แกลบที่ผลิตด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุ 10.22 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใส่ลงดินจะช่วยเพิ่มแหล่งคาร์บอนในดิน และการสะสมอินทรีย์วัตถุในดิน มีผลต่อการปลดปล่อยและการดูดซับสารอินทรีย์ละลายน้ำในดิน ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอัตราส่วนของไบโอชาร์ที่ใส่ลงดินเพิ่มขึ้น (Feng *et al.*, 2021)

(2.4) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 (ตารางที่ 16) พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติระหว่างตำรับการทดลอง โดยตำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินอยู่ในช่วง 270.77 - 311.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ขณะที่ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าระหว่าง 274.97 - 290.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์ เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาพบว่า ดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จัดอยู่ในระดับสูงมาก มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดินก่อนการทดลอง มีค่า 271.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และตำรับควบคุมมีค่า 262.57 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับสูงมากเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากสภาพพื้นที่ดินมีค่าเป็นต่างจัด ซึ่งหากดินมีค่าความเป็นกรดเป็นต่างสูงกว่า 7.20 ฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูป PO_4^{3-} เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นรูปที่พืชดูดไปใช้ได้ยากที่สุด อีกทั้งเกิดการสูญเสียจากการชะล้างในดินน้อย (ยงยุทธ, 2552) จึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมากนัก

(2.5) ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 (ตารางที่ 16) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์สะสมในดินมีค่าสูงสุด 254.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่า 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 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 5 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ และดินก่อนการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่าระหว่าง 122.33 - 157.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาพบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินจัดอยู่ในระดับสูงมาก มีค่าสูงกว่าดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดินเพียงอย่างเดียว เพิ่มขึ้นคิดเป็น 86.88 และ 107.92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และ มีค่าสูงกว่าดินก่อนการทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ มีค่าเพิ่มขึ้น 45.22 และ 61.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Abrishamkesh *et al.* (2015) พบว่า การใส่ไบโอชาร์แกลบ อัตรา 0.4 - 3.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในดินต่าง สามารถยกระดับปริมาณโพแทสเซียมในดินก่อนการทดลองจาก 121 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เพิ่มขึ้นเป็น 121.33 - 256.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากรายงานของพินิจฉณ (2558) พบว่า การใช้ไบโอชาร์ อัตราส่วน 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงขึ้นตามสัดส่วนของไบโอชาร์ ช่วยลดการสูญเสียโพแทสเซียมในดินได้ และจากผลการศึกษาของ Wang *et al.* (2014) พบว่า การใส่ไบโอชาร์ลงดิน ในอัตรา 0.5 - 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของดิน สามารถเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมในดินสูงขึ้นจาก 42 เป็น 324 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เนื่องจากสมบัติของไบโอชาร์ที่มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง สามารถกักเก็บธาตุไอออนบวก เช่น K^+ Ca^{2+} Mg^{2+} และ NH_4^+ ลดการสูญเสียธาตุอาหารจากการชะล้าง (Alling *et al.*, 2014) และการใส่ไบโอชาร์ลงดินช่วยเพิ่มค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน ส่งผลให้มีการรักษาระดับปริมาณของโพแทสเซียมในดิน (ยงยุทธ, 2552) อีกทั้งผลการทดลองจากงานวิจัยนี้มีการเพิ่มคุณสมบัติของไบโอชาร์ด้วยวิธีการบ่มปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว (อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร) บ่มนาน 1 ชั่วโมง ในการดูดซับเซลล์แบคทีเรียก่อนใส่ลงดิน จึงช่วยเพิ่มปริมาณแบคทีเรียละลายสารประกอบโพแทสเซียม *B. subtilis* เป็นจุลินทรีย์ที่ปลดปล่อยกรดอินทรีย์ ช่วยละลายแร่ธาตุที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ สามารถละลายโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้น 9.02 เปอร์เซ็นต์ (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) ส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์สะสมในดินเพิ่มขึ้น และการใช้ไบโอชาร์แกลบจะช่วยลดการสูญเสียโพแทสเซียมจากกระบวนการชะล้างภายในดินจากระบบการปลูกพืชแบบเชิงเดี่ยวที่มีจัดการดินด้วยการไถพรวนอย่างต่อเนื่อง

(2.6) ปริมาณแคลเซียมที่เป็นประโยชน์ ภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 (ตารางที่ 16) พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับควบคุม ดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าระหว่าง 2,315.30 - 2,901.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า ดินมีปริมาณแคลเซียมที่เป็นประโยชน์จัดอยู่ในระดับสูง มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดินก่อนการทดลอง 2,516.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับสูงเช่นกัน

(2.7) ปริมาณแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ ภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 (ตารางที่ 16) พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับควบคุม ดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าระหว่าง 320.00 - 360.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า ดินมีปริมาณแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์จัดอยู่ในระดับปานกลาง มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดินก่อนการทดลอง 355 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับปานกลางเช่นกัน

ตารางที่ 16 สมบัติทางเคมีของดินก่อนและหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1

ดำรับการทดลอง	OM (%)	Avail. P (mg/kg)	Avail. K (mg/kg)	Avail. Ca (mg/kg)	Avail. Mg (mg/kg)
ดินก่อนการปลูกรอบที่ 1	1.51 b	271.07	157.00 bc	2,516.00	355.00
1	1.55 b	262.57	122.33 c	2,441.00	341.67
2	1.55 b	274.97	122.00 c	2,778.70	323.67
3	1.59 b	290.33	116.67 c	2,703.70	320.00
4	1.52 b	277.17	146.00 bc	2,470.70	360.67
5	1.85 a	270.77	129.33 c	2,901.00	326.67
6	2.02 a	311.03	228.00 ab	2,315.30	344.00
7	2.01 a	290.33	254.00 a	2,735.00	355.00
F-test	**	ns	*	ns	ns
CV (%)	7.85	9.54	32.12	14.26	8.21

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยใช้ DMRT
ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซนต์

ดำรับการทดลองที่ 1 ไม่ใส่ปุ๋ย (control)

ดำรับการทดลองที่ 2 ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน

ดำรับการทดลองที่ 3 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 4 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 5 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 6 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 7 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่

(3) สมบัติทางเคมีของดินหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2

จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 เปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 ดังนี้

(3.1) ค่าการนำไฟฟ้าของดิน ภายหลังการทดลองทุกตำรับการทดลอง มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 0.13 - 0.14 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร (ตารางที่ 17) จะเห็นได้ว่าการใส่ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของดินเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 มีค่า 0.15 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร เมื่อนำเกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของดินอยู่ในระดับที่ไม่เค็ม (0 - 2 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร) หรือไม่มีผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตของพืช

(3.2) ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน พบว่า ตำรับการทดลอง มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) ตำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว 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 และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 มีค่า 8.27 แต่มีค่าลดลงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้น มีค่าระหว่าง 8.43 - 8.47 จึงจัดได้ว่าดินเป็นด่างปานกลาง (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2548) (ตารางที่ 17)

เมื่อพิจารณาจากค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2 พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้ความเป็นกรดเป็นด่างของดินทั้ง 2 รอบการปลูก มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการใส่ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 - 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ลงดินในครั้งเดียว ยังคงสามารถรักษาระดับความเป็นด่างของดินไม่ให้เพิ่มขึ้นได้ ซึ่งต่างจากตำรับควบคุม และการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวที่ส่งผลให้ดินเป็นด่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากการปรับปรุงคุณสมบัติของไบโอชาร์แกลบที่มีสมบัติเป็นด่างด้วยการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ที่มีสมบัติเป็นกรด มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่ำกว่า 5 โดยมีอัตราการดูดซับ 1 ต่อ 2 น้ำหนักต่อปริมาตร

จึงทำให้พื้นที่ผิวและรูพรุนของไบโอชาร์กลบบรรจด้วยสารละลายของปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว สามารถลดสมบัติความเป็นต่างของไบโอชาร์กลบก่อนใส่ลงดิน และช่วยเพิ่มสารละลายที่มีสมบัติเป็นกรดลงในดินอีกด้วย อีกทั้งบริเวณพื้นผิวไบโอชาร์จะมีหมู่ฟีนอลิก หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่คาร์บอนิล ทำหน้าที่จับไฮโดรเจนไอออนที่ละลายอยู่ในสารละลาย (Brewer and Brown, 2012) และอาจเกิดจากกิจกรรมของแบคทีเรียในปุ๋ยชีวภาพที่สามารถผลิตกรดอินทรีย์ขับออกมาภายนอก ผลงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การใส่ไบโอชาร์กลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลวในอัตราที่สูงขึ้น สามารถรักษาระดับค่าความเป็นกรดเป็นต่างของดินต่างไม่ให้อัตราที่สูงขึ้น จึงไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรดเป็นต่างของดิน และคุณสมบัติของไบโอชาร์ยังมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเป็นต่างของดินได้อีกด้วย (Brady and Weil, 2010)

ตารางที่ 17 ค่าการนำไฟฟ้าและความเป็นกรดเป็นด่างของดินหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 เปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1

ดำรับการทดลอง	EC (1 : 5) (dS/m)	pH (1 : 1)
ดินก่อนการปลูกรอบที่ 1	0.15	8.27 b
1 = ไม่ใส่ปุ๋ย (control)	0.13	8.43 a
2 = ปุ๋ยเคมี 100 เปอร์เซ็นต์	0.14	8.43 a
3 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่	0.14	8.33 b
4 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่	0.14	8.47 a
5 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ไบโอสชาร์กแลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่	0.14	8.33 b
6 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ไบโอสชาร์กแลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่	0.14	8.30 b
7 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ไบโอสชาร์กแลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่	0.14	8.27 b
F-test	ns	**
CV (%)	8.09	0.65

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยใช้ DMRT

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

(3.3) ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 (ตารางที่ 18) พบว่า ดำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอสชาร์กแลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 1.67 - 1.83 เปอร์เซ็นต์ แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุม ดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ดำรับการทดลองที่ 3

การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่าระหว่าง 1.40 - 1.53 เปอร์เซ็นต์ จัดอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ และเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้า รอบที่ 1 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่า 1.51 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้เกณฑ์ การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า การใส่ ไบโอสาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลต่อการสะสมปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ จัดว่าเป็นดิน ที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับปานกลาง สามารถยกระดับอินทรีย์วัตถุของดินก่อนการทดลอง จาก 1.51 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มเป็นอินทรีย์วัตถุเฉลี่ย 1.75 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้นคิดเป็น 15.89 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินภายหลังการทดลอง จากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2 พบว่า ดำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอสาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินภายหลัง การทดลองทั้ง 2 ครั้ง มีค่าการสะสมของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้นสูงกว่าดินก่อนการปลูก คะน้ารอบที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ขณะที่การใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวมีผลให้ปริมาณ อินทรีย์วัตถุในดินภายหลังการปลูกคะน้าอย่างต่อเนื่อง 2 รอบมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของดนัย และ วิวัฒน์ (2565) พบว่า การใส่ไบโอสาร์ อัตรา 1,000 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลต่อปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้น มากกว่าใส่ปุ๋ยหมักที่อัตราเดียวกัน เช่นเดียวกับรายงานผลการศึกษาของเกศศิริรินทร์ และคณะ (2558) พบว่า การใส่ไบโอสาร์ อัตรา 1,000 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มการสะสม อินทรีย์วัตถุในดินสูงกว่าการไม่ใส่ไบโอสาร์อย่างมีนัยสำคัญ และรายงานของจิตินิภา (2558) พบว่า การใส่ไบโอสาร์ร่วมกับปุ๋ยเคมีในการปลูกข้าวไร่ มีผลทำให้ดินมีอินทรีย์วัตถุ และธาตุอาหารในดิน สะสมเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว และสอดคล้องกับผลการศึกษาของสายชล และ คณะ (2563) พบว่า ผลของไบโอสาร์ร่วมกับการจัดการปุ๋ยต่อผลผลิต และความเข้มข้นธาตุอาหาร ในถั่วฝักยาวไร้ค้าง มีผลให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงกว่าดำรับที่ไม่ใช้ไบโอสาร์ ทั้งนี้เนื่องจากไบโอสาร์ แกลบมีองค์ประกอบของอินทรีย์คาร์บอนคงตัวสูง 32.30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ ให้กับดิน และช่วยเพิ่มปริมาณชีวมวลในดินจากปริมาณเศษซากพืชในดิน และสอดคล้องกับ การประเมินคุณภาพดินจากการใส่ไบโอสาร์เพื่อเพิ่มคาร์บอนในดิน โดยการใส่ไบโอสาร์ในอัตราส่วน ที่สูงขึ้นจะยิ่งมีผลทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มสูงขึ้น (บรรเจิดลักษณ์ และ รติกร, 2560) เนื่องจากไบโอสาร์มีปริมาณเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุสูง มีส่วนช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน

และช่วยเพิ่มปริมาณชีวมวลในดินจากปริมาณเศษซากพืชนั้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองปลูกไม้ผลชนิดต่าง ๆ ในสภาพเนื้อดินทรายจัด พบว่า การใช้ปุ๋ยหมักร่วมกับไบโอชาร์ ส่งผลให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มสูงขึ้น (พินิจภณ, 2558) เนื่องจากสมบัติของไบโอชาร์เป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนในรูปที่มีเสถียรภาพสูง สามารถกักเก็บคาร์บอนได้ในระยะยาว แม้ว่าจะสลายตัวเล็กน้อยในช่วงแรก แต่ส่วนที่เหลือจะทนทานอย่างยิ่งในดิน (Major *et al.*, 2010)

(3.4) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 (ตารางที่ 18) พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินอยู่ในช่วง 274.97 - 287.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าระหว่าง 281.90 - 296.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า ดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จัดอยู่ในระดับสูงมาก และให้ค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับควบคุมมีค่า 253.95 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับสูงมากเช่นกัน และทุกดำรับการทดลองข้างต้นมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 มีค่า 271.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

เมื่อพิจารณาปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2 พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสในดินมีค่าอยู่ในระดับสูงมาก ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากดินก่อนการทดลองมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินอยู่ในระดับสูงมาก 271.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อาจไม่เห็นผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินได้ชัดเจน จากการดูใช้ธาตุอาหารของคะน้าสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ต้องการปริมาณฟอสฟอรัสเพียง 0.3 - 0.6 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง เมื่อพิจารณาสมบัติดินก่อนการทดลอง ดินเป็นด่าง มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างมากกว่า 8 ส่งผลต่อการสะสมแคลเซียม และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ดินที่มีสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของดินสูง มักจะมี CaCO_3 หรือ MgCO_3 สะสมอยู่ ไอออนฟอสเฟตจะทำปฏิกิริยาได้ดีและรวดเร็วกับ Ca^{2+} และ Mg^{2+} เกิดเป็นสารแคลเซียมหรือแมกนีเซียมฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ยาก และพืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เกิดการตรึงฟอสเฟตไอออนในดิน เมื่อใส่ปุ๋ยฟอสเฟตที่ละลายได้ดีลงไปดิน พืชจะดูดปุ๋ยไปใช้ได้เพียง 10 - 25 เปอร์เซ็นต์ของฟอสเฟตที่ละลายได้ในปุ๋ยเท่านั้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) และดินมีค่าเป็นด่างจัด หากดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูงกว่า 7.2 ฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูป PO_4^{3-} เป็นส่วนใหญ่

ซึ่งพืชดูดไปใช้ได้ยากที่สุด และเกิดการสูญเสียจากการชะล้างในดินน้อย (ยงยุทธ, 2552) อีกทั้งไบโอชาร์มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัส มีรูพรุน และพื้นที่ผิวสูง จึงช่วยดูดซับธาตุอาหารได้ดี และช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน (ประไพพิศ และคณะ, 2557) สอดคล้องกับรายงานของ Zhang *et al.* (2014) ไบโอชาร์ที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์และการดูดซับธาตุฟอสฟอรัสในดิน และช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสในดิน แต่ปริมาณการดูดซับนั้นขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุของไบโอชาร์อีกด้วย

(3.5) ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 (ตารางที่ 18) พบว่า ดำรับการทดลองที่ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์สะสมในดินมีค่าสูงสุด 150.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่า 130.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 มีค่า 157.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุม ดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 5 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 62.42 - 81.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินจัดอยู่ในระดับสูงมาก มีค่าสูงกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์และการใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดินเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) มีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้นคิดเป็น 84.90 และ 113.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2 ทั้ง 2 รอบการปลูก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างดำรับการทดลองและดินก่อนการปลูกรอบที่ 1 พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 และ

2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการใส่ปุ๋ย การทดลองอื่น สามารถรักษาระดับปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินไว้ได้ไม่แตกต่างกัน ทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะแนนรอบที่ 1 แสดงให้เห็นได้ว่า ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับ ด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จากการใส่ในอัตรา 1,500 - 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลต่อ การสะสมปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน สอดคล้องกับรายงานของคณัย และ วิวัฒน์ (2565) การใส่ไบโอชาร์ อัตรา 1,000 - 2,000 ตันต่อไร่ มีผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น และการใช้ไบโอชาร์ อัตรา 500 - 3,000 กิโลกรัมต่อไร่ สำหรับการ ปลูกพืชผักอินทรีย์ในพื้นที่ดินกรด มีผลให้ปริมาณโพแทสเซียมในดินเพิ่มขึ้น (บรรเจิดลักษณ์ และ รติกร, 2560) และจากรายงานของ Ghorbani and Amirahmadi (2018) การใช้ไบโอชาร์แกลบ อัตรา 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินทดลอง สามารถเพิ่มการดูดซับไนโตรเจนและโพแทสเซียม ในดินสูงขึ้นตามอัตราที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากไบโอชาร์แกลบมีองค์ประกอบของโพแทสเซียม 1 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง มีค่า 178.71 เซนติโมลของประจุต่อกิโลกรัม มีค่าสูงกว่าดินที่มีค่า 27.74 เซนติโมลของประจุต่อกิโลกรัม และดินผสมกับไบโอชาร์แกลบ มีค่า 51.22 เซนติโมลของประจุต่อกิโลกรัม มีผลให้ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินที่ใส่ไบโอชาร์แกลบเพิ่มขึ้น มากกว่าไม่ใส่ (ประภัสสร และคณะ, 2563) ขณะที่ไบโอชาร์ที่เกิดสัดส่วนตัวสูงในกระบวนการผลิต จะมีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงตามไปด้วย (Asli *et al.*, 2016) ซึ่งความสามารถในการดูดซับ ธาตุอาหารมีความเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนไอออนบนพื้นผิว (Wang *et al.*, 2022; Tomczyk *et al.*, 2020) และสอดคล้องกับการศึกษาทดลองของพุทธิภณ และคณะ (2557) พบว่า ดินที่มีการใส่ ไบโอชาร์ทำให้โพแทสเซียมที่มีอยู่ในดินไม่ถูกชะล้าง และลดการสูญหายธาตุอาหารออกจากดิน เนื่องจากไบโอชาร์แกลบมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง มีผลทำให้หลังสิ้นสุดการทดลองมี ปริมาณโพแทสเซียมในดินสูง อย่างไรก็ตามไม่เพียงแต่ประโยชน์ของไบโอชาร์เท่านั้น การใส่ไบโอชาร์ แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลวในอัตราที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ปริมาณโพแทสเซียมในดินมี การสะสมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องมาจากการเพิ่มปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ที่มีแบคทีเรียละลาย สารประกอบโพแทสเซียม *B. subtilis* ที่ผลิตกรดอินทรีย์ช่วยละลายแร่ธาตุที่มีโพแทสเซียม เป็นองค์ประกอบในกลุ่มไมก้า เช่น ไบโอไทต์ และมัสโคไวต์ เป็นต้น และกลุ่มของเฟลด์สปาร์ เช่น ไมโครไคลน์ และออโทเคลส เป็นต้น ให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ สามารถละลาย โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้น 9.02 เปอร์เซ็นต์ (ฉวีวรรณ และ คณะ, 2552) ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติไบโอชาร์ด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จากคุณสมบัติ ของไบโอชาร์ที่มีรพุนสูง มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก สามารถดูดซับธาตุอาหาร และเป็นแหล่งที่อยู่อาศัย ให้กับแบคทีเรียจากหัวเชื้อปุ๋ยชีวภาพรพุนของเหลวได้ดี จึงส่งผลดีต่อการเจริญเติบโต เพิ่มผลผลิต และ การสะสมธาตุอาหารในดินเพิ่มขึ้น (Lehmann *et al.*, 2011)

(3.6) ปริมาณแคลเซียมที่เป็นประโยชน์ ภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 (ตารางที่ 18) พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับควบคุม ดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าระหว่าง 2,140.70 - 2,317.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และทุกดำรับการทดลองข้างต้น มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกรอบที่ 1 มีค่า 2,516 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาพบว่า ดินมีปริมาณแคลเซียมที่เป็นประโยชน์จัดอยู่ในระดับสูง มีค่าไม่แตกต่างจากดินก่อนการปลูกรอบที่ 1 ที่จัดอยู่ในระดับสูงเช่นกัน

เมื่อพิจารณาปริมาณแคลเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2 พบว่า ทุกดำรับการทดลองมีปริมาณแคลเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ เนื่องจากดินก่อนการทดลองมีสมบัติของเป็นดินด่าง มีการสะสมปริมาณแคลเซียมของดินอยู่ในระดับสูง อาจเนื่องจากในดินด่างเกิดจากวัตถุดิบกำเนิดที่เป็นด่าง เช่น หินปูน และการสะสมในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต เกิดการสะสมตกตะกอนในดินบนสูง จึงเกิดการชะละลายได้น้อย อีกทั้ง แคลเซียมเป็นธาตุอาหารรองที่จำเป็นต่อพืช ซึ่งมีความจำเป็นต่อการแบ่งเซลล์ของพืช และเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืช มีบทบาทต่อการสร้างโปรตีน และส่งเสริมการดูดใช้ในโตรเจนในพืช เป็นต้น แต่พืชต้องการในปริมาณน้อยกว่าธาตุอาหารหลัก จึงมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างดำรับการทดลอง (พินิจภณ, 2558)

(3.7) ปริมาณแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ ภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 (ตารางที่ 18) พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับควบคุม ดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ดำรับการทดลองที่ 3 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าระหว่าง 322.67 - 379.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และทุกดำรับการทดลองข้างต้นมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกรอบที่ 1 มีค่า 355 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาพบว่า

ดินมีปริมาณแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์จัดอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง ใกล้เคียงกับดินก่อนการทดลอง 355 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับปานกลาง

เมื่อพิจารณาปริมาณแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินภายหลังการทดลองจากการปลูกคะแนนรอบที่ 1 และ 2 พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีปริมาณแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ อาจเนื่องจากในดินต่างเกิดการสะสมในรูปแมกนีเซียมคาร์บอเนตเกิดการสะสมตกตะกอนในดินบนสูง จึงเกิดการชะละลายได้น้อย อีกทั้ง แมกนีเซียมจัดเป็นธาตุอาหารรองที่จำเป็นต่อพืช เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของคลอโรฟิลล์ แต่พืชดูดไปใช้ในปริมาณน้อย จึงไม่เห็นความแตกต่างของปริมาณแมกนีเซียมในดินที่ยังคงสะสมอยู่ในดินมาก แสดงว่าพืชนำแมกนีเซียมไปใช้ประโยชน์เพียงเล็กน้อย จึงมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างตำรับการทดลอง (พินิจภณ, 2558; คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ตารางที่ 18 สมบัติทางเคมีของดินหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 เปรียบเทียบกับ ดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1

ตำรับการทดลอง	OM (%)	Avail. P (mg/kg)	Avail. K (mg/kg)	Avail. Ca (mg/kg)	Avail. Mg (mg/kg)
ดินก่อนการปลูกรอบที่ 1	1.51 bc	271.07	157.00 a	2,516.00	355.00
1	1.40 c	253.95	62.42 b	2,257.70	335.67
2	1.40 c	281.90	70.67 b	2,249.70	325.00
3	1.53 bc	296.17	67.67 b	2,290.00	322.67
4	1.53 bc	295.33	67.67 b	2,317.30	379.00
5	1.83 a	274.43	81.67 b	2,211.70	346.00
6	1.67 ab	287.70	130.67 a	2,140.70	335.67
7	1.76 a	285.37	150.67 a	2,278.00	335.00
F-test	**	ns	**	ns	ns
CV (%)	7.00	8.60	18.13	7.81	10.14

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยใช้ DMRT
ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซนต์
ตำรับการทดลองที่ 1 ไม่ใส่ปุ๋ย (control)

ตำรับการทดลองที่ 2 ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน

ตำรับการทดลองที่ 3 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +
ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่

ตำรับการทดลองที่ 4 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +
ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่

ตำรับการทดลองที่ 5 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +
ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่

ตำรับการทดลองที่ 6 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +
ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่

ตำรับการทดลองที่ 7 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +
ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่

2) การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของดิน

ผลวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดินภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 เปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 (ตารางที่ 19) ดังนี้

(1) สมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง

เมื่อพิจารณาจากค่าวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของดิน เป็นสัดส่วนของมวลดินแห้งต่อปริมาตรรวมของดิน พบว่า ดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 มีความหนาแน่นรวมของดิน 1.67 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อประเมินระดับความหนาแน่นรวมของดิน โดยทั่วไปอยู่ในระดับสูง มีค่าระหว่าง 1.60 - 1.90 (Blake and Hartge, 1986) ทั้งนี้อาจเนื่องจากลักษณะเนื้อดินในแปลงทดลอง ดินบนเป็นดินร่วนปนทราย ส่วนดินล่างเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย หรือดินร่วนเหนียว โดยทั่วไปความหนาแน่นรวมของดินที่มีโครงสร้างดินดี มีค่า 1.30 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (วีรวัฒน์, 2558) อีกทั้งอาจเกิดจากการใช้พื้นที่ดังกล่าวทางการเกษตรอย่างต่อเนื่อง และมีการใช้เครื่องจักรกลในการไถพรวนดิน และมีค่าปริมาณน้ำในดินก่อนการทดลองมีค่า 18.19 เปอร์เซ็นต์

(2) สมบัติทางกายภาพของดินหลังการทดลอง

(2.1) ความหนาแน่นรวมของดิน จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวมของดินภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 พบว่า ค่าความหนาแน่นรวมของดินในแต่ละตำรับการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) ได้แก่ ตำรับควบคุม ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน และตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ ค่าความหนาแน่นรวมของดินสูงสุด และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 1.64 - 1.69 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อประเมินระดับความหนาแน่นรวมของดินโดยทั่วไปอยู่ในระดับสูง มีค่าระหว่าง 1.60 - 1.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่า 1.50 1.45 และ 1.43 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ เมื่อประเมินระดับความหนาแน่นรวมของดินมีค่าลดลงอยู่ในระดับปานกลาง มีค่าระหว่าง 1.30 - 1.60 (Blake and Hartge, 1986) จะเห็นว่าตำรับการทดลองที่มีการใส่ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ทุกอัตราให้ผลให้ความหนาแน่นรวมของดินลดลงแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 มีค่า 1.67 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดินมีค่าความหนาแน่นรวมของดินลดลง 10.18 - 16.78 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับรายงานของ Mankasingh *et al.* (2011) พบว่า จากการนำไบโอชาร์ไปใช้ประโยชน์เพื่อการปรับปรุงดิน สามารถลดความหนาแน่นรวมของดินลงได้ และการใส่ไบโอชาร์ที่อัตราประมาณ

2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถลดความหนาแน่นรวมของดินจาก 1.66 เหลือเป็น 1.53 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และจากการทดลองบ่มดินในคอลัมน์ พบว่า ดินที่เติมไบโอชาร์จะมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าดินที่ไม่ได้เติมไบโอชาร์อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการศึกษาในพื้นที่จริงต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 3 ปี โดยค่าความหนาแน่นรวมของดินที่เติมไบโอชาร์ที่ระดับความลึก 0 - 7.5 เซนติเมตร ลดลง 4.5 และ 6.0 เปอร์เซ็นต์ จากการเติมไบโอชาร์ อัตรา 0.23 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หรือคิดเป็น 368 กิโลกรัมต่อไร่ และ 0.45 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หรือคิดเป็น 720 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ และสอดคล้องกับรายงานของณิชาภัทร (2562) พบว่า การเติมไบโอชาร์จากตอซังข้าวโพดลงในดิน อัตรา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ความหนาแน่นรวมของดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคของไบโอชาร์มีผลต่อการลดลงของความหนาแน่นรวมของดิน โดยไบโอชาร์ขนาดเล็กกว่า 1 และ 1 - 2 มิลลิเมตร ทำให้ความหนาแน่นรวมของดินลดลงได้มากกว่าไบโอชาร์ขนาดใหญ่ 2 - 5 มิลลิเมตร และคุณสมบัติความพรุนสูงของไบโอชาร์สามารถลดความหนาแน่นรวมของดินลงได้อีกด้วย

(2.2) ปริมาณน้ำในดิน จากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำของดินของตัวอย่างดินภายหลังการทดลองจากการปลูกกะนารอบที่ 2 พบว่า ปริมาณน้ำในดินของแต่ละตำรับการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยตำรับการทดลองที่ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณน้ำในดินภายหลังทดลองมีค่าสูงสุด 23.37 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 5 และ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 และ 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันมีค่า 20.47 และ 21.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการใส่ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ทุกอัตราให้ผลให้ปริมาณน้ำในดินสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 1 - 4 มีค่าปริมาณน้ำในดินภายหลังการทดลองไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่าระหว่าง 18.57 - 19.87 เปอร์เซ็นต์ และดินก่อนการปลูกกะนารอบที่ 1 มีค่า 18.19 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า สมบัติทางกายภาพของดินภายหลังการทดลอง จากการใส่ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในอัตราที่สูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในดินตามไปด้วย เนื่องจากสมบัติของไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว มีรูพรุนสูงช่วยดูดซับน้ำจากปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว และกักเก็บน้ำในดินได้สอดคล้องกับรายงานของประไพพิศ และคณะ (2564) การใส่ไบโอชาร์ อัตรา 1,000 และ 2,000 ตันต่อไร่ มีผลต่อความชื้นในดินในช่วงความลึก 0 - 60 เซนติเมตร ในดินเนื้อหยาบมีความชื้นดินสูงกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์ และมีผลต่อการแทรกซึมน้ำของเนื้อดินทรายปนดินร่วน และจากการใส่ไบโอชาร์

มีผลให้อัตราการแทรกซึมน้ำสูงกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์ สอดคล้องกับผลการศึกษาการใส่ไบโอชาร์ ปริมาณ 1 - 2 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยเพิ่มสมบัติทางกายภาพดินให้ดีขึ้นได้ เช่น ความจุน้ำในดิน (Verheijen *et al.*, 2009) และจากรายงานผลการศึกษาของ Abel *et al.* (2013) พบว่า การใส่ไบโอชาร์ 2.5 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้ปริมาณน้ำในดินทรายเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การไม่ใส่ไบโอชาร์ และจากรายงานของ Gaskin *et al.* (2008) พบว่า การใส่ไบโอชาร์ 8 เปอร์เซ็นต์ มีผลทำให้ปริมาณน้ำในดินร่วนปนทรายเพิ่มขึ้นเห็นผลชัดเจน และการเติมไบโอชาร์ลงในดินไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มการเก็บน้ำในดิน และค่าการนำไฟฟ้า แต่อาจช่วยเพิ่มความสามารถในการแทรกซึมน้ำของดิน (Igbadunh *et al.*, 2016) แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มไบโอชาร์กลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว เมื่อใส่ลงดินจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในดิน ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวมของดิน โดยในดินที่มีความหนาแน่นของดินต่ำจะมีช่องว่างในดินสูง จะมีผลให้มีปริมาณน้ำในดินสูงมากกว่าดินที่มีความหนาแน่นของดินสูงจะมีช่องว่างในดินลดลง และมีปริมาณน้ำในดินน้อยลง บ่งบอกถึงการบีบอัดของช่องว่างในดิน (สถาพร, 2546)

ตารางที่ 19 ความหนาแน่นรวมและปริมาณน้ำในดินหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2
เปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1

ตัวรับการทดลอง	ความหนาแน่นรวมของดิน ปริมาณน้ำในดิน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) (เปอร์เซ็นต์)	
ดินก่อนการปลูกรอบที่ 1	1.67 a	18.19 d
1 = ไม้ใส่ปุ๋ย (control)	1.68 a	18.57 d
2 = ปุ๋ยเคมี 100 เปอร์เซ็นต์	1.64 ab	18.69 d
3 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่	1.69 a	19.06 cd
4 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่	1.56 bc	19.87 cd
5 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ไบโอสชาร์กกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่	1.50 cd	20.47 bc
6 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ไบโอสชาร์กกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่	1.45 d	21.78 b
7 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ไบโอสชาร์กกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่	1.43 d	23.37 a
F-test	**	**
CV (%)	3.61	4.20

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยใช้ DMRT

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

3) การเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียในดินหลังการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียละลายฟอสเฟต แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม และแบคทีเรียสร้างฮอโมน จากตัวอย่างดินภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 เปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 (ตารางที่ 20) มีรายละเอียดดังนี้

(1) ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระในดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ จากการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ หรือการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขี้มูลสัตว์ 300 กิโลกรัมต่อไร่ หรือการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระในดิน มีปริมาณเชื้อระหว่าง 4.812 - 5.167 log CFU ต่อกรัม ขณะที่ตำรับควบคุมและการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวมีปริมาณเชื้อ 4.499 และ 4.966 log CFU ต่อกรัม ตามลำดับ และทุกตำรับการทดลองมีปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 มีปริมาณเชื้อ 4.240 log CFU ต่อกรัม

(2) ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟตในดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขี้มูลสัตว์ 300 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณเชื้อสูงสุด 6.148 log CFU ต่อกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ตำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 5.494 - 5.954 log CFU ต่อกรัม และตำรับควบคุมมีปริมาณเชื้อ 5.440 log CFU ต่อกรัม แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว มีปริมาณเชื้อ 5.203 log CFU ต่อกรัม และทุกตำรับการทดลองข้างต้นมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 มีปริมาณเชื้อ 4.429 log CFU ต่อกรัม

(3) ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมในดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน

ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ ขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณเชื้อสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 7.380 - 7.826 log CFU ต่อกรัม และมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุมและการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว มีปริมาณเชื้อ 6.676 และ 6.711 log CFU ต่อกรัม ตามลำดับ และทุกดำรับการทดลองข้างต้นมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 มีปริมาณเชื้อ 5.718 log CFU ต่อกรัม

(4) ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอโมนในดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 พบว่า ทุกดำรับการทดลองปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอโมน มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยดำรับการทดลองที่ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณเชื้อสูงสุด 5.186 log CFU ต่อกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณเชื้อ 4.809 log CFU ต่อกรัม แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว ดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 5 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 4.292 - 4.474 log CFU ต่อกรัม และทุกดำรับการทดลองข้างต้นมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 มีปริมาณเชื้อต่ำสุด 3.707 log CFU ต่อกรัม ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุมมีปริมาณเชื้อ 4.045 log CFU ต่อกรัม

ตารางที่ 20 ปริมาณแบคทีเรียในดินหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 เปรียบเทียบกับ
ดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1

ตำรับการทดลอง	ปริมาณแบคทีเรีย (log CFU ต่อกรัม)			
	แบคทีเรียตรึง	แบคทีเรียละลาย	แบคทีเรียละลาย	แบคทีเรียสร้าง
	ไนโตรเจนแบบอิสระ	ฟอสเฟต	โพแทสเซียม	ฮอโรโมน
ดินก่อนการปลูกรอบที่ 1	4.240	4.429 c	5.718 c	3.707 e
1	4.499	5.440 ab	6.676 b	4.045 de
2	4.966	5.203 b	6.711 b	4.327 cd
3	5.167	6.148 a	7.455 a	4.292 cd
4	5.114	5.549 ab	7.380 a	4.335 cd
5	4.819	5.589 ab	7.677 a	4.474 bc
6	4.812	5.494 ab	7.826 a	4.809 ab
7	5.007	5.954 ab	7.585 a	5.186 a
F-test	ns	**	**	**
CV (%)	10.37	7.85	3.61	5.05

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยใช้ DMRT

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซนต์

ตำรับการทดลองที่ 1 ไม่ใส่ปุ๋ย (control)

ตำรับการทดลองที่ 2 ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน

ตำรับการทดลองที่ 3 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่

ตำรับการทดลองที่ 4 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่

ตำรับการทดลองที่ 5 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่

ตำรับการทดลองที่ 6 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

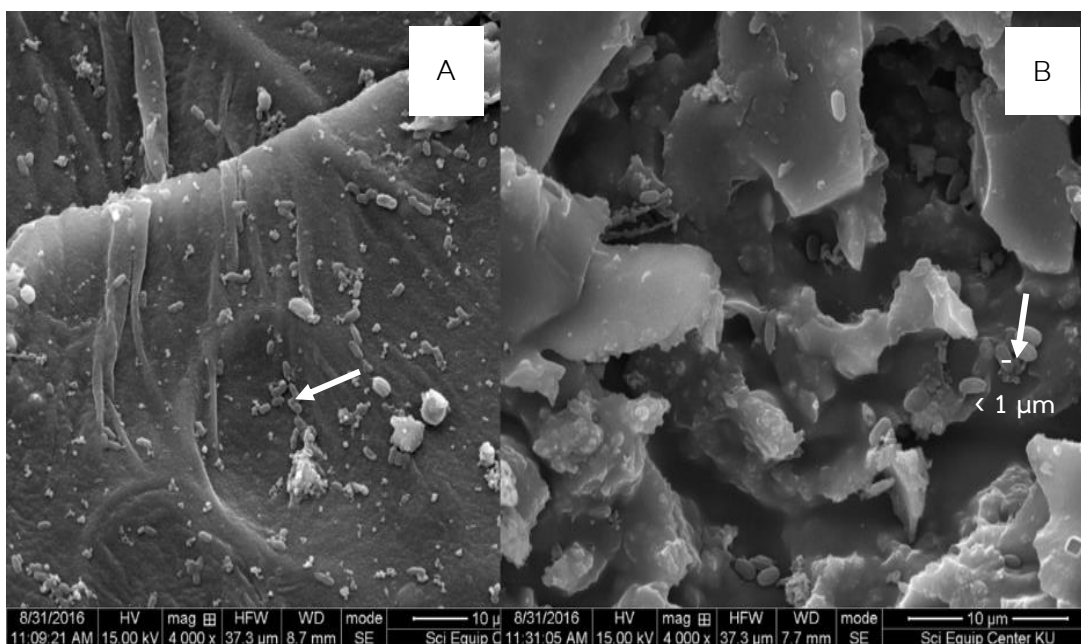
ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่

ตำรับการทดลองที่ 7 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่

จากผลการทดลองข้างต้นเมื่อพิจารณาปริมาณแบคทีเรียภายหลังสิ้นสุดการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกคะน้ารอบที่ 1 พบว่าแนวทางการเพิ่มปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ประกอบด้วย แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียละลายฟอสเฟต แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม และแบคทีเรียสร้างฮอโมนลงในดิน ได้แก่ การใส่ปุ๋ยชีวภาพรูปแบบการขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก หรือการขยายเชื้อแบบชนิดเหลว หรือการใส่ปุ๋ยชีวภาพชนิดเหลวร่วมกับไบโอชาร์ลงดิน มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณแบคทีเรียในดินทั้ง 4 ชนิดเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเชื้อในดินตามธรรมชาติ พบว่า ดินก่อนการทดลองที่มีปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ 4.240 log CFU ต่อกรัม ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสเฟต 4.429 log CFU ต่อกรัม ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 5.718 log CFU ต่อกรัม และปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอโมน 3.707 log CFU ต่อกรัม ซึ่งมีปริมาณเชื้อในดินใกล้เคียงกับรายงานการตรวจพบปริมาณเชื้อตามสภาพธรรมชาติบริเวณรอบรากพืชในพื้นที่ต่าง ๆ ซึ่งโดยทั่วไปจะพบปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ *A. chroococcum* ในดิน มีปริมาณอยู่ในช่วง $10^4 - 10^5$ CFU ต่อกรัม หรือ 4.00 ถึง 5.00 log CFU ต่อกรัม และปริมาณการกระจายตัวของแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระในดินจะเพิ่มขึ้น หรือลดจำนวนตามความชื้นดินและการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (ธงชัย, 2550) และจากรายงานการตรวจพบแบคทีเรียละลายฟอสเฟตในดินท้องถิ่น ประมาณ 10^4 CFU ต่อกรัม หรือ 4.00 log CFU ต่อกรัม ตัวอย่างเช่น ดินพื้นที่ปลูกพืชผัก ถั่ว กล้วย กล้วยพืช และไม้ผล (Carrenho *et al.*, 2007) และจากรายงานของบุษราพร (2562) พบว่า ดินในพื้นที่ปลูกมันสำปะหลัง จังหวัดชลบุรี ตรวจพบปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมอยู่ในช่วง $1.4 \times 10^4 - 4.0 \times 10^4$ CFU ต่อกรัมดิน หรือ 4.146 - 4.602 log CFU ต่อกรัม และแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชพบปริมาณมากบริเวณรอบรากพืช เช่น บริเวณรากข้าวในพื้นที่ดินเค็ม พบว่า มีอยู่ในช่วง 1.5×10^4 ถึง 8.5×10^6 CFU ต่อกรัมดิน หรือ 4.176 - 6.929 log CFU ต่อกรัม (Nadeema *et al.*, 2012) และจากงานวิจัยนี้เมื่อนำตัวอย่างของไบโอชาร์ในดินหลังการทดลองจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 มาตรวจสอบการเข้าอาศัยของเซลล์แบคทีเรียภายในรูพรุนของไบโอชาร์แกลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบลักษณะเซลล์แบคทีเรียอาศัยบนพื้นผิว และช่องว่างรูพรุนของไบโอชาร์แกลบภายหลังการทดลองที่กำลังขยาย 4,000 เท่า แสดงดังภาพที่ 15 พบเซลล์แบคทีเรียมีลักษณะเป็นวงรีหรือทรงกระบอก ยังคงมีลักษณะความสมบูรณ์ของเซลล์แบคทีเรีย มีขนาดส่วนกว้างเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร มีการกระจายตัวสม่ำเสมอภายในรูพรุนเป็นจำนวนมาก บ่งชี้ได้ว่า เป็นเซลล์ของแบคทีเรีย เนื่องจากมีรูปร่างเป็นท่อนทรงกระบอกจะมีส่วนกว้างเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5 - 4 ไมโครเมตร (นันทนา, 2549) ยังคงพบแบคทีเรียจำนวนมากที่มีชีวิตรอดภายในรูพรุนของไบโอชาร์แกลบได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Husna *et al.* (2019) พบว่า เชื้อจุลินทรีย์สามารถทนความหนาแน่นของเชื้อในการจัดเก็บรักษาสูงบนไบโอชาร์แกลบ ซึ่งไบโอชาร์มีศักยภาพสูงสุดในการเก็บรักษาเซลล์

คงความมีชีวิตรอดของประชากรจุลินทรีย์ได้นานมากกว่า 6 เดือน อีกทั้งการใส่ปุ๋ยชีวภาพเพิ่มลงในดิน เป็นการเพิ่มจำนวนประชากรของจุลินทรีย์ดินกลุ่มที่เป็นประโยชน์ทางการเกษตร และการใส่ไบโอชาร์ ในอัตราที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณแบคทีเรียในดิน ซึ่งสอดคล้องกับรายงาน ของ Muhammad *et al.* (2016) พบว่า การใส่ไบโอชาร์จากกากอ้อยมีผลทำให้มวลชีวภาพจุลินทรีย์ เพิ่มขึ้น และการใช้ไบโอชาร์อัตราเพิ่มขึ้น ทำให้มวลชีวภาพของจุลินทรีย์ในดินเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Steiner, 2006) เช่น จากรายงานการใช้ไบโอชาร์ อัตรา 2,000 ตันต่อไร่ มีผลให้มวลชีวภาพคาร์บอน ของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นมากกว่าการใส่มูลสุกรเพียงอย่างเดียว (นวลจันทร์ และคณะ, 2560) ดังนั้นการเพิ่ม จุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ทางการเกษตรลงในดิน ส่งผลดีต่อการหมุนเวียนธาตุอาหาร หรือช่วยให้ ธาตุอาหารเป็นประโยชน์กับพืช มาใช้ในการปรับปรุงบำรุงดินด้านสมบัติทางชีวภาพ ทางกายภาพ หรือ ทางชีวเคมี (Stevenson and Elliott, 1989)



ภาพที่ 15 ลักษณะเซลล์แบคทีเรียบนพื้นผิวและช่องว่างรูพรุนของไบโอชาร์เกลบภายหลังการทดลอง กำลังขยาย 4,000 เท่า (A) และ (B)

4) การเจริญเติบโตและผลผลิตของคะน้า

จากผลการทดลองและเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตและผลผลิตของคะน้าจากการปลูกทั้ง 2 รอบ นำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ มีรายละเอียดดังนี้

(1) ความสูงของต้นคะน้า

(1.1) การปลูกคะน้ารอบที่ 1 ความสูงของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 21) พบว่า ดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน มีผลให้ความสูงของต้นคะน้าเท่ากับ 35.88 เซนติเมตร มีค่าสูงสุดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์กลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีผลให้ความสูงของต้นคะน้าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ค่าระหว่าง 28.55 - 31.24 เซนติเมตร แต่ทุกดำรับการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุมที่มีค่าความสูงของต้นคะน้าน้อยที่สุด 15.91 เซนติเมตร

(1.2) การปลูกคะน้ารอบที่ 2 ความสูงของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 21) พบว่า ดำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์กลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าความสูงของต้นคะน้าสูงสุดเท่ากับ 23.63 เซนติเมตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน และดำรับการทดลองที่ 5 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์กลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในอัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าความสูงของต้นคะน้า 22.04 และ 22.03 เซนติเมตร ตามลำดับ แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับการทดลองที่ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์กลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าความสูงของต้นคะน้า 19.40 เซนติเมตร ดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ค่าความสูงของต้นคะน้า 20.62 และ 21.16 เซนติเมตร ตามลำดับ และทุกดำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุมมีค่าความสูงของต้นคะน้าต่ำสุด 11.70 เซนติเมตร

เมื่อพิจารณาจากค่าความสูงของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และรอบที่ 2 เห็นได้ว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์ที่ดูดซับ

ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้ค่าความสูงของต้นคะน้าเพิ่มขึ้น ในการปลูกครั้งที่ 2 สูงสุด แต่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับการใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน สามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมีได้ 25 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับการใส่ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อ ในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ หรือการใส่ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตร ต่อไร่ สอดคล้องกับรายงานของจันจิรา และ พิมพิธิดา (2552) การใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อ ในปุ๋ยหมักอัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยเคมีอัตราครึ่งหนึ่งที่แนะนำ มีผลให้การเจริญเติบโต ของต้นข้าวโพดที่ 45 วัน มีน้ำหนักต้นแห้ง เส้นผ่าศูนย์กลางโคนต้น และความสูงต้นมากกว่าการไม่ใส่ เชื้อ ซึ่งจากรายงานของปณิชา และ วิลาวัลย์ (2553) พบว่า การใช้ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ตามคำแนะนำ มีผลให้ค่าความสูงของต้นข้าวสูงกว่า การไม่ใส่เชื้ออย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และสอดคล้องกับรายงานการใส่ไบโอชาร์ต่อการเจริญเติบโต และผลผลิตของพืช เช่น ข้าว (วิชัย และคณะ, 2554; วิชุดา, 2556; เสาวคนธ์, 2557) และคะน้า (เกศศิริพันธ์ และคณะ, 2557) สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการปรับปรุง ดินและเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจากไบโอชาร์ที่ประกอบด้วยจุลินทรีย์จากปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ประกอบด้วยเชื้อ *A. tropicalis* สามารถตรึงก๊าซไนโตรเจนในอากาศ และเปลี่ยนให้อยู่ในรูป แอมโมเนียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช มีค่าการตรึงไนโตรเจน 1,246 นาโนโมลเอทิลีนต่อต้นต่อชั่วโมง ในการทดสอบกับข้าวโพด (พิกุล และ ดารารัตน์, 2552) จุลินทรีย์ละลายฟอสฟอรัส *B. unamae* สามารถผลิตกรดอินทรีย์ปลดปล่อยออกมาละลายสารประกอบอินทรีย์ฟอสเฟตที่อยู่ในรูปไม่ละลาย เช่น หินฟอสเฟต ให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดไปใช้ได้ มีประสิทธิภาพละลายในดินที่มีสภาพเป็นกรด กลาง และด่างเล็กน้อย ให้อยู่ในรูปฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้น 14.27 เปอร์เซ็นต์ 13.76 เปอร์เซ็นต์ และ 48.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ฉวีวรรณ, 2552) มีจุลินทรีย์ละลายโพแทสเซียม *B. subtilis* ปลดปล่อยกรดอินทรีย์ ช่วยละลายโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ ต่อพืชเพิ่มขึ้น 9.02 เปอร์เซ็นต์ (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) และมีจุลินทรีย์ที่สร้างสารกระตุ้น การเจริญเติบโต หรือฮอร์โมนพืช *A. chroococcum* เป็นแบคทีเรียสร้างออกซิน จิบเบอเรลลิน และ ไซโตไคนิน กระตุ้นการเจริญของรากขนอ่อน และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวรากพืช ทำให้พืชสามารถดูดน้ำ และธาตุอาหารเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งมีประสิทธิภาพสร้างฮอร์โมนออกซิน 56.18 มิลลิกรัมต่อลิตร (Leaungvutiviroj et al., 2010) ช่วยกระตุ้นการงอกของคะน้าจาก 60 เปอร์เซ็นต์ เป็น 93.33 เปอร์เซ็นต์ (พิมพิธิดา และคณะ, 2552) นอกจากความเป็นประโยชน์ของจุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชแล้ว การใช้ประโยชน์จากไบโอชาร์ยังช่วยให้ธาตุอาหารที่เป็น ประโยชน์กับพืช เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน ลดการสูญเสียธาตุอาหารพืชจากการชะล้างด้วย น้ำฝน หรือการให้น้ำจากระบบการปลูกพืช จากคุณสมบัติของไบโอชาร์ที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ส่งผลให้ไบโอชาร์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำในดิน

เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน กระตุ้นให้เกิดการจับตัวของเม็ดดิน ช่วยให้พืชสามารถจับยึดธาตุอาหารจากดินนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีขึ้น ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชดีขึ้น (Wang *et al.*, 2021) และ การใช้ไบโอชาร์ส่งผลต่อความสูงของพืชเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Varela *et al.* (2013) พบว่า การใช้ไบโอชาร์กลบ อัตรา 1.6 - 6.4 ตันต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยเคมี ส่งผลให้การเจริญเติบโตพืช ความยาวของใบ ขนาดใบ และขนาดลำต้นของผักบุ้ง เพิ่มขึ้นมากกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์

ตารางที่ 21 ความสูงของต้นคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2

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

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยการใช้ DMRT

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

(2) ค่าความเขียวของใบคะน้า

(2.1) การปลูกคะน้ารอบที่ 1 ค่าความเขียวของใบคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 22) พบว่า ดำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีผลให้ค่าความเขียวของใบคะน้ามีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับ การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 44.46 - 45.24 SPAD reading แต่ทุกดำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุมที่มีค่าความเขียวของใบคะน้าต่ำสุด 39.10 SPAD reading

(2.2) การปลูกคะน้ารอบที่ 2 ค่าความเขียวของใบคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 22) พบว่า ดำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อ ในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าความเขียวของใบคะน้าสูงสุดมีค่าระหว่าง 47.34 - 50.14 SPAD reading และไม่แตกต่างกันทางสถิติกับการใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน มีค่าระหว่าง 45.87 SPAD reading แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุมที่มีค่าความเขียวของใบคะน้าต่ำสุด 41.92 SPAD reading

เมื่อพิจารณาจากค่าความเขียวของใบคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว จากการปลูกทั้ง 2 รอบ พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ หรือการใส่ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ หรือปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มความเขียวของใบคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวสูงขึ้น มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับ การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของทัพไท และคณะ (2554) การใส่ไบโอชาร์ อัตรา 1,280 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าระดับคลอโรฟิลล์ในใบข้าวสูงกว่าการไม่ใส่ และจากการวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนของดินลึก 0 - 10 เซนติเมตร ระยะข้าวสร้างน้านม จากการใส่ไบโอชาร์ อัตรา 1,280 และ 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถตรึงแอมโมเนียมไอออนได้ 5.32 และ 5.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ และมีค่าสูงกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์ และการใส่ไบโอชาร์ อัตรา 640 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถตรึงแอมโมเนียมไอออนได้ 4.82 และ 4.68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ และสอดคล้องกับรายงานของ Zwieteren *et al.* (2010) พบว่า การใส่ไบโอชาร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับไนโตรเจนของข้าวสาลีสูงขึ้น นอกจากนี้คุณสมบัติ

ของไบโอชาร์มีพื้นที่ผิวมาก รุพรุนสูง และช่วยดูดซับประจุของธาตุอาหารพืชในดิน ช่วยลดการชะล้างไนโตรเจนจากผิวดิน โดยการดูดซับแอมโมเนียมไอออนไว้ (Ding *et al.*, 2010; Zheng *et al.*, 2010) จึงเพิ่มความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนจากปุ๋ยเคมี อีกทั้งการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ช่วยเพิ่มกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถสร้างธาตุอาหารได้จากการตรึงก๊าซไนโตรเจนในอากาศ และเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแอมโมเนียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (พิกุล และ ดารารัตน์, 2552) จึงส่งผลต่อการสะสมไนโตรเจนในพืช และความเขียวใบพืชมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 22 ค่าความเขียวของใบคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2

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

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยใช้ DMRT

* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

(3) ขนาดพื้นที่ใบของคะน้า

(3.1) การปลูกคะน้ารอบที่ 1 ขนาดพื้นที่ใบของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 23) พบว่า ดำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีขนาดพื้นที่ใบของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 77.81 - 91.40 ตารางเซนติเมตร แต่มีค่าต่ำกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อ ในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลให้ขนาดพื้นที่ใบของคะน้าสูงสุด 118.56 ตารางเซนติเมตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน มีค่า 107.08 และ 107.09 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ แต่ทุกดำรับการทดลอง มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุม ที่มีขนาดพื้นที่ใบของคะน้าต่ำสุด 34.47 ตารางเซนติเมตร

(3.2) การปลูกคะน้ารอบที่ 2 ขนาดพื้นที่ใบของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 23) พบว่า ดำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีขนาดพื้นที่ใบของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว สูงสุด 67.08 ตารางเซนติเมตร รองลงมา คือ ดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 5 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่าระหว่าง 60.30 - 65.18 ตารางเซนติเมตร แต่ทุกดำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุมที่มีขนาดพื้นที่ใบของคะน้าต่ำสุด 18.71 ตารางเซนติเมตร

เมื่อพิจารณาจากค่าวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ใบของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว จากตารางที่ 20 การใช้ไบโอชาร์แกลบที่บ่มด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในอัตราที่เพิ่มขึ้น มีผลให้ขนาดพื้นที่ใบของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวลดลงจากการปลูกรอบแรก ทั้งนี้เนื่องจากไบโอชาร์มีความสามารถดูดซับธาตุอาหารพืชในดิน ทั้งโมเลกุลประจุบวกและประจุลบของสารอาหารพืช (Atkinson *et al.*, 2010) จึงอาจมีผลกระทบต่อการใช้ธาตุอาหารของพืช ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช และขนาดพื้นที่ใบคะน้าได้ อีกทั้งอาจเกิดจากการลดใช้ปุ๋ยเคมี 25 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้ปริมาณ

ธาตุอาหารหลักไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่จะเห็นได้ว่า จากผลการทดลองในการปลูก รอบที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในทุกอัตรา มีผลให้ขนาดพื้นที่ใบของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวไม่แตกต่างกันกับการใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตาม ค่าวิเคราะห์ดิน ทั้งนี้เนื่องจากไบโอชาร์สามารถดูดซับธาตุอาหารในพื้นที่ผิวและรูพรุน ช่วยกักเก็บ ธาตุอาหาร และลดการสูญเสียธาตุอาหารจากการชะล้าง นอกจากคุณสมบัติในการดูดซับธาตุอาหาร ของไบโอชาร์แล้ว ไบโอชาร์ยังสามารถปลดปล่อยคายการดูดซับธาตุอาหารได้อย่างช้า ๆ ด้วย กระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับธาตุอาหาร และการควบคุมความเข้มข้นของธาตุอาหารในดิน (Wang *et al.*, 2022) จากผลงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า การใช้ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในอัตราที่เหมาะสมจะต้องคำนึงถึงอัตราการใช้ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับธาตุอาหาร และการชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชมากเกินไป อาจมีผลทำให้พืชผักที่มีอายุสั้นได้รับ ธาตุอาหารไม่เพียงพอได้ จากรายงานของ Schwilch *et al.* (2011) พบว่า ไบโอชาร์มีความสามารถในการดูดซับสารอาหารในดินร่วนปนทราย มีประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรต แอมโมเนียม และ ฟอสเฟตได้ถึง 34.0 34.7 และ 20.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเทียบเปรียบกับดินที่ไม่ได้ใส่ไบโอชาร์ และช่วยลดการชะล้างในดิน ซึ่งมีผลต่อการดูดใช้ธาตุอาหารของพืช และสอดคล้องกับรายงานของ พินิจภณ (2558) พบว่า การใส่ไบโอชาร์ อัตรา 0.8 - 1.6 ตันต่อไร่ เพียงอย่างเดียว และการใส่ ไบโอชาร์ซ้ำกันหลายครั้งไม่ทำให้ผลผลิตของงาดำเพิ่มขึ้น เพราะการดูดซับธาตุอาหารของไบโอชาร์ จึงควรใส่ร่วมกับปุ๋ยเคมีตามความต้องการธาตุอาหารสำหรับการปลูกพืช จากงานวิจัยนี้มีข้อสังเกตว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในอัตรา 1,500 - 2,000 กิโลกรัม ไม่ส่งผลต่อขนาดพื้นที่ใบคะน้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นข้อดีที่จะสามารถ ลดปริมาณการใช้และลดต้นทุนจากไบโอชาร์ได้ อาจใช้ในอัตราเริ่มต้นน้อยเพื่อลดต้นทุนของไบโอชาร์ แต่อย่างไรก็ตามต้องศึกษาอัตราที่เหมาะสมต่อผลผลิตพืชต่อไป

ตารางที่ 23 ขนาดพื้นที่ใบค่น้ำที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกค่น้ำรอบที่ 1 และ 2

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

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยใช้ DMRT

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

(4) น้ำหนักแห้งของต้นค่น้ำที่อายุเก็บเกี่ยว

(4.1) การปลูกค่น้ำรอบที่ 1 น้ำหนักแห้งของต้นค่น้ำที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 24) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ มีน้ำหนักแห้งของต้นสูงสุด 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 มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์

ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีน้ำหนักแห้งของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 1.82 - 2.01 กรัมต่อต้น แต่พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุมที่มีค่าน้ำหนักแห้งของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวต่ำสุด 0.47 กรัมต่อต้น

(4.2) การปลูกคะน้ารอบที่ 2 น้ำหนักแห้งของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 24) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีน้ำหนักแห้งของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวสูงสุด 1.91 กรัมต่อต้น มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมี อัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน มีน้ำหนักแห้งของต้นคะน้า 1.97 กรัมต่อต้น แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่า 1.50 และ 1.45 กรัมต่อต้น ตามลำดับ และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับการทดลองที่ 5 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีน้ำหนักแห้งของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว มีค่า 1.58 และ 1.57 กรัมต่อต้น ตามลำดับ แต่พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุมที่มีค่าน้ำหนักแห้งของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวต่ำสุด 0.90 กรัมต่อต้น

ตารางที่ 24 น้ำหนักแห้งต่อต้นคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2

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

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยใช้ DMRT

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

(5) น้ำหนักผลผลิตของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว

(5.1) การปลูกคะน้ารอบที่ 1 น้ำหนักผลผลิตของคะน้า (ตารางที่ 25) พบว่า ดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน มีผลให้น้ำหนักผลผลิตคะน้าสูงสุด เท่ากับ 5,440 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าน้ำหนักผลผลิตคะน้า 5,072 และ 4,720 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ รองลงมา คือ ดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 5 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าน้ำหนักผลผลิตคะน้า 4,448 4,528 และ 4,416 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ แต่ทุกดำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุมมีค่าน้ำหนักผลผลิตคะน้าต่ำสุด 1,008 กิโลกรัมต่อไร่

(5.2) การปลูกคะน้ารอบที่ 2 น้ำหนักผลผลิตของคะน้า (ตารางที่ 25) พบว่า ดำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีน้ำหนักผลผลิตของคะน้าสูงสุด 2,928 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับการทดลองที่ 5 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน และดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าน้ำหนักผลผลิตของคะน้าระหว่าง 2,624 - 2,784 กิโลกรัมต่อไร่ แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าน้ำหนักผลผลิตของคะน้า 2,288 กิโลกรัมต่อไร่ และทุกดำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุมมีค่าน้ำหนักผลผลิตคะน้าต่ำสุด 624 กิโลกรัมต่อไร่

ตารางที่ 25 น้ำหนักต้นคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2

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

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยใช้ DMRT

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การใช้ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ผลผลิตคะน้าจากการปลูกรอบที่ 1 สูงกว่าแตกต่างกับการใช้ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว หรือปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก และการใช้ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ไบโอสชาร์กที่บ่มด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดินเป็นการประเมินค่าอัตราความต้องการของปริมาณธาตุอาหารหลักไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ที่เพียงพอต่อความต้องการของพืชในการส่งเสริมระยะการเจริญเติบโตอย่างเหมาะสม

และเพียงพอกับการให้ผลผลิต ให้ธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์แก่พืช เฉพาะธาตุอาหารที่เป็นองค์ประกอบของปุ๋ย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอัตราปุ๋ยเคมีลดลง 25 เปอร์เซ็นต์จากคำแนะนำ ทำให้ปริมาณผลผลิตพืชเปลี่ยนแปลงลดลงด้วย ถึงแม้ว่าจะมีการใช้ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ประกอบด้วยแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียละลายฟอสเฟต แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม และแบคทีเรียผลิตฮอร์โมน ต้องมีระยะเวลาเพิ่มประชากรในดินรอบพืชราก แล้วส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช โดยต้องมีปริมาณจุลินทรีย์ที่มากเพียงพอในการช่วยให้พืชได้รับธาตุอาหารมากขึ้น อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความแห้งแล้ง ส่งผลต่อการมีชีวิตรอดและกิจกรรมของจุลินทรีย์ (ยงยุทธ และคณะ, 2551) เช่นเดียวกันการใช้ปุ๋ยเคมีลดลง 25 เปอร์เซ็นต์ร่วมกับไบโอชาร์ที่บ่มด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลให้ผลผลิตพืชในรอบแรกน้อยกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติของไบโอชาร์เป็นอินทรีย์คาร์บอนเสถียรสูงทนทานต่อย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ จึงไม่สามารถปลดปล่อยธาตุอาหารได้รวดเร็วตอบสนองความต้องการของพืชในระยะสั้น แต่จะดูดซับธาตุอาหารลดการสูญเสียธาตุอาหารจากการชะล้าง ปลดปล่อยธาตุอาหารให้กับพืชในระยะยาว และเหมาะสมต่อการเป็นที่อยู่อาศัยให้กับจุลินทรีย์ ซึ่งส่งผลดีต่อระบบนิเวศดินทางชีวภาพ (Wang *et al.*, 2022) และการใช้ไบโอชาร์ที่บ่มด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ช่วยส่งเสริมและตอบสนองการเจริญเติบโตและผลผลิตพืชได้ในระยะยาว และส่งเสริมการปรับปรุงสมบัติทางเคมีดินและกายภาพดินได้ดีกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณาจากน้ำหนักผลผลิตของค่น้ำจากการปลูกทั้ง 2 รอบจากข้อมูลน้ำหนักผลผลิตค่น้ำจากการปลูกค่น้ำรอบที่ 2 ปลูกช่วงเดือนมีนาคมถึงเดือนเมษายน มีสภาพอากาศร้อนจัด ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของค่น้ำ จึงมีค่าน้ำหนักผลผลิตค่น้ำต่ำกว่าการปลูกครั้งที่ 1 ที่ปลูกในช่วงฤดูหนาว แต่กลับพบว่าจากค่าวิเคราะห์จากการปลูกค่น้ำรอบที่ 2 พบว่า ค่าความสูงต้น ขนาดพื้นที่ใบ น้ำหนักแห้งของค่น้ำ และน้ำหนักผลผลิตค่น้ำ เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ดำรับการทดลองที่ 6 มีการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์กลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ให้ค่าน้ำหนักผลผลิตค่น้ำที่อายุเก็บเกี่ยวมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่สูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดินเพียงอย่างเดียว สอดคล้องกับรายงานของเกศศิริรินทร์ และคณะ (2557) การใส่ไบโอชาร์ในอัตราที่เพิ่มขึ้นจาก 400 เป็น 800 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้ค่น้ำมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ผลผลิตค่น้ำสูงขึ้น และจากรายงานของเกศศิริรินทร์ และคณะ (2558) จากการศึกษาการใส่ไบโอชาร์ในอัตราส่วน 1,000 - 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้การเจริญเติบโตและผลผลิตของผักสลัดกรีนคอส มีค่าไม่แตกต่างกันกับการใส่ปุ๋ยคอก อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ และการใส่ไบโอชาร์ในอัตราเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ดินมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงในดินขึ้นตามไปด้วย (Asli *et al.*, 2016) และสามารถเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายของไบโอชาร์ที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง สามารถดูดซับและ

กักเก็บน้ำ และธาตุอาหารพืชในดิน (พินิจภณ, 2558) ซึ่งการดูดซับธาตุอาหารพืชไว้ในไบโอชาร์เมื่อไบโอชาร์ดูดซับธาตุอาหารและน้ำเต็มพื้นที่ผิวรูพรุนแล้ว ก็จะปลดปล่อยธาตุอาหารพืชออกมาเป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Wang *et al.* (2022) พบว่าการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์เป็นปุ๋ยละลายช้า จากสมบัติของไบโอชาร์ที่มีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารเท่านั้น แต่ยังมีสมบัติในการคายการดูดซับเพิ่มความเป็นประโยชน์ของแร่ธาตุอาหาร และควบคุมความเข้มข้นของธาตุอาหารในดิน และการเพิ่มธาตุอาหารในระบบชีวภาพอีกด้วย อีกทั้งงานวิจัยนี้การเพิ่มความเป็นประโยชน์ของปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 เป็นปัจจัยส่งเสริมในการปรับปรุงดิน และเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารให้กับพืช ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความสูงต้นคะน้า ความเขียวของใบคะน้า ขนาดพื้นที่ใบของคะน้า และน้ำหนักผลผลิตคะน้า สามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมีสำหรับการปลูกคะน้า 25 เปอร์เซ็นต์ และการใส่ปุ๋ยชีวภาพที่มีแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระจะมีประสิทธิภาพในการตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ 231 นาโนโมลเอทิลีนต่อต้นต่อชั่วโมง แบคทีเรียละลายฟอสเฟต มีประสิทธิภาพการละลายหินฟอสเฟต 48.22 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม มีประสิทธิภาพการละลายแร่เฟลด์สปาร์ 9.02 เปอร์เซ็นต์ และแบคทีเรียผลิตฮอร์โมน มีประสิทธิภาพผลิตฮอร์โมนออกซิน 56.18 มิลลิกรัมต่อลิตร (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารหลักที่พืชต้องการในปริมาณมาก สำหรับการเจริญเติบโตและผลผลิตพืช และการใช้ประโยชน์จากไบโอชาร์ หรือปุ๋ยหมักในการปรับปรุงเพิ่มแหล่งอินทรีย์วัตถุให้แก่ดิน เป็นที่อาศัยของจุลินทรีย์ ส่งเสริมความเป็นประโยชน์ให้จุลินทรีย์ดินในการหมุนเวียนธาตุอาหารพืช อีกทั้งไบโอชาร์ยังช่วยเพิ่มการดูดซับทั้งธาตุอาหารและน้ำให้กับพืช นำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น ลดการชะล้างโดยการจัดการดิน ซึ่งวิธีการดังกล่าวส่งผลให้ดินมีสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางชีวภาพที่เหมาะสม มีคุณภาพด้านชนิดประชากร และกิจกรรมของจุลินทรีย์ พืชย่อมมีแนวโน้มที่จะได้รับธาตุอาหารต่าง ๆ มากขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มผลผลิตของพืชตามไปด้วย

จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าวิธีการที่เหมาะสม คือ การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ จากการปรับปรุงคุณภาพของไบโอชาร์เป็นการเสริมจุดเด่นของไบโอชาร์ที่มีรูพรุนสูงเป็นที่อยู่อาศัยให้จุลินทรีย์จากปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารปรับปรุงสมบัติทางกายภาพดิน ลดความหนาแน่นรวมของดิน เป็นแนวทางการใช้ประโยชน์สำหรับการปลูกคะน้าได้จริงในสภาพดินต่างจัด เนื้อดินร่วนปนทราย ชุดดินปราณบุรี โดยไม่ส่งผลกระทบต่อทำให้ดินมีค่าเป็นด่างเพิ่มขึ้น แต่กลับส่งผลดีต่อสมบัติดินเพิ่มการสะสมอินทรีย์วัตถุ และโพแทสเซียมในดินสูงขึ้น และให้ผลผลิตคะน้าสูงกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์เพียงอย่างเดียวอย่างชัดเจนในการปลูกคะน้าอย่างต่อเนื่องรอบที่ 2 และมีข้อสังเกตว่า สมบัติทางเคมีดินภายหลังจาก

การปลูกคะน้ารอบที่ 2 หากมีการปลูกคะน้าในครั้งต่อไปในพื้นที่เดิม เมื่อประเมินการใช้อัตราปุ๋ยธาตุอาหารหลักสำหรับคะน้า เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ดินตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร (2548) ยังคงใช้ปุ๋ยไนโตรเจน 15 กิโลกรัมต่อไร่ ต้องใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัส 5 กิโลกรัมต่อไร่ และต้องใช้ปุ๋ยโพแทสเซียม 5 กิโลกรัมต่อไร่ ในอัตราเท่าเดิม แต่กลับพบว่า การใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้คะน้ามีความต้องการใช้ปุ๋ยเพิ่มสูงขึ้น ต้องใช้ปุ๋ยไนโตรเจน 20 กิโลกรัมต่อไร่ ปุ๋ยฟอสฟอรัส 5 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียม 10 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเพิ่มต้นทุนค่าปุ๋ยเคมีสำหรับการปลูกคะน้า อีกทั้งการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้สมบัติดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุ และปริมาณโพแทสเซียมลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และส่งผลกระทบต่อผลผลิตคะน้าที่ลดลงต่ำกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12

5) ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้า

จากการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้าทั้ง 2 รอบ มีรายละเอียดดังนี้

(1) ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1

ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 (ตารางที่ 26 และตารางผนวกที่ 4) พบว่า รายได้สุทธิมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) ดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ให้รายได้สุทธิสูงสุด 102,880.40 บาทต่อไร่ สูงกว่าดำรับการทดลองอื่น ๆ รองลงมา คือ ดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพในปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ให้รายได้สุทธิ 88,510.30 82,170.30 และ 80,100.30 บาทต่อไร่ ตามลำดับ ให้รายได้สุทธิสูงกว่าดำรับการทดลองที่ 5 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ให้รายได้สุทธิ 74,220.30 และ 61,980.30 บาทต่อไร่ ตามลำดับ และทุกดำรับการทดลองข้างต้นให้รายได้สุทธิสูงกว่าดำรับควบคุมที่มีรายได้สุทธิต่ำสุด 15,100 บาทต่อไร่

(2) ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2

ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้ารอบที่ 2 (ตารางที่ 26 และตารางผนวกที่ 5) พบว่า รายได้สุทธิมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) ดำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ให้รายได้สุทธิสูงสุด 52,820.30 บาทต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับดำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ให้รายได้สุทธิ 49,790.30 บาทต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 5 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ให้รายได้สุทธิ 48,660.30 บาทต่อไร่ รองลงมา คือ ดำรับการทดลองที่ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ให้รายได้สุทธิ 48,020.30 บาทต่อไร่ และดำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ให้รายได้สุทธิ 46,560.40 บาทต่อไร่ และทุกดำรับการทดลองให้รายได้สุทธิสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุมที่มีรายได้สุทธิต่ำสุด 15,100 บาทต่อไร่

ทั้งนี้จากการประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้า ทั้ง 2 รอบ จะเห็นได้ว่ารายได้สุทธิจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ให้รายได้สุทธิสูงกว่าดำรับการทดลองอื่น ๆ เนื่องจากปริมาณธาตุอาหารหลักจากปุ๋ยเคมีตอบสนองต่อการเพิ่มขึ้นของผลผลิตคะน้าสูงกว่าการลดใช้ปุ๋ยเคมี 25 เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้จะมีการใส่ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 หรือการใส่ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในอัตรา 1,000 - 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ และต้นทุนไบโอชาร์แกลบมีค่าสูงกว่าต้นทุนการใช้ปุ๋ยเคมี เนื่องจาก การใส่ไบโอชาร์แกลบเพียงครั้งเดียวในรอบแรก แต่ในการปลูกคะน้ารอบที่ 2 ดำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีรายได้สุทธิสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดินเพิ่มขึ้น 13.44 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากไม่มีค่าต้นทุนของไบโอชาร์แกลบ มีเพียงต้นทุนการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ตามค่าวิเคราะห์ดิน แต่กลับให้ผลผลิตและรายได้สุทธิจากการปลูกคะน้าต่อเนื่องรอบที่ 2 เพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ ที่บ่มด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ในการปรับปรุงดินต่างจัด เนื้อดินร่วนปนทราย ชุดดินปรานบุรี สามารถเพิ่มผลผลิตคะน้าและรายได้สุทธิสูงขึ้นโดยไม่ส่งผลให้ดินมีค่าเป็นด่างเพิ่มขึ้น แต่กลับส่งผลดีต่อการสะสมอินทรีย์วัตถุและโพแทสเซียมในดินเพิ่มขึ้น และให้ผลผลิตคะน้าสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวจากการปลูกคะน้าต่อเนื่อง 2 รอบ ที่มีผลให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณโพแทสเซียม และผลผลิตคะน้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง อีกทั้งการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวยังมีแนวโน้มการใส่ปุ๋ยเคมีเพิ่มขึ้นจากการปลูกคะน้าอย่างต่อเนื่อง ในฤดูต่อไป ดังนั้นแนวทางการเพิ่มผลตอบแทนทางเศรษฐกิจให้สูงขึ้น คือ การผลิตไบโอชาร์แกลบใช้เองจะช่วยลดต้นทุนการผลิต สามารถเพิ่มรายได้สุทธิให้สูงขึ้นได้ตั้งแต่การปลูกคะน้าในรอบแรก จึงเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว สำหรับการผลิตคะน้าที่เป็นพืชผักอายุสั้นได้จริง เนื่องจากการปรับปรุงบำรุงดินด้วยไบโอชาร์เป็นวัสดุที่มีคาร์บอนคงทนสูงเหมาะสมกับปลูกพืชผักที่ต้องมีการไถพรวนดินก่อนการปลูกทุกรอบการผลิต ส่งผลให้เกิดการเร่งกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์คาร์บอน และอินทรีย์วัตถุในดิน และเกิดการสูญเสียธาตุอาหาร

จากการชะล้าง ช่วยส่งเสริมระบบนิเวศดินด้วยจุลินทรีย์จากปุ๋ยชีวภาพ คงความมีชีวิตรอดของจุลินทรีย์ในไบโอชาร์ จะช่วยเพิ่มแหล่งอินทรีย์คาร์บอนรูปที่มีเสถียรภาพ ทนทานต่อการย่อยสลายด้วยกระบวนการจุลินทรีย์ (Major *et al.*, 2010) เป็นแนวทางการปรับปรุงดินสำหรับการผลิตพืชในระยะยาว

ตารางที่ 26 ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1 และ 2

ตำรับการทดลอง	รายได้สุทธิ (บาทต่อไร่)	
	ปลูกรอบที่ 1	ปลูกรอบที่ 2
1 = ไม่ใส่ปุ๋ย (control)	15,100.0 e	7,420.0 c
2 = ปุ๋ยเคมี 100 เปอร์เซ็นต์	102,880.4 a	46,560.4 ab
3 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่	82,170.3 bc	38,970.3 b
4 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่	88,510.3 b	49,790.3 a
5 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่	74,220.3 cd	48,660.3 a
6 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่	80,100.3 bc	52,820.3 a
7 = ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่	61,980.3 d	48,020.3 ab
F-test	**	**
CV (%)	11.01	12.50

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยใช้ DMRT

** แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

4.8 สรุปและเสนอแนะ

4.8.1 สรุปผลการทดลอง

1) วิธีการและอัตราการใช้ไบโอชาร์กลับต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ที่เหมาะสม คือ การผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ขยายปริมาณเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสมประกอบด้วยน้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (เตรียมปริมาตร 100 ลิตร ประกอบด้วยน้ำกากส่า 10 ลิตร : กากน้ำตาล 5 ลิตร : น้ำ 85 ลิตร) ใส่หัวเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เติมนอกซิเจนเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีปริมาณเชื้อ 4 ชนิด ได้แก่ แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียสร้างฮอโมน แบคทีเรียละลายฟอสเฟต และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม เท่ากับ 6.779 6.450 7.973 และ 8.273 log CFU ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ โดยการผลิตไบโอชาร์กลับต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ที่เหมาะสมประกอบด้วยไบโอชาร์กลับ 1 ส่วน ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว 2 ส่วน (อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร) แซไบโอชาร์กลับเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียสร้างฮอโมน แบคทีเรียละลายฟอสเฟต และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม เท่ากับ 5.310 5.770 7.200 และ 6.040 log CFU ต่อกรัม ตามลำดับ

2) การใช้ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์กลับที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลให้สมบัติทางเคมีของดินภายหลังการทดลอง ดินมีค่าความเป็นด่างลดลง ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้น 1.83 1.67 และ 1.76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สูงกว่าค่ารับควบคุม 1.40 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้นคิดเป็น 30.71 19.29 และ 25.71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณโพแทสเซียมสะสมในดิน 81.67 130.67 และ 150.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สูงกว่าค่ารับควบคุม 62.42 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เพิ่มขึ้นคิดเป็น 30.84 109.33 และ 141.38 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของดิน ลดความหนาแน่นรวมของดิน 1.50 1.45 และ 1.43 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ มีค่าลดลงต่ำกว่าค่ารับควบคุม 1.68 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลดลงคิดเป็น 10.71 13.69 และ 14.88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเพิ่มปริมาณน้ำในดิน และผลต่อสมบัติทางชีวภาพในดิน มีการสะสมปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียสร้างฮอโมน แบคทีเรียละลายฟอสเฟต และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมในดินเพิ่มสูงขึ้น

3) การใช้ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์กลับที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ในการปลูกครั้งที่ 1 ให้ผลผลิตค่าน้ำไม่แตกต่างกันกับการใช้ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ แต่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของค่าน้ำ ได้แก่ ความสูงต้น ความเขียวใบ ขนาดพื้นที่ใบ และน้ำหนักแห้งต้นเพิ่มสูงขึ้น และให้ผลผลิตค่าน้ำในการปลูกครั้งที่ 2 สูงสุด 2,928 กิโลกรัมต่อไร่ สูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดิน 2,624 กิโลกรัมต่อไร่ เพิ่มขึ้นคิดเป็น 11.58 เปอร์เซ็นต์ และลดการใช้ปุ๋ยเคมีได้ 25 เปอร์เซ็นต์

4) ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการใช้ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ จากการปลูกครั้งที่ 1 ให้รายได้สุทธิ 88,510.30 บาท สูงกว่าการใช้ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ให้รายได้สุทธิ 80,100.30 บาทต่อไร่ แต่ในการปลูกครั้งที่ 2 การใช้ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ให้รายได้สุทธิเพิ่มขึ้นสูงสุด 52,820.30 บาทต่อไร่ สูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินที่ให้รายได้สุทธิ 46,560.40 บาทต่อไร่ เพิ่มขึ้นคิดเป็น 13.44 เปอร์เซ็นต์

4.8.2 ข้อเสนอแนะ

1) การใช้ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ สำหรับการปลูกค่น้ำจะให้รายได้สุทธิเพิ่มขึ้นในการปลูกครั้งที่ 2 แต่หากต้องการเพิ่มรายได้สุทธิตั้งแต่จากการปลูกครั้งที่ 1 ควรแบ่งใส่ไบโอชาร์เป็น 2 ครั้ง เพื่อลดต้นทุนค่าไบโอชาร์ เช่น จากรายงานการใช้ไบโอชาร์แกลบอัตรา 800 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตและเพิ่มผลผลิตของพืชผักกินใบได้ (Varela *et al.*, 2013)

2) การใช้ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ หลังไถ่ลงดินสำหรับการผลิตพืช ไม่ต้องใส่ไบโอชาร์เพิ่มอีกในช่วงระยะเวลา 1 ปี สามารถเพิ่มผลผลิตค่น้ำสูงขึ้น (เกศศิริรินทร์ และคณะ, 2557) และไบโอชาร์ช่วยคงประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ปุ๋ยชีวภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโต และเพิ่มผลผลิตพืชในระยะเวลาจนถึง 2 ปี (Zhao *et al.*, 2014)

3) การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์แกลบ มีการศึกษาอัตราการใช้ และระยะเวลาความคงทนในดินต่อการเจริญเติบโตของพืช จากการติดตามผลการใส่ไบโอชาร์แกลบลงดินในระยะยาวต่อการเจริญเติบโตของพืชชนิดต่าง ๆ (ตารางที่ 27) ดังนี้ พืชผัก เช่น ผักบุ้ง จากการใส่ไบโอชาร์แกลบอัตรา 0.5 - 4.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ไถ่ลงดินระยะเวลานาน 12 เดือน สามารถเพิ่มมวลชีวภาพผลผลิตผักบุ้ง (Varela *et al.*, 2013) พืชไร่ เช่น ข้าวสาลีจากการใส่ไบโอชาร์แกลบอัตรา 1.5 ตันต่อไร่ ไถ่ลงดินระยะเวลานาน 24 เดือน สามารถเพิ่มผลผลิตของเมล็ดข้าวสาลี (Zhao *et al.*, 2014) สำหรับการผลิตข้าวจากการใส่ไบโอชาร์แกลบอัตรา 3.2 ตันต่อไร่ ไถ่ลงดินระยะเวลานาน 36 เดือน สามารถเพิ่มผลผลิตเมล็ด และจำนวนต้นต่อกอมากขึ้น (Huang *et al.*, 2019) และสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จากการใส่ไบโอชาร์แกลบอัตรา 1.6 ตันต่อไร่ ไถ่ลงดินระยะเวลานาน 12 เดือน สามารถเพิ่มมวลชีวภาพต้นข้าวโพดสูงขึ้น (Singh *et al.*, 2018) และผลของไบโอชาร์แกลบต่อสมบัติดินทางเคมีและทางกายภาพดิน จากรายงานผลการใส่ไบโอชาร์แกลบ อัตรา 5 10 และ 15 ตันต่อไร่ สำหรับในพื้นที่ปลูกข้าวสาลีและปลูกสลับกับข้าวโพด ในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ระยะยาว 36 เดือน พบว่าดินที่ใส่ไบโอชาร์แกลบยังคงมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด และยังรักษาระดับ

ของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินได้ตลอดการปลูกพืช 36 เดือน (Dong *et al.*, 2016) และจากการศึกษาการใช้ไบโอชาร์แกลบในระยะยาวของ Oladele (2019) พบว่า การใช้ไบโอชาร์แกลบ อัตรา 0.5 1.0 และ 2.0 ตันต่อไร่ ในดินร่วนเหนียวปนทราย สำหรับการปลูกข้าวโพดในระยะยาว 3 ปี พบว่า การใช้ไบโอชาร์แกลบ อัตรา 1 และ 2 ตันต่อไร่ ช่วยลดความเป็นกรดของดิน ยกกระดับเพิ่มค่าความเป็นกรดเป็นด่างจาก 5.12 เป็น 6.62 สูงขึ้น 28 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าแตกต่างกันจากดินที่ไม่ใส่ในปีแรก แต่ช่วยลดค่าการนำไฟฟ้าของดินจากการใส่ไบโอชาร์แกลบในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นในปีที่ 3 สามารถช่วยเพิ่มปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดิน เพิ่มค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน เพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน และลดความหนาแน่นรวมของดิน มากกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์อย่างมีนัยสำคัญ จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่า การใช้ไบโอชาร์แกลบสามารถช่วยปรับปรุงดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ไบโอชาร์แกลบ อัตราระหว่าง 1 - 2 ตันต่อไร่ มีระยะเวลาความคงทนของไบโอชาร์ในดิน สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชทั้งพืชผัก และพืชไร่ และเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินได้นานมากกว่า 3 ปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราของไบโอชาร์ที่ใส่ลงดินด้วย

การใช้ไบโอชาร์แกลบอาจมีการใช้ร่วมกับวัสดุปรับปรุงดินชนิดอื่น ๆ เช่น ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก และปุ๋ยชีวภาพ ทำให้วัสดุปรับปรุงดินเหล่านี้สามารถใช้เพื่อการปรับปรุงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และอาจช่วยลดจำนวนครั้งของการใส่ไบโอชาร์ลงได้ หากมีการใส่ในอัตราที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มไบโอชาร์ลงดินอย่างเหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในแง่คุณภาพดิน และผลผลิตพืช จะส่งผลดีต่อสมบัติดินทางเคมี ทางกาย และทางชีวภาพในดิน ช่วยลดการชะล้างของธาตุอาหารจากดิน และเพิ่มความหลากหลายของธาตุอาหารในดิน เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 27 ฐานข้อมูลอัตราการใช้ไบโอชาร์แกลบ และระยะเวลาคงทนของไบโอชาร์ในดิน
ต่อการเจริญเติบโตของพืช และสมบัติดิน

ชนิดพืช	อัตราการใช้	ระยะเวลา คงทนในดิน (เดือน)	การเจริญเติบโต ของพืช และสมบัติดิน	อ้างอิง
พืชผัก	0.5 - 4 กิโลกรัมต่อ ตารางเมตร	12	เพิ่มมวลชีวภาพ	Varela <i>et al.</i> (2013)
ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	1.6 ต้นต่อไร่	12	เพิ่มมวลชีวภาพต้น	Singh <i>et al.</i> (2018)
ข้าวสาลี	1.5 ต้นต่อไร่	24	เพิ่มผลผลิตเมล็ด	Zhao <i>et al.</i> (2014)
ข้าว	3.2 ต้นต่อไร่	36	เพิ่มผลผลิตเมล็ด จำนวนต้นต่อกอ	Huang <i>et al.</i> (2019)
ข้าวสาลี	4.8 9.6	36	เพิ่มอินทรีย์คาร์บอน	Dong <i>et al.</i>
ข้าวโพด	และ 14.4 ต้นต่อไร่		เพิ่มไนโตรเจนทั้งหมด เปรียบเทียบกับไม่ใส่	(2016)
ข้าว	1 - 2	36	เพิ่มความเป็นกรดเป็นด่าง	Oladele
ข้าวโพด	ต้นต่อไร่		เพิ่มความจุแลกเปลี่ยน - แคตไอออน เพิ่มอินทรีย์คาร์บอน เพิ่มไนโตรเจนทั้งหมด เพิ่มความชื้นดิน ลดความหนาแน่นรวมของดิน	(2019)

4) สถานที่แหล่งผลิตไบโอชาร์ในประเทศไทย

การผลิตไบโอชาร์ในประเทศไทยมีรูปแบบเตาเผาหลากหลาย และสถานที่แหล่งผลิตไบโอชาร์ในประเทศไทยกระจายทั่วไปตามภาคต่าง ๆ เกษตรกรมีการประดิษฐ์เตาเผาไบโอชาร์ไว้ใช้เองในพื้นที่และครัวเรือน โดยเตาเผาแบบถังเหล็กขนาด 200 ลิตร เป็นที่นิยมของเกษตรกร ซึ่งมีต้นทุนไม่สูงมากนักราคาประมาณ 2,500 - 3,500 บาทต่อเตา ขึ้นอยู่กับชนิดวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเตาเผา ขณะที่แหล่งผลิตขนาดกลาง เช่น วิสาหกิจชุมชน กลุ่มเกษตรกร หรือหมู่บ้าน มีรูปแบบเตาเผาที่หลากหลาย และแหล่งผลิตขนาดใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมไบโอชาร์ที่มีกำลังการผลิตสูง ซึ่งมีราคาจำหน่ายไบโอชาร์ ในแต่ละแหล่งผลิตแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับกระบวนการเผาและชนิดของมวลชีวภาพที่ใช้เป็นแหล่งผลิตไบโอชาร์ ซึ่งแสดงแหล่งผลิตไบโอชาร์ในประเทศไทย ดังตารางที่ 28 ซึ่งปัจจุบันตามประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง กำหนดราคาจำหน่ายปัจจัยการผลิตทางการเกษตร พ.ศ. 2567 ประกาศ ณ วันที่ 29 ตุลาคม พ.ศ. 2567 ได้ประกาศราคาจำหน่ายปัจจัยการผลิตทางการเกษตร ได้แก่ ถ่านชีวภาพ (Biocha) จากตอซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และโคกทางใบปาล์มน้ำมัน อัตราลิตรละ 60 บาท (กรมวิชาการเกษตร, 2567)

ตารางที่ 28 สถานที่แหล่งผลิตไบโอชาร์ในประเทศไทย

สถานที่	จังหวัด	ราคา (บาท/ลิตร)
1. บ้านดอนเสาหลัก อำเภอมือง	สกลนคร	ไม่ระบุ
2. หมู่บ้านนันทวัน อำเภอมือง	นครพนม	ไม่ระบุ
3. วิสาหกิจชุมชนถ่านไบโอชาร์ อำเภอมือง	หนองบัวลำภู	ไม่ระบุ
4. บริษัท ที. เค. บัณฑิตอินทรีย์ชีวภาพ จำกัด	นครราชสีมา	16
5. ชุมชนไทยเวียง อำเภอมือง	นครนายก	ไม่ระบุ
6. เครือข่ายกองทุนพี่ช่วยน้องและเพื่อน	ชัยนาท	10 - 15
7. ชุมชนปราจีนบุรี	ปราจีนบุรี	ไม่ระบุ
8. บริษัททวงศ์ไผ่ อำเภोजอมบึง	ราชบุรี	ไม่ระบุ
9. บ้านไบโอชาร์ อำเภอนินมะปราง	พิษณุโลก	50
10. มูลนิธิอุ้นใจ อำเภอฟ้าว	เชียงใหม่	ไม่ระบุ
11. วิสาหกิจชุมชนไผ่ อำเภอมะพรัง	ลำปาง	20
12. บริษัท NATUREHUT	WWW.MYNATUREHUT.COM	ไม่ระบุ
13. บริษัท สหโคเจนกรีน	ลำพูน	ไม่ระบุ

วิธีการรวบรวมไบโอชาร์จากการผลิตในประเทศไทย ปัจจุบันมีหน่วยงาน ทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน สถาบันการศึกษา และเกษตรกร เห็นความสำคัญในการพัฒนาส่งเสริม การผลิตไบโอชาร์ และเก็บรวบรวมไบโอชาร์ในพื้นที่ ด้วยการรวบรวมไบโอชาร์จากเกษตรกรรายย่อย ที่มีวิธีผลิตไบโอชาร์ด้วยเตาเผาขนาดเล็ก ในรูปแบบการรวมกลุ่มเกษตรกรผู้ผลิตไบโอชาร์ เพื่อควบคุม คุณภาพ เป็นแหล่งรวบรวมซื้อขาย และแลกเปลี่ยนวัตถุดิบในการผลิต เพื่อลดต้นทุนการขนส่ง ในพื้นที่ เช่น การดำเนินโครงการนำร่องรวมกลุ่มเกษตรกรผู้ผลิตข้าวโพดในพื้นที่ภาคเหนือ ดำเนินการ ส่งเสริมการผลิตและรับซื้อไบโอชาร์จากเศษข้าวโพด เป็นมาตรการการผลิตพืชคาร์บอนต่ำ และลด PM2.5 เพื่อผลิตพืช Good agricultural practice (GAP) PM2.5 FREE (ธีรวุฒิ, 2568) ส่วนบริษัท ที่มีกำลังการผลิตไบโอชาร์ขนาดใหญ่เพื่อจำหน่าย หรือส่งเสริมเกษตรกรรายย่อย แล้วรับซื้อวัตถุดิบ ในจัดการเศษชีวมวลจากภาคเกษตรกรรม เพิ่มมูลค่าเป็นผลิตภัณฑ์ไบโอชาร์ เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ ทางการเกษตร และเป็นแหล่งวัสดุย่อยดในอุตสาหกรรมชนิดต่าง ๆ และมุ่งสู่ตลาดคาร์บอนเครดิต

สำหรับประเทศไทยแนวทางการจัดการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้ทาง การเกษตร เช่น ฟางข้าว ต้นและซังข้าวโพด ใบอ้อย ใบไม้ และกิ่งไม้ เป็นต้น เพื่อลดปัญหาการเผา ในพื้นที่โล่งแจ้ง สาเหตุการเกิดก๊าซพิษ และปัญหาฝุ่น PM2.5 โดยนำมาผลิตเป็นไบโอชาร์ที่มี คุณสมบัติเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นก้อนสีดำ มีรูพรุน เป็นแหล่งสะสมคาร์บอนระยะยาว มีความปลอดภัย และมีคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงสมบัติดิน ส่งเสริมการเจริญเติบโต ของพืช และสภาพแวดล้อมทางการเกษตร ได้แก่ การปรับปรุงคุณภาพดิน เช่น เพิ่มความสามารถใน การอุ้มน้ำของดิน เพิ่มความพรุนของดิน ปรับปรุงโครงสร้างดิน ลดความเป็นกรดของดิน เป็นแหล่ง อาศัยของจุลินทรีย์ ช่วยดูดซับธาตุอาหาร และลดการชะล้าง ช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สู่ชั้นบรรยากาศ และลดปัญหาการเกิดเถ้าลอย และฝุ่นละอองขนาดเล็ก (คณะกรรมการพลังงาน หอการค้าไทย, 2567) และเพิ่มการเก็บกักคาร์บอนในดินระยะยาว ด้วยการเผาผลิตไบโอชาร์จาก กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนของชีวมวล เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะที่มี ออกซิเจนต่ำ ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นวิธีการเผาแบบลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจุบันมีการรับรองการผลิตไบโอชาร์ในต่างประเทศ มีการรับซื้อเป็นคาร์บอนเครดิต สร้างมูลค่า ช่วยลดปัญหาฝุ่นควันในการแก้ปัญหาฝุ่นละออง PM2.5 (วีระศักดิ์, 2568) ทั้งนี้เนื่องจากไบโอชาร์ มีค่าสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H : Corg) น้อยกว่า 0.4 มีศักยภาพสูงในการกักเก็บคาร์บอน และ มีความเสถียรทนทานต่อการสลายตัวได้นานมากกว่า 100 ปี เป็นเทคโนโลยีการกำจัดคาร์บอน เป็นแนวทางการพัฒนาการกักเก็บคาร์บอนด้วยไบโอชาร์ระดับอาเซียน เพื่อมุ่งสู่ตลาดคาร์บอนเครดิต (ประกายธรรม, 2568) ซึ่งไบโอชาร์เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการกักเก็บคาร์บอนและช่วยลดปล่อย ก๊าซเรือนกระจก จากไบโอชาร์ 1 ตัน สามารถป้องกันคาร์บอนไดออกไซด์ไปสู่ชั้นบรรยากาศได้ ประมาณ 3 ตัน โดย Puro ซึ่งเป็นตลาดที่ขายผลิตภัณฑ์กำจัดคาร์บอน มีการซื้อขายไบโอชาร์ในราคา

ประมาณ 100 ถึง 200 ดอลลาร์ต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 1 ตันที่กักเก็บ ซึ่งสามารถเพิ่มมูลค่า มุ่งสู่ตลาดคาร์บอนเครดิตให้กับประเทศไทยได้ (บริษัท เอ ทีเอ็ม เมนเทนแนนท์ แอนด์ เซอร์วิส จำกัด, 2568) และในปี 2568 กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ดำเนินโครงการสนับสนุน ส่งเสริมของภาครัฐต่อการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์เพื่อการจัดการก๊าซเรือนกระจก และ PM2.5 สำหรับ ภาคเกษตร โดยการนำร่องในพื้นที่ปลูกข้าวโพด และมีการต่อยอดต้นแบบสู่พื้นที่ปลูกข้าวและอ้อย ซึ่งไบโอชาร์เป็นหนึ่งในนโยบายด้านการขับเคลื่อนคาร์บอนเครดิต จากเทคโนโลยีการดักจับ ในการใช้ประโยชน์และการกักเก็บคาร์บอนของประเทศ เพื่อหยุดการเผา (ธีรวุฒิ, 2568)

5. ผลสำเร็จของงาน

5.1 ผลสำเร็จของงานเชิงปริมาณ

5.1.1 วิธีการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จำนวน 1 วิธีการ ดังนี้ วิธีการผลิต ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ประกอบด้วยน้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (เตรียมปริมาตร 100 ลิตร ประกอบด้วยน้ำกากส่า 10 ลิตร : กากน้ำตาล 5 ลิตร : น้ำ 85 ลิตร) ใส่หัวเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เติมน้ำออกซิเจนเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

5.1.2 วิธีการผลิตไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จำนวน 1 วิธีการ ดังนี้ วิธีการผลิตไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ประกอบด้วย ไบโอชาร์แกลบ 1 ส่วน ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว 2 ส่วน (อัตราส่วน 1 : 2 น้ำหนักต่อปริมาตร) แช่วไบโอชาร์แกลบนาน 1 ชั่วโมง

5.1.3 องค์ความรู้การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน และผลผลิตพืช จำนวน 1 เรื่อง

5.1.4 เอกสารวิชาการการเพิ่มประสิทธิภาพปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ด้วยไบโอชาร์ ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตพืช จำนวน 1 เรื่อง

5.2 ผลสำเร็จของงานเชิงคุณภาพ

5.2.1 ขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพได้รวดเร็วภายใน 24 ชั่วโมง อาหารเลี้ยงเชื้อต้นทุนต่ำ จากการใช้น้ำกากส่าและกากน้ำตาล เป็นวิธีการง่ายปฏิบัติตามได้จริง ผลิตเป็นปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ประกอบด้วยแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียสร้างฮอโมน แบคทีเรียละลาย - ฟอสเฟต และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม เท่ากับ 6.779 6.450 7.973 และ 8.273 log CFU ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

5.2.2 เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินจากเดิม ได้แก่ ปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้น คิดเป็น 19.29 - 30.71 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นคิดเป็น 30.84 - 141.38 เปอร์เซ็นต์ จากใช้ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

5.2.3 เพิ่มจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ทางการเกษตรในดิน ได้แก่ แบคทีเรียตรึงไนโตรเจน - แบบอิสระ แบคทีเรียละลายฟอสเฟต แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม และแบคทีเรียสร้างฮอโมน เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน และเพิ่มแหล่งอินทรีย์คาร์บอนในดินที่อยู่ในรูปของเซลล์จุลินทรีย์

5.2.4 เพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ และวัสดุเหลือใช้ อุตสาหกรรมเกษตร ได้แก่ น้ำกากส่าและกากน้ำตาล ลดต้นทุนทดแทนสารเคมีสำหรับเลี้ยงเชื้อ ปุ๋ยชีวภาพ

5.2.5 สามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมี 25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการผลิตพืช

5.2.6 สามารถเพิ่มการเจริญเติบโต ผลผลิตของพืช และเพิ่มรายได้เกษตรกร

6. การนำไปใช้ประโยชน์/ผลกระทบ

6.1 สามารถนำต้นแบบการผลิต และวิธีการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับ ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลวที่เหมาะสม ถ่ายทอดสู่เกษตรกร และเกษตรกร นำไปต่อยอดขยายผล การใช้ประโยชน์ในพื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ดินเสื่อมโทรม และพื้นที่ดินความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ด้วยไบโอชาร์ที่เป็นอินทรีย์วัตถุรูปเสถียรเพื่อการบำรุงดิน เพิ่มจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ในการเพิ่ม แหล่งธาตุอาหารพืชจากธรรมชาติ ส่งเสริมระบบนิเวศในดิน ลดปัญหาดินเสื่อมโทรม และเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน ให้เหมาะสมสำหรับการผลิตพืชได้อย่างยั่งยืน ช่วยเพิ่มขีดความสามารถ ด้านปัจจัยการบำรุงดินด้วยอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ในประเทศได้อย่างมีประสิทธิภาพ และคุ้มค่า ดังนั้น ประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตไบโอชาร์จากวัสดุแกลบได้จำนวนมาก กล่าวได้ว่า ไบโอชาร์ มีบทบาทสำคัญนำไปใช้ประโยชน์ในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ โดยไบโอชาร์มีคุณสมบัติคงทนในดิน พร้อมส่งเสริมประสิทธิภาพปุ๋ยอินทรีย์ และปุ๋ยเคมีในดินเพาะปลูก

6.2 สามารถใช้เอกสารวิชาการเป็นแหล่งข้อมูล และเป็นคู่มือแนวทางการจัดการด้านการบำรุงดินด้วยอินทรีย์วัตถุ จากการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์วัสดุเหลือใช้ทางเกษตรของแต่ละท้องถิ่น มาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน จากคุณสมบัติเด่นที่มีรพุนสูง อุดมไนโตรเจนได้ดี ดูดซับ และลดการสูญเสีย ธาตุอาหารพืช มีองค์ประกอบของอินทรีย์คาร์บอนที่คงตัวสูง และมีช่องว่างเป็นแหล่งที่อยู่อาศัย ของจุลินทรีย์ นำมาใช้ประโยชน์ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช จากธรรมชาติ เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน เป็นแนวทางให้ผู้บริหาร นักวิชาการ และเกษตรกร นำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนด้านการบำรุงดินด้วยอินทรีย์วัตถุ เพื่อการพัฒนาที่ดินอย่างยั่งยืน โดยให้เน้นถึงความสำคัญและความเข้าใจการปฏิบัติในการใช้ไบโอชาร์แก่เกษตรกรว่าการใส่ไบโอชาร์

เพียงหนึ่งครั้ง เพื่อปลูกพืชผักจะมีความคงทนได้ระยะเวลาหนึ่งปี ซึ่งจะปลูกพืชผักได้ 3 ถึง 4 ครั้ง โดยที่ไบโอชาร์จะยังคงรักษาประสิทธิภาพการเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ปุ๋ยชีวภาพในดิน การกักเก็บความชื้นและธาตุอาหารพืชในดิน เป็นการประหยัดลดต้นทุนการใช้ไบโอชาร์

6.3 สามารถนำองค์ความรู้ไปใช้ในการบริหารจัดการเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรในพื้นที่ หมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ และสร้างมูลค่าทางชีวภาพ เพื่อเป็นแหล่งอินทรีย์วัตถุในดิน ปัจจุบันการผลิตไบโอชาร์มีรูปแบบการผลิตที่ง่าย และต้นทุนต่ำ เกษตรกรสามารถนำแนวทางไปปฏิบัติใช้ประโยชน์ได้เองในพื้นที่ เป็นแนวทางการส่งเสริมเกษตรกรให้พึ่งพาตนเอง ด้านการบำรุงดินในการรักษา ฟื้นฟู และยกระดับอินทรีย์วัตถุในดิน เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน และเพิ่มผลผลิตภพดินในการผลิตพืชสูงขึ้น เป็นการสร้างภูมิคุ้มกัน ความมั่นคงของชีวิตเกษตรกร และประเทศ เกิดการเกื้อกูลระบบนิเวศเกษตรที่ยั่งยืน ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมอย่างสมดุล มั่นคง และยั่งยืนของครอบครัว สังคม และประเทศ

7. ความยุ่งยากและซับซ้อนในการดำเนินการ

7.1 การวิเคราะห์ และจำแนกชนิดของแบคทีเรียแต่ละชนิด ที่ต้องใช้วิธี microbiological method ต้องใช้ความรู้ความเชี่ยวชาญ และเทคนิคการตรวจสอบเชื้อแต่ละสายพันธุ์ที่ถูกต้อง

7.2 ตรวจสอบการเข้าอยู่อาศัยของแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิด ในช่องว่างรูพรุนของไบโอชาร์ ด้วยการใช้เครื่องมือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่ซับซ้อน ต้องใช้ความรู้ความเชี่ยวชาญ และเทคนิคในการเตรียมตัวอย่างทุกขั้นตอน

7.3 การทดสอบในแปลงทดลอง เนื่องจากปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมในแปลงไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ความชื้นในดิน และอุณหภูมิ เป็นต้น การดำเนินงานต้องตรวจสอบ ควบคุม และดูแลแปลง เช่น การให้น้ำพืช การใส่ปุ๋ย และการเก็บข้อมูลอย่างละเอียด เพื่อลดปัจจัยเสี่ยงที่มีผลกระทบต่อการวิจัย

7.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ การรวบรวมข้อมูลต้องถูกต้อง การใช้เวลาการเตรียมข้อมูล การตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูล และการวางแผนการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้ได้ผลวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์

8. ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินการ

เนื่องจากการทดสอบในพื้นที่แปลงทดลอง ช่วงเวลาที่เพาะปลูกช่วงเดือนเมษายน สภาพอากาศร้อน มีการระเหยของน้ำสูง จึงต้องมีการจัดการให้น้ำที่เหมาะสม ซึ่งพืชทดสอบเป็นพืชผักที่ต้องการน้ำในการเจริญเติบโตอย่างเหมาะสม เพื่อลดปัจจัยเสี่ยงที่มีผลกระทบต่อการวิจัย

9. ข้อเสนอแนะ

9.1 ควรมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมด้านการปรับปรุงดินด้วยไบโอชาร์ที่ผลิตจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และอุตสาหกรรมเกษตรรูปแบบต่าง ๆ ที่มีในท้องถิ่น ร่วมกับการใช้ประโยชน์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 หรือจุลินทรีย์ควบคุมโรคพืช ในการเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดิน เพิ่มผลผลิตภาพดิน และผลผลิตพืช ตามศักยภาพของดินที่แตกต่างกัน และศึกษาผลจากการใช้ประโยชน์ในระยะยาวต่อคุณภาพดิน ด้านสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพของดิน ในพื้นที่ดินมีอินทรีย์วัตถุต่ำ จะเป็นข้อมูลในการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

9.2 ควรมีการขยายผลจากการวิจัยสู่แปลงสาธิตร่วมกับการจัดการดินแบบผสมผสาน สำหรับผลิตพืชชนิดต่าง ๆ ตามศักยภาพของดินในแต่ละพื้นที่ เพื่อให้เกษตรกรเกิดความมั่นใจนำไปปฏิบัติได้อย่างเป็นรูปธรรม และประยุกต์ใช้ขยายผลได้เป็นวงกว้าง

9.3 ควรมีการศึกษาวิจัยระยะเวลาความคงทนของไบโอชาร์ในชุดดินที่สำคัญ ซึ่งมีดัชนีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินบ่งชี้ประสิทธิภาพคุณสมบัติของไบโอชาร์

9.4 ควรมีการศึกษาวิจัยการใช้ไบโอชาร์กลายเป็นวัสดุรองรับในการผลิตผลิตภัณฑ์ จุลินทรีย์ทางการเกษตรของกรมพัฒนาที่ดิน

9.5 ควรมีการศึกษาวิจัยประสิทธิภาพธาตุอาหารพืชจากปุ๋ยเคมีและในดิน เพื่อชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชอย่างมีประสิทธิภาพ ลดต้นทุนการผลิต แนวทางรูปแบบการใช้ประโยชน์จากไบโอชาร์พัฒนาเป็นปุ๋ยอินทรีย์เคมีอัดเม็ด เพื่อสะดวกต่อการใช้ประโยชน์ของเกษตรกร ซึ่งจะเกิดศักยภาพได้ควรจะมีความร่วมมือกันกับหน่วยงานภาครัฐ ได้แก่ วิสาหกิจชุมชนของกรมส่งเสริมการเกษตร หรือเอกชนผู้ผลิตปุ๋ยเคมี

10. การเผยแพร่ผลงาน

10.1 การจัดทำเอกสารเผยแพร่หน้าเว็บไซต์หน่วยงาน ได้แก่ กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน

แหล่งเผยแพร่: <http://180.180.244.229/osb/Index.htm?mode=document>

(แสดงเอกสารเผยแพร่ที่ภาคผนวก ค ข้อ 1.)

10.2 การนำเสนอผลงานในการอบรมเชิงปฏิบัติการเจ้าหน้าที่ โครงการศึกษาการจัดการดิน ปุ๋ย และน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อแก้ปัญหาภัยแล้ง และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับเจ้าหน้าที่ของกรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ จำนวน 40 คน หัวข้อบรรยาย การศึกษาวิจัยการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อการปรับปรุงดิน เมื่อวันที่ 29 มีนาคม 2564 ณ โรงแรมอาปินา เฮาส์ กรุงเทพมหานคร (แสดงเอกสารเผยแพร่ที่ภาคผนวก ค ข้อ 2.)

11. ผู้มีส่วนร่วมในผลงาน

11.1 นางจันจิรา แสงสีเหลือง ตำแหน่งนักวิชาการเกษตรชำนาญการพิเศษ มีหน้าที่ดำเนินการวางแผนการทดลอง วิจัย วิเคราะห์แปรข้อมูล และเขียนรายงาน สัดส่วนร้อยละ 80

11.2 นางนวลจันทร์ ชะบา ตำแหน่งผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน มีหน้าที่ร่วมดำเนินการวางแผนการทดลองห้องปฏิบัติการและแปลงทดลอง สัดส่วนร้อยละ 10

11.3 นายวุฒิชัย จันทรสมบัติ ตำแหน่งนักวิชาการเกษตรชำนาญการพิเศษ มีหน้าที่ร่วมดำเนินการวางแผนการทดลอง เก็บข้อมูลในห้องปฏิบัติการ สัดส่วนร้อยละ 10

ขอรับรองว่าผลงานดังกล่าวข้างต้นเป็นความจริงทุกประการ

(ลงชื่อ)

จิราภา

(นางจันจิรา แสงสีเหลือง)

ตำแหน่ง นักวิชาการเกษตรชำนาญการพิเศษ

ผู้ขอประเมิน

วันที่ 24 / กรกฎาคม / 2568

ขอรับรองว่าสัดส่วนการดำเนินการข้างต้นเป็นความจริงทุกประการ

รายชื่อผู้มีส่วนร่วมในผลงาน	ลายมือชื่อ
1. นางนวลจันทร์ ชะบา	<i>นวลจันทร์</i>
2. นายวุฒิชัย จันทรมบัติ	<i>วุฒิชัย</i>

ได้ตรวจสอบแล้วขอรับรองว่าผลงานดังกล่าวข้างต้นถูกต้องตรงกับความเป็นจริงทุกประการ

(ลงชื่อ)

ธีรวัฒน์

(นายธีรวัฒน์ สิทธิปัญญาพัฒน์)

ตำแหน่ง ผู้อำนวยการกองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน

ผู้บังคับบัญชาที่กำกับดูแล

วันที่ 24 / กรกฎาคม / 2568

(ลงชื่อ)

ทวิศักดิ์

(นายทวิศักดิ์ ธนเดโชพล)

ตำแหน่ง

อธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน

ผู้บังคับบัญชาที่เหนือขึ้นไป

วันที่ 28 / สิงหาคม / 2568

หมายเหตุ - คำรับรองจากผู้บังคับบัญชาอย่างน้อยสองระดับ คือ ผู้บังคับบัญชาที่กำกับดูแล และผู้บังคับบัญชาที่เหนือขึ้นไปอีกหนึ่งระดับ เว้นแต่ในกรณีที่ผู้บังคับบัญชาดังกล่าวเป็นบุคคลคนเดียวกัน ก็ให้มีคำรับรองหนึ่งระดับได้

- ผู้บังคับบัญชาที่กำกับดูแล ผู้ลงนามในแบบการประเมินบุคคล มีการโยกย้ายไปดำรงตำแหน่ง ผู้อำนวยการสำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 10

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. 2551. การปรับปรุงบำรุงดินด้วยอินทรีย์วัตถุ กรมพัฒนาที่ดิน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- _____. 2557. ลักษณะและสมบัติของชุดดินในภาคกลาง. กองสำรวจดินและวิจัยทรัพยากรดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- _____. 2562ก. คำอธิบายลักษณะและสมบัติของชุดดินจัดตั้งในประเทศไทย. กองสำรวจดินและวิจัยทรัพยากรดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- _____. 2562ข. การใช้ผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีชีวภาพ กรมพัฒนาที่ดิน เพื่อส่งเสริมการใช้สารอินทรีย์ลดการใช้สารเคมี. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2560. เตาเผาถ่านชีวภาพ. แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th/main.php?filename=index>, 10 สิงหาคม 2567.
- กรมวิชาการเกษตร. 2548. คำแนะนำการใส่ปุ๋ยกับพืชเศรษฐกิจ. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- _____. 2553. หลักวิชาการสถิติ. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- _____. 2567. ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง กำหนดราคาจำหน่ายปัจจัยการผลิตทางการเกษตร พ.ศ. 2567. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- เกศศิริรินทร์ แสงมณี, ชัยนาม ดิสภาพร และ สุรัชย์ สุวรรณชาติ. 2557. การจัดการดินด้วยเทคโนโลยีชีวภาพและถ่านชีวภาพในการผลิตผักคะน้าในดินทราย, น. 70. ใน การประชุมวิชาการและนำเสนองานวิจัยพืชเขตร้อนและกึ่งร้อน ครั้งที่ 8 วันที่ 20 - 21 กรกฎาคม 2557. มหาวิทยาลัยหอการค้า, กรุงเทพฯ.
- _____, อีระรัตน์ ชินแสน และ ณัฐพงษ์ พันธภา. 2558. การศึกษาอัตราส่วนของถ่านชีวภาพต่อคุณสมบัติทางเคมีของดินปลูก การเจริญเติบโต และผลผลิตของผักสลัดกรีนคอส, น. 746 - 752. ใน การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 53: สาขาพืช. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- คณะกรรมการพลังงานหอยการค้าไทย. 2567. รู้จัก ไบโอชาร์ ถ่านชีวภาพที่ช่วยปรับปรุงดินและลดโลกร้อน. แหล่งที่มา: <https://energy-thaichamber.org/biochar/>, 31 มีนาคม 2568.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ระบบข้อมูลและธาตุอาหารพืชเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพืช. เอกสารประกอบการฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

- จรัญ จันทลักษณ์. 2534. สถิติ: วิเคราะห์และวางแผนงานวิจัย. พิมพ์ครั้งที่ 6. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- จิตติภา ศรีวัชรทรัพย์. 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. การพัฒนารูปแบบผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพตรึงไนโตรเจน ละลายฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และสร้างฮอร์โมนพืชชนิดเม็ดต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- เจษฎา กาญจนเกษร, ธงชัย ขาดิเือก, อิศร ตั้งสุวรรณ และ เกศศิริรินทร์ แสงมณี. 2561. ผลของถ่านชีวภาพจากแกลบและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดหวานที่ปลูกในพื้นที่ดินกรด. วิทยาศาสตร์เกษตร 49 (1) (พิเศษ): 194 - 198.
- 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 และ พิมพ์ธิดา เรืองไพศาล. 2554. วิจัยและพัฒนาปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตทางการเกษตร. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- ชฎาภา ใจหมั่น. 2564. ผลของการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดิน และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกภายใต้ระบบการปลูกข้าว. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

- ฐปน ชื่นบาล, ศิราภรณ์ ชื่นบาล และ ปิยะบุตร โพธิคามบำรุง. 2552. การกำจัดสีในน้ำกากสา โดยใช้เชื้อผสมระหว่างเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่ม WHITE - ROT FUNGI และเชื้อยีสต์. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ณิชามัทธ สิริธรรนันท์. 2562. ผลของการใช้ถ่านชีวภาพต่อความอุดมสมบูรณ์ของการกักเก็บน้ำ ในดินและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัย เชียงใหม่.
- ดนัย พรอานวยลาภ และ วิวัฒน์ สวยสม. 2565. ผลของถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์บนพื้นที่ลาดเท ในกลุ่มชุดดินที่ 55 จังหวัดน่าน, น. 72 - 82. ใน เอกสารประชุมวิชาการ กรมพัฒนาที่ดิน ปี 2565. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและ สหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- ทัพไท หน่อสุวรรณ, อรรถชัย จินตะเวช และ สิทธิชัย ลอดแก้ว. 2554. ความเป็นไปได้ในการผลิต ไบโอดีเซลเพื่อเพิ่มผลผลิตในระบบการผลิตข้าวนาสวน. ใน รายงานการสัมมนาาระบบเกษตร แห่งชาติ ครั้งที่ 7, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ทัศนีย์ ดิษฐกมล. 2551. การใช้ประโยชน์ของน้ำกากสาสำหรับการผลิตอ้อยเพื่อลดมลพิษสิ่งแวดล้อม: กรณีอ้อย ปลุกปีแรก. วารสารคำแหง ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 11 (1): 11 - 29.
- _____ และ สมบูรณ์ แก้วปั้นทอง. 2547. ประโยชน์น้ำกากสาสำหรับการผลิตข้าวจังหวัดขอนแก่น. วารสารคำแหง 7 (ฉบับพิเศษ): 132 - 151.
- ธงชัย มาลา. 2550. ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ: เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์. พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- _____. 2557. การตรึงไนโตรเจนทางชีวภาพ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ธีรวุฒิ ชูตินันทกุล. 2568. บทบาท แนวทาง และการสนับสนุนส่งเสริมของภาครัฐต่อการ ใช้ ประโยชน์ไบโอดีเซล เพื่อการจัดการก๊าซเรือนกระจกสำหรับภาคเกษตร. ใน ประชุม วิชาการประจำปี สวทช. ครั้งที่ 20 NAC2025. ศูนย์ประชุมอุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย, จังหวัดปทุมธานี.
- นวลจันทร์ ชะบา, จันจิรา แสงสีเหลือง และ วุฒิชัย จันทรสมบัติ. 2560. ศึกษาการใช้ไบโอดีเซล ต่อการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมมวลชีวภาพและสังคมของจุลินทรีย์ดินในพื้นที่ปลูกฝักระบบ เกษตรอินทรีย์. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- นันทนา สีสุข. 2549. จุลชีววิทยาทั่วไป. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นันทปรีชา สิงห์ทอง. 2562. การไฟโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของถ่านทอร์รีไฟต์ในเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดIZED BED แบบฟอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

- บรรเจิดลักษณ์ จินตฤทธิ และ นวลจันทร์ ภาสดา. 2560. การศึกษาสมบัติของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดิน และผลผลิต พืชสมุนไพรขึ้นในพื้นที่ดินเปรี้ยวจัด. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- บรรเจิดลักษณ์ จินตฤทธิ และ รติกร ณ ลำปาง. 2560. การประเมินคุณภาพดินและการใช้ถ่านชีวภาพ (ไบโอชาร์) เพื่อเพิ่มคาร์บอนในดินและเพิ่มผลผลิตพืชผักอินทรีย์ในพื้นที่ดินกรด. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- บริษัท เอ ทีม เมนเทนแนนท์ แอนด์ เซอร์วิส จำกัด. 2568. การออกแบบ พัฒนาและสร้างเตาไพโรไลซิส สำหรับผลิตไบโอชาร์ที่ได้มาตรฐานสากล. ใน ประชุมวิชาการประจำปี สวทช. ครั้งที่ 20 NAC 2025. ศูนย์ประชุมอุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย, จังหวัดปทุมธานี.
- บริษัท เบสตัน กรุ๊ป จำกัด. 2567. อุปกรณ์การผลิตไบโอชาร์. แหล่งที่มา: <https://bestoncompany.com/th/biochar-production-equipment>, 15 สิงหาคม 2567.
- บุษราพร ไชยพันธ์. 2562. การสำรวจปริมาณของจุลินทรีย์ดินที่เป็นประโยชน์ทางการเกษตรในพื้นที่ปลูกมันสำปะหลัง จังหวัดชลบุรี. ดินและปุ๋ย 41: 24 - 33.
- บ้านไร่เรา. 2564. แบบเตาเผาถ่านกลบ. แหล่งที่มา: www.banrainarao.com, 15 สิงหาคม 2567.
- ปณิชา จันทรเปล่ง และ วิลาวัลย์ เรียงเวช. 2553. การใช้ผลิตภัณฑ์หัวเชื้อจุลินทรีย์ผลิตปุ๋ยชีวภาพเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตข้าว จังหวัดอ่างทอง. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- ประกายธรรม สุขสถิตย์. 2568. กรอบการพัฒนาระเบียบวิธีการประเมินการกักเก็บคาร์บอนของไบโอชาร์. ใน ประชุมวิชาการประจำปี สวทช. ครั้งที่ 20 NAC2025. ศูนย์ประชุมอุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย, จังหวัดปทุมธานี.
- ประพิน ชันธเลิศ และ ฤกษ์ หอมตลบ. 2552. การใช้ผลิตภัณฑ์หัวเชื้อจุลินทรีย์ผลิตปุ๋ยชีวภาพเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตกะหล่ำปลี จังหวัดตาก. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- ประไพพิศ ศรีมาวงษ์, วันเพ็ญ วิริยะกิจนทีกุล, สรุเชษฐ์ นารักษ์, อรอนงค์ โฉมศิริ และ กุลภัทร ยิ้มพักตร์. 2557. สมบัติเคมี - กายภาพ และการดูดซับธาตุอาหารพืชของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- _____, นภัสสร ไนตศิริ, ปราณี จอมอูน, ชนิดา เกิดชนะ, ชนิดา จรรย์วรพรรณ และ รัตนชาติ ช่วยบุตตา. 2564. ผลการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพต่อปริมาณความชื้นและการแทรกซึมน้ำในดินปลูกมันสำปะหลัง. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

ประภัสสร รัตนไพบูลย์, นิกราน หอมดวง, ณัฐวุฒิ ดุษฎี, ภคมน ปินตานา และ ชูรัตน์ ชารารักษ์.

2563. การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากแกลบและซังข้าวโพดเพื่อปรับปรุงดิน.

วิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน 3 (3): 74 - 79.

ประวิทย์ สูงสุด, นิวัต เหลืองชัยศรี, จักรกฤษณ์ หอมจันทร์ และ ชุติมาศ บุญไทย. 2550. การใส่

น้ำกากส่าจากโรงงานเอทานอลเพื่อประโยชน์ทางการเกษตร. **มหาวิทยาลัยขอนแก่น**

(ฉบับบัณฑิตศึกษา) 7 (4): 13 - 19.

ปัทมา วิทยากร. 2547. **ความอุดมสมบูรณ์ของดินชั้นสูง.** มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

พิกุล ธรรมานิมิตกุล และ ดารารัตน์ โฮตาก้า. 2552. การคัดเลือกอะไซโตแบคเตอร์ที่มีประสิทธิภาพ

ในการเพิ่มผลผลิตพืช, น. 88 - 89. ใน **เอกสารประชุมวิชาการดินและปุ๋ยแห่งชาติ ครั้งที่**

1 เรื่องดินและปุ๋ยในภาวะวิกฤตอาหารและพลังงาน วันที่ 23 - 24 เมษายน 2552.

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พินิจภณ ปิตุยะ. 2558. ผลของการผสมถ่านชีวภาพในดินทรายบริเวณพื้นที่เงาฝนเพื่อเพิ่ม

ผลผลิตงาดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พิมพ์ธิดา เรืองไพศาล, ณวิวรรณ เหลืองวุฒิโรจน์ และ ดารารัตน์ โฮตาก้า. 2552. การพัฒนา

ผลิตภัณฑ์เชื้อจุลินทรีย์ที่สร้างฮอโมนเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช, น. 51. ใน

เอกสารประชุมวิชาการดินและปุ๋ยแห่งชาติ ครั้งที่ 1 เรื่องดินและปุ๋ยในภาวะวิกฤตอาหาร

และพลังงาน วันที่ 23 - 24 เมษายน 2552. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พุทธิภณ ศิริมูล, ศุภสิทธิ์ สิทธาพานิช, พรทิพย์ ศรีมงคล และ วิมลนันทน์ กันเกตุ. 2557. อิทธิพล

ของปุ๋ยโพแทสเซียมต่อการดูดใช้ธาตุอาหารและผลผลิตของข้าวในสภาพดินเค็ม. **วิทย. กษ.**

45 (2) (พิเศษ): 637 - 640.

พูนสุข ประเสริฐสรรพ. 2558. **การใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือทางอุตสาหกรรมเกษตร.**

สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ไพจิตร กระจ่างหิน. 2552. **การใช้ประโยชน์จากน้ำกากส่าเพื่อผลิตไฮโดรเจน.** วิทยานิพนธ์

ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภารุจีร์ ภูมิไกล. 2556. **สภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อ *Azotobacter vinelandii* ใน**

การผลิตปุ๋ยชีวภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรึงไนโตรเจนสำหรับปลูกอ้อย. วิทยานิพนธ์

ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ยงยุทธ โอสดสภา. 2552. **ธาตุอาหารพืช.** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และ ขวลิติ ยังประยูร. 2551. **ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน.** สำนักพิมพ์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- รัชฎา เลกุล และ วิสาชา ภูจินดา. 2563. แนวทางการใช้ประโยชน์จากน้ำกากส่าจากการผลิตสุรา สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. **วิจัยไร่ไพพรรณี** 14 (1): 139.
- วิชัย ลิ้มโพธิ์ทอง, สลิตา สุสิงห์ และ ชัยนาม ดิสถาพร. 2554. การศึกษาชนิดและอัตราที่เหมาะสมของถ่านชาร์ร่วมกับการใช้ปุ๋ยเคมีในการเพิ่มผลผลิตของข้าวปทุมธานี 1 ในสภาพดินทราย. **กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.**
- วิชุดา กัลยาศิริ. 2556. ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อผลผลิตข้าวและคุณภาพดินเหนียวปนทราย กรณีศึกษาตำบลป่าเต็ง อำเภอกำแพงกระเจาน จังหวัดเพชรบุรี. **วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.**
- วีรวัฒน์ นิลรัตน์คุณ. 2558. การเพิ่มผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยการใช้ปุ๋ยอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ. **สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 2 กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.**
- วีระศักดิ์ โควรสุรัตน์. 2568. **ไบโอชาร์ เผาไม่ส่งฝุ่น ได้ลุ้นคาร์บอนเครดิต.** แหล่งที่มา: <https://www.weerasak.org/articles/vdo-weerasak/20250205>, 31 มีนาคม 2568.
- วุฒิชัย จันทรมสมบัติ, บวร บัวขาว, ภัทรานิษฐ์ ช่วยสรน้อย และ นิภาพร ศรีบัณฑิต. 2567. ผลของถ่านชีวภาพจากวัสดุท้องถิ่นที่แตกต่างกัน ต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของดินเค็ม ภายใต้การอนุรักษ์ดินและน้ำแบบที่ 1 ในพื้นที่แอ่งโคราช, น. 18 - 19. ใน **เอกสารประชุมวิชาการ กรมพัฒนาที่ดิน 2567. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.**
- ศิริลักษณ์ ศิริสิงห์ และ อรสา สุขสว่าง. 2556. การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดินเพื่อการเกษตร. **สังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์** 39 (2): 212 - 225.
- ศูนย์เครือข่ายปราชญ์ชาวบ้าน. 2558. **เตาเผาถ่านชีวภาพ เกษตรกรกลุ่มจุลินทรีย์บ้านดอนผิงแดด จังหวัดเพชรบุรี.** แหล่งที่มา: https://www.facebook.com/donpingdad/?ref=page_internal, 10 สิงหาคม 2567.
- สถาพร คูวิจิตรจากร. 2546. **ทดลองปลูกพืชกลศาสตร์.** ไลบรารี นาย พับลิชชิ่ง, กรุงเทพฯ.
- สายชล สุขญาณกิจ, สิริวรรณ สมิตธิอาภรณ์, ธนภัทร ปลื้มพวง และ ธนวรรณ พาณิชพัฒน์. 2563. ผลของถ่านชีวภาพร่วมกับการจัดการปุ๋ยต่อผลผลิตและความเข้มข้นธาตุอาหารในถั่วฝักยาวไร้ค้าง. **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี** 28 (3): 443 - 454.
- สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน. 2548. **คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.**
- สุดชล วุ่นประเสริฐ. 2555. การศึกษาสัดส่วนและความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชในการผลิตผักคะน้าและผักชีในระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดินในระบบปิด. **มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.**

- เสาวคนธ์ เหมวงษ์. 2557. ผลของถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่และแกลบต่อผลผลิต และประสิทธิภาพการดูดใช้ในโตรเจนของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1. **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี** 16 (1): 69 - 75.
- เสาวรส เหลื่อนุ่นขาบ. 2560. การผลิตก๊าซชีวภาพน้ำกากส่าของโรงงานสุรากลั่นชุมชนโดยใช้กลยุทธิ์การหมักร่วม. **วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยทักษิณ.**
- อรสา สุกสว่าง. 2552. เทคโนโลยีถ่านชีวภาพ: วิธีแก้ปัญหาลอกรื้อน ดิน และความยากจนในภาคเกษตรกรรม. ใน **เอกสารประชุมวิชาการเรื่อง สภาวะโลกร้อน: ความหลากหลายทางชีวภาพและการใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน วันที่ 5 - 6 พฤศจิกายน 2552. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.**
- _____. 2558. **ไบโอชาร์ ถ่านชีวภาพ.** สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. แหล่งที่มา: <https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=20127>, 20 สิงหาคม 2566.
- อภิเชษฐ หมั่นอร่าม, วิเชียร ลีลาวัชรมาศ และ ประมุข ภาระกุลสุขสถิตย์. ม.ป.ป. **ผลของกากน้ำตาลและกากเชลล์ยีสต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อการผลิตแบคทีเรียกรดแลกติก.** แหล่งที่มา: https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/BKN_AGRO/search_detail/download_digital_file/12626/101967, 5 สิงหาคม 2566.
- อุซุกร พรหมมานนท์ และ วรภา นาเมือง. 2552. **การใช้ผลิตภัณฑ์หัวเชื้อจุลินทรีย์ผลิตปุ๋ยชีวภาพเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ดินและผลผลิตยางพารา จังหวัดมุกดาหาร.** กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- อำพร สอนนำ และ ไชยยา สุตสะอาด. 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.** Available Source: <http://10.57772/intechopen.68803>, July 10, 2023.
- 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.
- Abrishamkesh, S., M. Gorjil, H. Asad, G.H. Bagheri-Marandi and A.A. Pourbabae. 2015. Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth. **Plant Soil Environ.** 61 (11): 475 - 482.

- Ahmad, M., A.U. Rajapaksha, J.E. Lim, M. Zhang, N. Bolan, D. Mohan, M. Vithanage, S.S. Lee and Y.S. Ok. 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water. **Chemosphere**. 99: 19 - 33.
- 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. **J. Plant Nutr. Soil Sc.** 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. **J. Plant Nutr. Soil Sc.** 177 (5): 671 - 680.
- Angers, D. and S. Recous. 1997. Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size. **Plant Soil**. 189: 197 - 203.
- Asadi, H., G. Mohammad, R.R. Mehran, A. Sepideh, A. Elnaz, C. Chen and G. Manouchehr. 2021. **Application of rice husk biochar for achieving sustainable agriculture and environment**. Available Source: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1672630821000433?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8b293e5389932705, August 13, 2024.
- 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.
- Asia Pacific Biochar Market. 2023. **Asia pacific biochar market report**. Available Source: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/asia-pacific-bio-char-market-report#>, August 14, 2024.
- Asli, T.T., G. Duman, S. Ucar and L. Yanik. 2016. Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potential applications of biochar. **J. Anal. Appl. Pyrol.** 120: 200 - 206.
- Atkinson, C.J., J.D. Fitzgerald and N.A. Hipps. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils. **Plant Soil**. 337: 1 - 18.
- Bach, Q.V. and Q. Skreiberg. 2016. Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: a review and comparison with dry torrefaction. **Renew. Sustain. Energy Rev.** 54: 665 - 677.

- 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, pp. 363 - 382. *In* Klute, A., Ed., Methods of soil analysis, part 1 - physical and mineralogical methods, 2nd eds. **Agronomy monograph 9.** Science society of America, Madison, WI. USA.
- Brady, N.C. and R.R. Weil. 2010. **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, eds. **Comprehensive renewable energy.** Elsevier, Oxford.
- Burnette, R. 2013. **Charcoal production in 200 - liter horizontal drum kilns.** Available Source: <https://www.echocommunity.org/en/resources/069529b4-0ce4-475c-99b8-326957e3afa7>, April 20, 2023.
- 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. **Anim. Feed Sci. Tech.** 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. **Int. Biodeter. Biodegr.** 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 temperature on nutrient retention and leaching. **Arch. Agron. Soil Sci.** 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. **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. **Environ. Sci. Technol.** 38 (17): 4649 - 4655.
- Cornelissen, G., N.L. Nurida, S.E. Hale, V. Martinsen, L. Silvani and J. Mulder. 2018. Fading positive effect of biochar on crop yield and soil acidity during five growth seasons in an Indonesian Ultisol. **Sci. Total Environ.** 634: 561 - 568.
- 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. **Pesqui. Agropecu. Bras.** 47 (5): 637 - 648.
- Crane-Droesch, A., S. Abiven, S. Jeffery and M.S. Torn. 2013. Heterogeneous global crop yield response to biochar: a meta - regression analysis. **Environ. Res. Lett.** 8 (4): 044049.
- 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 Poll.** 213: 47 - 55.
- Dong, X., T. Guan, G. Li, Q. Lin and X. Zhao. 2016. Long - term effects of biochar amount on the content and composition of organic matter in soil aggregates under field conditions. **J. Soils Sediments.** 16: 1481 - 1497.
- El-Naggar, A., R. Zhou, R. Tangm, J. Hur, Y. Cai and S.X. Chang. 2022. **Rice husk and its biochar have contrasting effects on water - soluble organic matter and the microbial community in a bamboo forest soil.** Available Source: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/12/2265>, August 25, 2024.

- Emilce, V., F. Sineriz and M.E. Iucca. 2009. **Biofertilizer production bioprocess using vinasse and cheese whey in the media composition.** Available Source: https://www.conicet.gov.ar/new_scp/detalle.php?keywords=&id=05436&inst=yes&congresos=yes&detalles=yes&congr_id=910113, April 11, 2023.
- European Biochar Foundation. 2012. **The European biochar certificate guidelines.** Available Source: <http://www.european-biochar.org/en/download>, August 14, 2024.
- Feng, Z., Z. Fan, H. Song, K. Li, H. Lu, Y. Liu and F. Cheng. 2021. Biochar induced changes of soil dissolved organic matter: The release and adsorption of dissolved organic matter by biochar and soil. **Sci. Total Environ.** 783: 147091
- 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. **T. ASABE.** 51 (6): 2061 - 2069.
- Gaudy, F.A. and E.T. Gaudy. 1980. pH and microbial growth, pp. 183. *In* Julienne, V. Brown and S. Wagley, eds. **Microbiology for environmental scientists and engineers.** McGraw-Hill, Inc.
- Gaur, A.C. 1990. Physiological functions of phosphate solubilizing micro - organisms, pp. 16 - 72. *In* A.C. Gaur, eds. **Phosphate solubilizing micro - organisms as biofertilizers.** Omega Scientific Publishers, New Delhi.
- Ghorbani, M. and E. Amirahmadi. 2018. Effect of rice husk biochar (RHB) on some of chemical properties of an acidic soil and the absorption of some nutrients. **J. Appl. Sci. Environ. Manage.** 22 (3): 313 - 317.
- Glaser, B., J. Lehmann and W. Zech. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal. **Biol. Fert. Soil.** 35 (4): 219 - 230.
- 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.
- Gomezzy, 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. **Int. J. Environ. Sci. and Te.** 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 Res.** 111: 81 - 84.
- Huang, M., L. Fan, L.G. Jiang, S.Y. Yang, Y.B. Zou and N. Uphoff. 2019. Continuous applications of biochar to rice: effects on grain yield and yield attributes. **J. Integr. Agric.** 18 (3): 563 - 570.
- 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.
- International Biochar Initiative. 2012. **Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil.** Available Source: <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>, August 1, 2024.
- _____. 2017. **Biochar.** Available Source: <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>, August 1, 2024.
- Jadhav, G.G., D.S. Salunkhe, D.P. Nerka and R.K. Bhadekar. 2010. Isolation and characterization of salt - tolerant nitrogen - fixing microorganisms from food. **J. Eur. Asia. Bio. Sci.** 4: 33 - 40.
- 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. **Environ. Res. Lett.** 12 (5): 053001.

- Jesus, C.M., M.A. Lourdes, P.V. Guadalupe and E.L.S. Paulina. 2004. *Burkholderia unamae* sp. nov., an N₂ - fixing rhizospheric and endophytic species. **J. Syst. Evol. Microbiol.** 54 (4): 1165 - 1172.
- Joseph, S., K.Y. Chan, I. Meszaros, A. Downie and L.V. Zwieten. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. **Aust. J. Soil Res.** 45: 132 - 140.
- Joseph, U.E., A.O. Toluwase, E.O. Kehinde, E.E. Omasan, A.Y. Tolulope, O.O. George, C. Zhao and W. Hongyan. 2019. Effect of biochar on soil structure and storage of soil organic carbon and nitrogen in the aggregate fractions of an Albic soil. **Arch. Agron. Soil Sci.** 66 (1): 1 - 12.
- Jimenez, A.M., R. Borja and A. Martin. 2003. Aerobic - anaerobic biodegradation of beet molasses alcoholic fermentation wastewater. **Process Biochem.** 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.
- Kai, H.K. 2021. **Increasing resilience and carbon storage through in forest biochar production.** Available Source: https://fireadaptednetwork.org/forest-biochar-production/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=forest-biochar-production, August 23, 2024.
- 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 CH₄ uptake and water holding capacity - results from a short - term pilot field study. **Agr. Ecosyst. Environ.** 140 (1 - 2): 309 - 313.
- Kato, H. and H. Tsuchida. 1981. Estimation of melanoidin structure by pyrolysis and oxidation. **Prob. Fd. Nutr. Sci.** 147 - 156.
- Katterer, T., D. Roobroeck, O. Andrén, G. Kimutai, E. Karlton, H. Kirchmann, G. Nyberg, B. Vanlauwe and K.R.D. Nowina. 2019. Biochar addition persistently increased soil fertility and yields in maize - soybean rotations over 10 years in sub - humid regions of Kenya. **Field Crop. Res.** 235: 18 - 26.
- Kirk, G. 2004. **The biogeochemistry of submerged soils.** West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.

- Kumar, T., A. Usmani, Z. Kumar and Z. Anshumail. 2017. Biochar and fly ash 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.** Available Source: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014EGUGA..16.9885H/abstract>, July 10, 2023.
- 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 technol.** 236: 155 - 163.
- Lehmann, J. 2007. Bio - energy in the black. **Front Ecol. Environ.** 5 (7): 381 - 387.
- _____, M.C. Rillig, J. Thies, C.A. Masiello, W.C. Hockaday and D. Crowley. 2011. Biochar effects on soil biota a review. **Soil Biol. Biochem.** 43 (9): 1812 - 1836.
- ____ and S. Joseph. 2009. An Introduction, pp. 1 - 9. In J. Lehmann and S. Joseph, eds., **Biochar for environmental management.** Routledge, London.
- Leaungvutiviroj, C., P. Ruangphisarn, P. Hansanimitkul, H. Shinkava and K. Sasaki. 2010. Development of a new biofertilizer with a high capacity for N₂ 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. **Sci. Total. Environ.** 837: 155563
- 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.

- Maftuah, E., M. Saleh and E. Pratiwi. 2020. **The potentials of biochar from agricultural waste as a carrier material of biofertilizer for swamplands.** Available Source: <https://www.sciencedirect.com/journal/materials-science-and-engineering>, July 10, 2023.
- 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.
- Manikandan, S.K. and V. Nair. 2023. **Developing a biocatalyst showcasing the synergistic effect of rice husk biochar and bacterial cells for the removal of heavy metals.** Available Source: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/nj/d3nj02889e/unauth>, August 25, 2024.
- Mankasingh, U., P.C. Choi and V. Ragnarsdottir. 2011. Biochar application in a tropical, agricultural region: a plot scale study in Tamil Nadu, India. **Appl. Geochem.** 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. **J. Agr. Sci.** 2 (1): 39 - 47.
- Mia, S., F.A. Dijkstra and B. Singh. 2017. Long - term aging of biochar: A molecular understanding with agricultural and environmental implications. **Adv. Agron.** 141: 1 - 51.
- Mehnaz, M., M.K. Uddin, S. Mia, M.F. Sulaiman, S.M. Shamsuzzaman and A.N.A. Haque. 2022. **Influence of rice husk biochar and lime in reducing phosphorus application rate in acid soil: a field trial with maize.** Available Source: https://www.researchgate.net/publication/358367625_Influence_of_Rice_Husk_Biochar_and_Lime_in_Reducing_Phosphorus_Application_Rate_in_Acid_Soil_A_Field_Trial_with_Maize, August 24, 2024.
- 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. **J. Biosci. Bioeng.** 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.
- Oka, H., S. Idthipong and W. Rungrattanakasin. 1993. Improvement of the sandy soil in Northeast Thailand by using carbonized rice husk. *In* **Workshop on technology development for sustainable agriculture and environment in the northeast**, Jan 13 - 15, 1993, Khon Kaen, Thailand.
- Oladele, S.O. 2019. Changes in physicochemical properties and quality index of an Alfisol after three years of rice husk biochar amendment in rainfed rice - maize cropping sequence. **Geoderma.** 353: 359 - 371.
- 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 improve faba bean yield under dripping irrigation system, pp. 137: 1 - 7. *In* **Proceedings of the 17th WCSS**. August 14 - 21, 2002, Thailand.
- 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. **Appl. Energ.** 93 (1): 648 - 654.
- Paturaul, J.M. 1989. **By - products of the cane sugar industry: An introduction to their industrial utilization**. Elsevier Publishing Company.
- Pimchuai, A., A. Dutta and P. Basu. 2010. Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. **Energ. Fuel.** 24: 4638 - 4645.
- Purevsuren, B., B. Avid, B. Tesche and Y.A. Davaajav. 2003. A biochar from casein and its properties. **J. Mater. Sci.** 38: 2347 - 2351.
- Qian, L., B. Chen and D. Hu. 2013. Effective alleviation of aluminium phytotoxicity by manure - derived biochar. **Environ. Sci Technol.** 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: Intech Open.
- 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 sci.** 177 (10): 573 - 579.
- Saranya, K., K. Kumutha and P.S. Krishnan. 2011. Influence of biochar and *Azospirillum* application on the growth of maize. **Madras Agric. J.** 98: 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.
- Schweikle, J., W. Spreer, K. Intani, D.S. Shafer, P. Tiyayon, S. Saehang, C. Santasup, K. Sringarm, W. Wiriya and J. Muller. 2015. **Infield biochar production from crop residues: An approach to reduce open field burning in northern Thailand**. Tropentag conference, September 16 - 18, 2015 in Berlin, Germany.
- Schwilch, G., B. Brandon, B. Sally and C. William. 2011. Experiences in monitoring and assessment of sustainable land management. **Land Degrad. Dev.** 22 (2): 214 - 225.
- Seesawhea, Y., P. Saenphoom, P. Chaokaur, S. Chimtong, S. Prajukboonjatsada and S. Bureenok. 2017. **Nutritional improvement of corn peel silage using fermented juice from epiphytic lactic bacteria (FJLB), nutrients digestibility and growth**. Available Source: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/VESTSU>, August 24, 2024.
- Sheng, M.H., X.Y. Ai, B.C. Huang, M.K. Zhu, Z.Y. Liu and Y.W. Ai. 2023. **Effects of biochar additions on the mechanical stability of soil aggregates and their role in the dynamic renewal of aggregates in slope ecological restoration**. Available Source: 165478<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969723041013>, November 10, 2023.

- Shenbagavalli, S. and S. Mahimairaja. 2012. **Production and characterization of biochar from different biological wastes**. Available Source: https://www.researchgate.net/publication/264890070_Production_and_characterization_of_biochar_from_different_biological_wastes, August 24, 2024.
- 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. **J. Soil. Sediment.** 17 (8): 2116 - 2126.
- Shi, 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. **Environ. Sci. Pollut. R.** 25 (10): 9662 - 9672.
- Singh, M.M., G. Singh, B.P. Singh, B.S. Sekhon, O.P. Choudhary, S. Sagi and R. Berry. 2018. Interactive effects of rice - residue biochar and N - fertilizer on soil functions and crop biomass in contrasting soils. **J. Soil Sci. Plant Nutr.** 18 (1): 41 - 59.
- Sohi, S.P., E. Krull, E. Lopez-Capel and R. Bol. 2010. Chapter 2 - a review of biochar and its use and function in soil. **Adv. Agro.** 105: 47 - 82.
- 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.
- Stevenson, F.J. and E.T. Elliott. 1989. Methodologies for assessing the quantity and quality of soil organic matter, pp. 173 - 242. *In* Coleman D.C., J.M. Oades and 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.
- 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.

- Thies, J.E. and M. Rillig. 2009. Characteristics of biochar: Biological properties, pp. 85 - 105. *In* Lehmann, J. and Joseph S., eds. **Biochar for environmental management: Science and technology**, London.
- Tiyayon, P., W. Spreer, N. Wuttisathitthaworn, K. Lammawut, S. Karaj, K. Inthani, K. Sringarm, C. Santasup and J. Muller. 2011. Analysis of biochar from different kinds of feedstock and varying pyrolysis temperature II: Analysis of Biochar from a Local Kiln. **J. Agriculture**. 32: 55 - 61.
- Tomczyk, A., Z. Sokołowska and P. Boguta. 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Environ. Sci. Technol.** 19: 191 - 215.
- Tortora, G.J., B.R. Funke and C.L. Case. 1995. Microbial growth, pp. 142 - 145. *In* A. Scanlan-Rohrer eds. **Microbiology an introduction fifth edition**, The Benjamin Cummings, Inc.
- Tumuluru, J.S., S. Sokhansanj, J.R. Hess, C.T. Wright and R.D. Boardman. 2011. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. **Ind. Biotechnol.** 7 (5): 384 - 401.
- Uvarov, A.V. 2000. Effects of smoke emissions from a charcoal kiln on the functioning of forest soil systems: a microcosm study. **Environ. Monit. Assess.** 60 (3): 337 - 357.
- Varela, M.O., E.B. Rivera, W.J. Huang, C. Chien and Y.M. Wang. 2013. Agronomic properties and characterization of rice husk and wood biochar and their effect on the growth of water spinach in a field test. **J. Soil Sci. Plant Nutr.** 13 (2): 251 - 266.
- Vasilieva, S., E. Lobakova, T. Grigoriev, I. Selyakh, L. Semenova, O. Chivkunova, P. Gotovtsev, C. Antipova, Y. Zagoskin, P. Scherbakov, A. Lukyanov, K. Lukanina and 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.V.D. Velde and I. Diafas. 2010. **Biochar application to soils**. European Commission, Luxembourg.

- Verheijen, F.G.A., S. Jeffery, A.C. Bastos, M.V.D. Velde and I. Dias. 2009. **Biochar application to soils a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions**. European Communities, Luxembourg.
- 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. **Sci. Total Environ.** 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., H. Treichel and M.P. Shah, eds. **Biochar and its application in bioremediation**, Singapore.
- Wang, Y., R. Yin and R. Liu. 2014. Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil. **J. Anal. Appl. Pyrol.** 110: 375 - 381.
- Wangdi, K., N. Khongdee, S. Intanon, U. Samaksaman, W. Spreer, S. Kiravittaya and W. Pansak. 2023. Characterization of rice husk biochar and its particle size effects on soil properties in sandy loam soil. **GMSARN International J.** 17: 389 - 395.
- Weaver, R.W. and S.K.A. Danso. 1994. Dinitrogen fixation, pp. 1019 - 1043. *In* Weaver, R.W., J.S. Angle and P.S. Bottomley, eds. **Methods of soil analysis. Part 2: Microbiological and biochemical properties**. Soil science society of America, Inc, Madison, Wisconsin.
- Weber, K. and P. Quicker. 2018. Properties of biochar. **Fuel.** 217: 240 - 261.
- Wijitkosum, S. 2020. Applying rice husk biochar to revitalize saline sodic soil in Khorat Plateau area - a case study for food security purposes. *In* Singh, J.S. and C. Singh, eds. **Biochar applications in agriculture and environment management**, Switzerland.
- World Biochar Certificate. 2023. **World biochar certificate - guidelines for a sustainable production of biochar and its certification**. Carbon Standards International, Switzerland.
- 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. **J. Soil. Sediment.** 12 (4): 494 - 502.
- Xu, R., L. Ferrante, K. Hall, C. Briens and F. Berruti. 2011. Thermal self - sustainability of biochar production by pyrolysis. **J. Anal. Appl. Pyrol.** 91 (1): 55 - 66.
- 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.
- Yamato, M., Y. Okimori, I.F. Wibowo, S. Anshori and M. Ogawa. 2006. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia. **Soil Sci. Plant Nutr.** 52: 489 - 495.
- 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.
- Yang, C., S. Dou, O.D. Guo and H. Zhao. 2024a. The application of biochar enhances soil organic carbon and rice yields. **Agron. J.** 14 (3): 455.
- Yang, W., Z. Wang, H. Zhao, D. Li, H. Jia and W. Xu. 2024b. Biochar application influences the stability of soil aggregates and wheat yields. **Plant Soil Environ.** 20 (3): 125 - 141.
- 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. **Chemosphere.** 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 Ultisols. **Soil Use Manag.** 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.

- Zhao, X., J.W. Wang, S.Q. Wang and G.X. Xing. 2014. Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: A pot experiment with two rice/wheat rotations in paddy soil. **Plant Soil**. 378: 279 - 294.
- Zheng, W., B.K. Sharma and N. Rajagopalan. 2010. **Using biochar as a soil amendment for sustainable agriculture**. Available Source: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2111479>, April 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. **Environ. Pollut.** 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.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางผนวกที่ 1 ค่าเกณฑ์กำหนดที่สำคัญของไบโอชาร์

ค่าเกณฑ์	เกณฑ์คุณภาพสูง	เกณฑ์เกษตร	เกณฑ์วัสดุ
ธาตุองค์ประกอบ	Ctot Corg H N O S ash	ไม่กำหนด	
	H/C org	< 0.4	< 0.7
สมบัติ	ขนาดอนุภาค วัตถุแข็ง ค่าความหนาแน่นรวม ความสามารถอุ้มน้ำ ความเป็นกรดเป็นด่าง ค่าการนำไฟฟ้า	< 3 มิลลิเมตร	< 3 มิลลิเมตร ไม่กำหนด
TGA	350 - 1,000 องศาเซลเซียส		
ธาตุอาหาร	N P K Mg Ca Fe	ไม่กำหนด ไม่กำหนด	
โลหะหนัก	Pb Cd Cu Ni Hg Zn Cr As	120 กรัมต่อตัน 1.5 กรัมต่อตัน 140 กรัมต่อตัน 50 กรัมต่อตัน 1 กรัมต่อตัน 420 กรัมต่อตัน 100 กรัมต่อตัน 13 กรัมต่อตัน	300 กรัมต่อตัน 5 กรัมต่อตัน 200 กรัมต่อตัน 100 กรัมต่อตัน 2 กรัมต่อตัน 1,000 กรัมต่อตัน 200 กรัมต่อตัน 20 กรัมต่อตัน
สารปนเปื้อนอินทรีย์	PAH 8 EFSA PAH PCB PCDD/F	6 กรัมต่อตันมวลแห้ง 1 กรัมต่อตันมวลแห้ง PCB : 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม PCDD/F : 20 นาโนกรัมต่อกิโลกรัม	- 1 กรัมต่อ ตันมวลแห้ง 4 กรัมต่อ ตันมวลแห้ง

ที่มา: World Biochar Certificate (2023)

ตารางผนวกที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวแต่ละตำรับการทดลอง

ตำรับการทดลอง	องค์ประกอบทางเคมี					
	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	pH
1 = น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์	0.004	0.0005	0.015	0.0055	0.0025	6.17
2 = กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	0.036	0.004	0.031	-	-	6.16
3 = น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์	0.008	0.001	0.030	0.011	0.005	
กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	0.036	0.004	0.031	-	-	
รวม	0.044	0.005	0.061	0.011	0.005	5.84
4 = น้ำกากส่า 20 เปอร์เซ็นต์	0.016	0.002	0.060	0.022	0.010	
กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	0.036	0.004	0.031	-	-	
รวม	0.052	0.006	0.091	0.022	0.010	5.80
5 = น้ำกากส่า 30 เปอร์เซ็นต์	0.024	0.003	0.090	0.033	0.015	
กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	0.036	0.004	0.031	-	-	
รวม	0.060	0.007	0.121	0.033	0.015	5.50
6 = น้ำกากส่า 40 เปอร์เซ็นต์	0.032	0.004	0.120	0.044	0.020	
กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	0.036	0.004	0.031	-	-	
รวม	0.068	0.008	0.151	0.044	0.020	5.21
7 = น้ำกากส่า 50 เปอร์เซ็นต์	0.040	0.005	0.150	0.055	0.025	
กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	0.036	0.004	0.031	-	-	
รวม	0.076	0.009	0.181	0.055	0.025	5.17
8 = น้ำกากส่า 95 เปอร์เซ็นต์	0.080	0.010	0.300	0.110	0.050	
กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์	0.036	0.004	0.031	-	-	
รวม	0.116	0.014	0.331	0.110	0.050	4.95

ตารางผนวกที่ 3 ปริมาณแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12

ชนิดแบคทีเรีย	ปริมาณแบคทีเรีย (log CFU ต่อกรัม)
	ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12
แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ	7.792
แบคทีเรียละลายฟอสเฟต	8.982
แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม	8.897
แบคทีเรียสร้างฮอร์โมน	7.944

ตารางผนวกที่ 4 การประเมินค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้ารอบที่ 1

รายการค่าใช้จ่าย	ตำรับการทดลอง						
	1	2	3	4	5	6	7
1. ค่าแรงงาน (บาทต่อไร่)							
- ไถดะ/แปร/ซักร่อง	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
- คลุมฟางและปลูก	500	500	500	500	500	500	500
- ใส่ปุ๋ยเคมี	-	140	140	140	140	140	140
- ใส่ไบโอชาร์	-	-	-	-	600	600	600
- ใส่ปุ๋ยหมัก	-	-	300	-	-	-	-
- กำจัดวัชพืช	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
- เก็บเกี่ยว	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2. ค่าวัสดุ (บาทต่อไร่)							
- ปุ๋ยเคมีสูตร 46 - 0 - 0	-	435.6	326.7	326.7	326.7	326.7	326.7
- ปุ๋ยเคมีสูตร 18 - 46 - 0	-	184.8	138.6	138.6	138.6	138.6	138.6
- ปุ๋ยเคมีสูตร 60 - 0 - 0	-	99.2	74.4	74.4	74.4	74.4	74.4
- เมล็ดพันธุ์คะน้า	560	560	560	560	560	560	560
- ปุ๋ยหมัก	-	-	750	-	-	-	-
- กากน้ำตาล	-	-	-	150	-	-	-
- ไบโอชาร์	-	-	-	-	10,000	15,000	20,000
รวมต้นทุน (บาทต่อไร่)	5,060.0	5,919.6	6,789.7	5,889.7	16,339.7	21,339.7	26,339.7
ผลผลิต (กิโลกรัมต่อไร่)	1,008	5,440	4,448	4,720	4,528	5,072	4,416
ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)	20	20	20	20	20	20	20
มูลค่าผลผลิต (บาท)	20,160	108,800	88,960	94,400	90,560	101,440	88,320
รายได้สุทธิ (บาทต่อไร่)	15,100	102,880.4	82,170.3	88,510.3	74,220.3	80,100.3	61,980.3
	e	a	bc	b	cd	bc	d
F-test				**			
CV (%)				11.01			

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสตมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยการใช้ DMRT

****** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซนต์
ค่าแรง 300 บาทต่อคนต่อวัน

ราคาปุ๋ยเคมีสูตร 46 - 0 - 0 เท่ากับ 9.90 บาทต่อกิโลกรัม (ใช้ 44 กิโลกรัมต่อไร่)

ราคาปุ๋ยเคมีสูตร 18 - 46 - 0 เท่ากับ 16.80 บาทต่อกิโลกรัม (ใช้ 11 กิโลกรัมต่อไร่)

ราคาปุ๋ยเคมีสูตร 60 - 0 - 0 เท่ากับ 12.40 บาทต่อกิโลกรัม (ใช้ 8 กิโลกรัมต่อไร่)

ราคาปุ๋ยหมัก กิโลกรัมละ 2.50 บาท

ราคากากน้ำตาล ลิตรละ 10 บาท

ราคาผลผลิตค่น้ำ กิโลกรัมละ 20 บาท

ราคาไบโอชาร์แกลบ กิโลกรัมละ 10 บาท

ดำรับการทดลองที่ 1 ไม่ใส่ปุ๋ย (control)

ดำรับการทดลองที่ 2 ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน

ดำรับการทดลองที่ 3 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 4 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 5 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 6 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 7 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +

ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
โดยการใช้ DMRT

****** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซนต์
ค่าแรง 300 บาทต่อคนต่อวัน

ราคาปุ๋ยเคมีสูตร 46 - 0 - 0 เท่ากับ 9.90 บาทต่อกิโลกรัม (ใช้ 44 กิโลกรัมต่อไร่)

ราคาปุ๋ยเคมีสูตร 18 - 46 - 0 เท่ากับ 16.80 บาทต่อกิโลกรัม (ใช้ 11 กิโลกรัมต่อไร่)

ราคาปุ๋ยเคมีสูตร 60 - 0 - 0 เท่ากับ 12.40 บาทต่อกิโลกรัม (ใช้ 8 กิโลกรัมต่อไร่)

ราคาปุ๋ยหมัก กิโลกรัมละ 2.50 บาท

ราคากากน้ำตาล ลิตรละ 10 บาท

ราคาผลผลิตค่น้ำ กิโลกรัมละ 20 บาท

ดำรับการทดลองที่ 1 ไม่ใส่ปุ๋ย (control)

ดำรับการทดลองที่ 2 ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน

ดำรับการทดลองที่ 3 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +
ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 4 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +
ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 5 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +
ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 6 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +
ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่

ดำรับการทดลองที่ 7 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซนต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน +
ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่

ภาคผนวก ข

1. สูตรอาหาร Burk's N - free medium

Sucrose	20.00	กรัม
K ₂ HPO ₄	0.05	กรัม
KH ₂ PO ₄	0.15	กรัม
CaCl ₂ · 2H ₂ O	0.01	กรัม
MgSO ₄ · 7H ₂ O	0.20	กรัม
Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	0.002	กรัม
FeCl ₃	0.01	กรัม
CaCO ₃	1.00	กรัม
Agar	15.00	กรัม
น้ำกลั่น	1.00	ลิตร

2. สูตรอาหาร Pikovskaya's agar medium

Glucose	10.00	กรัม
Ca ₃ (PO ₄) ₂	5.00	กรัม
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.50	กรัม
NaCl	0.20	กรัม
MgSO ₄ · 7H ₂ O	0.10	กรัม
KCl	0.20	กรัม
Yeast extract	0.50	กรัม
MnSO ₄ · 7H ₂ O	0.001	มิลลิกรัม
FeSO ₄ · 7H ₂ O	0.001	มิลลิกรัม
Agar	15.00	กรัม
น้ำกลั่น	1.00	ลิตร

3. สูตรอาหาร Sucrose minimal salts agar medium

Sucrose	5.00	กรัม
Yeast extract	0.50	กรัม
MgSO ₄ · 7H ₂ O	0.50	กรัม
CaCO ₃	0.10	กรัม
Na ₂ HPO ₄	2.00	กรัม
FeCl ₃	0.005	กรัม
KH ₂ PO ₄	2.00	กรัม
Agar	15.00	มิลลิกรัม
Bromothymol blue	5.00	มิลลิกรัม
Solution (1%)		
น้ำกลั่น	1.00	ลิตร

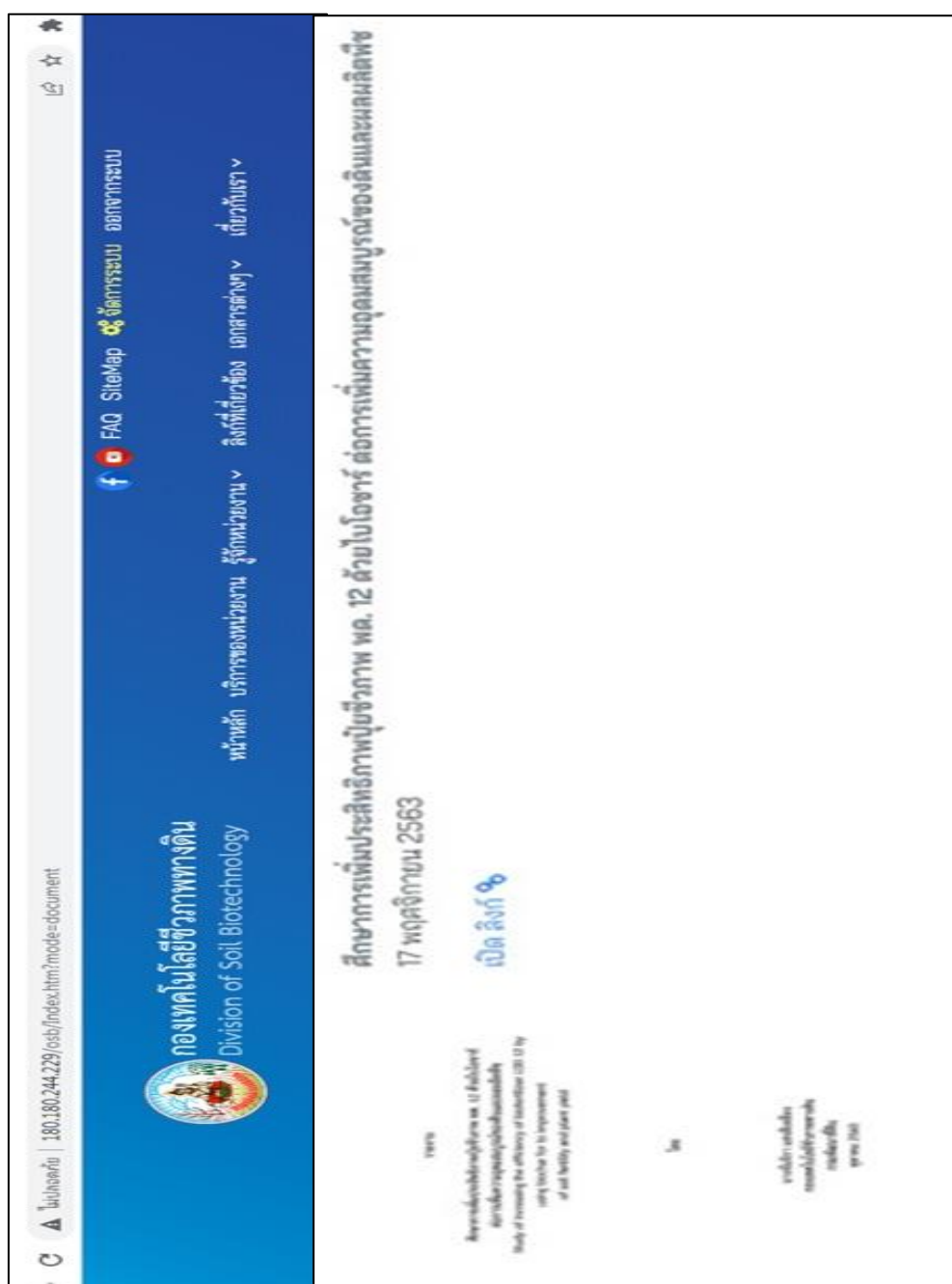
4. สูตรอาหาร Glucose peptone agar

Glucose	20.00	กรัม
Peptone	10.00	กรัม
KCl	5.00	กรัม
Agar	15.00	กรัม
น้ำกลั่น	1.00	ลิตร

ภาคผนวก ค

1. การจัดทำเอกสารเผยแพร่หน้าเว็บไซต์หน่วยงาน ได้แก่ เว็บไซต์กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
กรมพัฒนาที่ดิน

แหล่งเผยแพร่: <http://180.180.244.229/osb/Index.htm?mode=document>



2. การนำเสนอผลงานในการอบรมเชิงปฏิบัติการเจ้าหน้าที่ โครงการศึกษาการจัดการดิน ปุ๋ย และน้ำ อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อแก้ปัญหาภัยแล้งและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับเจ้าหน้าที่ของ กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ จำนวน 40 คน หัวข้อบรรยาย การศึกษาวิจัยการใช้ ถ่านชีวภาพเพื่อการปรับปรุงดิน เมื่อวันที่ 29 มีนาคม 2564 ณ โรงแรมอาปinya เฮาส์ กรุงเทพมหานคร



บันทึกข้อความ

กรมพัฒนาที่ดิน	
เลขที่	ก ๑๕๐
วันที่	๒๕ มี.ค. ๒๕๖๔
เวลา	๑๓.๐๐ น.

ส่วนราชการ กรมส่งเสริมการเกษตร กองส่งเสริมการอารักขาพืชและจัดการดินปุ๋ย โทร. ๐ ๒๕๕๕ ๑๕๑๕
 ที่ กษ ๑๐๑๐/ก ๕๕๐ วันที่ ๒๕ มีนาคม ๒๕๖๔ กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
 เรื่อง ขอเชิญเป็นวิทยากร เลขที่ ๕๖๔
 เรียน อธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน วันที่ 24/3/64 เวลา 10.00 น.

ด้วยกรมส่งเสริมการเกษตร มีกำหนดการอบรมเชิงปฏิบัติการเจ้าหน้าที่โครงการศึกษาการจัดการดิน ปุ๋ย และน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อแก้ปัญหาภัยแล้งและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระหว่างวันที่ ๒๕ - ๓๑ มีนาคม ๒๕๖๔ ณ โรงแรมอาปinya เฮาส์ กรุงเทพมหานคร โดยมีผู้เข้าร่วมประกอบด้วย เจ้าหน้าที่จาก สำนักงานเกษตรจังหวัด สำนักงานเกษตรอำเภอ เจ้าหน้าที่จากส่วนกลาง วิทยากรและผู้จัด จำนวน ๔๐ คน

กรมส่งเสริมการเกษตรพิจารณาแล้ว เพื่อให้เกิดประโยชน์และบรรลุวัตถุประสงค์ของการอบรมฯ จึงขอเชิญ

๑. นางจันจิรา แสงสีเหลือง ผู้อำนวยการกลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพจุลินทรีย์ จัดการมลพิษทางดินและน้ำ กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน

๒. นางกุลวดี สุทธาวาส ผู้เชี่ยวชาญด้านวางระบบพัฒนาที่ดิน สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต ๑๐ เป็นวิทยากรบรรยายในหัวข้อ เรื่อง การศึกษาวิจัยการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อการปรับปรุงดิน ในวันที่ ๒๕ มีนาคม ๒๕๖๔ เวลา ๑๕.๓๐ - ๑๗.๐๐ น. ณ โรงแรมอาปinya เฮาส์ กรุงเทพมหานคร โดยขอให้ส่งแบบตอบรับและข้อมูลวิทยากร ทาง E-mail: soil_fer57@hotmail.com ภายในวันที่ ๒๕ มีนาคม ๒๕๖๔ รายละเอียดตามเอกสารที่แนบมาพร้อมนี้

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา และแจ้งผู้เกี่ยวข้องเป็นวิทยากรบรรยายตามวัน เวลา และสถานที่ดังกล่าว จะขอบคุณมาก

(นายพีทัศน์ อุ่นจิตตพันธ์)

ผู้อำนวยการกองส่งเสริมการอารักขาพืชและจัดการดินปุ๋ย
 ปฏิบัติราชการแทนอธิบดีกรมส่งเสริมการเกษตร

**การอบรมเชิงปฏิบัติการเจ้าหน้าที่
โครงการศึกษาการจัดการดิน ปุ๋ย และน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ
เพื่อแก้ปัญหาภัยแล้งและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
ณ โรงแรมเอปี่น่า เฮาส์ กรุงเทพมหานคร
ระหว่างวันที่ ๒๙ - ๓๑ มีนาคม ๒๕๖๔**

วันที่ ๒๙ มีนาคม ๒๕๖๔

๐๘.๐๐ - ๐๘.๓๐ น.	ลงทะเบียน
๐๘.๓๐ - ๑๐.๐๐ น.	บรรยาย มหัทศจรย์ด้านชีวภาพ โดย อาจารย์เกศศิริพันธ์ แสงมณี สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
๑๐.๐๐ - ๑๐.๓๐ น.	พักรับประทานอาหารว่าง
๑๐.๓๐ - ๑๑.๓๐ น.	บรรยาย การใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ โดย นายพิรพงษ์ เขาวนพงษ์ หัวหน้ากลุ่มงานวิจัยปุ๋ยและสารปรับปรุงดิน กรมวิชาการเกษตร
๑๑.๓๐ - ๑๒.๐๐ น.	ชี้แจงโครงการศึกษาการจัดการดิน ปุ๋ย และน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อแก้ปัญหาภัยแล้งและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และระเบียบวิจัย โดย นางชญัญญา ทิพานุกะ ผู้อำนวยการกลุ่มส่งเสริมการจัดการดินปุ๋ย และคณะ
๑๒.๐๐ - ๑๓.๐๐ น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน
๑๓.๐๐ - ๑๔.๓๐ น.	บรรยาย เทคโนโลยีการออกแบบสร้างเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพ โดย ผศ.ดร.สุรัชย์ สนิทใจ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
๑๔.๓๐ - ๑๕.๐๐ น.	พิธีเปิดการอบรมเชิงปฏิบัติการ โดย นายเข้มแข็ง ยุติธรรมดำรง อธิบดีกรมส่งเสริมการเกษตร
๑๕.๐๐ - ๑๕.๓๐ น.	พักรับประทานอาหารว่าง
๑๕.๓๐ - ๑๗.๐๐ น.	บรรยาย การศึกษาวิจัยการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อการปรับปรุงดิน โดย นางจันจิรา แสงสีเหลือง ผู้อำนวยการกลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพการจัดการมลพิษ ทางดินและน้ำ กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน และนางกุลวดี สุทธาวาส ผู้เชี่ยวชาญด้าน วางระบบการพัฒนาที่ดิน สำนักงานพัฒนาที่ดิน เขต ๑๐ กรมพัฒนาที่ดิน

วันที่ ๓๐ มีนาคม ๒๕๖๔

๐๘.๓๐ - ๑๐.๐๐ น.	บรรยาย ถ่านชีวภาพเพื่อความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน โดย รศ.ดร.อรสา สุกสวาท มูลนิธิบีบีซี เอ็นเอฟไอฟี
๑๐.๐๐ - ๑๐.๓๐ น.	พักรับประทานอาหารว่าง
๑๐.๓๐ - ๑๒.๐๐ น.	บรรยาย การใช้เทคโนโลยีออกแบบสร้างเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพใช้งานอย่างเหมาะสมในชุมชน โดย ดร.พันธุ์ศักดิ์ โกเมศ ผู้ทรงคุณวุฒิในคณะกรรมการบริหารศูนย์เทคโนโลยีการเกษตร และนวัตกรรม (AIC) จังหวัดชลบุรี
๑๒.๐๐ - ๑๓.๐๐ น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน
๑๓.๐๐ - ๑๔.๐๐ น.	บรรยาย การพัฒนาระบบน้ำส้มควันไม้จากผลพลอยได้การผลิตถ่านชีวภาพ โดย อาจารย์เทอดเกียรติ แก้วพวง มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สระแก้ว
๑๔.๐๐ - ๑๔.๔๕ น.	บรรยาย การส่งเสริมการผลิตและใช้ถ่านชีวภาพในพื้นที่จังหวัดสระแก้ว โดย นายประสาน สุขสุทธิ สำนักงานเกษตรจังหวัดสระแก้ว
๑๔.๔๕ - ๑๕.๐๐ น.	พักรับประทานอาหารว่าง
๑๕.๐๐ - ๑๕.๔๕ น.	บรรยาย การส่งเสริมการผลิตและใช้ถ่านชีวภาพในพื้นที่จังหวัดนครพนม โดย ผู้แทนสำนักงานเกษตรจังหวัดนครพนม
๑๕.๔๕ - ๑๗.๐๐ น.	บรรยาย การจัดการวัสดุการเกษตรเพื่อผลิตถ่านชีวภาพและเชื้อเพลิงพลังงาน โดย นายรังสฤษฎ์ คุณชัยมั่ง ผู้อำนวยการมูลนิธิพัฒนาชุมชนผาปิง จังหวัดลำปาง

3. คู่มือ สารเร่งจุลินทรีย์เพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตทางการเกษตร ปี 2550



คณะผู้จัดทำ

นายรัชต์ชัย นายปิ่นศักดิ์ นายปรเมต นายอภิชาติ นางสาวเสียงแก้ว นางเบญจรัตน์	อธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน รองอธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน รองอธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน รองอธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน ผู้ตรวจงานด้านบำรุงดินและอินทรีย์วัตถุ ผู้อำนวยการสำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
---	--

คณะผู้จัดทำ

นางสาวฉวีวรรณ นางสาวนงนันทน์ นางรวงทอง นางสาวจุฑารัตน์ นางสาวจุฑา นายสุวิทย์ นางสาวพิมพ์นิดา นางสาวดารารัตน์ นางสาวมณฑะวี นางสาวจันทรา	เลขาธิการสำนัก ภคสา สงวนพร คำพิภพ นพรัตน์ รุ่งโรจน์ เรืองไพศาล โชดาก พิรุณ แสงสีทอง ปริญญ์
---	---

สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน

สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน

สอบถามข้อมูลเพิ่มเติมที่
ศูนย์ถ่ายทอดเทคโนโลยีการเกษตร
กรมพัฒนาที่ดิน โทร. 0-2579-0679
Email : osb_5@ddd.go.th

5. คู่มือ การจัดการอินทรีย์วัตถุ เพื่อปรับปรุงบำรุงดินและเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน ปี 2551



6. คู่มือ จุลินทรีย์สำหรับพืชปรับปรุงบำรุงดิน พด. 11 ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ปี 2551



คณะผู้จัดทำ

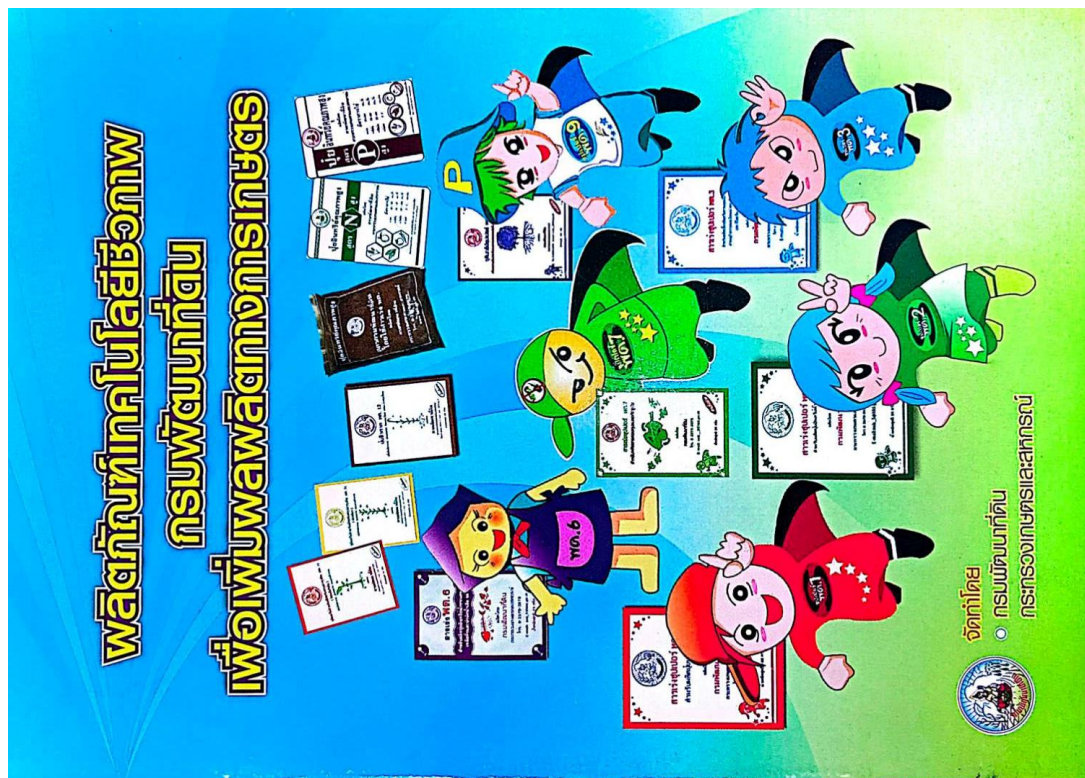
คณะที่ปรึกษา นายบัณฑิต นายฉลอง นายเกษม นายเกรียงศักดิ์ นางเบญจรัตน์	ดันศิริ เทพทักษกิจ ทองปาน หงษ์โต อนันต์พงษ์สุข	อธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน รองอธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน รองอธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน รองอธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน ผู้อำนวยการสำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
---	--	--

คณะผู้จัดทำ

นางสาวสุภาพร นางสาววิวรรณ นางรวงคณา นางสาวพิมพ์ธิดา นางสาววันจิรา นางสาวสิรินภา นางสาวพิกุล	จันทรุ่งเรือง เหลืองวุฒิโรจน์ สงวนพงษ์ เรืองไพศาล แสงสีเหลือง ชินอ่อน พรธนา นิมิตกุล	สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
---	--	--

สอบถามข้อมูลเพิ่มเติมที่ สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
 กรมพัฒนาที่ดิน โทร 0-2579-2875 E-mail : osb_8@dd.go.th

7. คู่มือ ผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีชีวภาพ กรมพัฒนาที่ดิน เพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร



คณะผู้จัดทำ

ที่ปรึกษา

นายเกรียงศักดิ์ หงษ์ไต่ อธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน
นางกุลรัศมี อนันต์พงษ์สุข รองอธิบดีกรมพัฒนาที่ดินด้านวิชาการ

คณะผู้ดำเนินการ

นางสาวฉวีวรรณ เทสียงศรีวิโรจน์
นางสาวสุภาพร จินรุ่งเรือง
นายโสฬส แซ่ลิ้ม
นางเนลลจันทร์ ะมา
นางพิภูล เกตุชาญวิทย์
นางสาวพิมพ์ริดา เรืองไพศาล
นายวุฒิชัย จันทรสมบัติ
นางสาวเบตระวี พันธ์วัชร
นางสาวพนิดา ปรับปรนโมทย์
นางจันจิรา แสงสีห์เสียง
นางสาวสิริมา ชินอ่อน
นางสาวกานูกา อยู่อุ่มพะเนา
นางเสาวลักษณ์ เมธีเรลล์
นางสาวดารารัตน์ โยธากา

สอบถามข้อมูลเพิ่มเติม

กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
โทร.0-2579-0679 E-mail: osb_8_1dd@hotmail.com

8. คู่มือ การจัดการอินทรีย์วัตถุ เพื่อปรับปรุงบำรุงดินและเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน ปี 2558



9. คู่มือ แนะนำการจัดการขยะ เพื่อส่งเสริมการใช้สารอินทรีย์ลดการใช้สารเคมี ปี 2561



คู่มือแนะนำการจัดการขยะ
เพื่อส่งเสริมการใช้สารอินทรีย์ลดการใช้สารเคมี

ที่ปรึกษา

นายสุรเดช เตียวตระกูล อธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน
นายเข้มแข็ง ยุติธรรมดำรง รองอธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน ด้านวิชาการ
นายปรเมธี ญาใจ รองอธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน ด้านปฏิบัติการ
นางสาวเบญจพร ภาครานนท์ รองอธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน ด้านบริหาร

คณะผู้จัดทำ

นางสาวสุภาพร จันทรุ่งเรือง ผู้อำนวยการกองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
นางนวลจุฬินทร์ ะบา นักวิชาการเกษตรชำนาญการพิเศษ
นายวุฒิชัย จันทรสัมบัติ นักวิชาการเกษตรชำนาญการ
นางสาวมนต์ระวี ธีราวัชร นักวิชาการเกษตรชำนาญการ
นางจันทิรา แสงสีเหลือง นักวิชาการเกษตรชำนาญการ
นางสาวภาณุภา อยู่อุ่มพะเนา นักวิชาการเกษตรชำนาญการ
นางสาวดารารัตน์ โชตาทัก้า นักวิชาการเกษตรชำนาญการ

ออกแบบภาพการ์ตูน

นางสาวดารารัตน์ โชตาทัก้า นักวิชาการเกษตรชำนาญการ

ติดต่อสอบถามข้อมูลเพิ่มเติม

กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ถนนพหลโยธิน
โทรศัพท์ 02-579-0679
โทรสาร 02-579-2875
<http://www.idd.go.th>

10. คู่มือ การใช้ผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีชีวภาพ กรมพัฒนาที่ดิน เพื่อส่งเสริมการใช้สารอินทรีย์ลดการใช้สารเคมี ปี 2562



11. คู่มือ การผลิตและการใช้สารบำบัดน้ำเสียขจัดกลิ่นเหม็น ชูปเปอร์ พด. 6 ปี 2566

ที่ปรึกษา

อธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน

รองอธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน ด้านวิชาการ

รองอธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน ด้านปฏิบัติการ

รองอธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน ด้านบริหาร

คณะผู้ดำเนินการ

นายอาทิตย์ ศุภเกษม	นายอรรถนพ พุทธโส
นางนวลจันทร์ ชะบา	นางจันทิรา แสงสีเหลือง
นางพิกุล เกตุชาวกิจภัย	นางสาวพิมพ์ธิดา เรืองไพศาล
นางสาวสุมาลี กลางสูง	นางมนต์ระวี มีแต้ม
นางสาวพนิดา ปรีเปรมโนภัย	นางสาวสิรินภา ชินอ่อน
นางสาวภาณุภา อยู่อุ่นพระเนา	นางสาวดารารัตน์ ไชตัก้า
นางสาวกนกวรรณ เชื้อพันธุ์	นายพิสิษฐ์ กิมยงค์
นางสาวกานต์ณัน จันทรังว	

ข้อมูลเพิ่มเติม

กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

โทร 0 2579 0679 FB: กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน

การผลิตและการใช้ สารบำบัดน้ำเสีย ขจัดกลิ่นเหม็น ชูปเปอร์ พด.6



จัดทำโดย : กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
พฤษภาคม 2566



12. คู่มือ Soil Biotechnology for Increasing crop Production in Thailand

Editorial Board

Ms. Supaporn Junrungreang
Director Office of soil Biotechnology

Ms. Chaveevan Leungvutiviroj

Ms. Nuanjun Pasda

Ms. Pimtida Ruangphisam

Ms. Monrwee Peerawatchara

Mr. Wuttichai Juntarasombut

Ms. Sirinapa Chin-on

Mrs. Junjira Sagseeleuang

Land Development Department

Mr. Solod Saelim

Ms. Jutharat Khumungkit

Ms. Pikul Hunsanimitkul

Ms. Panida Preepremnot

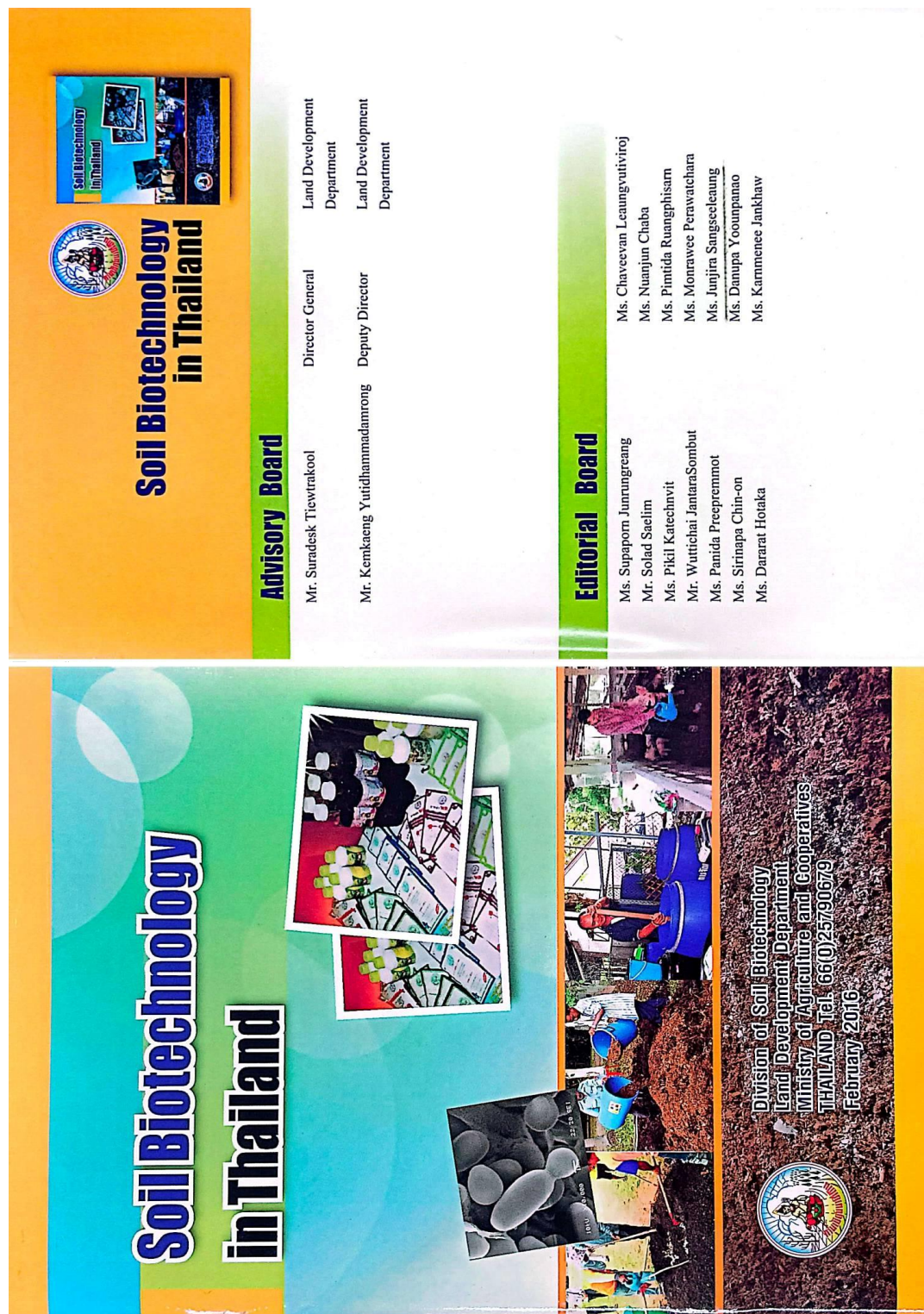
Ms. Saowaluck Wongthianlai

Ms. Danupa Yoonunpanao

Soil Biotechnology for Increasing crop Production in Thailand

Office of Soil Biotechnology
Land Development Department
Ministry of Agriculture and Cooperatives
THAILAND
Tel.66(0)-2579-0679
E-mail:osb_2@idd.go.th

13. คู่มือ Soil Biotechnology in Thailand ปี 2559



14. คู่มือ Organic Matter and Soil Biotechnology Management in Thailand ปี 2559

