

การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพในการปลูกข้าวในพื้นที่เกษตรกรรมดินเค็ม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Biochar Application for Rice Cultivation in Salt-affected Soils



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science

Inter-Department of Environmental Science

GRADUATE SCHOOL

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพในการปลูกข้าวในพื้นที่ เกษตรกรรมดินเค็ม
โดย	น.ส.สิรภัทร ประเสริฐสุข
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิวงศ์ ศรีบุรี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนุญ หนูจักร)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิวงศ์ ศรีบุรี)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.อนงนาฏ ศรีประโชติ)	

สิริภัทร ประเสริฐสุข : การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพในการปลูกข้าวในพื้นที่เกษตรกรรมดินเค็ม. (Biochar Application for Rice Cultivation in Salt-affected Soils) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม , อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.ทวิวงศ์ ศรีบุรี

จังหวัดนครราชสีมาเป็นพื้นที่วิกฤตดินเค็มของประเทศไทย โดยสาเหตุสำคัญของดินเค็มในพื้นที่เกิดจากสภาพทางธรณีวิทยา และมีแนวโน้มการแพร่กระจายพื้นที่ดินเค็มเพิ่มมากขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำเกษตรกรรม โดยทำให้การเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชลดลงอย่างมาก และบางพื้นที่ไม่สามารถเพาะปลูกได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งปรับปรุงดินเค็มด้วยถ่านชีวภาพกลบเพื่อให้สามารถเพาะปลูกข้าวได้ โดยทำการทดลองปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในดินเค็มโซดิกที่มี pH เท่ากับ 10.6 ปริมาณโซเดียมทั้งหมดเท่ากับ 0.83 % ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 68.6 dS/m และ SAR เท่ากับ 11,707 และจำกัดปัญหาการระเหยของเกลือจากน้ำใต้ดินขึ้นมาสู่ผิวดินโดยทำการปลูกข้าว ในวงบ่อซีเมนต์ปิดกั้นบ่อ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพกลบสามารถปรับปรุงดินเค็มโซดิกได้ โดยสามารถลดความเค็มของดินได้ภายในรอบการปลูกข้าว (120 วัน) ซึ่งพบว่า การนำไฟฟ้า ปริมาณโซเดียม และค่า SAR ของดินมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การใส่ถ่านชีวภาพยังช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ทั้งไนโตรเจน แคลเซียม และแมกนีเซียมได้ โดยเฉพาะการใส่ถ่านชีวภาพกลบในอัตรา 1.5 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ร่วมกับปุ๋ยคอกในอัตรา 1 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ (ตำรับการทดลองที่ 3) มีค่าการนำไฟฟ้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (13.33 dS/m) เช่นเดียวกับปริมาณโซเดียมทั้งหมด (0.18 %) และค่า SAR (4,602) ของดินในตำรับการทดลองที่ 3 ที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังให้ผลการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวที่ดีที่สุด ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อทำการปลูกข้าวรอบที่ 2 และรอบที่ 3 พบว่า ถ่านชีวภาพกลบสามารถปรับปรุงคุณภาพดินให้ดีขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ผลการศึกษายังพบว่า ตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพ ให้ผลผลิตของข้าวในรอบการปลูกข้าวที่ 3 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (202.77-492.77 กรัม) จากรอบการปลูกที่ 1 อีกด้วย ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ ให้ผลการเจริญเติบโตข้าวที่ดีในรอบการปลูกที่ 1 (15.55 กรัม) แต่ให้ผลการเจริญเติบโตต่ำที่สุดในรอบการปลูกที่ 3 (7.30 กรัม) ดังนั้น การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงสรุปได้ว่า การใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยคอกสามารถลดความเค็มในดินได้ดีกว่าการใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว โดยการใส่ถ่านชีวภาพกลบในอัตรา 1.5 และ 2 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ เป็นอัตราการใส่ถ่านชีวภาพที่เหมาะสมที่สุดในการปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในดินเค็มโซดิกในวงบ่อซีเมนต์ เนื่องจากสามารถปรับปรุงดินเค็มโซดิกให้มีสมบัติที่เหมาะสมแก่การเพาะปลูก ส่งผลให้การเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวดีที่สุด

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6087227220 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: Biochar, Saline soil, KDML105, Soil amendment

Sirapat Prasertsuk : Biochar Application for Rice Cultivation in Salt-affected Soils. Advisor:
Asst. Prof. Dr. Saowanee Wijitkosum Co-advisor: Assoc. Prof. Dr. Thavivongse Sriburi

Nakhon Ratchasima Province, Thailand is a critically saline area. The essential causes are the underlying geology, an increase in human activity, and the effects of climate change. Soil salinization significantly affects agriculture by reducing the growth and productivity of plants, resulting in uncultivated areas. This research aimed to improve saline soil quality using rice husk biochar (RHB) to enable rice cultivation. Jasmine rice variety KDML105 was planted in cement rings filled with saline sodic soil at pH 10.6, with a total sodium content of 0.83%, electrical conductivity of 68.6 dS/m, and SAR (Sodium Absorption Ratio) of 11,707. In addition, salt evaporation from groundwater to surface soil can be limited by cultivating rice in the bottom-covering cement ring. The results indicated that RHB could improve saline sodic soil quality by reducing soil salinity within the first crop of rice cultivation (120 days). This significantly decreases electrical conductivity, sodium content, and SAR value. Moreover, adding RHB also elevates the levels of available macronutrients (N, Ca, and Mg). In particular, the application of RHB at a rate of 1.5 kg/cement ring, together with manure at a rate of 1 kg/cement ring (Treatment 3) can significantly decrease electrical conductivity (13.33 dS/m) as well as total sodium content (0.18 %) and SAR value (4,602). Furthermore, rice growth and yield were highest in the application of Treatment 3. Besides, RHB was able to continuously improve soil quality during the second and third crops of rice cultivation. The results also found that the RHB-added treatments produced significantly higher rice yields in the third crop cycle than in the first (202.77-492.77 g), while treatment without RHB had higher rice growth in the first crop cycle (15.55 g) than in the third (7.30 g). Therefore, applying RHB with manure-reduced soil salinity is better than applying manure alone. Adding RHB at 1.5 and 2.0 kg/cement ring were optimal rates for growing KDML105 under these conditions. Better saline sodic soil properties proved more suitable for cultivation, resulting in improved rice growth and productivity.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวนีย์ วิจิตรโกสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิวงศ์ ศรีบุรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ คำปรึกษา และข้อชี้แนะ ตลอดจนช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ให้วิทยานิพนธ์สำเร็จไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ เป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รอง ศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช และ อาจารย์ ดร.อนงนาฏ ศรีประโชติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ คำแนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่มอบทุนอุดหนุนวิจัย “90 ปีจุฬาลงกรณ์ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช” สำหรับ การทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณ สำนักพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ประจำปีงบประมาณ 2563 ที่มอบ “ทุนวิจัยบัณฑิตศึกษาด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร” และขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ระดับ มหาบัณฑิต หลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนใน การทำวิทยานิพนธ์บางส่วน รวมถึง ศูนย์วิจัยถ่านชีวภาพป่าเต็ง และศูนย์วิจัยข้าวนครราชสีมา ที่อนุเคราะห์วัสดุปลูก สำหรับใช้ในการศึกษานี้

ขอขอบคุณ คุณสะอาด อดทน และคุณพัชรปัญจารีย์ รอสุงเนิน ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการศึกษาวิจัยและให้ ความช่วยเหลือเป็นอย่างมากมาโดยตลอด และผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณเปรมสุตา จิวนอก คุณธนากร ศิริชู และคุณชัยวุฒิ ภูมระณ ที่ให้ความช่วยเหลือ ทั้งการติดต่อประสานงาน ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการออกภาคสนามอยู่เสมอ ตลอดจนบุคคลอื่น ๆ ที่มีได้กล่าวถึงในที่นี้

และสุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัว ประเสริฐสุข ที่ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนด้านการศึกษา เสมอ ผู้วิจัยไม่สามารถมาอยู่จุดนี้ได้เลยหากปราศจากแรงสนับสนุนจากครอบครัว ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอขอบคุณทุกคนที่เชื่อมั่นในตัวข้าพเจ้า แม้ในวันที่ข้าพเจ้าไม่เชื่อมั่นในตัวเองก็ตาม

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่าการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อสังคมไม่มากนักน้อย หากมีข้อบกพร่องใดที่อาจเกิดขึ้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดและยินดีที่จะรับฟังข้อเสนอแนะจากทุกท่านที่ได้มาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัย ต่อไป

สิรภัทร ประเสริฐสุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา.....	3
1.4.2 ขอบเขตด้านพื้นที่ศึกษา	4
1.5 คำจำกัดความ.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 กรอบแนวคิดการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 หลักการและทฤษฎี	6
2.1.1 ถ่านชีวภาพ (biochar).....	6
2.1.1.1 กระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ.....	6
2.1.1.2 สมบัติของถ่านชีวภาพ.....	6

2.1.1.3 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อสมบัติดิน	12
2.1.1.4 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อพืช	13
2.1.2 ดินเค็ม (saline soil).....	15
2.1.2.1 ประเภทของดินเค็ม.....	15
2.1.2.2 ปัจจัยการเกิดพื้นที่ดินเค็ม.....	16
2.1.2.3 พื้นที่ดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	17
2.1.2.4 ผลกระทบของดินเค็มต่อการเจริญเติบโตของพืช	20
2.1.2.5 แนวทางการแก้ไขปัญหาดินเค็มในปัจจุบัน.....	22
2.1.3 ข้าวขาวดอกมะลิ 105	24
2.1.3.1 ลักษณะทั่วไปของข้าวขาวดอกมะลิ 105.....	24
2.1.3.2 การเจริญเติบโตของข้าว.....	26
2.1.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าว	29
2.1.3.4 การปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105	31
2.1.3.5 การปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์.....	32
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	38
3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย	38
3.2 การวางแผนและออกแบบการศึกษาวิจัย	40
3.3 พารามิเตอร์และการวิเคราะห์.....	40
3.4 การเตรียมวัสดุปลูก	43
3.5 การเตรียมพื้นที่การทดลองและวัสดุปลูก	47
3.6 การเพาะปลูกข้าว	48
3.7 การเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	49
3.7.1 การวัดการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว.....	49

3.7.2 การเก็บตัวอย่างดินหลังปลูก.....	50
3.7.3 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	51
3.7.4 การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ถ่านชีวภาพแลกเปลี่ยนปัญหา ดินเค็ม และการปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์	51
บทที่ 4 ผลของถ่านชีวภาพต่อการปรับปรุงสมบัติดินเค็ม.....	52
4.1 ผลวิเคราะห์สมบัติของดินและวัสดุปลูก	52
4.1.1 ผลวิเคราะห์สมบัติของดินเค็ม	52
4.1.2 ผลวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพแลกเปลี่ยน.....	53
4.1.3 ผลวิเคราะห์สมบัติของปุ๋ยคอก.....	55
4.2 ผลวิเคราะห์สมบัติของดินผสมวัสดุปลูก.....	55
4.3 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินก่อนปลูกและดินหลังปลูกข้าว	60
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินก่อนและหลังปลูกข้าว	60
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารของดินก่อนและหลังปลูกข้าว.....	67
4.3.3 การเปลี่ยนแปลงความเค็มของดินก่อนและหลังปลูกข้าว	80
4.4 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดินเค็ม.....	88
4.4.1 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินเค็ม	88
4.4.2 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อธาตุอาหารของดินเค็ม	89
4.4.3 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อความเค็มของดินเค็ม	90
บทที่ 5 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว	92
5.1 ผลการศึกษาเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว	92
5.1.1 ความสูงของต้นข้าว	92
5.1.2 การแตกกอและจำนวนรวงต่อพื้นที่	96
5.1.3 จำนวนเมล็ดต่อรวง	99
5.1.4 น้ำหนัก 1,000 เมล็ดดีและน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด.....	101

5.1.5 เปอร์เซ็นต์เมล็ดดี	104
5.2 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว	106
บทที่ 6 ประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ในการแก้ไขปัญหาดินเค็ม ด้วยการใช้ถ่านชีวภาพในการปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์.....	113
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	120
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	120
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	123
บรรณานุกรม.....	130
ประวัติผู้เขียน.....	153



สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1-1 แผนภาพแสดงกรอบแนวคิดการวิจัย	5
รูปที่ 2-1 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากแกลบ	8
รูปที่ 2-2 โครงสร้างของถ่านชีวภาพ เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	9
รูปที่ 2-3 กลไกของถ่านชีวภาพที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน	13
รูปที่ 2-4 แผนที่พื้นที่ดินเค็มในประเทศไทย	18
รูปที่ 2-5 แบบจำลองการยกตัวขึ้นของเทือกเขาภูพาน	19
รูปที่ 2-6 แผนที่พื้นที่ดินเค็มในอำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา	20
รูปที่ 2-7 เมล็ดข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105	25
รูปที่ 2-8 ลักษณะและส่วนประกอบของต้นข้าว	27
รูปที่ 2-9 การเจริญเติบโตทางลำต้นและใบของต้นข้าว	28
รูปที่ 2-10 การพัฒนาของดอกข้าวเป็นเมล็ด	29
รูปที่ 3-1 แผนที่พื้นที่ดินเค็มในอำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา	38
รูปที่ 3-2 ลักษณะดินในพื้นที่ตำบลหนองสรวง อำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา	39
รูปที่ 3-3 เตาควบคุมอุณหภูมิชั้นใน	43
รูปที่ 3-4 เตาให้ความร้อนชั้นใน	45
รูปที่ 3-5 เตาผลิตแกลบชีวภาพ 4 x 200 ลิตร ควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการเปลี่ยนสภาพด้วยความร้อนแบบช้า	45
รูปที่ 3-6 ขนาดของวงบ่อซีเมนต์	47
รูปที่ 3-7 การแบ่งพื้นที่ภายในวงบ่อซีเมนต์เพื่อการปลูกข้าว	48
รูปที่ 3-8 ลำดับการดำเนินการศึกษาและผลการศึกษา	50
รูปที่ 4-1 ค่าความเป็นกรดต่างของดินในแต่ละดำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2	61

รูปที่ 4-2 ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2.....	63
รูปที่ 4-3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2	66
รูปที่ 4-4 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2	68
รูปที่ 4-5 ปริมาณฟอสฟอรัสที่มีประโยชน์ต่อพืชของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2.....	71
รูปที่ 4-6 ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2.....	74
รูปที่ 4-7 ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2	77
รูปที่ 4-8 ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2.....	79
รูปที่ 4-9 ค่าการนำไฟฟ้าขณะดินอิ่มตัวด้วยน้ำของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2.....	81
รูปที่ 4-10 ปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้ของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2.....	83
รูปที่ 4-11 ปริมาณโซเดียมทั้งหมดของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2	84
รูปที่ 4-12 ค่าอัตราการดูดซับโซเดียมของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2.....	87
รูปที่ 5-1 ความสูงของต้นข้าวทั้ง 4 ระยะการเจริญเติบโตในรอบการปลูกที่ 1	93
รูปที่ 5-2 ความสูงของต้นข้าวทั้ง 4 ระยะการเจริญเติบโตในรอบการปลูกที่ 3	94

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมือต่าง ๆ	7
ตารางที่ 2-2 การจำแนกประเภทของดินเค็ม	16
ตารางที่ 2-3 การจำแนกระดับความเค็มที่มีผลกระทบต่อพืช	22
ตารางที่ 3-1 ปริมาณของแต่ละวัสดุปลูกสำหรับแต่ละตำรับการทดลองต่อหนึ่งวงบ่อซีเมนต์.....	40
ตารางที่ 3-2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวัสดุปลูกและวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	41
ตารางที่ 4-1 ผลวิเคราะห์สมบัติของดินก่อนการปลูกพืช	52
ตารางที่ 4-2 ผลวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพแกลบ และปุ๋ยคอกแห้งจากมูลวัวเนื้อ.....	54
ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติของดินเดิมและดินก่อนการปลูกข้าวทั้ง 4 ตำรับการทดลอง	56
ตารางที่ 5-1 ผลการศึกษาความสูงของข้าวในระยะเก็บเกี่ยว ของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3	96
ตารางที่ 5-2 ผลการศึกษาการแตกกอในระยะการแตกกอ ของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3	97
ตารางที่ 5-3 ผลการศึกษาจำนวนรวงต่อพื้นที่ในระยะสร้างช่อรวงอ่อนและระยะเก็บเกี่ยว ของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3	98
ตารางที่ 5-4 ผลการศึกษาจำนวนเมล็ดต่อรวงในระยะเก็บเกี่ยว ของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3	99
ตารางที่ 5-5 ผลการศึกษาน้ำหนักเมล็ดทั้งหมดในระยะเก็บเกี่ยว ของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3	102
ตารางที่ 5-6 ผลการศึกษาน้ำหนัก 1,000 เมล็ดดีในระยะเก็บเกี่ยว ของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3	103
ตารางที่ 5-7 ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีในระยะเก็บเกี่ยว ของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3	105

ตารางที่ 6-1 การเปรียบเทียบต้นทุนในรอบการปลูกแรก ของการปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์ในตำรับ การทดลองที่ 1 ตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4	114
ตารางที่ 6-2 การเปรียบเทียบผลผลิตและรายได้ของการปลูกข้าวในรอบที่ 1 ของตำรับการทดลองที่ 1 ตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4.....	116
ตารางที่ 6-3 การเปรียบเทียบผลผลิตและรายได้ของการปลูกข้าวในรอบที่ 3 ของตำรับการทดลองที่ 1 ตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4.....	117



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน พื้นที่ทั่วโลกมีพื้นที่ดินเค็มประมาณ 10 ล้านตารางกิโลเมตร (FAO & ITPS, 2015) โดยพื้นที่ดินเค็มส่วนใหญ่เกิดจากสภาพทางธรณีวิทยาของพื้นที่ แต่จากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่กระทบต่อระบบอุทกวิทยา ทั้งการเปลี่ยนแปลงความถี่และปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิที่สูงขึ้น อัตราการคายระเหยที่เพิ่มขึ้น ประกอบกับ กิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ อาทิ การทำนาเกลือ การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน การตัดไม้ทำลายป่า หรือการใช้น้ำเพื่อการชลประทานที่ไม่ถูกต้อง (อรุณี ยูวะนิยม, 2546) ล้วนส่งผลให้ปัญหาดินเค็มมีความรุนแรงมากขึ้น อีกทั้งยังมีแนวโน้มในการขยายตัวของพื้นที่ดินเค็มเพิ่มมากขึ้น (Cramer et al., 2014) ปัญหาดินเค็มส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและการใช้ประโยชน์พื้นที่ โดยเฉพาะการทำเกษตรกรรม ซึ่งปริมาณและความเข้มข้นของเกลือในสารละลายดินที่มากเกินไปกว่าปกติ จะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช ทั้งปริมาณผลผลิตและคุณภาพของของผลผลิต เนื่องจากความไม่สมดุลของธาตุอาหารและน้ำ (Munns et al., 2002; Shrivastava & Kumar, 2015; Machado & Serralheiro, 2017) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางอาหารของโลกในอนาคต

พื้นที่จังหวัดนครราชสีมา เป็นพื้นที่ที่มีความรุนแรงของปัญหาดินเค็มมากที่สุดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยมีพื้นที่ที่ประสบปัญหาดินเค็ม 6,158 ตารางกิโลเมตร หรือร้อยละ 30.05 ของพื้นที่ทั้งจังหวัด (สำนักงานจังหวัดนครราชสีมา, 2557) พื้นที่อำเภอขามทะเลสอเป็นพื้นที่วิกฤตดินเค็มของจังหวัดนครราชสีมา กล่าวคือ อำเภอขามทะเลสอ (ขนาดพื้นที่ 214 ตารางกิโลเมตร) ประกอบด้วย 5 ตำบล โดยพื้นที่ 4 ตำบลเป็นพื้นที่ดินเค็ม ซึ่งโดยร้อยละ 25.56 ของพื้นที่อำเภอเป็นพื้นที่ดินเค็มจัด (ระบบแผนที่เกษตรเพื่อการบริหารจัดการเชิงรุกออนไลน์, 2558) พื้นที่ดินเค็มในหลายบริเวณของอำเภอขามทะเลสอไม่สามารถทำการเพาะปลูกได้ และบางพื้นที่ให้ผลผลิตทางการเกษตรต่ำ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตประชาชนในพื้นที่เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ จากการทำพื้นที่ดินเค็มได้ผลผลิตทางการเกษตรต่ำ หรือในบางพื้นที่ไม่สามารถเพาะปลูกได้ เกษตรกรจึงมักเปลี่ยนการใช้ประโยชน์พื้นที่ไปทำนาเกลือ ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ดินเค็มกระจายตัวเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ การแก้ปัญหาดินเค็มสามารถดำเนินการได้หลากหลายวิธี อาทิ การแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น การชะล้างเกลือ การระบายน้ำ เป็นต้น (Sharma & Manchanda, 1996; Sharma & Rao, 1998) การแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีทางเคมี เช่น การเติมยิปซัม แคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น (Provin & Pitt, 2001; Rasool et al., 2013; Machado & Serralheiro, 2017) และการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีทางชีวภาพ เช่น การ

ปลูกพืชทนเค็ม การเติมอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ อาทิ ชีวมวล ปุ๋ยอินทรีย์ แกลบ รวมถึง ถ่านชีวภาพ (Chen, 2006; Tejada et al., 2006; Saifullah et al., 2018) ซึ่งการแก้ไขปัญหาดินเค็มด้วยวิธีการเพิ่มอินทรีย์วัตถุหรืออินทรีย์คาร์บอนในดินถือว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสม เนื่องจากอินทรีย์วัตถุสามารถหาได้ง่าย การดำเนินการไม่ยุ่งยากซับซ้อน เกษตรกรสามารถทำได้พร้อม ๆ กับการเพาะปลูก ทำให้ต้นทุนในการแก้ไขปัญหาดินเค็มดังกล่าวของเกษตรกรไม่สูงนัก (Chen, 2006; ทวีวงศ์ ศรีบุรี & เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม, 2559)

ถ่านชีวภาพ (biochar) เป็นอินทรีย์วัตถุที่ผลิตจากชีวมวล (biomass) โดยผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) ซึ่งเป็นวิธีการเผาไหม้โดยควบคุมอุณหภูมิและจำกัดปริมาณอากาศ สมบัติเฉพาะตัวของถ่านชีวภาพที่มีปริมาณคาร์บอนที่มีความคงตัวสูง สามารถคงอยู่ในดินได้เป็นระยะเวลานาน (Lehmann & Joseph, 2015; Sriburi & Wijitkosum, 2016; Brassard et al., 2018) จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ด้วยวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มปริมาณการกักเก็บคาร์บอนและการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากพื้นที่เกษตรกรรม (Ok et al., 2015; Mohammadi et al., 2016; Brassard et al., 2018; เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม, 2560) แต่จากการที่ถ่านชีวภาพมีโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก รวมทั้ง การมีพื้นที่ผิวและมีประจุลบที่พื้นที่ผิวเป็นจำนวนมาก จึงมีการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพเพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน และเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพของผลผลิต (Wijitkosum & Kallayasiri, 2015; Yooyen et al., 2015; Novak et al., 2016; Sriburi & Wijitkosum, 2016; Lonardo et al., 2017) ซึ่งจากผลงานวิจัยหลายชิ้นที่ได้มีการดำเนินการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อประโยชน์ทางการเกษตร ชี้ให้เห็นว่า การผสมถ่านชีวภาพลงในดินสามารถปรับปรุงคุณภาพดินได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งสมบัติทางกายภาพของดิน ซึ่งถ่านชีวภาพช่วยเพิ่มการระบายน้ำ การระบายอากาศ และการกักเก็บน้ำในดิน ทั้งในดินเหนียว (Castellini et al., 2015) ดินทราย (Laghari et al., 2015; Khan et al., 2017; Suliman et al., 2017) และดินดาน (Novak et al., 2016; Pituya et al., 2017) รวมทั้ง การปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดิน ทั้งดินเปรี้ยว (Zhao et al., 2015; Lin et al., 2018) และดินเค็ม (Lashari et al., 2013; Wu et al., 2014; Sun et al., 2016; Luo et al., 2017; Sun et al., 2017) ทั้งนี้ ประสิทธิภาพของการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อปรับปรุงสมบัติของดิน ขึ้นอยู่กับ สมบัติของถ่านชีวภาพที่ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและวัตถุดิบในการผลิตถ่านชีวภาพ สมบัติและประเภทของดินซึ่งมีลักษณะเฉพาะในแต่ละพื้นที่ (Sriburi & Wijitkosum, 2016; Tan et al., 2017; Kavitha et al., 2018) โดยเฉพาะในพื้นที่ดินเค็ม (Lashari et al., 2013; Sun et al., 2016; Luo et al., 2017) ซึ่งมีปัจจัยด้านปริมาณน้ำ ปริมาณเกลือ และสภาพพื้นที่เป็นปัจจัยสำคัญ (ทวีวงศ์ ศรีบุรี & เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม, 2559)

จากความสำคัญของปัญหาดินเค็มและสภาพปัญหาดินเค็มในพื้นที่อำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา จึงนำมาสู่การศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติของดินเค็มในพื้นที่ที่ไม่สามารถเพาะปลูกได้ โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากชีวมวลที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น ซึ่งจะเป็นต้นแบบในการแก้ไขปัญหาดินเค็มเพื่อการทำเกษตรกรรมอย่างยั่งยืน อันจะเป็นการสร้างความมั่นคงทางอาหารต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ศึกษาสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากแกลบและอัตราการใส่ถ่านชีวภาพที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติดินเค็ม
- 2) วิเคราะห์ผลของถ่านชีวภาพแกลบต่อการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินเค็ม
- 3) ประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพแกลบเพื่อการปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในดินเค็มในวงบ่อซีเมนต์
- 4) เสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาดินเค็มในพื้นที่ที่ประสบปัญหาดินเค็ม

1.3 สมมติฐานการวิจัย

ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากแกลบ สามารถปรับปรุงสมบัติทั้งด้านกายภาพและด้านเคมีของดินเค็ม ที่ไม่สามารถทำเกษตรกรรมได้ ให้มีสมบัติที่ดีขึ้นและสามารถใช้ในการเพาะปลูกข้าวได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา

ถ่านชีวภาพแกลบ ผลิตจากแกลบดิบ ด้วยเตาผลิตแกลบชีวภาพ 4 x 200 ลิตร ผลิตแกลบชีวภาพ ควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการเปลี่ยนสภาพด้วยความร้อนแบบช้า (Controlled Temperature Rice Husk Biochar Retort for Slow Pyrolysis Process) (เลขที่จดสิทธิบัตร 1601001281 โดยทวิวงศ์ ศรีบุรี) โดยการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ในพารามิเตอร์ที่จำเป็น (รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3-2)

การศึกษารูปแบบของการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบเพื่อปรับปรุงสมบัติของดินเค็มโซดิก โดยการทดลองใช้ถ่านชีวภาพแกลบผสมลงในดินและปุ๋ยคอกจากมูลวัว ซึ่งเป็นปุ๋ยแห้งและปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L.) ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวที่เกษตรกรในพื้นที่นิยมปลูก ทำการทดลองปลูกข้าวแบบนาดำในวงบ่อซีเมนต์ พร้อมทั้ง การศึกษาการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ

105 และประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ในการแก้ไขปัญหาดินเค็มด้วยการใช้ถ่านชีวภาพในการปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์

1.4.2 ขอบเขตด้านพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ดินเค็มที่ทำการวิจัยและเก็บตัวอย่างดินเค็มคือ พื้นที่ตำบลหนองสรวง อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี (15.087448, 101.921135) ซึ่งเป็นพื้นที่วิกฤตดินเค็มของจังหวัดสุราษฎร์ธานี และทำการวิจัยที่พื้นที่ตำบลโป่งแดง อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี (14.962828, 101.937475)

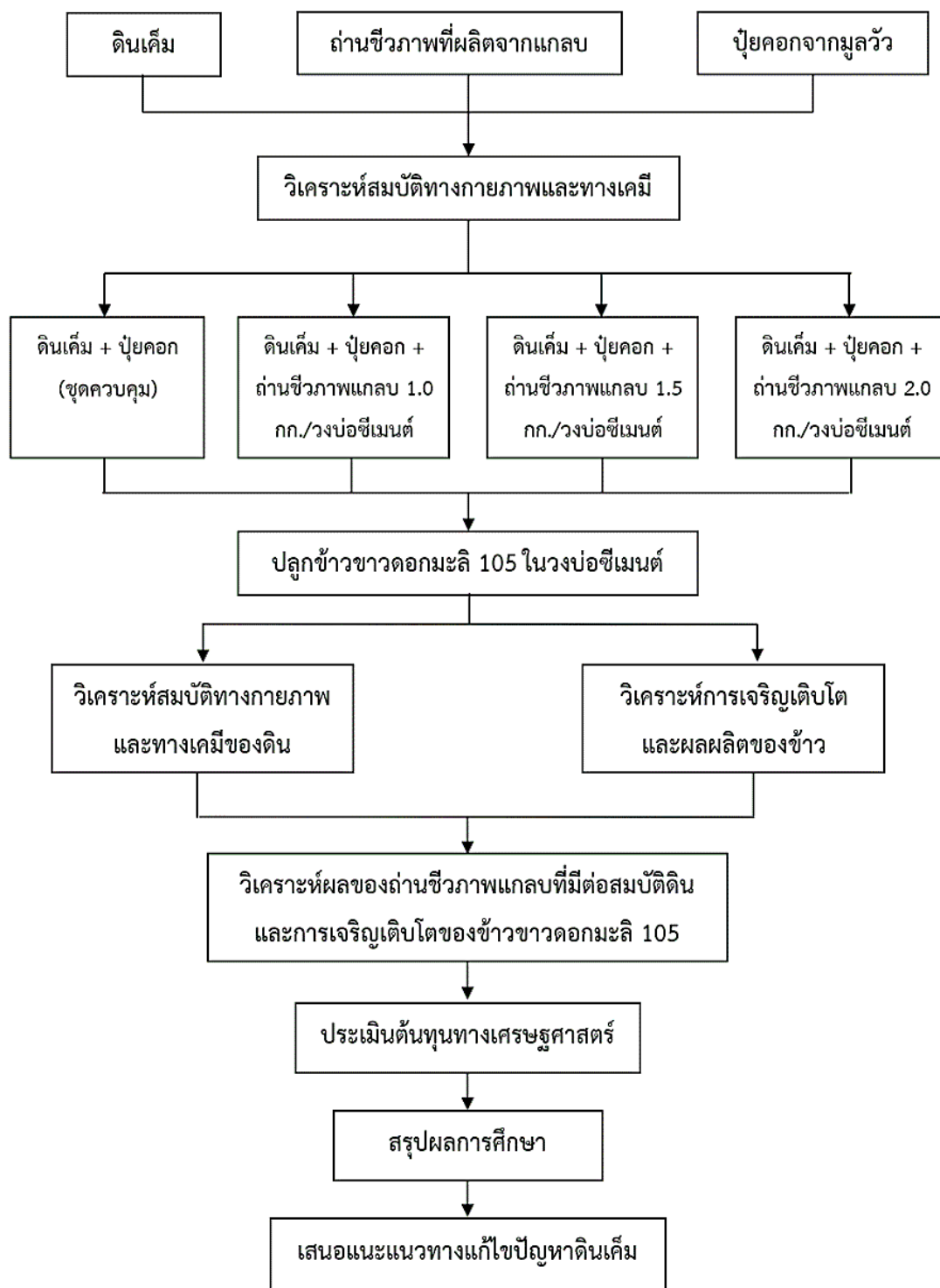
1.5 คำจำกัดความ

- 1) ถ่านชีวภาพ (biochar) คือ วัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนและรูพรุนสูง ผลิตโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อนภายใต้สภาวะที่ควบคุมปริมาณออกซิเจน
- 2) ดินเค็ม (saline soil) เป็นดินที่มีปริมาณเกลือที่ละลายน้ำได้มากเกินไปจนเป็นอันตรายต่อพืช

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ต้นแบบการแก้ไขปัญหาดินเค็มด้วยถ่านชีวภาพ
- 2) แนวทางการแก้ไขปัญหาดินเค็มในเชิงพื้นที่ของพื้นที่เกษตรกรรมดินเค็ม
- 3) เพิ่มความมั่นคงทางอาหารในพื้นที่เกษตรกรรมดินเค็ม

1.7 กรอบแนวคิดการวิจัย



รูปที่ 1-1 แผนภาพแสดงกรอบแนวคิดการวิจัย

บทที่ 2

บททวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการและทฤษฎี

2.1.1 ถ่านชีวภาพ (biochar)

ถ่านชีวภาพ คือ วัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวในปริมาณมากและความเสถียรสูง ผลิตด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อนภายใต้สภาวะที่ควบคุมปริมาณออกซิเจน โดยถ่านชีวภาพถูกใช้ประโยชน์อย่างมากทั้งในแง่ของการกักเก็บคาร์บอน การปรับปรุงคุณภาพดิน และการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร (Lehmann & Joseph, 2015; Ok et al., 2015; Mohammadi et al., 2016; Sriburi & Wijitkosum, 2016; Brassard et al., 2018)

2.1.1.1 กระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพ สามารถผลิตจากมวลชีวภาพหรือสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้หลายชนิด เช่น เศษไม้ ฟางข้าว ชังข้าวโพด มูลสัตว์ เป็นต้น โดยผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน ซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะให้ผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ syngas, bio-oil และ biochar ซึ่งในแต่ละวิธีของกระบวนการให้อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันไป (IEA Bioenergy, 2007; Lehmann & Joseph, 2015; Sriburi & Wijitkosum, 2016) ดังตารางที่ 2-1 ซึ่งการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็วจะให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็น bio-oil ในขณะที่ การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าจะให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็น char ดังนั้น ในการผลิตถ่านชีวภาพจึงใช้วิธีการผลิตด้วยวิธีการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า

2.1.1.2 สมบัติของถ่านชีวภาพ

ชีวมวล ประกอบด้วย สารประกอบอินทรีย์ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน (Fahmi et al., 2008) โดยลิกนิน คือ องค์กรประกอบที่มีความเสถียรมากและทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิมากกว่า 300°C จะทำให้ปริมาณของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสลดลง ในการผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส จะทำให้น้ำและสารประกอบที่สามารถระเหยได้ในชีวมวลระเหยออกไป ในขณะที่ ปริมาณสารประกอบอะโรมาติก (aromatic) จะเพิ่มขึ้น ดังนั้น สมบัติของถ่านชีวภาพจึงขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่าน

ชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิส (Tan et al., 2017; Kavitha et al., 2018) ซึ่งในการเลือกใช้อ่านชีวภาพ จึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น การใช้อ่านชีวภาพเพื่อวัตถุประสงค์ในการกักเก็บคาร์บอนนั้น ต้องการอ่านชีวภาพที่มีสมบัติของการมีคาร์บอนคงตัวในปริมาณมาก อ่านชีวภาพจึงควรผลิตด้วยกระบวนการไพโรไลซิสอย่างช้า หรือการปรับปรุงคุณภาพดินที่เป็นกรด ต้องเลือกใช้อ่านชีวภาพที่มีสมบัติเป็นต่าง ซึ่งในกระบวนการผลิตอ่านชีวภาพต้องใช้อุณหภูมิในการผลิตสูง เป็นต้น

ตารางที่ 2-1 อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสวิธีต่าง ๆ

กระบวนการ	สภาวะ	ของเหลว (bio-oil)	ของแข็ง (biochar)	ก๊าซ (syngas)
Fast	อุณหภูมิในการเผาปานกลาง (~500°C) ใช้เวลาในการเผาสั้น (~1 วินาที)	75%	12%	13%
Intermediate	อุณหภูมิในการเผาปานกลาง (~500°C) ใช้เวลาในการเผาประมาณ 10-20 วินาที	50%	20%	30%
Slow	อุณหภูมิในการเผาต่ำ (~400°C) ใช้เวลาในการเผานานตั้งแต่ 2-24 ชั่วโมง	30%	35%	35%
Gasification	อุณหภูมิในการเผาสูงมาก (>800°C) ใช้เวลาในการเผา 0.5-5 นาที	5%	10%	85%

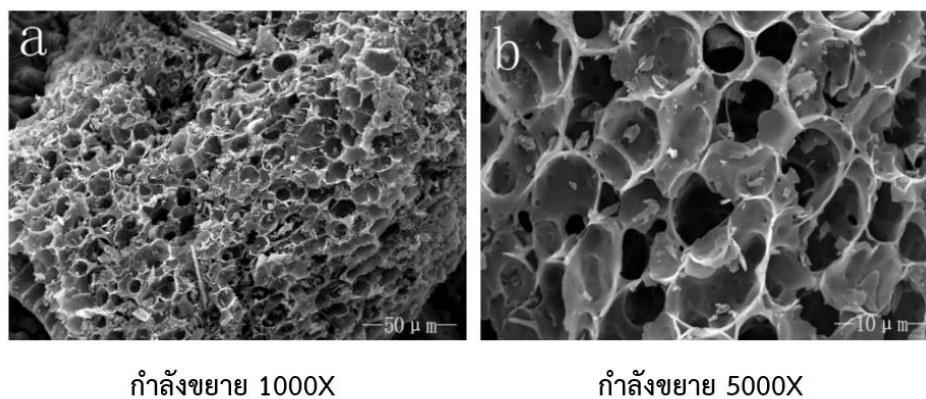
ที่มา: IEA Bioenergy (2007)

1) สมบัติทางกายภาพของอ่านชีวภาพ

1.1) ขนาดและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน

อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสที่สูง จะทำให้สารประกอบต่าง ๆ ระเหยออกไป และเกิดรูพรุนภายในอ่านชีวภาพ (Lehmann & Joseph, 2009; Brewer et al., 2014) โดยขนาดรูพรุนของอ่านชีวภาพ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ macropores (เส้นผ่านศูนย์กลางของรู 1000–0.05 μm) mesopores (เส้นผ่านศูนย์กลางของรู 0.05–0.002 μm) และ micropores (เส้นผ่านศูนย์กลางของรู 0.05–0.0001 μm) (Brewer et al., 2014) ภายในโครงสร้างของอ่านชีวภาพมีการเรียงตัวคล้ายผลึกแบบแกรไฟต์ กล่าวคือ การเรียงตัวเป็นไปใน

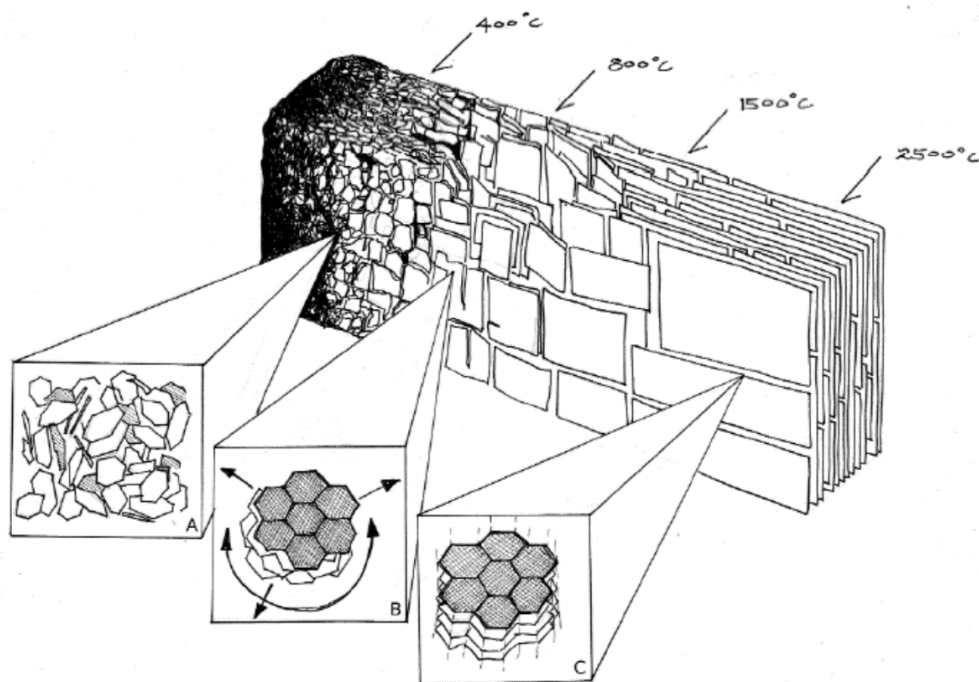
แนวราบคล้ายรังผึ้ง ซึ่งโครงสร้างของถ่านชีวภาพจะขึ้นอยู่กับ โครงสร้างเดิมของชีวมวลและอะตอมของไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ยังคงเหลือจากกระบวนการไพโรไลซิส (Laine et al., 1991; Wilson, 2014) (รูปที่ 2-1)



รูปที่ 2-1 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากแกลบด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ที่อุณหภูมิ 500°C

ที่มา: Zhang, et al. (2018)

โครงสร้างภายในของถ่านชีวภาพมีรูพรุนหลายขนาด โดยรูพรุนแบบ micropores จะสามารถดูดซับโมเลกุลขนาดเล็กต่าง ๆ ได้ดี เช่น ก๊าซ ของเหลว และสารละลายต่าง ๆ และยังเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ต่าง ๆ ในดิน รูพรุนแบบ mesopores จะสามารถดูดซับของเหลวบางประเภทได้ ในขณะที่ รูพรุนแบบ macropores จะเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของดิน โดยจะเพิ่มการถ่ายเทอากาศและการกักเก็บน้ำภายในดิน ทำให้ดินมีความหนาแน่นน้อยลง รากพืชจะสามารถเจริญเติบโตและซอนไซในดินได้ง่ายขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น จะทำให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวกันมากขึ้น ดังรูปที่ 2-2 ระยะห่างระหว่างระนาบจะลดลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวต่อปริมาตรของรูพรุนแบบ micropores เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลเล็ก ๆ ได้มากขึ้น (Rouquerol et al., 1999; Wilson, 2014)



รูปที่ 2-2 โครงสร้างของถ่านชีวภาพ เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

- (A) สัดส่วนของวงอะโรมาติกคาร์บอนเพิ่มขึ้นและเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ
- (B) มีการเรียงตัวเป็นแผ่นและคอนจุกต์ของวงอะโรมาติกคาร์บอน และ
- (C) โครงสร้างเรียงตัวคล้ายแกรไฟต์ในลักษณะสามมิติ

ที่มา: Lehmann and Joseph (2009)

1.2) ปริมาตรรูพรุน

ความพรุนของถ่านชีวภาพ ขึ้นอยู่กับ วัตถุดิบหรือชีวมวลที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ ขนาดของอนุภาค และอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส (Brewer et al., 2014) การระเหยออกของก๊าซจากกระบวนการไพโรไลซิส จะทำให้เกิดรูพรุนภายในถ่านชีวภาพ และเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูงจนถึงจุดหนึ่ง (มากกว่า 900°C) ความพรุนของถ่านชีวภาพจะลดลง (Fu et al., 2012) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการหดตัวของของแข็ง (Weber & Quicker, 2018) หรือการที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำลายผนังกั้นระหว่างรูพรุนแบบ micropores ทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้ปริมาตรของรูพรุนแบบ micropores ลดลง ในขณะที่ ปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดจะเพิ่มขึ้น (Zhang et al., 2004)

1.3) พื้นที่ผิวจำเพาะ

พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านชีวภาพ ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านชีวภาพเป็นอย่างมาก โดยที่ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านชีวภาพจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณพื้นที่ผิวทั้งหมด ปริมาณของ micropores และชนิดของวัสดุดิบ กล่าวคือ ถ่านชีวภาพที่มีความพรุนสูง จะยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทั้งนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสที่สูงขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิสจนถึงอุณหภูมิหนึ่ง จะส่งผลให้พื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพลดลง (Lehmann et al., 2003)

ถ่านชีวภาพมีความสามารถในการดูดซับ (adsorption) และดูดซึม (absorption) โดยความสามารถในการดูดซึมของถ่านชีวภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาตรรูพรุนของถ่านชีวภาพ โดยรูพรุนแบบ macropores จะสามารถดูดซึมและกักเก็บน้ำ และธาตุอาหารที่ละลายน้ำได้ในขณะที่ ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวและประจุที่พื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพ เนื่องจากพื้นที่ผิวทั้งภายในและภายนอกของถ่านชีวภาพจะดูดซับสารต่าง ๆ ด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Wilson, 2014)

2) สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพ

2.1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่า pH ของถ่านชีวภาพ ขึ้นอยู่กับ ชนิดของวัสดุดิบและกระบวนการไพโรไลซิส ถ่านชีวภาพส่วนใหญ่จะมีค่า pH ที่สูงกว่า 7 ซึ่งค่า pH มีความสัมพันธ์กับปริมาณเถ้า โดยเมื่อปริมาณเถ้ามากจะส่งผลให้ค่า pH ยิ่งสูง เนื่องจากสารบางชนิดที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของวัสดุดิบ (Gai et al., 2014) ทั้งนี้ ปริมาณของไอออนประจุบวกและคาร์บอนเนตจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 300-700°C เป็นผลให้ค่า pH ของถ่านชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ หมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดจะหายไป (Yuan et al., 2011)

2.2) ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)

ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity) คือ ปริมาณของประจุบวกที่วัสดุนั้น ๆ สามารถดูดซับไว้ได้ บ่งบอกถึงความสามารถในการกักเก็บธาตุอาหารและน้ำของดิน ปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพที่ส่งผลต่อค่า CEC ของถ่านชีวภาพ คือ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากอุณหภูมิจะส่งผลกับปริมาณพื้นที่ผิวและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า CEC ของถ่านชีวภาพ โดยเมื่ออุณหภูมิใน

กระบวนการไพโรไลซิสต่ำ จะให้ค่า CEC ของถ่านชีวภาพสูง (Liang et al., 2006; Weber & Quicker, 2018)

2.3) ค่าการนำไฟฟ้า (EC)

ค่าการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity) มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเกลือในน้ำ จึงสามารถประเมินค่าความเข้มข้นของเกลือและอิทธิพลของเกลือในดินที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยในการผลิตถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการจับกันของพันธะระหว่างคาร์บอน กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่เพิ่มสูงขึ้น จะทำให้การจับและเรียงตัวกันของอะตอมของธาตุคาร์บอนอยู่ชิดกันมากขึ้น (Gabhi et al., 2017) จึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพสูงขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงถึงประมาณ 700°C พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลต่อการฟอร์มตัวของโครงสร้างคาร์บอนในรูปแบบใหม่ (Hossain et al., 2011)

2.4) ธาตุองค์ประกอบ

ถ่านชีวภาพ ประกอบด้วย ธาตุต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก โดยธาตุองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ C, H, O, N และ S ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อองค์ประกอบของธาตุและลักษณะโครงสร้างภายใน (Liu et al., 2010) เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสสูงขึ้น พันธะของหมู่ฟังก์ชันบางหมู่จะถูกทำลาย ทำให้ปริมาณคาร์บอนของถ่านชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลง

ค่าอัตราส่วนของออกซิเจนและคาร์บอน (O/C ratio) แสดงถึง หมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว ความชอบน้ำ และความเสถียรของถ่านชีวภาพในดิน ในขณะที่ ค่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนกับคาร์บอน (H/C ratio) แสดงถึง การเปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนให้เป็นวงอะโรมาติก ซึ่งเมื่อค่า H/C ต่ำ จะแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันที่ลดลงและมีความเป็นอะโรมาติกมากขึ้น ซึ่งวงอะโรมาติกมีความเสถียรมาก จึงทำให้ถ่านชีวภาพมีความเสถียรมาก (Tan et al., 2017; Weber & Quicker, 2018)

2.5) หมู่ฟังก์ชัน

ประเภทและปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพ โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการลดความเป็นกรดหรือเบสของดิน การที่พันธะของหมู่ฟังก์ชันถูกทำลายในอุณหภูมิสูง จะทำให้หมู่ฟังก์ชันนั้น ๆ เกิดประจุลบ เช่น หมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COO}^-$) หรือหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{O}^-$) จึงสามารถจับกับประจุบวก (H^+) ได้ (Singh & Cowie, 2010; Weber & Quicker, 2018)

2.1.1.3 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อสมบัติดิน

1) ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อสมบัติดินด้านกายภาพ

การผสมถ่านชีวภาพซึ่งมีปริมาตรรูพรุนสูงมากลงในดิน ทำให้ความหนาแน่นรวมของดินลดลง (Lashari et al., 2013; Novak et al., 2016) โดยรูพรุนขนาดเล็กของถ่านชีวภาพจะช่วยในการกักเก็บน้ำ และธาตุอาหารในสารละลายดิน ในขณะที่รูพรุนขนาดใหญ่ของถ่านชีวภาพจะส่งผลต่ออัตราการซึมของน้ำในดินและการระบายอากาศในดิน (Herath et al., 2013) ทำให้รากพืชสามารถเจริญเติบโตและขนานไปลงในดินได้มากขึ้น (Kasak et al., 2018) และทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้นและพืชเจริญเติบโตได้ดีขึ้น (Lehmann & Joseph, 2009; Tan et al., 2017)

2) ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อสมบัติดินด้านเคมี

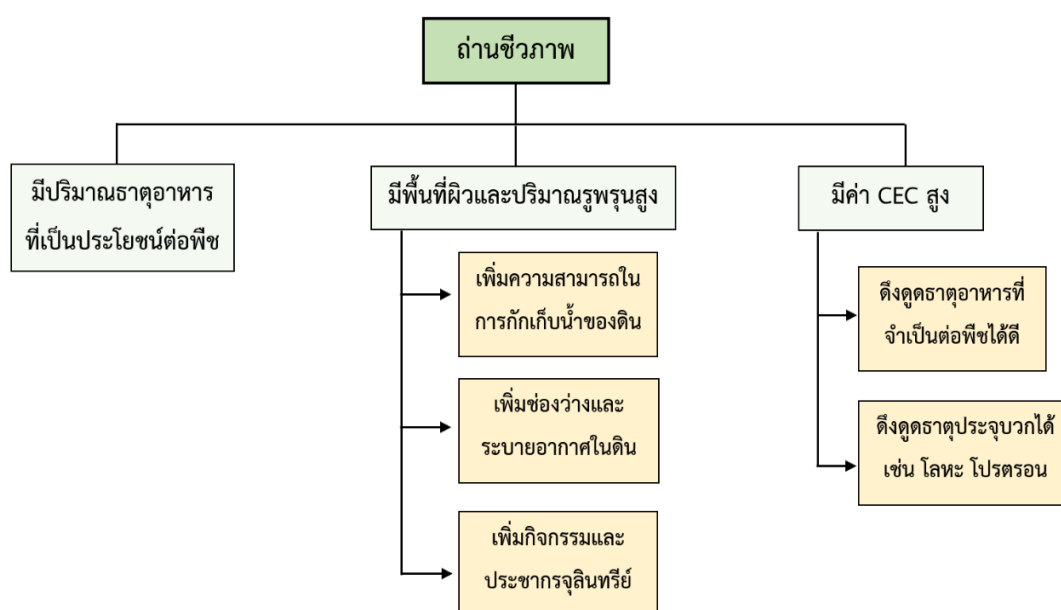
เนื่องจากถ่านชีวภาพมีค่า CEC สูง ทำให้เมื่อถูกเติมลงไปในดินจะส่งผลให้ค่า CEC ของดินเพิ่มขึ้น ประกอบกับ พื้นผิวของถ่านชีวภาพที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นประจุลบ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล หรือหมู่คาร์บอกซิลจึงจับกับประจุบวกในสารละลายดิน ซึ่งประจุบวกในดินอาจจะเป็นได้ทั้งธาตุอาหารที่สำคัญต่อพืช โลหะ หรือโปรตรอน ดังนั้น เมื่อถ่านชีวภาพจับกับธาตุอาหารได้ดีจะทำให้พืชได้รับธาตุอาหารได้มากขึ้น หรือในกรณีที่ดินเป็นกรด ถ่านชีวภาพจะจับกับโปรตรอนทำให้ดินมีความเป็นกรดลดลง เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้น ถ่านชีวภาพที่มีปริมาณเถ้าสูง หรือค่า pH สูง จะส่งผลให้ค่า pH ของดินโดยรวมมีค่าสูงขึ้นอีกด้วย (Gan et al., 2012; Yooyen et al., 2015)

3) ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อสมบัติดินด้านชีวภาพ

เนื่องจากโครงสร้างของถ่านชีวภาพเป็นวงอะโรมาติกคาร์บอน ซึ่งสามารถเป็นทั้งผู้ให้และผู้รับอิเล็กตรอนในกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ (Lovley et al., 1996) ทำให้ถ่านชีวภาพนอกจากช่วยในการทำงานในกระบวนการเมตาบอลิซึมแล้ว ยังช่วยให้จุลินทรีย์สามารถแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างกันได้ดีขึ้นอีกด้วย จึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการเมตาบอลิซึมในสังคมจุลินทรีย์ดีขึ้น (Kappler et al., 2014) และจากสมบัติของถ่านชีวภาพที่มีความพรุนสูงจึงทำให้ดินมีความหนาแน่นต่ำลงและเพิ่มช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดิน ส่งผลให้ดินมีการถ่ายเทอากาศและการกักเก็บน้ำได้ดีขึ้น จึงช่วยให้การทำงานของจุลินทรีย์ดีขึ้นในอีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ รูพรุนของถ่านชีวภาพยังเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ ทำให้สามารถปกป้องจุลินทรีย์ดินจากสภาวะแวดล้อมภายนอกที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการดำรงชีวิต โดยเฉพาะรูพรุนแบบ micropores ซึ่งทำให้จุลินทรีย์ดินสามารถเติบโตได้ดี และจำนวนของจุลินทรีย์ในดินเพิ่มสูงขึ้น ดังจะเห็นได้จากผลการศึกษาของ Tan และคณะ (2017) ที่พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านชีวภาพลงในดิน จะทำให้จุลินทรีย์ในดิน

เพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ถ่านชีวภาพที่มีสมบัติแตกต่างกันจะส่งผลให้สังคมนจุลินทรีย์ในดินแตกต่างกันไปด้วย (Pietikäinen et al., 2000)

กล่าวโดยสรุปแล้ว ถ่านชีวภาพสามารถปรับปรุงคุณภาพดินได้ด้วยสมบัติเฉพาะตัวของถ่านชีวภาพทั้งสมบัติทางกายภาพและเคมี จึงส่งผลให้สมบัติของดินเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการผสมถ่านชีวภาพลงในดิน ซึ่งกลไกของถ่านชีวภาพที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินสรุปได้ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 กลไกของถ่านชีวภาพที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1.1.4 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อพืช

1) ผลของถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตของพืช

สมบัติของถ่านชีวภาพที่สำคัญ คือ การที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูง และบริเวณพื้นผิวมีประจุลบซึ่งจะเพิ่มค่า CEC ให้กับดิน เพิ่มการกักเก็บธาตุอาหารที่สำคัญต่อพืช และยังชะลอการสูญเสียธาตุอาหารพืชที่มีประจุบวก ชะลอการไหลของน้ำให้ช้าลง โดยเปลี่ยนจากการไหลแบบ bypass เป็นการไหลแบบ matrix (Laird et al., 2010) ซึ่งอิทธิพลของถ่านชีวภาพที่มีต่อพืชนั้นมีสมมติฐานว่า เนื่องจากถ่านชีวภาพมีปริมาณ C/N สูง จึงทำให้ไนโตรเจนในดินเคลื่อนที่ได้ช้าลง ทำให้จุลินทรีย์ได้รับไนโตรเจนมากขึ้นและก่อให้เกิดกิจกรรมต่าง ๆ ของจุลินทรีย์ได้อีกมาก อาทิ การ

ดูดซับแอมโมเนียม และการกักเก็บสารละลายดินภายในช่องว่าง เป็นต้น (Sohi et al., 2010; Noguera et al., 2012)

จากผลงานวิจัยหลายชิ้นก่อนหน้านี้สามารถสรุปได้ว่า การผสมถ่านชีวภาพลงในดินทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้น โดยพืชได้รับธาตุอาหารที่จำเป็นมากขึ้น และการเจริญเติบโตของพืชเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแปลงปลูกพืชที่ผสมถ่านชีวภาพ และแปลงปลูกพืชที่ไม่ได้ผสมถ่านชีวภาพ (Sriburi & Wijitkosum, 2016; Agegnehu et al., 2017; Xie et al., 2017; Cornelissen et al., 2018) อีกทั้ง ถ่านชีวภาพยังเพิ่มประสิทธิภาพของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ที่ใส่ควบคู่ลงไปด้วย (Wijitkosum & Kallayasiri, 2015; Yooyen et al., 2015) นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังสามารถเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรได้หากใช้ในปริมาณที่มากพอ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ปุ๋ยร่วมด้วย ดังเช่นผลการศึกษาของ Wijitkosum และ Kallayasiri (2015) ที่ใช้ถ่านชีวภาพในการเพิ่มผลผลิตข้าวไร่ในพื้นที่ดินร่วนปนเหนียวในพื้นที่ตำบลป่าเต็ง อำเภอกำแพงกระเจาน จังหวัดเพชรบุรี โดยการผสมถ่านชีวภาพในดินปลูกในอัตรา 1,600 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งสามารถเพิ่มผลผลิตข้าวไร่ได้มากกว่าการปลูกข้าวไร่โดยการใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียวในอัตรา 1,600 กิโลกรัมต่อไร่ สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Yooyen และคณะ (2015) ที่ใช้ถ่านชีวภาพผสมในดินในอัตรา 30 t ha⁻¹ เพื่อปลูกถั่วเหลือง ซึ่งให้ผลผลิตของถั่วเหลืองมากกว่าการปลูกโดยการใส่ปุ๋ยมูลวัวเพียงอย่างเดียวในอัตรา 10 t ha⁻¹ เป็นต้น

2) ผลของถ่านชีวภาพต่อระบบรากพืช

การเติมถ่านชีวภาพลงในดินในช่วงความลึกที่รากสามารถหยั่งถึงได้ ทำให้ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินเปลี่ยนแปลง โดยช่วยให้ดินมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของรากพืชมากขึ้น ทำให้การเจริญเติบโตของรากพืชดีขึ้น โดยถ่านชีวภาพที่ผสมลงในดินสามารถเพิ่มชีวมวลของรากพืช ปริมาตรรากพืช และพื้นที่ผิวของรากได้ ทำให้รากพืชสามารถดูดซึมน้ำและธาตุอาหารได้ดีขึ้น (Yooyen et al., 2015) อีกทั้งยังเพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน โดยเฉพาะการตรึงไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์ ซึ่งจะทำให้เกิดปมรากเพิ่มขึ้น (Cui et al., 2011; Sriburi & Wijitkosum, 2016; Xiang et al., 2017) อย่างไรก็ตาม การใส่ถ่านชีวภาพบางชนิดอาจทำให้รากพืชพัฒนาได้ช้าลง เนื่องจากถ่านชีวภาพมีสารระเหยหรือสารประกอบฟีนอลเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน และอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเจริญเติบโตในระยะแรก (จาวภา มະนาวนอก และคณะ, 2560) และอาจส่งผลต่อการดูดซับและการคายของสารประกอบที่เป็นตัวส่งสัญญาณที่เชื่อมต่อกันระหว่างรากและจุลินทรีย์ในดินอีกด้วย (Warnock et al., 2007)

2.1.2 ดินเค็ม (saline soil)

ดินเค็ม คือ ดินที่มีปริมาณเกลือที่ละลายอยู่ในดินมากเกินไปจนส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช โดยสารละลายเกลือในดิน ประกอบด้วย Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- และ SO_4^{2-} ซึ่งสารละลายเกลือจะทำลายโครงสร้างของดิน ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของอนุภาคดินขนาดเล็ก ส่งผลให้โครงสร้างดินเกิดการเปลี่ยนแปลงจนไม่สามารถดึงดูดแร่ธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ (ปานใจ สารพันโซติวิทยา และคณะ, 2556; นุชิต ศิริทองคำ, 2557)

2.1.2.1 ประเภทของดินเค็ม

ดินเค็ม แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ดินเค็ม ดินโซดิก และดินเค็มโซดิก โดยการจำแนกประเภทดินเค็มจากค่าการนำไฟฟ้า (EC) ร้อยละของโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ (ESP) และค่าอัตราส่วนการดูดซับโซเดียม (SAR) ดังตารางที่ 2-2 โดยมีรายละเอียด (FAO, 1988) ดังนี้

1) ดินเค็ม (saline soils) คือ ดินที่มีปริมาณเกลือที่ละลายน้ำได้มากเกินไปจนเป็นอันตรายต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช โดยดินเค็มมีค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (EC_e) มากกว่า 2 dS/m ที่ 25 องศาเซลเซียส และค่าร้อยละโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ (ESP) ที่ต่ำกว่า 15 (USSL, 1954) องค์ประกอบของเกลือในดินเค็มเกิดจากการรวมตัวของธาตุประจุบวกกับธาตุประจุลบ โดยส่วนใหญ่มีปริมาณโซเดียมและคลอไรด์เป็นหลัก (FAO, 1988)

2) ดินโซดิก (sodic soils) เป็นดินที่มีสมบัติคล้ายดินเค็มแต่ไม่ใช่ดินเค็ม โดยดินโซดิกเป็นดินที่มีค่าร้อยละโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ (ESP) มากกว่า 15 (FAO, 1988) ส่งผลให้ดินมีสมบัติทางกายภาพที่ไม่ดี ดินฟุ้งกระจาย และดินแน่นจึงทำให้น้ำซึมผ่านได้ยาก การถ่ายเทอากาศไม่ดี และไถพรวนยาก โดยปกติดินโซดิกมักมีค่า pH ประมาณ 7.8-8.5 แต่ยังขึ้นกับชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ อย่างไรก็ตาม การที่ดินมีค่า pH สูงจะส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของพืช โดยเมื่อค่า pH เปลี่ยนไปอาจทำให้ธาตุอาหารเปลี่ยนรูปลายเป็นรูปที่พืชไม่สามารถใช้ได้ (อรุณี ยูวะนิยม, 2546)

3) ดินเค็มโซดิก (saline sodic soils) คือ ดินที่มีทั้งเกลือที่ละลายน้ำได้และมีค่าร้อยละโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ (ESP) สูงกว่า 15 ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของพืช

ตารางที่ 2-2 การจำแนกประเภทของดินเค็ม

ประเภท	ค่าการนำไฟฟ้า (dS/m)	ค่า pH	ร้อยละของโซเดียม ที่แลกเปลี่ยนได้ (ESP)	ค่าอัตราส่วนการ ดูดซับโซเดียม (SAR)	ลักษณะทาง กายภาพ
ดินเค็ม	> 4.0	< 8.5	< 15	< 13	ปกติ
ดินโซดิก	< 4.0	> 8.5	> 15	> 13	แย
ดินเค็มโซดิก	> 4.0	< 8.5	> 15	> 13	ปกติ

ที่มา: FAO (1988)

2.1.2.2 ปัจจัยการเกิดพื้นที่ดินเค็ม

1) ปัจจัยจากธรรมชาติ

เนื่องจากเกลือสามารถละลายน้ำได้ดี น้ำจึงเป็นตัวพาเกลือไปสะสมในที่ต่าง ๆ ที่น้ำไหลผ่านซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการแพร่กระจายของดินเค็ม โดยส่วนใหญ่พื้นที่ดินเค็มมักเกิดขึ้นในพื้นที่ที่ภูมิอากาศแห้งแล้งหรือกึ่งแล้ง (arid or semiarid) เนื่องจากมีการระเหยของน้ำจากดินมากกว่าปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมา เพราะปริมาณน้ำฝนไม่เพียงพอต่อการชะล้างเกลือออกไปจากดิน หรือในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินหรือไม่มีสิ่งปกคลุมผิวดิน เมื่อได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ จะเกิดแรงดึงดูดระหว่างช่องว่างขนาดเล็กในอนุภาคดิน (capillary force) ไปดึงดูบน้ำเค็มใต้ดินขึ้นมาแพร่กระจายสู่ผิวดินด้านบน ต่อมา เมื่อน้ำระเหยไปจะทิ้งคราบเกลือไว้ที่ผิวดิน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ก่อให้เกิดพื้นที่ดินเค็มได้เช่นกัน ได้แก่ การที่บริเวณนั้นเป็นพื้นที่ลุ่มต่ำที่มีระดับผิวดินอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำเค็มใต้ดิน หรือพื้นที่ที่มีแนวรอยแตกของเปลือกโลกพาดผ่าน ทำให้น้ำบาดาลเค็มซึมผ่านรอยแตกขึ้นมาสู่ผิวดิน (อรุณี ยูวะนิยม, 2546; ปานใจ สารพันโชติวิทยา และคณะ, 2556; นุชิต ศิริทองคำ, 2557)

นอกจากนั้น ปัจจัยทางธรรมชาติที่สำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาดินเค็มของพื้นที่ รวมทั้ง การทำให้พื้นที่มีศักยภาพในการแพร่กระจายดินเค็ม คือ การมีสภาพทางธรณีวิทยาและธรณีโครงสร้างของพื้นที่ที่มีชั้นหินหรือแร่ที่เป็นหินเกลือรองรับอยู่ใต้พื้นที่ ดังเช่น ปัญหาดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ที่มีกลุ่มหินโคราช ซึ่งเป็นชั้นหินสีแดงมหายุคมีโซโซอิกที่สะสมตัวอยู่บนภาคพื้นทวีป โดยมีหมวดหินสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดดินเค็มในพื้นที่ ได้แก่ หมวดหิน

มหาสารคาม ซึ่งประกอบด้วย หินทรายแป้งและหินทราย ที่มีชั้นโพแทช แอนไฮไดรต์ ยิปซัม และหินเกลือแทรกสลับอยู่ เป็นต้น (ทวิวงศ์ ศรีบุรี & เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม, 2559)

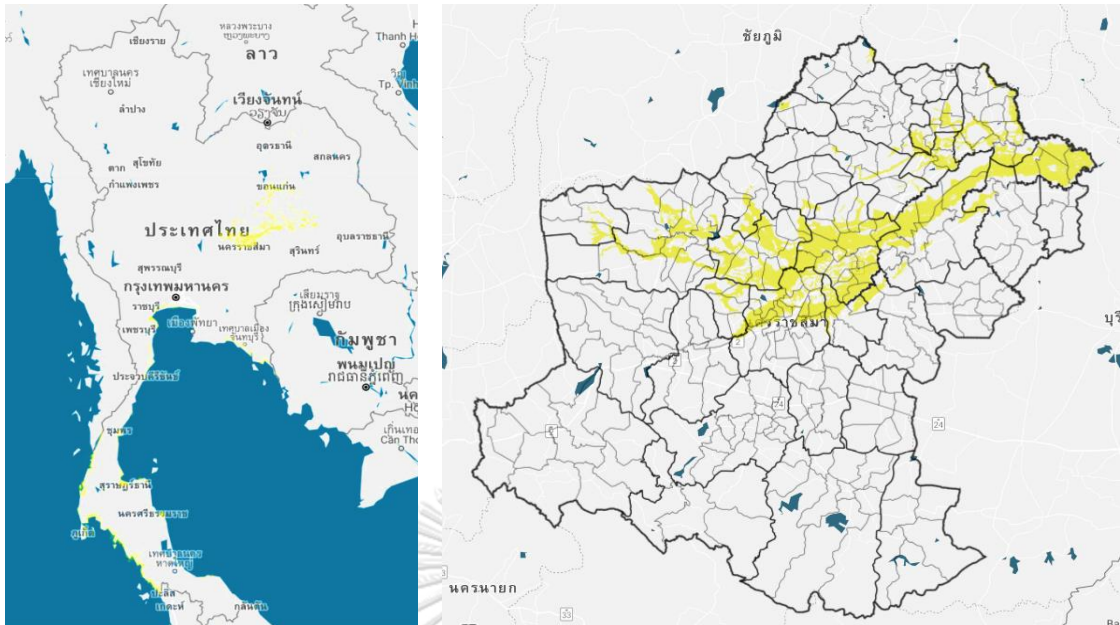
2) ปัจจัยจากการกระทำของมนุษย์

การกระทำของมนุษย์ เป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการแพร่กระจายของดินเค็ม โดยการกระทำของมนุษย์ที่สำคัญ คือ การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยเฉพาะในพื้นที่รับน้ำและในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงในการเกิดปัญหาดินเค็มจากปัจจัยทางธรรมชาติ

การกระทำของมนุษย์ที่ก่อให้เกิดปัญหาดินเค็ม ได้แก่ การทำนาเกลือ ทั้งโดยวิธีการสูบน้ำเค็มขึ้นมาตากหรือวิธีการขุดคราบเกลือจากผิวดินมาต้มเกลือ การสร้างเขื่อนในบริเวณที่ไม่มีความเหมาะสมทางอุทกธรณีวิทยาทำให้ระดับน้ำใต้ดินในบริเวณถูกยกสูงขึ้น การขาดการวางแผนที่ดีของการชลประทานทำให้พื้นที่บริเวณใกล้เค็มกลายเป็นพื้นที่ดินเค็ม รวมถึง การตัดไม้ทำลายป่า (deforestation) บนพื้นที่รับน้ำ ทำให้ดุลการใช้น้ำในพื้นที่สูญเสียไป มีน้ำส่วนเกินที่ไหลจากเนินพื้นที่รับน้ำไปเพิ่มเติมน้ำใต้ดินเค็มในที่ลุ่มซึ่งเป็นพื้นที่จายน้ำหรือพื้นที่ให้น้ำ ถูกยกกระด้างขึ้นมาใกล้ผิวดิน ทำให้ที่ลุ่มกลายเป็นดินเค็ม และทำให้พื้นที่ดินเค็มแพร่กระจายมากขึ้น (อรุณี ยูวะนิยม, 2546) หรือการปล่อยให้สัตว์แทะเล็มพืชพันธุ์ที่คลุมหน้าดินมากเกินไป (overgrazing) ทำให้น้ำระเหยพาเกลือขึ้นมาสะสมในชั้นดินได้ (Pessarakli & Szabolcs, 1999)

2.1.2.3 พื้นที่ดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

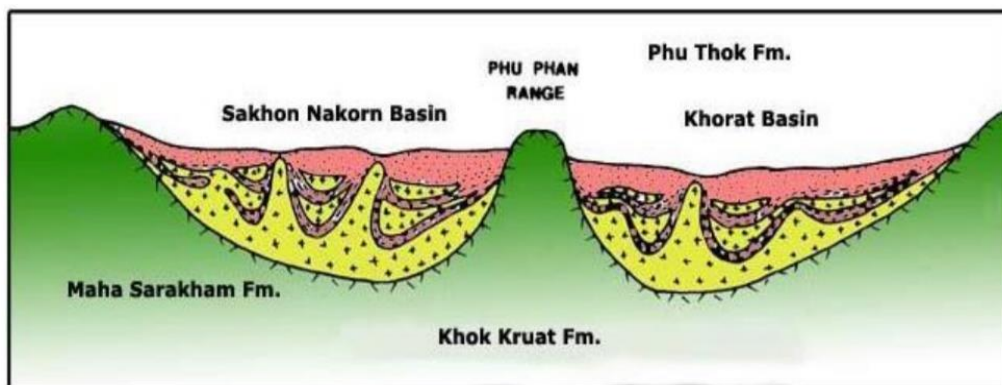
พื้นที่ดินเค็มในประเทศไทย จำแนกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ดินเค็มบก และดินเค็มชายทะเล ซึ่งดินเค็มทั้งสองประเภทมีสาเหตุของการเกิด ชนิดของเกลือ และการแพร่กระจายที่แตกต่างกันตามลักษณะสภาพภูมิประเทศที่ต่างกัน (รูปที่ 2-4) ซึ่งดินเค็มที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยเฉพาะในการทำเกษตรกรรมของประเทศไทย ได้แก่ ดินเค็มบก โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีพื้นที่ดินเค็มประมาณ 17.8 ล้านไร่ หรือหนึ่งในสามของพื้นที่ทั้งภูมิภาค นอกจากนี้ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือยังมีพื้นที่ที่มีศักยภาพในการแพร่กระจายของดินเค็มอีก 19.4 ล้านไร่ (สมศรี อรุณินท์, 2539) การกระจายตัวของดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมักพบบริเวณพื้นที่ลุ่มต่ำ ในจังหวัดนครราชสีมา ขอนแก่น กาฬสินธุ์ มหาสารคาม ชัยภูมิ ร้อยเอ็ด อุตรดิตถ์ สกลนคร นครพนม สุรินทร์ บุรีรัมย์ ยโสธร และอุบลราชธานี (นุชิต ศิริทองคำ, 2557)



รูปที่ 2-4 แผนที่พื้นที่ดินเค็มในประเทศไทย (ซ้าย) และจังหวัดนครราชสีมา (ขวา)

ที่มา: ระบบแผนที่เกษตรเพื่อการบริหารจัดการเชิงรุกออนไลน์ (2558)

สำหรับสาเหตุสำคัญของปัญหาพื้นที่ดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คือ สภาพทางธรณีวิทยาของพื้นที่ที่มีชั้นหินเกลือใต้ดินที่เกิดจากการที่น้ำทะเลมีการเปลี่ยนแปลงระดับขึ้นลงตลอดเวลา ในยุคครีเทเชียส (100 ล้านปี) กล่าวคือ ในช่วงน้ำทะเลเพิ่มระดับ น้ำทะเลบางส่วนไหลข้ามสันดอนที่ปิดกั้นดินแดนภาคตะวันออกเฉียงเหนือในอดีต และเมื่อน้ำทะเลภายนอกลดระดับลง น้ำทะเลที่เหลือจึงถูกขังกลายเป็นแอ่งทะเลสาบน้ำเค็มขนาดใหญ่ นอกจากนั้น ความร้อนจากแสงอาทิตย์ ยังเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ทะเลสาบน้ำเค็มดังกล่าวมีอัตราการระเหยตัวที่สูงมาก ซึ่งเมื่อการระเหยของน้ำมากกว่าการได้รับน้ำจากระบบน้ำบนแผ่นดินและน้ำฝน จึงทำให้น้ำมีความเข้มข้นของเกลือมากขึ้น จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว เกิดการตกตะกอนเป็นชั้นหินเกลือและชั้นแร่โพแทช หลังจากนั้นเทือกเขาภูพานเกิดการยกตัวบริเวณกลางแอ่ง ชั้นหินเกลือจึงเกิดการโค้งงอตามรูปหินฐานรองรับ เนื่องจากชั้นหินเกลือมีความหนาแน่นน้อยและไม่คงรูป ทำให้เมื่อมีแรงกดทับจากชั้นหินด้านบนซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่า บางส่วนของชั้นหินเกลือจึงถูกแรงอัดบีบ มีส่วนที่ปูดขึ้นเกิดลักษณะคล้ายโดมหรือโดมเกลือ เป็นชั้นหินเกลือโผล่ขึ้นใกล้บริเวณผิวดิน พบในบางบริเวณของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (นุชิต ศิริทองคำ, 2557) ดังรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 แบบจำลองการยกตัวขึ้นของเทือกเขาภูพาน แบ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือออกเป็น 2 แอ่ง ทำให้ชั้นเกลือใต้ดินมีลักษณะคดโค้ง โผล่ขึ้นใกล้ผิวดินซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดดินเค็ม

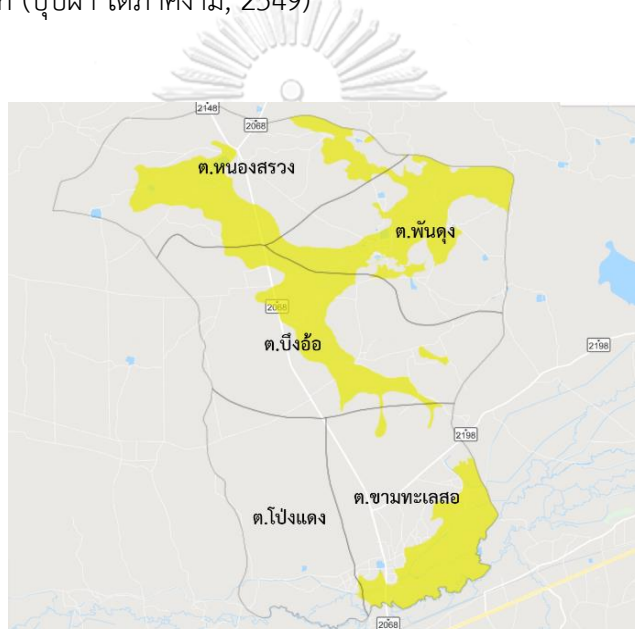
ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ที่มา: นุชิต ศิริทองคำ (2557)

เมื่อโดมเกลือแทรกขึ้นมาถึงระดับน้ำบาดาล ชั้นดินด้านบนจึงเกิดการทรุดและยุบตัวลง ชั้นหินเกลือที่อยู่ใต้ดินเกิดการยกตัว ทำให้เกิดโดมเกลือใต้ดินในระดับตื้น เมื่อเกลือถูกน้ำบาดาลทำละลายกลายเป็นน้ำเค็ม น้ำเค็มจะเคลื่อนที่ไปตามระบบการไหลของน้ำบาดาล ไหลลงสู่ที่ราบลุ่มของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และเมื่อน้ำเค็มระเหยออกมาตามช่องว่างของดิน ส่วนที่เป็นอนุภาคเกลือจะตกตะกอนตามเม็ดดิน เห็นเป็นคราบเกลือบนผิวดิน ซึ่งพบมากในพื้นที่ลุ่มต่ำของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ปานใจ สารพันโชติวิทยา และคณะ, 2556) สังเกตได้จากคราบเกลือบนผิวดินเป็นหย่อม ๆ ในฤดูฝน เกลือที่ดินชั้นบนจะถูกน้ำฝนชะล้างไปในดินชั้นล่าง และเกลือจะกลับขึ้นมาที่ผิวดินใหม่ในช่วงแล้ง โดยละลายอยู่ในน้ำที่ระเหยขึ้นมาตามช่องว่างของชั้นดินแล้วตกผลึกค้างอยู่บนผิวดิน (นุชิต ศิริทองคำ, 2557) หรือในบริเวณที่มีการตัดไม้ทำลายป่า น้ำฝนสามารถซึมผ่านลงไปใต้ดินได้มากขึ้น ส่งผลให้ระดับน้ำใต้ดินซึ่งเป็นน้ำเค็มสูงขึ้น จนอยู่ในระยะอิทธิพลของแรงดึงดูดของเหลวในช่องว่างขนาดเล็ก (capillary force) น้ำเค็มจึงสามารถแพร่กระจายขึ้นสู่ผิวดินด้านบนได้

จังหวัดนครราชสีมา มีพื้นที่ดินเค็มมากที่สุดและรุนแรงที่สุด โดยมีพื้นที่ดินเค็มทั้งหมด 3,849,254 ไร่ (ร้อยละ 30.05 ของพื้นที่ทั้งจังหวัด) (สำนักงานจังหวัดนครราชสีมา, 2557) พื้นที่ดินเค็มในจังหวัดนครราชสีมา ครอบคลุมพื้นที่อำเภอโนนสูง อำเภอโนนไทย อำเภอโนนแดง อำเภอคง อำเภอเมือง อำเภอเมืองยาง อำเภอด่านขุนทด อำเภอเฉลิมพระเกียรติ อำเภอพิมาย อำเภอประทาย อำเภอบัวใหญ่ อำเภอชุมพวง อำเภอแก้งสนามนาง อำเภอเทพารักษ์ อำเภอบ้าน

เหลื่อม อำเภอสีดา อำเภพระทองคำ อำเภจ๊กราช อำเภขามสะแกแสง และอำเภขามทะเลสอ ซึ่งเป็นพื้นที่วิกฤตดินเค็มของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อำเภขามทะเลสอมีพื้นที่ทั้งหมด 203.6 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ทางการปกครองทั้งหมด 5 ตำบล ในพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่เป็นดินเค็มถึง 4 ตำบล (ร้อยละ 25.56 ของพื้นที่ทั้งหมดของอำเภ) (ระบบแผนที่เกษตรเพื่อการบริหารจัดการเชิงรุกออนไลน์, 2558) (รูปที่ 2-6) เนื่องจากสภาพธรณีวิทยาของภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีชั้นหินเกลือ (หมวดหินมหาสารคาม) กระจายอยู่ทั่วไปในบริเวณตอนกลางของที่ราบสูงโคราช มีระดับความลึกตั้งแต่ 50 ถึง 1,000 เมตร ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำใต้ดินในระดับลึกเค็มจัดความเค็มถูกพาขึ้นมาในระดับตื้นจากการซึมขึ้นมาของน้ำใต้ดินเค็ม ทำให้พบชั้นสะสมเกลือมากหรือพบคราบเกลือที่ผิวดินในปริมาณมาก (บุปผา โทภาคงาม, 2549)



รูปที่ 2-6 แผนที่พื้นที่ดินเค็ม (สีเหลือง) ในอำเภขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา

ที่มา: ระบบแผนที่เกษตรเพื่อการบริหารจัดการเชิงรุกออนไลน์ (2558)

2.1.2.4 ผลกระทบของดินเค็มต่อการเจริญเติบโตของพืช

ความเค็มส่งผลให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง เนื่องจากความเครียดออสโมติก และความเป็นพิษของธาตุบางชนิด รายละเอียดดังนี้ (Zhang et al., 2010; Gupta & Huang, 2014)

1) ความเครียดออสโมติก (osmotic stress)

เกลือทำให้น้ำในดินมีแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) เพิ่มขึ้นและทำให้ความต่างศักย์ของน้ำ (water potential) ลดลง และเนื่องจากสารละลายจะเคลื่อนที่จากบริเวณความต่างศักย์สูงไปยังบริเวณที่มีความต่างศักย์ต่ำกว่า กล่าวคือ น้ำจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของเกลือเจือจางไปยังบริเวณที่เกลือเข้มข้น ทำให้พืชไม่สามารถใช้น้ำจากดินได้ เซลล์ของพืชจึงมีอาการขาดน้ำ (อรุณี ยูวะนิยม, 2546)

2) ความเป็นพิษของธาตุบางชนิด (ion toxicity)

ไอออนที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} และ SO_4^{2-} (USSL, 1954) โดยหากพืชดูดไอออนดังกล่าวเข้าไปสะสมมากเกินไปจะแสดงความเป็นพิษด้วยอาการขอบใบไหม้ โซเดียมที่สะสมในใบจะแสดงอาการใบไหม้ โดยทำให้นเนื้อเยื่อตามขอบใบตาย และโซเดียมปริมาณมากทำให้พืชเกิดอาการขาดแคลเซียม โพแทสเซียม และแมกนีเซียม อีกทั้งยังทำให้โครงสร้างของดินเสีย นอกจากนี้คลอไรด์ที่พืชดูดเข้าไปจะไปสะสมใน vacuole เพื่อไม่ให้ทำปฏิกิริยากับน้ำย่อย เนื่องจากคลอไรด์จะแข่งขันกับตัวทำละลายอินทรีย์อื่น ๆ จึงส่งผลต่อการสะสมน้ำตาลในเซลล์สะสมอาหาร และยังทำให้โพแทสเซียมในพืชไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ทำให้ใบของพืชขาดโพแทสเซียม ไม่พอใช้ในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต (อรุณี ยูวะนิยม, 2546)

อย่างไรก็ตาม พื้นที่บริเวณที่มีระดับความเค็มต่างกันจะส่งผลกระทบต่อพืชต่างกัน USSL (1954) จึงจำแนกพื้นที่ตามระดับความเค็มเป็น 3 ระดับ ดังนี้

1) พื้นที่ดินเค็มจัด เป็นบริเวณที่ปรากฏคราบเกลือให้เห็นบนผิวดินทั้งพื้นที่ โดยการกระจายของคราบเกลือตามผิวดินมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 10 ของพื้นที่ หรือค่าการนำไฟฟ้าของดินที่สกัดได้จากดินขณะที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (EC_e) มีค่ามากกว่า 8 dS/m ซึ่งพื้นที่ที่มีความเค็มระดับนี้ จะปลูกพืชไม่ค่อยได้ผล จึงมักถูกปล่อยทิ้งร้าง เนื่องจากการปรับปรุงคุณภาพดินต้องลงทุนสูง

2) พื้นที่ดินเค็มปานกลาง เป็นบริเวณที่ปรากฏคราบเกลือให้เห็นบนผิวดินเป็นหย่อม ๆ โดยการกระจายของคราบเกลือตามผิวดินมีปริมาณร้อยละ 1 ถึง 10 ของพื้นที่ หรือ ค่าการนำไฟฟ้าของดินที่สกัดได้จากดินขณะที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (EC_e) มีค่าประมาณระหว่าง 4-8 dS/m ซึ่งพื้นที่ที่มีความเค็มระดับนี้ สามารถปลูกพืชได้ แต่ให้ผลผลิตต่ำและไม่ต่อเนื่อง

3) พื้นที่ดินเค็มน้อย เป็นบริเวณที่ปรากฏคราบเกลือให้เห็นในช่วงฤดูแล้ง โดยการกระจายของคราบเกลือตามผิวดินมีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 1 ของพื้นที่ หรือ ค่าการ

นำไฟฟ้าของดินที่สกัดได้จากดินขณะที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (EC_e) มีค่าน้อยกว่า 4 dS/m พื้นที่บริเวณนี้ส่วนใหญ่ใช้ทำนา น้ำใต้ดินเป็นน้ำกร่อยหรือน้ำเค็ม

ตารางที่ 2-3 การจำแนกระดับความเค็มที่มีผลกระทบต่อพืช

ค่าการนำไฟฟ้า (dS/m)	ระดับความเค็ม	ผลต่อการเพาะปลูกพืช
น้อยกว่า 2	ไม่เค็ม	ไม่ส่งผลกระทบต่อพืช
2 – 4	เค็มเล็กน้อย	กระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชไม่ทนเค็ม
4 – 8	เค็มปานกลาง	กระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด
8 – 16	เค็มมาก	เจริญเติบโตเฉพาะพืชทนเค็มเท่านั้น
มากกว่า 16	เค็มจัด	เจริญเติบโตเฉพาะพืชทนเค็มจัดเท่านั้น

ที่มา: USSL (1954)

2.1.2.5 แนวทางการแก้ไขปัญหาดินเค็มในปัจจุบัน

ในการปรับปรุงคุณภาพของดินเค็มต้องพิจารณาประเภทของดินเค็ม โดยแนวทางการแก้ไขหรือปรับปรุงสมบัติของดินเค็มสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ดังนี้

1) วิธีทางกายภาพ

1.1) วิธีการชะล้างเกลือ (leaching)

การขูดเกลือที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าดิน (scraping) ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาชั่วคราว เนื่องจากเกลือที่มีปริมาณมากในดินจะขึ้นมาสะสมที่ผิวดินได้อีก ดังนั้น ในการนำเกลือออกจากพื้นที่จึงต้องทำให้เกลือที่ละลายได้ออกไปจากดินบริเวณรากพืช โดยการใช้น้ำล้างคราบเกลือที่ผิวดิน (flushing) และการชะล้างเกลือออกไปจากเขตรากพืชลงไปในชั้นดินตามแนวตั้ง (leaching) ซึ่งในการชะล้างเกลือที่ผิวดิน น้ำจะไหลไปในแนวราบไปสู่พื้นที่ต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตามวิธีการล้างเกลือจะทำให้เกลือที่ถูกชะล้างจะไปสะสมอยู่ในพื้นที่ที่ต่ำกว่าได้ ส่วนการชะล้างเกลือออกไปจากเขตรากพืชลงไปในชั้นดินตามแนวตั้ง เป็นวิธีที่ให้ประสิทธิผลที่ดีที่สุดกรณีที่ดินมีความชื้นต่ำและระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึก โดยการขังน้ำจืดแล้วค่อย ๆ ปล่อยให้ น้ำซึมลงไปในดิน เกลือจะถูกละลายและเคลื่อนย้ายออกจากพื้นที่ดังกล่าว อย่างไรก็ตาม หากการชะล้างเกลือทำในช่วงฤดูแล้ง

อาจจะทำให้น้ำใต้ดินระเหยขึ้นมาพร้อมกับเกลือบนผิวดินได้อีก (FAO, 1988; Provin & Pitt, 2001; Rasool et al., 2013)

1.2) วิธีการระบายน้ำ (drainage)

ระดับน้ำใต้ดินมีผลต่อการระเหยน้ำที่ผิวดิน กล่าวคือ เมื่อระดับน้ำใต้ดินอยู่ตื้นมากจะมีอัตราการระเหยมากขึ้น ทำให้เกลือที่ละลายอยู่ในน้ำใต้ดินขึ้นมาบนดิน ดังนั้นการแก้ปัญหาดินเค็มจึงต้องควบคุมและรักษาระดับน้ำใต้ดินให้อยู่ในระดับลึกพอที่จะไม่ระเหยขึ้นมา ซึ่งการระบายน้ำที่เหมาะสมสามารถควบคุมระดับน้ำใต้ดินได้ แต่วิธีดังกล่าวไม่สามารถใช้ได้กับพื้นที่ดินเค็มที่เกิดจากน้ำใต้ดินเค็ม (FAO, 1988; Rasool et al., 2013)

1.3) การปรับระดับพื้นที่แปลงนาให้อยู่ในระดับเดียวกัน

การปรับระดับพื้นที่เพาะปลูกให้มีระดับเดียวกันโดยการไถพรวนดินให้ลึกประมาณ 30 เซนติเมตร เพื่อให้ระดับน้ำข้างอย่างสม่ำเสมอทั่วแปลง ซึ่งสามารถป้องกันไม่ให้เกิดการเกลือมาสะสมที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งได้ (ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2555ก) จึงเป็นอีกวิธีในการควบคุมปริมาณเกลือที่ระเหยขึ้นมาสะสมบริเวณหน้าดิน

2) วิธีทางเคมี

การแก้ไขปัญหาดินเค็มด้วยวิธีทางเคมี เป็นการทำให้ปริมาณโซเดียมในดินลดลง ด้วยการเติมไอออนประจุบวก 2 เช่น แคลเซียมในรูปยิปซัมหรือแคลเซียมคลอไรด์ โดยทำให้แคลเซียมเข้าไปแทนที่โซเดียมในส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ของดิน นอกจากนี้ ยังสามารถเติมซัลเฟอร์หรือกรดซัลฟูริก เพื่อปรับปรุงดินเค็มได้อีกด้วย (Provin & Pitt, 2001; Hanay et al., 2004; Rasool et al., 2013; Chaganti et al., 2015; Machado & Serralheiro, 2017) ซึ่งสำหรับการแก้ไขปัญหาดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ส่วนใหญ่ดินค่อนข้างเป็นทรายจึงเป็นการใส่ปุ๋ยเคมีที่มีทั้งไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม หากแต่การใช้ปุ๋ยเคมีจะเร่งอัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุให้สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของดินเสื่อมลง โดยดินจะอุ้มน้ำลดลง หน้าดินแข็ง อากาศและน้ำไม่สามารถผ่านดินได้ ทำให้การเจริญเติบโตของพืชต่ำลง รวมถึง ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในดินอีกด้วย

3) วิธีทางชีวภาพ

การใช้อินทรีย์วัตถุปรับปรุงดินเค็มเป็นวิธีทางชีวภาพในการปรับปรุงสมบัติของดินเค็มที่ได้ผลดีและเกษตรกรสามารถดำเนินการได้ง่าย มีวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก (Chen, 2006;

Rasool et al., 2013; ทวีวงศ์ ศรีบุรี & เสาวนีย์ วิจิตรโกสม, 2559) โดยสามารถใช้อินทรีย์วัตถุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น และมีราคาถูก เช่น ชีวมวล ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก ปุ๋ยพืชสด แกลบ รวมถึง ถ่านชีวภาพ (ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2555ก) การเติมอินทรีย์วัตถุในดินเค็ม จะช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน โดยทำให้อนุภาคดินเล็ก ๆ รวมตัวกัน เพิ่มความเสถียรของเม็ดดินในช่องว่างในดิน ลดความหนาแน่นของดิน มีช่องว่างสำหรับการไหลเวียนของน้ำ ทำให้เกลือบนผิวดินถูกชะล้างลงไปตามล่างได้ (Tejada et al., 2006; Lakhdar et al., 2009; Saifullah et al., 2018) อีกทั้งในส่วนของการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดิน อินทรีย์วัตถุจะเร่งให้เกิดการชะล้างโซเดียม และเพิ่มค่า CEC แต่ในบริเวณพื้นผิวที่แลกเปลี่ยนได้จะมี Ca^{2+} Mg^{2+} และ K^+ ในขณะที่ Na^+ ไม่ได้ถูกจับและถูกชะล้างออกมาทำให้ค่า ESP ลดลง (Walker & Bernal, 2008)

2.1.3 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

กรมการข้าว ได้รวบรวมพันธุ์ข้าวพื้นเมืองทั่วประเทศและทำการปลูกคัดเลือกพันธุ์ข้าวด้วยวิธีคัดสายพันธุ์บริสุทธิ์ ซึ่งจากการปลูกทดลองพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิในแต่ละปี จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2493 - 2494 กรมการข้าวจึงได้ทำการคัดเลือกพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวไวแสงทนแล้งและทนเค็มได้ดี และในวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2502 คณะกรรมการพิจารณารับรองสายพันธุ์และส่งเสริมให้เกษตรกรในประเทศปลูก (กรมการข้าว, 2553)

2.1.3.1 ลักษณะทั่วไปของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 หรือในทางการค้าเรียกว่า ข้าวหอมมะลิ เป็นที่นิยมและต้องการของตลาดเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นข้าวที่มีลักษณะเด่น คือ เมล็ดข้าวสารมีรูปร่างเรียวยาว เมล็ดใส ท้องไข่น้อย คุณภาพการขัดสีดี ข้าวสุกจะมีกลิ่นหอมที่เป็นเอกลักษณ์และมีความนุ่มเหนียว

ข้าวขาวดอกมะลิเป็นข้าวเจ้าไวต่อช่วงแสงอย่างอ่อน ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวสั้น ทนต่อสภาพดินเปรี้ยวและดินเค็มได้ดี ทนแล้งได้ดีพอสมควร แต่ไม่ต้านทานต่อโรคและแมลงศัตรูข้าว ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ปลูกให้ผลดีในฤดูนาปี พื้นที่ที่เหมาะสมแก่การปลูก ได้แก่ พื้นที่นาข้าว นาชลประทานในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือของประเทศไทย (กรมการข้าว, 2553; ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2555ข)

1) ลักษณะทางกายภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ลักษณะต้นข้าวมีความสูงประมาณ 140-150 เซนติเมตร ความยาวจากคอรวงถึงปลายรวง เฉลี่ย 33 เซนติเมตร กอตั้ง ปล้องสีเหลืองอ่อน กาบใบและใบสีเขียว มีขนบนใบ ปลายใบตกร ลิ่นใบสีเขียวรูปร่างแหลมมี 2 ยอด หูใบและข้อต่อใบสีเขียวอ่อน

ลักษณะเมล็ดข้าวเปลือกสีฟาง เมล็ดเรียวยาว ดังรูปที่ 2-7 ก้นงอน ปลายยอดดอก กลีบรองดอก และยอดเกสรตัวเมียมีสีเขียว ต้นข้าวและรวงข้าวแน่นแข็งปานกลาง คอรวงยาว ใบธงเอนปานกลาง เปลือกเมล็ดและยอดเมล็ดสีฟาง มีขนสั้นบนเปลือกเมล็ด กลีบรองดอกสั้น น้ำหนักข้าวเปลือก 1,000 เมล็ด ประมาณ 27.9 กรัม เมล็ดข้าวเปลือกมีความยาวประมาณ 10.4 มิลลิเมตร ความกว้างประมาณ 2.6 มิลลิเมตร และความหนา 2.0 มิลลิเมตร เมล็ดข้าวกล้องรูปร่างเรียวยาว มีความยาวประมาณ 7.4 มิลลิเมตร ความกว้าง 2.1 มิลลิเมตร หนา 1.7 มิลลิเมตร ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 8 สัปดาห์ (กรมการข้าว, 2553)



รูปที่ 2-7 เมล็ดข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

ที่มา: กรมการข้าว (2553)

2) ลักษณะทางเคมีของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105

ในเมล็ดข้าวทั่วไปจะประกอบด้วยแป้ง 2 ชนิด คือ อะไมโลเพคติน (amylopectin) และแป้งอะไมโลส (amylose) ซึ่งอัตราส่วนระหว่างอะไมโลเพคตินและแป้งอะไมโลส เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้ข้าวสุกมีสมบัติที่แตกต่างกัน โดยปริมาณอะไมโลสที่มากจะทำให้ข้าวสุกมีความเหนียวลดลงและทำให้ข้าวแข็งมากขึ้น ข้าวขาวดอกมะลิ 105 จัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณร้อยละ 15-16 ข้าวสุกที่หุงได้จะมีลักษณะที่นุ่มเหนียว

กลิ่นหอมของข้าวเกิดจากสารระเหย 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) เป็นสารประเภท branched chain hydrocarbons ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความหอมของข้าว ซึ่งในข้าวหอมมีสาร 2AP มากกว่าข้าวทั่วไป โดยในข้าวสารหอม 1 กรัม มีปริมาณ 2AP ประมาณ 0.04-0.09 ไมโครกรัม (กรมการข้าว, 2553) โดยข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยเคมีมีปริมาณสาร 2AP เท่ากับ 4.04 และ 3.96 ppm ตามลำดับ (อภิวัฒน์ อินทร์นิก และคณะ, 2559)

2.1.3.2 การเจริญเติบโตของข้าว

การเจริญเติบโตของต้นข้าว แบ่งออกเป็น 3 ระยะ (เบนิตโต เอส เวอการา, 2526; อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547; วัชรินทร์ ชื่นสุวรรณ, 2554) ดังนี้

1) การเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ (vegetative growth) เริ่มตั้งแต่ต้นข้าวออกจากเมล็ดจนถึงวันที่เริ่มสร้างรวงอ่อนหรือช่อดอก ซึ่งระยะเจริญเติบโตทางใบและลำต้นของแต่ละพันธุ์ข้าวเป็นตัวกำหนดให้พันธุ์ข้าวมีอายุแตกต่างกัน โดยต้นข้าวจะสร้างราก ลำต้น ใบ และการแตกกอ (รูปที่ 2-8) เพื่อทำการสะสมอาหารไว้สำหรับการเจริญเติบโตช่วงระยะการสืบพันธุ์ โดยการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ มี 2 ระยะ (รูปที่ 2-9) ดังนี้

1.1) ระยะต้นกล้า (seedling stage) เป็นระยะจากข้าวงอกจนกระทั่งถึงข้าวแตกกอ ใช้ระยะเวลาประมาณ 20 วัน สิ้นสุดระยะนี้ต้นข้าวจะมีใบประมาณ 5-6 ใบ

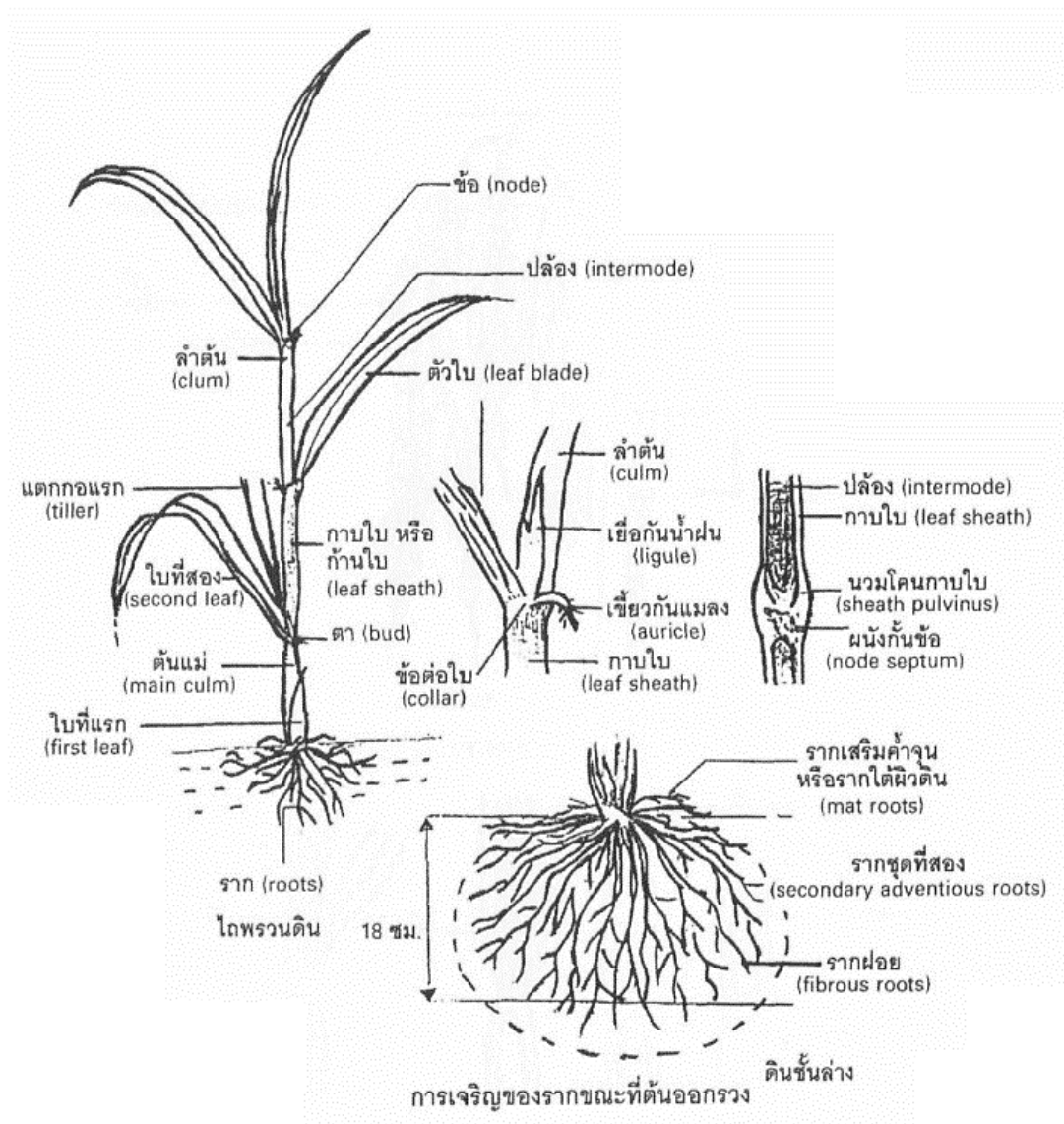
1.2) ระยะแตกกอ (tillering stage) เป็นระยะจากข้าวเริ่มแตกกอจนถึงข้าวเริ่มสร้างช่อดอกอ่อน ใช้ระยะเวลาประมาณ 30-50 วันหลังจากระยะต้นกล้า ขึ้นอยู่กับการตอบสนองต่อช่วงแสงของพันธุ์ข้าว

2) การเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ (reproductive growth) เริ่มตั้งแต่วันที่ข้าวเริ่มสร้างช่อดอกอ่อนจนถึงวันที่รวงเริ่มโผล่ออกจากใบธง โดยจะใช้ระยะเวลาช่วงนี้ประมาณ 30-35 วัน โดยการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ มี 3 ระยะ ดังนี้

2.1) ระยะเริ่มสร้างช่อรวงอ่อน (panicle initiation) เป็นระยะหลังจากแตกกอเต็มที่แล้ว ระยะนี้ต้นข้าวจะเปลี่ยนจากต้นที่มีลักษณะแบนเป็นต้นกลม และจะมีการยืดปล้อง (stem elongation) ในอัตราเร็ว เมื่อผ่าลำต้นดูจะเห็นจุดกำเนิดช่อดอก (panicle primordium) ลักษณะเป็นสามเหลี่ยมมีสีขาวปุย ๆ และจะเจริญเติบโตเรื่อย ๆ เป็นช่อดอกที่มีดอก (spikelets)

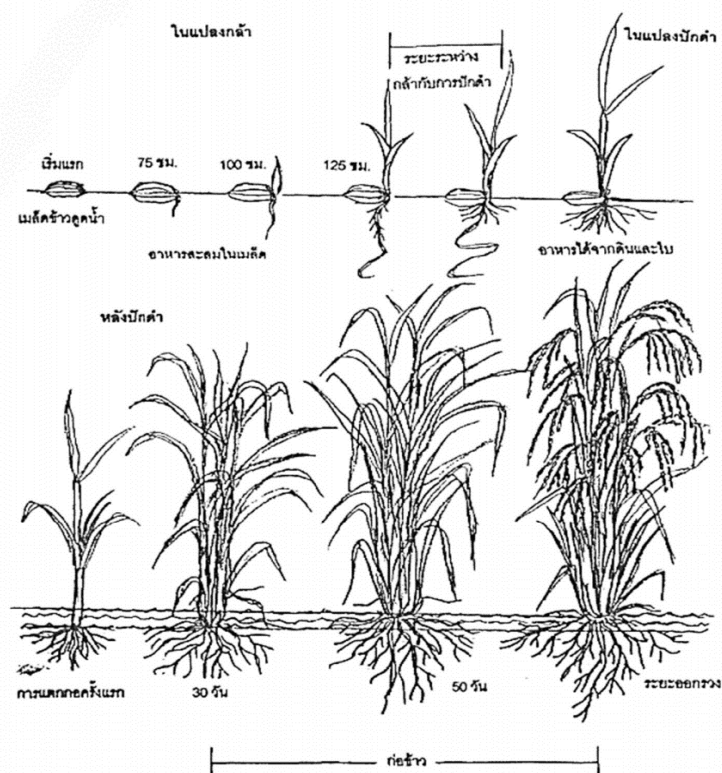
2.2) ระยะตั้งท้อง (booting stage) เป็นระยะที่ช่อดอกอ่อนของข้าวขยายตัวใหญ่ขึ้นจนเป็นช่อดอกที่สมบูรณ์ ตรงกาบใบธงจะอ้วนพองขึ้น

2.3) ระยะออกดอกและผสมเกสร ระยะที่ช่อดอกโผล่จากกาบใบ (heading) ดอกข้าวบาน (flowering) และผสมเกสร (fertilization) ซึ่งจะเกิดพร้อมกันหรือเหลื่อมกันบางเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2-8 ลักษณะและส่วนประกอบของต้นข้าว

ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)



รูปที่ 2-9 การเจริญเติบโตทางลำต้นและใบของต้นข้าว

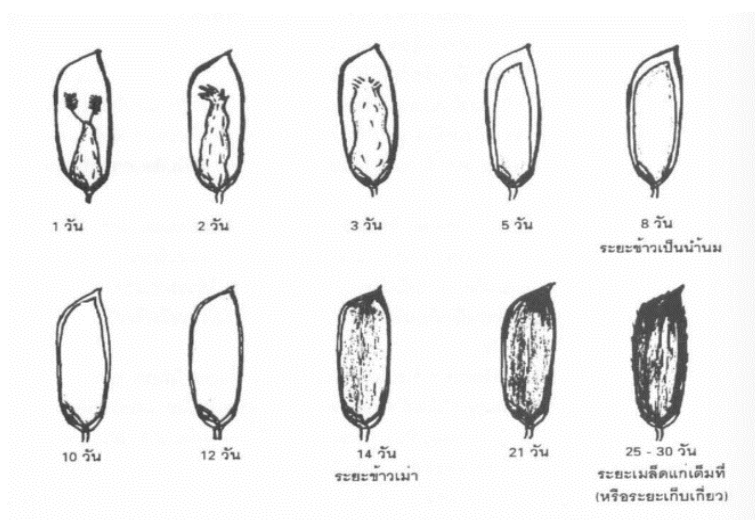
ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)

3) การพัฒนาของดอกข้าวเป็นเมล็ด (grain development) คือระยะภายหลังจากผสมเกสร ซึ่งรังไข่ที่ได้รับการผสมจะเจริญเติบโต อาหารที่ได้รับการสังเคราะห์แสงจะถูกสะสมในเมล็ด ใช้เวลาการพัฒนาการของเมล็ดทั้งหมดประมาณ 25-30 วัน โดยแบ่งออกเป็น 3 ระยะ (รูปที่ 2-10) ดังนี้

3.1) ระยะข้าวเป็นน้ำนม (milk stage) ใช้ระยะเวลาประมาณ 7 วัน หลังการผสมระหว่างหน่วยสืบพันธุ์ ลักษณะภายในของเมล็ดข้าวเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำนม เปลือกของเมล็ดมีสีเขียว

3.2) ระยะข้าวเม่า หรือเป็นโด (dough stage) ใช้ระยะเวลาประมาณ 14-21 วันหลังการผสมระหว่างหน่วยสืบพันธุ์ ลักษณะภายในของเมล็ดข้าวจะมีน้ำน้อยลง เหนียวและแข็งขึ้น เปลือกของเมล็ดมีสีเขียวอมน้ำตาล เปลือกใหญ่และเปลือกเล็กจะเริ่มแข็ง

3.3) ระยะเมล็ดแก่เต็มที่ หรือระยะเก็บเกี่ยว (maturation stage) ใช้ระยะเวลาประมาณ 30 วันหลังการผสมระหว่างหน่วยสืบพันธุ์ เมล็ดมีโครงสร้างสมบูรณ์เต็มที่ ลักษณะภายในของเมล็ดข้าวจะมีสีขาวและแข็ง ส่วนใหญ่จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลทอง



รูปที่ 2-10 การพัฒนาของดอกข้าวเป็นเมล็ด

ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)

2.1.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าว

อิทธิพลของสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าว มีปัจจัยภายนอกที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1) ช่วงแสง

ความยาวของช่วงแสงของแต่ละพื้นที่ ถูกกำหนดโดยตำแหน่งเส้นรุ้งบนพื้นผิวโลก และมีการเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ด้วยช่วงกลางวันที่ยาวในฤดูร้อน และช่วงกลางวันสั้นในฤดูหนาว ซึ่งสำหรับพื้นที่นาในประเทศไทยส่วนใหญ่มีวันยาวที่สุดประมาณ 13 ชั่วโมง ในปลายเดือนมิถุนายน และวันสั้นที่สุดประมาณ 11 ชั่วโมง ในปลายเดือนธันวาคม (เบญจวรรณ อุทิศเกษม, 2561) ข้าวต้องการช่วงแสงที่แตกต่างกันไปตามอายุของการเจริญเติบโต โดยการบังแสงในระยะเวลาเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์จะทำให้จำนวนดอกต่อพื้นที่ลดลง ส่งผลให้ผลผลิตลดลง เช่นเดียวกันหากบังแสงในระยะเวลาพัฒนาของดอกข้าวเป็นเมล็ดจะทำให้เมล็ดลีบ ส่งผลให้ผลผลิตลดลงเช่นกัน

และเนื่องจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นพันธุ์ข้าวที่ไวต่อช่วงแสง โดยมีช่วงแสงวิกฤตเท่ากับ 11.52 ชั่วโมง (นันทิยา คำบุญเรือง, 2554) ปัจจัยเรื่องของช่วงแสงจึงเป็นอิทธิพลหลักที่จะส่งผลต่อการออกดอกของข้าว

2) อุณหภูมิ

พืชแต่ละชนิดต้องการอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตต่างกัน อีกทั้ง ในระยะการเจริญเติบโตที่ต่างกันพืชก็ต้องการอุณหภูมิในการเจริญเติบโตต่างกัน ซึ่งอุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราการเจริญเติบโตและพัฒนาการของต้นข้าวอย่างมาก โดยหากอุณหภูมิลดลงหรือสูงเกินไป จะทำให้ละอองเกสรเพศผู้ไม่สมบูรณ์ การผสมเกสรล้มเหลว ทำให้เมล็ดข้าวลีบ (นันทิยา คำบุญเรือง, 2554; วิชุดา กัลยาศิริ, 2556)

3) น้ำ

การตอบสนองต่อความต้องการน้ำ ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวแต่ละชนิดและระยะการเจริญเติบโตของข้าว โดยหากต้นข้าวอยู่ในสภาวะขาดน้ำ ในระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ จะทำให้ผลผลิตลดลงประมาณร้อยละ 17 หรือขาดน้ำในระยะการสร้างรวงอ่อนจนถึงรวงแก่ จะทำให้ผลผลิตลดลงร้อยละ 30 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลกระทบต่อการขาดน้ำในระยะการสร้างรวงส่งผลกระทบมากกว่าระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ โดยทำให้การสร้างรวงลดลง และมีโอกาสเกิดเมล็ดลีบมากขึ้น (Liu et al., 2006)

4) ปริมาณธาตุอาหาร

พืชมีความต้องการใช้ธาตุอาหารในปริมาณที่มากน้อยต่างกัน ซึ่งสามารถจัดแบ่งหมวดหมู่ของธาตุอาหารตามความต้องการของพืช (กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร, 2543; เบลูจวรรณ ฤกษ์เกษม, 2561) ได้แก่

4.1) มหธาตุ (macronutrients) เป็นกลุ่มธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณที่สูง และพืชมักจะแสดงอาการขาดธาตุกลุ่มนี้เป็นอันดับแรก โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ธาตุอาหารหลัก (primary element) หรือธาตุปุ๋ย (fertilizer element) ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) และอีกกลุ่มเป็นธาตุที่พืชต้องการใช้ปริมาณมากรองลงมาคือ ธาตุอาหารรอง (secondary element) ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และกำมะถัน (S)

4.2) จุลธาตุ (micronutrients) เป็นกลุ่มธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณน้อย โดยปกติจุลธาตุมีอยู่ในดินปริมาณน้อย (ระดับ ppm) แต่เนื่องจากพืชมีความต้องการใช้ในปริมาณน้อย ปัญหาการขาดธาตุดังกล่าวจึงไม่ค่อยมี ได้แก่ เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) โบรอน (B) โมลิบดีนัม (Mo) คลอรีน (Cl) และนิกเกิล (Ni)

นอกจากนี้ ยังมีธาตุเสริมประโยชน์ (beneficial mineral element) หมายถึง ธาตุที่ช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช แต่มีในธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช โดยเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชบางชนิด ได้แก่ ซิลิกอน (Si) โซเดียม (Na) โคบอลต์ (Co) และอะลูมิเนียม (Al) เป็นต้น

5) ลม

ต้นข้าวจะเจริญเติบโตได้ดีขึ้น หากมีลมที่พัดอ่อนๆ อยู่ตลอดเวลา (ความเร็วลมประมาณ 0.75-2.25 ซม./วินาที) ซึ่งจะช่วยให้มีการถ่ายเทก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี ทำให้พืชสามารถสังเคราะห์แสงได้มากขึ้น แต่หากลมพัดแรงจะทำให้ต้นข้าวหักล้ม ผลผลิตเกิดความเสียหาย (วัชรินทร์ ชื่นสุวรรณ, 2554; วิชิตา กัลยาศิริ, 2556)

2.1.3.4 การปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105

1) การเตรียมดินเพื่อปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105

การปลูกข้าวขาวดอกมะลิ สามารถปลูกได้ทั้งแบบนาหว่าน นาหว่านน้ำ ตม และนาดำ โดยการเตรียมดินสำหรับปลูกข้าวนาดำ ต้องไถตะกั้งไว้ประมาณ 15 วัน จึงไถแปรอีกครั้ง เพื่อกำจัดต้นอ่อนของวัชพืชที่ขึ้นมาใหม่ แล้วคราดดินเพื่อดันวัชพืชให้จมอยู่ใต้โคลน ในขณะที่เดียวกันเกลี่ยโคลนปรับระดับหน้าดินไปด้วย จะทำให้ระดับน้ำในแปลงนาท่วมคลุมวัชพืชได้อย่างทั่วถึง (ศูนย์ศึกษาการพัฒนากฎพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2555ข)

2) วิธีการปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105

วิธีการปลูกข้าวจะต้องคำนึงถึงช่วงเวลาที่เหมาะสม ปริมาณและการกระจายของน้ำฝน ซึ่งวิธีปักดำและนาหว่านน้ำตมแผนใหม่ เหมาะกับการปลูกในเขตชลประทานที่ไม่มีปัญหาเรื่องน้ำ ส่วนวิธีหว่านข้าวแห้งและนaylor เหมาะสำหรับการปลูกในพื้นที่ที่มีปริมาณฝนตกน้อยหรือในพื้นที่ที่ฝนตกล่าช้า (กรมการข้าว, 2553; ศูนย์ศึกษาการพัฒนากฎพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2555ข)

2.1) การเตรียมเมล็ดพันธุ์ โดยคัดเลือกเมล็ดพันธุ์ให้บริสุทธิ์ มีร้อยละการงอร้อยละ 80 ขึ้นไป และไม่ให้มีเมล็ดพันธุ์อื่นหรือสิ่งเจือปน เช่น เมล็ดลีบ เศษวัชพืช เป็นต้น สำหรับการหว่านข้าววงอก นำเมล็ดพันธุ์ที่คัดแล้วใส่ถุงผ้าดิบที่น้ำและอากาศสามารถซึมผ่านได้ แช่ลงในน้ำสะอาดประมาณ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปไว้ในที่ที่ระบายอากาศได้ดีโดยใช้กระสอบป่านหรือผ้าอ้อมน้ำคลุม จากนั้นรดน้ำให้ชุ่มเสมอประมาณ 48 ชั่วโมง แล้วนำไปหว่าน

2.2) การหว่านเมล็ดพันธุ์ข้าว สำหรับวิธีหว่านน้ำตม คือเลือกเมล็ดที่งอกพอเหมาะ รากยาวประมาณ 1-2 มิลลิเมตร และควรหว่านเมล็ดในช่วงตอนบ่ายหรือเย็น เนื่องจากข้าวที่หว่านจะได้ไม่โดนความร้อนนานเกินไปในช่วงระยะแรก

2.3) การปักกล้า สำหรับวิธีการปักดำ ควรเลือกกล้าที่มีอายุเหมาะสม คือ 25-30 วัน การปักดำ 3-5 ต้นต่อจับ ควรปักลึกประมาณ 2-3 เซนติเมตร และระดับน้ำขณะปักดำ ควรอยู่ที่ 5-10 เซนติเมตร

3) การใส่ปุ๋ย

การใส่ปุ๋ยเคมี สำหรับนาดำ ควรแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 ใส่ก่อนปักดำไม่เกิน 1 วัน หรือหลังปักดำ ประมาณ 10-20 วัน โดยใส่ปุ๋ยสูตร 16-20-0, 20-20-0, 28-22-0 หรือ 18-46-0 ในดินเหนียว และสูตร 16-16-8 ในดินทราย อัตรา 20-25 กิโลกรัมต่อไร่ และการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 ทำการใส่ก่อนข้าวออกดอกประมาณ 30 วัน โดยใช้สูตร 21-0-0 ในอัตรา 10-20 กิโลกรัมต่อไร่ หรือปุ๋ยยูเรียสูตร 46-0-0 ในอัตรา 5-10 กิโลกรัมต่อไร่ (ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2555ข)

4) การกำจัดวัชพืชและการดูแลแปลง

วัชพืชในนาข้าวมี 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดใบแคบ และชนิดใบกว้าง ซึ่งรวมทั้งพืชประเภทเฟิร์น เช่น ผักแว่น และกก เช่น กกทราย เป็นต้น โดยสารกำจัดวัชพืชที่กรมการข้าวแนะนำให้ใช้ในกรณีที่ต้องใช้สารกำจัดวัชพืช ได้แก่ เพอร์ทิลาลอร์ โดยให้ก่อนวัชพืชงอก (0-4 วันหลังหว่านข้าว) หรือ บิวทาลอร์ ซึ่งให้ก่อนวัชพืชงอก (4-6 วันหลังหว่านข้าว) (กรมการข้าว, 2553; ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2555ข)

ในส่วนของสัตว์ที่เป็นศัตรูข้าวที่สำคัญ คือ หอยเชอรี่ ซึ่งเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้เร็ว วิธีการป้องกันและกำจัดหอยเชอรี่ที่ดีควรเป็นวิธีแบบผสมผสาน เช่น ใช้ตาข่ายไนลอนชนิดตาถี่เพื่อดักจับหอยเชอรี่ขณะสูบน้ำเข้านา การปล่อยฝูงเป็ดเข้าไปเพื่อกินหอยเชอรี่ หรือการฉีดพ่นสารเคมีเพื่อกำจัดหอยเชอรี่ก่อนหว่านข้าว เป็นต้น (วิไล ปาละวิสุทธิ์, 2549)

2.1.3.5 การปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์

การเตรียมดินสำหรับการปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์ เริ่มจากการเตรียมวงบ่อซีเมนต์โดยเทปูนปิดก้นบ่อให้สนิทเพื่อป้องกันการรั่วซึม จากนั้น ใส่ดินลงไปให้สูงประมาณ 20-30 เซนติเมตร และผสมปุ๋ยอินทรีย์หรือมูลวัวกับดินประมาณ 1 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ จากนั้น ใส่น้ำให้ท่วมดิน และแช่น้ำทิ้งไว้ 2 คืน โดยก่อนการเริ่มปักดำต้นกล้า ควรย่ำดินให้เสมอก่อน

เมื่อปักดำได้ 2-3 วัน ให้ใส่ปุ๋ยในบ่อสูง 2 นิ้ว แล้วรักษาระดับน้ำไว้ตลอด หลังจากปักดำได้ 50 วัน จะเป็นช่วงระยะข้าวตั้งท้องให้รดน้ำเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นให้น้ำต่อจนถึงช่วงก่อนเก็บเกี่ยว 7 วัน จึงงดให้น้ำอีกครั้ง นอกจากนี้ หลังจากปักดำได้ 7 วัน ให้ปุ๋ยอินทรีย์ 0.5 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ และให้ปุ๋ยอินทรีย์อีกครั้ง ประมาณ 0.5 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ เมื่อต้นข้าวอายุ 20 วัน (สำนักงานพิพิธภัณฑสถานเกษตรเฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว, 2556)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ถ่านชีวภาพ ถูกนำมาใช้ประโยชน์ทั้งเพื่อวัตถุประสงค์ทางการเกษตรและด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพดินและเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร การกักเก็บคาร์บอนและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคเกษตรกรรม รวมถึง การดูดซับสารเคมีในดิน โดยมีงานวิจัยการใช้ถ่านชีวภาพทั้งในวัตถุประสงค์ทางการเกษตรกรรมและงานสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาครั้งนี้เป็นจำนวนมาก สรุปพอสังเขปได้ ดังนี้

จากงานวิจัยที่ศึกษาผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติของดิน พบว่า การผสมถ่านชีวภาพลงในดินที่มีเนื้อดินในลักษณะต่าง ๆ จะทำให้ค่า pH ค่า CEC ค่า EC ปริมาณคาร์บอน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช และอัตราการซึมน้ำของดินเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ความหนาแน่นของดินลดลง และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของปุ๋ยเคมีหรือปุ๋ยคอกในการทำเกษตรกรรมได้ (Novak et al., 2009; Lashari et al., 2013; วิชุตตา กัลยาศิริ, 2556; มนตรี วันตาแสง, 2560) โดยถ่านชีวภาพสามารถปรับปรุงดินที่มีความเป็นกรดได้ (Cornelissen et al., 2018) แต่อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาของ Luo และคณะ (2017) ชี้ให้เห็นว่า เมื่อใส่ถ่านชีวภาพในอัตราส่วนที่มากเกินไปลงในดินเค็มซึ่งมีความเป็นด่าง จะส่งผลให้ดินมีความเค็มเพิ่มขึ้น และทำให้การเจริญเติบโตของต้นโสนลดลง

ดินเค็มมักมีธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมต่ำ (Lakhdar et al., 2009; Akhtar et al., 2015) ในการปรับปรุงคุณภาพดินเค็มที่นอกจากจะต้องลดปริมาณความเค็มของดินแล้ว จึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณธาตุอาหารและความอุดมสมบูรณ์ของดินด้วย ซึ่งถึงแม้ว่าการใส่ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์เพื่อเพิ่มธาตุอาหารที่จำเป็นในดิน จะเป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม การใช้ปุ๋ยเคมีจำเป็นต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในเรื่องปุ๋ยเคมี มิเช่นนั้น อาจทำให้เกิดปัญหาความเสื่อมโทรมของดิน และสูญเสียค่าใช้จ่ายโดยเปล่าประโยชน์

ในการปรับปรุงคุณภาพดินเค็มสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งวิธีที่เป็นที่ยอมรับ ได้แก่ การใส่สารเคมีที่มีประจุบวก 2 เพื่อเข้าไปแทนที่โซเดียมในส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ของดินและทำให้โซเดียมในดินลดลง

เช่น ยิปซัม แคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น (Provin & Pitt, 2001; Machado & Serralheiro, 2017) นอกจากนี้ การใส่อินทรีย์วัตถุเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินเค็มยังสามารถดำเนินการได้ ซึ่งอินทรีย์วัตถุ ได้แก่ ชีวมวล ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสด แกลบ และถ่านชีวภาพ โดยถ่านชีวภาพ ซึ่งผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร สามารถเป็นแหล่งธาตุอาหารให้แก่พืชได้โดยตรง จากงานวิจัยอื่น ๆ ก่อนหน้าพบว่า ในดินเค็มที่มีการเติมถ่านชีวภาพ ทำให้ปริมาณของธาตุ Ca, Mg, K, N และ P เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Lashari et al., 2013; Akhtar et al., 2015) ทั้งนี้ จากการทบทวนงานวิจัยหลายชิ้นในการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเค็ม สามารถสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพอสังเขปได้ ดังนี้

จากวิจัยของ Chaganti และคณะ (2015) ทำการเปรียบเทียบผลของการเติมยิปซัมและอินทรีย์วัตถุที่มีต่อดินเค็มโซดิก ที่มีค่า SAR เท่ากับ 31.8 mmol l⁻¹ ค่า EC_e เท่ากับ 23.3 dS m⁻¹ และค่า ESP เท่ากับ ร้อยละ 24.7 บนพื้นที่ San Joaquin valley ในแคลิฟอร์เนีย พบว่า การใส่ปุ๋ยอินทรีย์และถ่านชีวภาพจะช่วยในการแลกเปลี่ยนธาตุประจุบวกสอง (Ca²⁺ และ Mg²⁺) กับโซเดียมในดิน ทำให้โซเดียมถูกชะล้างไป ปรับปรุงโครงสร้างของดินเค็มโซดิกให้ดีขึ้น อีกทั้ง การใส่ทั้งปุ๋ยอินทรีย์และถ่านชีวภาพในอัตราร้อยละ 5 สามารถลดความเค็มและความแห้งแล้งของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใส่ยิปซัมซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิมที่ใช้แก้ปัญหาดินเค็ม สอดคล้องกับการศึกษาของ Akhtar และคณะ (2015) ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของข้าวสาลีเมื่อเติมถ่านชีวภาพในอัตราร้อยละ 5 ลงในดินที่ระดับความเค็มแตกต่างกัน โดยมีค่า EC_e เท่ากับ 2.3, 7.2 และ 10.9 dS m⁻¹ พบว่าการใส่ถ่านชีวภาพสามารถลดการดูดซึมโซเดียมของข้าวสาลีได้ โดยโซเดียมถูกชะล้างและมีปริมาณน้อยลงหลังสัปดาห์ที่ 2 และ 3 ของการปลูก ในขณะที่ ปริมาณของโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมในดินเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่เติมและไม่ได้เติมถ่านชีวภาพ พบว่า ผลผลิตของเมล็ดข้าวสาลีของชุดที่ใส่ถ่านชีวภาพเท่ากับ 3.7 กรัม ซึ่งมากกว่าผลผลิตเมล็ดข้าวสาลีชุดที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพที่เท่ากับ 2.3 กรัม อย่างมีนัยสำคัญ

Mahmoodabadi และคณะ (2013) ศึกษาการปรับปรุงดินเค็มโซดิกจากพื้นที่ Kerman city ประเทศอิหร่าน ซึ่งมีค่า SAR เท่ากับ 32.2 และค่า EC เท่ากับ 19.8 dS m⁻¹ ด้วยวัสดุปรับปรุงดินต่าง ๆ ได้แก่ ปุ๋ยมูลวัวในอัตรา 50 g kg⁻¹ เศษเปลือกถั่วพิสตาชิโอในอัตรา 50 g kg⁻¹ และยิปซัมในอัตรา 5.2 g kg⁻¹ โดยทำการศึกษาภายในห้องทดลอง 120 วัน ด้วย soil column ยาว 30 เซนติเมตร ผลการศึกษาพบว่า ค่า EC และค่า SAR ของดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญในทุกตัวรับการทดลอง โดยยิปซัมส่งผลให้ค่า SAR ของดินต่ำที่สุด ยิ่งไปกว่านั้น ยังพบว่ากรดซัลฟิวริกที่อยู่ในน้ำสำหรับชลประทาน จะยิ่งทำให้ค่า SAR ของดินลดต่ำลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Murtaza และคณะ (2009) ทำการศึกษาการปรับปรุงดินเค็มโซดิกบนพื้นที่บริเวณ Indus Basin ประเทศปากีสถาน ซึ่งมีค่า EC และ SAR เท่ากับ 39.50 dS m⁻¹ และ 258 (mmol l⁻¹)^{1/2} ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบ

ระหว่างการใส่ปุ๋ยซั่มและปุ๋ยคอก ในอัตรา ร้อยละ 70 และ 25 Mg ha⁻¹ ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า วัสดุปรับปรุงดินทั้งสองทำให้ความหนาแน่นรวมและค่า SAR ของดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้การใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียวจะลดค่า SAR ได้น้อยกว่าการใส่ปุ๋ยซั่ม แต่ปุ๋ยคอกสามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินได้ดีกว่า และเพิ่มค่า CEC ให้กับดิน ได้มากกว่าปุ๋ยซั่ม

Walker และ Bernal (2005) ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของดินเค็มด้วยมูลไก่และปุ๋ยหมักของกากเปลือกมะกอกและฝ้าย ในอัตรา 29.7 และ 20.9 g kg⁻¹ ตามลำดับ โดยศึกษาดินเค็มจากพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณวาเลนเซีย ประเทศสเปน ซึ่งมีค่า EC เท่ากับ 1.51 dS m⁻¹ และค่า ESP เท่ากับ 0.29 พบว่า ทั้งสองได้รับการทดลองเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมและแมกนีเซียมให้กับดิน และลดปริมาณแคลเซียมในดินลง แต่วัสดุปรับปรุงดินทั้งสองไม่ได้เปลี่ยนแปลงค่า ESP อย่างมีนัยสำคัญ

พรรณี หงส์น้อย และ ยุทธชัย อนุรักติพันธุ์ (2542) ศึกษาวัสดุปรับปรุงดินที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงดินเค็มชุดกำแพงแสนเพื่อปลูกแคนตาลูป ซึ่งดินเค็มมีค่า EC เท่ากับ 11.4 dS m⁻¹ พบว่าการใช้ปุ๋ยหมักและแกลบทำให้ปริมาณและคุณภาพของผลผลิตดีกว่าใช้แกลบและกากอ้อย อีกทั้งผลผลิตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราของวัสดุปรับปรุงดินเพิ่มขึ้น โดยการใส่แกลบในอัตรา 3 ตันต่อไร่ ทำให้ค่า EC ของดินต่ำสุด (7.40 dS m⁻¹) และสามารถสรุปได้ว่า วัสดุปรับปรุงดินที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและความอุดมสมบูรณ์ของดิน ได้แก่ ปุ๋ยหมัก ขี้เถ้าแกลบ และกากอ้อย ในขณะที่แกลบปรับปรุงแค่เพียงสมบัติทางกายภาพของดิน ไม่ได้เป็นแหล่งธาตุอาหารให้แก่พืช

Oo และคณะ (2015) ศึกษาการปรับปรุงดินเค็มด้วยกากของเสียจากโรงงานมันสำปะหลัง ปุ๋ยมูลไส้เดือน และไส้เดือน โดยเก็บตัวอย่างดินจากอำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม โดยมีค่า EC เท่ากับ 4.26 dS m⁻¹ ผลการศึกษาพบว่าปุ๋ยมูลไส้เดือนในอัตรา 5 Mg ha⁻¹ และไส้เดือน (20 ตัว) สามารถลดค่า EC ของดินได้ดีที่สุดเท่ากับ 1.86 dS m⁻¹

สรรพสิทธิ์ แก้วเฮ้า (2557) ทำการปรับปรุงคุณภาพดินเค็มโดยเปรียบเทียบระหว่างการใส่ปุ๋ยพืชสดจากโสนอัฟริกันและถั่วเขียว โดยทำการศึกษาพื้นที่บริเวณอ่างเก็บน้ำหนองบ่อ อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม พบว่า ภายใน 3 เดือน ชุดที่ใส่ปุ๋ยพืชสดจากโสนอัฟริกันสามารถลดค่าความเค็มได้มากกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ (0.115 dS m⁻¹) ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะโสนอัฟริกันสลายตัวเร็ว เพิ่มธาตุอาหารให้แก่ดินได้ดีกว่า อีกทั้ง มีระบบรากหยั่งลึกจึงสามารถขนไซไปในระหว่างเม็ดดินได้ดีกว่า

นอกจากนั้น การศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรในงานวิจัยหลายชิ้นยังให้ผลการศึกษาที่สอดคล้องกันว่า ถ่านชีวภาพสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างมีนัยสำคัญ อาทิ Lashari และคณะ (2013) ศึกษาผลของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากมูลสัตว์ ผสมกับน้ำส้ม

คว้นไม้ที่มีต่อสมบัติของดินเค็มและผลผลิตของข้าวสาลี ที่ Central China Great Plain โดยทำการศึกษาในพื้นที่จริงเป็นระยะเวลา 2 ปี พบว่า ค่า pH ลดลงจาก 8.23 เป็น 7.69 ความเค็มของดินลดลงจาก 9.21 เป็น 5.63 g kg^{-1} และความหนาแน่นของดินลดลงจาก 1.30 เป็น 1.17 g cm^{-3} โดยผลผลิตของข้าวสาลีเพิ่มขึ้นภายในปีแรกอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตข้าวสาลีระหว่างพื้นที่ที่ไม่ได้มีการใส่และมีการใส่ถ่านชีวภาพซึ่งเท่ากับ 0.57 และ 6.61 t ha^{-1} ตามลำดับ ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารที่สำคัญต่อพืชในดิน

Wijitkosum and Kallayasiri (2015) ใช้ถ่านชีวภาพจากไม้เนื้ออ่อนและซังข้าวโพด ในการทดลองปลูกข้าวไร่พันธุ์เหลือง บนพื้นที่ดินเหนียวปนทราย ผลการศึกษาพบว่า การใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 1,600 กิโลกรัมต่อไร่ ให้ผลผลิตของข้าวเท่ากับ 629.25 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งสูงกว่าการปลูกข้าวโดยการใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียวซึ่งมีผลผลิตเท่ากับ 587.83 กิโลกรัมต่อไร่ โดยประเมินจากความสูงน้ำหนักราก การแตกกอ จำนวนรวงต่อพื้นที่ จำนวนเมล็ดต่อรวง เปอร์เซ็นต์เมล็ดดี และน้ำหนักราก 1,000 เมล็ดของข้าว และผลผลิตข้าวไร่เพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยในอัตรา 1,600 กิโลกรัมต่อไร่ โดยมีผลผลิตเท่ากับ 660.48 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Yooyen และคณะ (2015) ซึ่งใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระซิดในอัตรา 10, 20 และ 30 t ha^{-1} ในการปลูกถั่วเหลืองในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ซึ่งมีค่าอินทรียวัตถุเท่ากับร้อยละ 1.14 ผลพบว่า การเติมถ่านชีวภาพในอัตรา 30 t ha^{-1} ส่งผลให้การเจริญเติบโตของถั่วเหลืองซึ่งมีน้ำหนักราก (22.1 กรัม) ปริมาณฝักต่อต้น (44.1) และปริมาณผลผลิตของถั่วเหลือง (5.4 t ha^{-1}) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับแปลงที่ไม่ได้เติมถ่านชีวภาพซึ่งมีค่าเท่ากับ 20.0 กรัม, 33.3 ฝักต่อต้น และ 3.9 t ha^{-1} ตามลำดับ นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังช่วยเพิ่มความยาวราก มวลชีวภาพของราก และผลผลิตของข้าวโพดอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับแปลงปลูกข้าวโพดโดยการใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว (เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม, 2560)

ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของผลผลิตพืชและการเจริญเติบโตที่เพิ่มสูงขึ้นของพืชที่เพาะปลูกด้วยการใส่ถ่านชีวภาพ เป็นผลมาจากการที่ถ่านชีวภาพมีสมบัติเฉพาะตัวที่ช่วยปรับปรุงสมบัติของดิน ทั้งความพรุนของถ่านชีวภาพ การมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง การมีความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง จึงทำให้ดินมีสมบัติที่ดีขึ้น ดินมีสภาพที่เหมาะสมและเอื้อต่อการเจริญเติบโตของพืช ทั้งการปรับสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของดิน การเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน การปรับสภาพทางกายภาพของดิน การสร้างสภาพที่เอื้อต่อการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินและเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ดิน อีกทั้ง ถ่านชีวภาพยังมีธาตุอาหารในตัวเองมากพอ จึงเป็นเหตุผลให้ดินที่ใส่ถ่านชีวภาพจึงสามารถเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ (Lashari et al., 2013; Sriburi & Wijitkosum, 2016; วิชุต กัลยาศิริ, 2556; มนตรี วันตาแสง, 2560) แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ถ่าน

ชีวภาพจำเป็นต้องคำนึงถึงชนิดของวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพ ปริมาณถ่านชีวภาพที่ใช้ และระยะเวลาในการใช้ถ่านชีวภาพด้วย (Wijitkosum & Kallayasiri, 2015; Sriburi & Wijitkosum, 2016; Luo et al., 2017) โดย Hall และ Bell (2015) ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพและปุ๋ยหมักในการเพิ่มผลผลิตของถั่วลันเตา ข้าวสาลีและข้าวฟ่าง บนพื้นที่ดินทราย พบว่า ผลผลิตระหว่างแปลงที่ใช้ปุ๋ยหมักและถ่านชีวภาพไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และพืชที่ศึกษามีการตอบสนองต่างกันเมื่อถ่านชีวภาพต่างชนิดกัน เช่น การตอบสนองของถั่วลันเตาที่มีต่อถ่านชีวภาพมูลไก่ให้ผลผลิตมากกว่าแปลงชุดควบคุม 0.38 t ha^{-1} เช่นเดียวกันกับ งานวิจัยของ Sun และคณะ (2016) ศึกษาผลของการเติมถ่านชีวภาพในอัตรา 5, 10 และ 20 g kg^{-1} ที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นชะครามในพื้นที่ดินเค็มซึ่งดินเค็มมีค่า EC เท่ากับ $239 \mu\text{S cm}^{-1}$ พบว่า การเจริญเติบโตของต้นชะครามตอบสนองต่อถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกถั่วมากกว่าฟางข้าวสาลีและซังข้าวโพดในอัตราปริมาณที่เท่ากัน โดยมีค่าชีวมวลรวมของต้นชะครามเท่ากับ 0.396, 0.279 และ $0.100 \text{ กรัมต่อกระถาง}$ ตามลำดับ

ถ่านชีวภาพจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาทางเคมีในดินซึ่งผลการวิจัยหลายชิ้นชี้ให้เห็นว่า การใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงคุณภาพดินและเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรได้ผลดีที่สุดเมื่อในรอบการปลูกที่ 2 ขึ้นไป อาทิ ผลการศึกษาของ เสาวนีย์ วิจิตรโกสม (2560) ที่ทดลองใช้ถ่านชีวภาพจากเห้งน้ำมันสำปะหลังในการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ พบว่า การใช้ถ่านชีวภาพในการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพียงครั้งแรกครั้งเดียว สามารถเพิ่มผลผลิตของข้าวโพด (0.740 kg m^{-2}) ซึ่งมากกว่าการปลูกข้าวโพดโดยใส่เพียงปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว (0.723 kg m^{-2}) ซึ่งเป็นการเพาะปลูกโดยทั่วไปของเกษตรกร โดยผลผลิตเพิ่มขึ้นตั้งแต่รอบการปลูกแรกและผลผลิตในรอบการปลูกที่ 2 ยังคงสูงกว่าการปลูกโดยการใส่ปุ๋ยคอก สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Cornelissen และคณะ (2018) ที่ทดลองปลูกข้าวโพดในดินเปรี้ยว 5 ฤดูปลูก ที่พื้นที่ Lampung สุมาตราใต้ ประเทศอินโดนีเซีย โดยใส่ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกเมล็ดโกโก้และแกลบข้าวในอัตรา 5 และ 15 t ha^{-1} ซึ่งพบว่า ในฤดูปลูกที่ 2 แปลงที่ใส่ถ่านชีวภาพเปลือกโกโก้ในอัตรา 15 t ha^{-1} ให้ผลผลิตของข้าวโพดสูงที่สุด (4.3 t ha^{-1}) และยังคงให้ผลผลิตดีในฤดูปลูกที่ 3 และ 4 จากนั้นผลผลิตต่ำที่สุดในฤดูปลูกที่ 5 ในขณะที่ ผลผลิตของข้าวโพดที่ใส่ถ่านชีวภาพจากแกลบในอัตรา 15 t ha^{-1} ให้ผลผลิตสูงที่สุดในฤดูปลูกที่ 1 (1.4 t ha^{-1}) นอกจากนี้ ผลการศึกษาได้เสนอแนะว่า ควรเติมถ่านชีวภาพลงในดินทุก ๆ 3 ฤดูปลูก

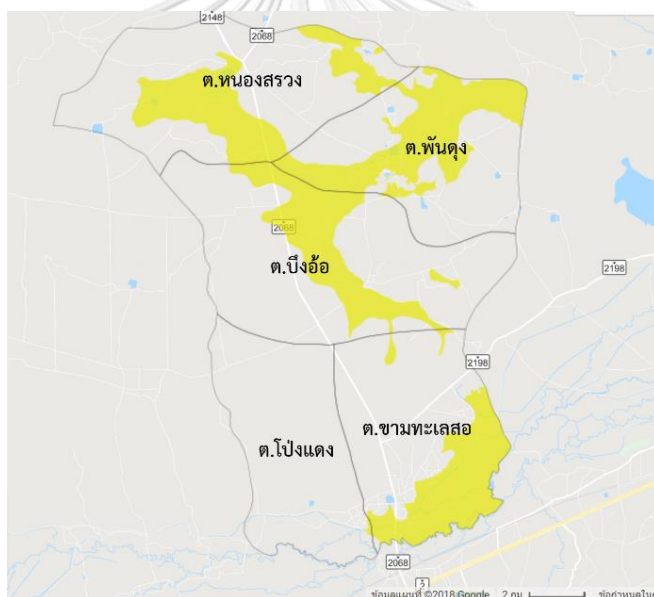
จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า ถ่านชีวภาพสามารถทำให้สมบัติของดินดีขึ้นและดินมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้ดินมีสมบัติที่เหมาะสมต่อการทำการเกษตรมากขึ้น นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับปุ๋ยที่ใส่ในแปลงเพาะปลูกอีกด้วย เติมนลงไปอีกด้วย ดังนั้น จึงนำไปสู่งานวิจัยชิ้นนี้ที่ทำการศึกษานี้ที่ทำการศึกษานี้ที่ทำการศึกษาสมบัติและปริมาณของถ่านชีวภาพที่เหมาะสม ที่ส่งผลต่อสมบัติของดินเค็มและผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย

พื้นที่ดินเค็มที่ทำการวิจัยและเก็บตัวอย่างดินเค็มคือ พื้นที่ตำบลหนองสรวง อำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา (15.087448, 101.921135) โดยพื้นที่ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง ประมาณ 200 - 209 เมตร อำเภอขามทะเลสอมีพื้นที่ทั้งหมด 5.18 ตารางกิโลเมตร โดยพื้นที่ร้อยละ 25.56 ของพื้นที่ทั้งหมดเป็นพื้นที่ดินเค็ม ดังรูปที่ 3-1 ซึ่งดินมีลักษณะเป็นดินทรายปนดินร่วน (รูปที่ 3-2) (ทวิวงศ์ ศรีบุรี & เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม, 2559)



รูปที่ 3-1 แผนที่พื้นที่ดินเค็ม (สีเหลือง) ในอำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา

ที่มา: ระบบแผนที่เกษตรเพื่อการบริหารจัดการเชิงรุกออนไลน์ (2558)

พื้นที่อำเภอขามทะเลสอ มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยประมาณ 1,000 - 1,050 มิลลิเมตรต่อปี (Wijitkosum, 2020) โดยช่วงฤดูกาลปลูกข้าวของเกษตรกรในพื้นที่เป็นช่วงเดือนกรกฎาคมถึงพฤศจิกายน โดยเริ่มตกลาเดือนกรกฎาคม ปกติต้นกล้าเดือนสิงหาคม ข้าวจะออกดอกประมาณวันที่ 20 ตุลาคม และเก็บเกี่ยวข้าวประมาณวันที่ 20 พฤศจิกายนของทุกปี



รูปที่ 3-2 ลักษณะดินในพื้นที่ตำบลหนองสรวง อำเภอกงหราทะเลสาบ จังหวัดนครราชสีมา
ที่มา: ทวีวงศ์ ศรีบุรี และ เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม (2559)

ในการศึกษานี้ ศึกษาการเจริญเติบโตของข้าวรอบที่ 1 ระหว่างเดือนสิงหาคม-ธันวาคม พ.ศ. 2562 ซึ่งพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยเท่ากับ 80.98 มิลลิเมตรและมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 27.2 องศาเซลเซียส จากนั้น ศึกษาการเจริญเติบโตของข้าวในรอบที่ 3 ระหว่างเดือนกรกฎาคม-พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 ซึ่งพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยเท่ากับ 186.96 มิลลิเมตรและมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 27.6 องศาเซลเซียส (ศูนย์ภูมิอากาศ กองพัฒนาอู่ศูนย์มวิทยา, 2564) อย่างไรก็ตาม การปลูกข้าวในรอบที่ 2 (เดือนมกราคม-เมษายน พ.ศ. 2563) ไม่สามารถรายงานผลได้อย่างสมบูรณ์

3.2 การวางแผนและออกแบบการศึกษาวิจัย

การออกแบบการศึกษาเป็นแบบแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด Completely Randomized Design (CRD) โดยปริมาณวัสดุปลูกที่ทำการศึกษา อ้างอิงปริมาณปุ๋ยคอกที่ใส่จากเกษตรกรในพื้นที่ และจากปัญจกรณ์ พุฒอินทร์ (2562) ที่แนะนำให้ใส่ปุ๋ยคอก 1 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ และปริมาณถ่านชีวภาพแกลบที่ใส่อ้างอิงจากงานวิจัยของ Wijitkosum (2020) ที่ศึกษาบนพื้นที่แปลงจริง

การศึกษานี้ มีทั้งหมด 4 ดำรับการทดลอง ดังนี้ ดินเค็มที่ใส่ปุ๋ยคอกซึ่งเป็นสภาพการเพาะปลูกโดยทั่วไปของเกษตรกรในพื้นที่ เป็นชุดการทดลองควบคุม และดินเค็มที่ใส่ปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพตามอัตราส่วนดังนี้ คือ 1.0, 1.5 และ 2.0 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ ในแต่ละดำรับการทดลอง ทำการทดลองละ 4 ซ้ำ (replicate) รวมทั้งหมดเป็น 16 ดำรับการทดลอง ดังตารางที่ 3-1 โดยวงบ่อซีเมนต์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร และมีความสูง 40 เซนติเมตร มีแผ่นซีเมนต์ปิดที่ก้นวงบ่อซีเมนต์ โดยแต่ละดำรับการทดลองใส่วัสดุปลูกลงในวงบ่อซีเมนต์ให้มีความสูง 20 เซนติเมตร เนื่องจากจากงานวิจัยก่อนหน้าและการศึกษาเบื้องต้นพบว่า รากของต้นข้าวที่ปลูกในดินเค็ม มีความยาวต่ำกว่าความยาวรากของพืชที่ปลูกในดินปกติ (Läuchli & Grattan, 1970; Wijitkosum, 2020)

ตารางที่ 3-1 ปริมาณของแต่ละวัสดุปลูกสำหรับแต่ละดำรับการทดลองต่อหนึ่งวงบ่อซีเมนต์

ดำรับการทดลอง	ดินเค็ม (กิโลกรัม)	ปุ๋ยคอก (กิโลกรัม)	ถ่านชีวภาพ (กิโลกรัม)
1	100.0	1.0	0.0
2	100.0	1.0	1.0
3	100.0	1.0	1.5
4	100.0	1.0	2.0

3.3 พารามิเตอร์และการวิเคราะห์

วัสดุปลูกทั้งดิน ถ่านชีวภาพแกลบ และปุ๋ยคอก จะถูกวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญ โดยพารามิเตอร์และวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุปลูกแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3-2 ทั้งนี้ ถ่านชีวภาพและปุ๋ยคอกจะถูกวิเคราะห์สมบัติก่อนการเพาะปลูก ส่วนตัวอย่างดินจะถูกวิเคราะห์สมบัติตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทั้งก่อนการผสมวัสดุปลูก เมื่อผสมวัสดุปลูกแล้ว และภายหลังการปลูกข้าว

ตารางที่ 3-2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวัสดุปลูกและวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	การวิเคราะห์			อ้างอิง
		ดิน	ถ่านชีวภาพ	ปุ๋ยคอก	
ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) (ดิน : น้ำ = 1:1)	pH meter	✓	✓	✓	
ค่าการนำไฟฟ้าขณะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (EC _e)		✓			
ค่าการนำไฟฟ้า (EC) (ถ่านชีวภาพหรือปุ๋ยคอก : น้ำ = 1:5)	Electrical Conductivity meter		✓	✓	กรมพัฒนาที่ดิน, 2553ก; 2553ข
ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	Ammonium acetate (pH 7.0)	✓	✓	✓	
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter)	Walkley and Black method	✓	✓	✓	
เนื้อดิน (soil texture)	Hydrometer method	✓			กรมพัฒนาที่ดิน, 2553ก
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total N)	Kjeldahl method	✓	✓	✓	U.S. EPA, 1993
ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P)	Bray II method	✓			
ปริมาณโพแทสเซียม โปแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Na, K, Ca & Mg)	Ammonium Acetate method	✓			กรมพัฒนาที่ดิน, 2553ก
ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (total Na)	HNO ₃ and Flame Photometer	✓			

ตารางที่ 3-2 (ต่อ) การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละวัสดุปลูกและวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	การวิเคราะห์			อ้างอิง
		ดิน	ถ่านชีวภาพ	ปุ๋ยคอก	
ค่าอัตราการดูดซับโพแทสเซียม (Sodium Adsorption Ratio; SAR)	วิเคราะห์แคดไอออนที่ละลายน้ำได้ (Na, Ca, Mg) ด้วย AAS	✓			กรมพัฒนาที่ดิน, 2547
ปริมาณฟอสฟอรัส (total P)	Vanadomolybdophosphoric acid method		✓	✓	IBI, 2015
ปริมาณโพแทสเซียม (total K)	HNO ₃ and AAS		✓	✓	
ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียม (Total Ca & Mg)	SrCl ₂ 6H ₂ O and AAS		✓	✓	กรมพัฒนาที่ดิน, 2553ข
ปริมาณคาร์บอน (carbon content)	TOC analyses		✓		
ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) และค่าความพรุน (porosity)	Barrett-Joyner-Halenda (BJH) method		✓		IBI, 2015
สัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)	Walkley and Black method		✓	✓	กรมวิชาการเกษตร, 2551

หมายเหตุ: ค่าอัตราการดูดซับโพแทสเซียม (SAR) = $Na / \sqrt{(Ca+Mg) / 2}$ โดยโพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมที่ละลายน้ำได้ มีหน่วยเป็น mmol/L

และร้อยละของโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (ESP) = $\{Na / (Ca + Mg + K + Na)\} \times 100$ โดยโพแทสเซียม โพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ มีหน่วยเป็น mg/kg

(Levy & Shainberg, 2005)

3.4 การเตรียมวัสดุปลูก

3.4.1 การผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบ

1) การเตรียมวัตถุดิบ

การเผาถ่านชีวภาพ เริ่มจากนำแกลบดิบมาตากแดดให้แห้งอย่างน้อย 1 วัน

2) เตาเผาถ่านชีวภาพแกลบ

การผลิตถ่านชีวภาพในงานวิจัยครั้งนี้ ใช้เตาผลิตแกลบชีวภาพ 4 x 200 ลิตร ผลิตแกลบชีวภาพ ควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการเปลี่ยนสภาพด้วยความร้อนแบบช้า (Controlled Temperature Rice Husk Biochar Retort for Slow Pyrolysis Process) (เลขที่จดสิทธิบัตร 1601001281 โดยทวิวงศ์ ศรีบุรี) ซึ่งเป็นเตาที่ผลิตขึ้นด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่ทำให้เกษตรกรสามารถผลิตเตาและถ่านชีวภาพแกลบเองได้ ด้วยวิธีการผลิตเตาที่ไม่ยุ่งยาก และกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพที่ไม่ซับซ้อน หากแต่ได้จำนวนถ่านชีวภาพในปริมาณมาก รวมถึง สมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากเตาดังกล่าวไม่แตกต่างจากการผลิตถ่านชีวภาพจากห้องปฏิบัติการ (ทวิวงศ์ ศรีบุรี & เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม, 2559) และยังสามารถควบคุมอุณหภูมิในเตาผลิตให้อยู่ระหว่าง 400-500 องศาเซลเซียส โดยขั้นตอนการสร้างเตาดังกล่าว มีรายละเอียดดังนี้ (ทวิวงศ์ ศรีบุรี, 2559)

2.1) การเตรียมเตาควบคุมอุณหภูมิชั้นใน โดยเตรียมถังโลหะปลายเปิด 4 ถัง โดยเจาะรูเตาละ 4 รูที่ด้านล่าง รูขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร เพื่อให้อากาศภายในเตาและ syngas ไหลออกมาและถูกเผาโดยความร้อนจากเตาให้ความร้อนชั้นนอก โดยภายในถังหรือเตาผลิตแกลบชีวภาพจะมีท่อเหล็ก เพื่อให้ความร้อนจากเตาให้ความร้อนชั้นนอกไหลผ่าน ดังรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 เตาควบคุมอุณหภูมิชั้นใน

จากมุมมองด้านข้าง (ซ้าย) และด้านบน (ขวา)

2.2) การเตรียมเตาให้ความร้อนชั้นนอก โดยเตรียมถังคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งเตาจะเจาะช่องด้านบนตรงกับเตาผลิตแกลบชีวภาพทั้ง 4 ถัง (เตาควบคุมอุณหภูมิชั้นใน) และสวมท่อใยหินสำหรับการระบายก๊าซและควันออกจากเตาให้ความร้อนชั้นนอก จำนวน 4 ท่อ

เจาะรูผนังเตาให้ความร้อนชั้นนอกให้มีรูด้านละ 5 รู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2.54, 3.81, 5.08, 3.81 และ 2.54 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยให้รูขนาด 5.08 เซนติเมตร อยู่ตรงกึ่งกลางของผนังเตาให้ความร้อนชั้นนอกทั้ง 4 ด้าน และให้แต่ละรูให้มีระยะห่าง 20.0 เซนติเมตรเท่ากันจากรูกกลางของเตาให้ความร้อนชั้นนอก และเจาะสูงจากขอบล่างสุดของเตาให้ความร้อนชั้นนอก ประมาณ 20.0 เซนติเมตร เพื่อให้ความร้อนในเตาให้ความร้อนชั้นนอก สามารถดูดอากาศเข้าไปได้ขณะที่กำลังเผาเชื้อเพลิง

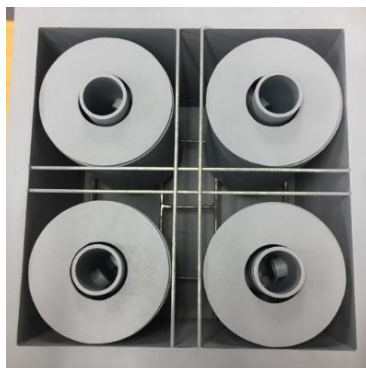
เนื่องจากความร้อนภายในเตาให้ความร้อนชั้นนอกค่อนข้างสูง จึงต้องมีเหล็กรองรับฝาเตาให้ความร้อนชั้นนอก ผนังกันเตาภายในเตาให้ความร้อนชั้นนอกมีตะแกรงเหล็กเพื่อรองรับเตาควบคุมอุณหภูมิชั้นใน กำหนดให้ตะแกรงมีขนาด 1.50 เมตร x 0.40 เมตร จำนวน 2 ตะแกรง วางห่างกัน 30.0 เซนติเมตร ซึ่งมีการเชื่อมต่อระหว่างตะแกรงจากกึ่งกลางออกไปข้างละ 40.0 เซนติเมตร แต่ละจุดเชื่อมของตะแกรงจะมีฐานรองรับสูงประมาณ 15.0 เซนติเมตร เพื่อให้สามารถกระจายไปทั่วเตาจากด้านล่าง

3) การเผาถ่านชีวภาพ

ขั้นตอนการผลิตถ่านชีวภาพ โดยใช้เตาผลิตแกลบชีวภาพ 4 x 200 ลิตร ผลิตแกลบชีวภาพ ควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการเปลี่ยนสภาพด้วยความร้อนแบบช้า มีรายละเอียดดังนี้

3.1) บรรจุแกลบที่ตากแห้งแล้ว ใส่ในถังโลหะหรือเตาควบคุมอุณหภูมิชั้นใน จากนั้นปิดฝาดัง และนำเตาให้ความร้อนชั้นในทั้ง 4 ถัง ไปวางตั้งไว้บนตะแกรงของเตาให้ความร้อนชั้นนอก ดังรูปที่ 3-4

3.2) จัดเรียงเชื้อเพลิงลงช่องว่างระหว่างเตาให้ความร้อนชั้นนอกและชั้นใน โดยที่น้ำหนักระหว่างแกลบและเชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้ความร้อน ควรมีอัตราส่วน 3 ใน 5 เพื่อเป็นการควบคุมอุณหภูมิในการผลิตแกลบชีวภาพให้อยู่ระหว่าง 400-500 องศาเซลเซียส

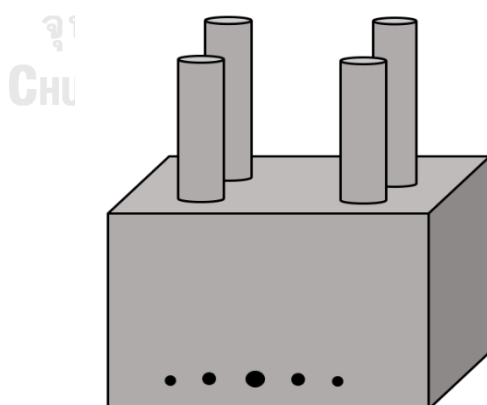


รูปที่ 3-4 เตาให้ความร้อนชั้นในบนตะแกรงของเตาให้ความร้อนชั้นนอกจากมุมมองด้านบน

3.3) จุดไฟเผาเชื้อเพลิง โดยเริ่มจุดจากส่วนบนของเตาให้ไฟไหม้ลามลงไปส่วนล่าง จากนั้นสวมท่อไยหิน จำนวน 4 ท่อ สำหรับการระบายก๊าซและควันออกจากเตาให้ความร้อนชั้นนอก และปิดฝาเตาให้ความร้อนชั้นนอกให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 3-5

3.4) เมื่อไฟในเตาให้ความร้อนชั้นนอกดับลง ให้ทิ้งเตาให้เย็นอย่างน้อย 4 ชั่วโมง เพื่อให้ได้แกลบชีวภาพที่มีสมบัติตามมาตรฐาน จากนั้นเก็บถ่านชีวภาพที่เผาเสร็จแล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติต่อไป

3.5) วิเคราะห์ลักษณะของถ่านชีวภาพก่อนและหลังการเผาโดยศึกษาพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 3-2



รูปที่ 3-5 เตาผลิตแกลบชีวภาพ 4 x 200 ลิตร ควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการเปลี่ยนสภาพด้วยความร้อนแบบช้า (Controlled Temperature Rice Husk Biochar Retort for Slow Pyrolysis Process)

3.4.2 การเก็บตัวอย่างปุ๋ยคอก

1) เก็บตัวอย่างปุ๋ยคอกซึ่งเป็นปุ๋ยคอกจากมูลวัวที่เลี้ยงในรูปแบบทั่วไปของเกษตรกร จากตำบลโป่งแดง อำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา โดยกำหนดจุดเก็บตัวอย่างปุ๋ยในกองให้กระจายอย่างทั่วถึง ไม่น้อยกว่า 10 จุด โดยแต่ละจุดเก็บตัวอย่างให้มีปริมาณเท่ากัน รวมทั้งหมดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 1 ของปริมาณปุ๋ยทั้งหมด จากนั้นนำมาเทกองรวมกันและคลุกผสมให้ทั่วกัน แล้วพูนให้เป็นรูปกรวย แล้วตบยอดให้ราบลง แบ่งออกเป็น 4 ส่วน นำส่วนที่อยู่ตรงข้าม 2 ส่วนมาผสมรวมกัน พูนเป็นรูปกรวยใหม่ แล้วตบยอดให้ราบลง และแบ่งเป็น 4 ส่วนอีกครั้ง ทำจนได้น้ำหนักตัวอย่างประมาณ 20 กิโลกรัม

2) นำปุ๋ยคอกเทลงบนแผ่นผ้าพลาสติกหรือผ้ายาง เคลี่ยปุ๋ยผึ่งลมไว้ในที่ร่มจนแห้ง จากนั้นแบ่งตัวอย่างมา 1 กิโลกรัม เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติของปุ๋ยคอกก่อนทำการผสมกับวัสดุปลูกอื่น ๆ โดยศึกษาตามพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 3-2 ส่วนปุ๋ยคอกที่เหลือนำไปใส่ถังพลาสติก เพื่อทำการศึกษาต่อไป (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553ข)

3.4.3 การเก็บตัวอย่างดินเค็ม

1) สุ่มเก็บตัวอย่างดินเค็มจากพื้นที่ตำบลหนองสรวง อำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นดินเค็มโซดิกตามเกณฑ์ของ USSL (1954) การเก็บตัวอย่างกระจายให้ครอบคลุมทั่วพื้นที่ ในพื้นที่ประมาณ 1 ไร่ โดยวิธีการสุ่มเก็บตัวอย่างแบบกระจายเต็มพื้นที่ (Simple Random Sampling) (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2545) ด้วยการสุ่มเก็บตัวอย่างดินจำนวน 20 จุด โดยเก็บดินในระดับชั้นไทรพรวน ที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร น้ำหนักรวมทั้งหมดประมาณ 1,000 กิโลกรัม

2) นำดินเทลงบนแผ่นผ้าพลาสติกหรือผ้ายาง เคลี่ยดินผึ่งลมไว้ในที่ร่มจนแห้ง ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อเอาเศษพืช เศษไม้ หรือกรวดที่ไม่ต้องการออก จากนั้น ผสมตัวอย่างดินให้เข้ากัน

3) สุ่มเก็บตัวอย่างดิน 20 จุด นำมาผสมให้เข้ากันเป็นหนึ่งตัวอย่าง แบ่งมา 1 กิโลกรัม เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติของดิน ตามพารามิเตอร์ที่จะศึกษาดังตารางที่ 3-2 ส่วนดินที่เหลือนำไปใส่ถังพลาสติกเพื่อใช้ในการทดลองศึกษาต่อไป

3.4.4 การเตรียมเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105

เมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L.) ที่ใช้ในการศึกษา เป็นเมล็ดพันธุ์ที่ขอความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยข้าวนครราชสีมา จำนวน 1 กิโลกรัม โดยเก็บให้ปราศจากความชื้น

3.5 การเตรียมพื้นที่การทดลองและวัสดุปลูก

1) พื้นที่สำหรับวางบ่อซีเมนต์เพื่อปลูกข้าวนั้น เป็นพื้นที่ตำบลโป่งแดง อำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่เรียบ อยู่ภายนอกอาคาร แสงแดดส่องถึงทั่วทั้งพื้นที่

2) ผสมวัสดุปลูก ได้แก่ ดิน ปุ๋ยคอกมูลวัวแห้ง และถ่านชีวภาพแกลบตามอัตราส่วนที่กำหนด (ตารางที่ 3-1)

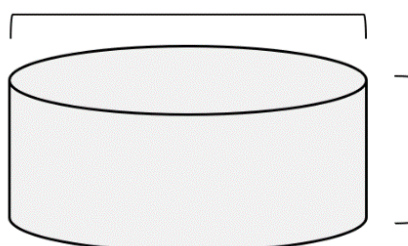
3) ใส่วัสดุปลูกที่ผสมแล้วลงในบ่อซีเมนต์ โดยหนึ่งตำรับการทดลองต่อหนึ่งบ่อซีเมนต์ บ่อซีเมนต์มีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร มีความสูง 40 เซนติเมตร และมีแผ่นซีเมนต์ปิดที่ก้นบ่อ ดังรูปที่ 3-6 โดยใส่วัสดุปลูกให้มีความสูง 20 เซนติเมตรจากก้นบ่อ และหมักวัสดุปลูกทิ้งไว้ประมาณ 14 วัน (วิชุดา กัลยาศิริ, 2556; เสาวนีย์ วิจิตรโกสม, 2560)

4) ปักดำต้นกล้าข้าวให้มีระยะห่างของแต่ละหลุมปลูกประมาณ 30 เซนติเมตร เพื่อให้ต้นข้าวสามารถเจริญเติบโตได้ โดยแต่ละหลุมปักต้นกล้าข้าว ซึ่งเพาะจากเมล็ดข้าว 1 เมล็ดต่อหลุม (ประมาณ 3 ต้น) ดังรูปที่ 3-7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

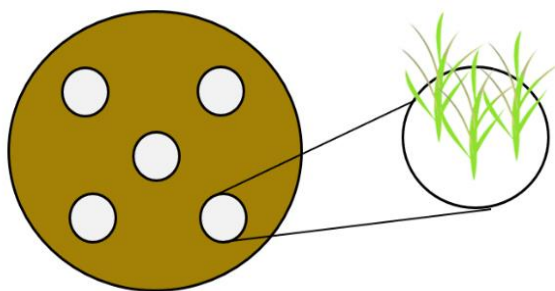
CHU

80 เซนติเมตร



40 เซนติเมตร

รูปที่ 3-6 ขนาดของบ่อซีเมนต์



รูปที่ 3-7 การแบ่งพื้นที่ภายในวงบ่อซีเมนต์เพื่อการปลูกข้าว

3.6 การเพาะปลูกข้าว

การปลูกต้นข้าวในพื้นที่ดินเค็มในลักษณะนาดำและให้น้ำแบบวิธีเปียกสลับแห้ง เริ่มจากการเพาะเมล็ดข้าวในดินที่อุดมสมบูรณ์ เนื่องจาก การเจริญเติบโตของข้าวในระยะแรก ๆ มีความไวต่อความเค็มมาก ทำให้เมล็ดข้าวไม่สามารถเจริญเติบโตได้อย่างดีเมื่อเพาะเมล็ดในดินเค็มจัด (Läuchli & Grattan, 1970) โดยการเพาะข้าว มีวิธีดังนี้

- 1) คัดเมล็ดข้าวที่สมบูรณ์ โดยนำเมล็ดพันธุ์ข้าวใส่ลงไปใต้น้ำสะอาด ใช้มือคนแล้วตักเมล็ดที่ลอยออก เมล็ดข้าวที่ได้คือเมล็ดที่มีความสมบูรณ์สูง
- 2) นำเมล็ดข้าวที่คัดไว้ใส่ผ้าขาวบาง แฉลงในน้ำสะอาดประมาณ 24-48 ชั่วโมง
- 3) บ่มข้าวโดยนำผ้าขาวบางที่ห่อเมล็ดข้าวไว้ขึ้นจากน้ำเป็นเวลา 1 คืน พักไว้ให้ข้าวแตกตุ่มตาประมาณ 1 มิลลิเมตร
- 4) เพาะกล้าในแปลงเพาะเมล็ดด้วยดินปกติที่อุดมสมบูรณ์ ซึ่งแปลงจะต้องมีความชื้นแต่ยังไม่ต้องใส่น้ำ หลังจากนั้น 3 วัน ใส่น้ำลงแปลง ซึ่งจะต้องคอยดูแลรักษาระดับน้ำในแปลงเพาะให้มีน้ำหล่อเลี้ยงอยู่เสมอ เพื่อป้องกันการขาดน้ำของต้นกล้า
- 5) เมื่อต้นกล้าเจริญเติบโตจนพร้อมปักดำ (ประมาณ 45 วัน) จึงนำกล้าออกจากแปลงเพาะ
- 6) ปักดำต้นกล้า 3-4 ต้นลงในแต่ละหลุมที่แบ่งไว้ภายในวงบ่อซีเมนต์ โดยปักให้มีความลึกประมาณ 3-5 เซนติเมตร
- 7) หลังจากปักดำได้ 50 วัน จะเป็นช่วงระยะข้าวตั้งท้อง ใ้ห้งต้นน้ำเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นให้น้ำและรักษาระดับน้ำต่อไป จนถึงช่วงก่อนเก็บเกี่ยว 7 วันจึงงดให้น้ำอีกครั้ง

ทั้งนี้ ในการปลูกข้าว จะใส่ปุ๋ยคอกมูลวัวแห้งจำนวน 2 ครั้ง คือ ก่อนปลูก (ผสมพร้อมกับถ่านชีวภาพ) และใส่อีกครั้งในระยะแตกกอ (ข้าวอายุประมาณ 45 วัน) โดยแต่ละครั้งแบ่งใส่ปุ๋ยคอกมูลวัวในปริมาณที่เท่ากัน (วิชุดา กัลยาศิริ, 2556; สำนักงานพิพิธภัณฑสถานเฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว, 2556; ปัญจภรณ์ พุฒอินทร์, 2562) อย่างไรก็ตาม ในรอบการปลูกข้าวที่ 2 และรอบที่ 3 ของการศึกษานี้ ไม่ได้ทำการใส่ปุ๋ยคอกหรือถ่านชีวภาพเพิ่มเติมแต่อย่างใด

3.7 การเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

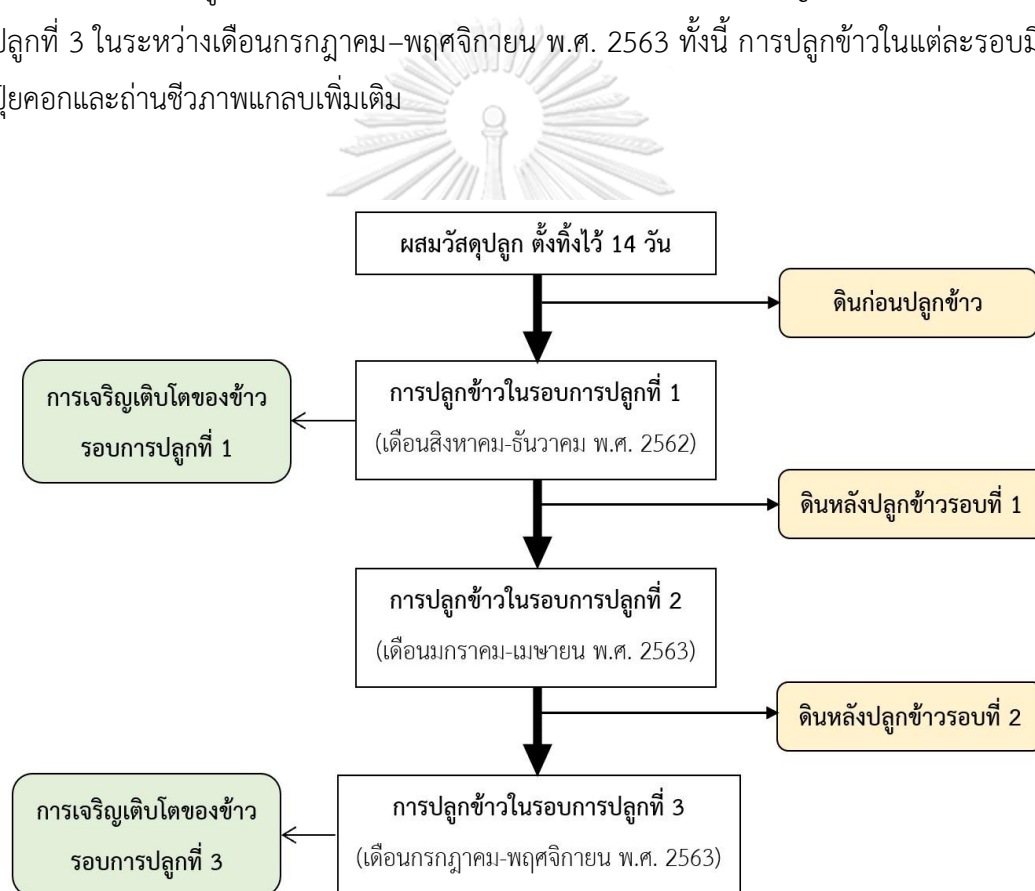
3.7.1 การวัดการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว

ในการศึกษา ทำการตรวจวัดและเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวตลอดระยะเวลาการเพาะปลูก ซึ่งพารามิเตอร์ที่ศึกษา ประกอบด้วย

- 1) ความสูงของต้นข้าว โดยวัดความสูงตั้งแต่โคนรากจนถึงส่วนปลายยอดของต้นข้าว ทุกต้นทั้ง 4 ระยะ ได้แก่ ระยะแตกกอ ระยะสร้างรวงอ่อน ระยะออกดอก และระยะเก็บเกี่ยว แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าวของแต่ละตำรับการทดลอง
- 2) การแตกกอ โดยการนับแขนงของต้นข้าวทุกต้นในช่วงระยะแตกกอ
- 3) จำนวนรวงต่อพื้นที่ โดยการนับจำนวนรวงทั้งหมดต่อวงบ่อซีเมนต์ 1 วงในระยะสร้างรวงอ่อนและระยะเก็บเกี่ยว
- 4) จำนวนเมล็ดต่อรวง โดยหาค่าเฉลี่ยของจำนวนเมล็ดต่อรวงจากต้นข้าวทั้งหมดในระยะเก็บเกี่ยว
- 5) น้ำหนักเมล็ดทั้งหมด โดยนำเมล็ดข้าวที่ตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 48 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักของเมล็ดข้าวทั้งหมดของแต่ละตำรับการทดลอง
- 6) น้ำหนัก 1,000 เมล็ด โดยนำเมล็ดข้าวที่ตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 48 ชั่วโมง นับจำนวนเมล็ดข้าว 100 เมล็ดในระยะเก็บเกี่ยว คำนวณหาน้ำหนัก 1,000 เมล็ด = $10 \times$ น้ำหนัก 100 เมล็ดเฉลี่ย
- 7) เปอร์เซ็นต์เมล็ดดี โดยนำเมล็ดข้าวที่ตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 48 ชั่วโมง นับจำนวนเมล็ดดีจากเมล็ดตัวอย่าง 500 เมล็ดในระยะเก็บเกี่ยว คำนวณหาเปอร์เซ็นต์เมล็ดดี = $(\text{จำนวนเมล็ดดี} / 500) \times 100$

3.7.2 การเก็บตัวอย่างดินหลังปลูก

การเก็บตัวอย่างดินหลังจากการเก็บเกี่ยวข้าวจากทุกตำรับการทดลองในทุกวงบ่อซีเมนต์รวมทั้งหมด 16 ตำรับการทดลอง จากนั้นทำการวิเคราะห์ตัวอย่างดินด้วยวิธีและพารามิเตอร์เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ดินก่อนทำการเพาะปลูก ดังตารางที่ 3-2 โดยทำการศึกษาการเจริญเติบโตโตของข้าวทั้งหมด 2 รอบ ซึ่งมีลำดับแผนงานดังรูปที่ 3-8 โดยศึกษาการเจริญเติบโตโตของข้าวในรอบการปลูกที่ 1 ระหว่างเดือนสิงหาคม-ธันวาคม พ.ศ. 2562 จากนั้น ทำการปลูกข้าวต่อในรอบที่ 2 ในระหว่างเดือนมกราคม-เมษายน พ.ศ. 2563 แต่ไม่สามารถรายงานผลการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวได้อย่างสมบูรณ์ (อธิบายต่อในบทที่ 5) และต่อมา ศึกษาการเจริญเติบโตโตของข้าวในรอบการปลูกที่ 3 ในระหว่างเดือนกรกฎาคม-พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 ทั้งนี้ การปลูกข้าวในแต่ละรอบมิได้ใส่ปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพแกลบเพิ่มเติม



รูปที่ 3-8 ลำดับการดำเนินการศึกษาและผลการศึกษา

3.7.3 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินก่อนการทดลอง ดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 และดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 และวิเคราะห์ผลการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวของการปลูกข้าวรอบที่ 1 และการปลูกข้าวรอบที่ 3 โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนและความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี One-way ANOVA แบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) เพื่อหาความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)

3.7.4 การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ถ่านชีวภาพแลกเปลี่ยนปัญหา

ดินเค็มและการปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์

การประเมินต้นทุน ผลผลิต และรายได้ของการปลูกข้าวด้วยดินเค็มในวงบ่อซีเมนต์ โดยใช้ถ่านชีวภาพแลกเปลี่ยนร่วมกับปุ๋ยคอก เปรียบเทียบระหว่างดำรับการทดลองที่ใส่และไม่ใส่ถ่านชีวภาพแลกเปลี่ยน ระหว่างการปลูกข้าวรอบที่ 1 และการปลูกข้าวรอบที่ 3

บทที่ 4

ผลของถ่านชีวภาพต่อการปรับปรุงสมบัติดินเค็ม

4.1 ผลวิเคราะห์สมบัติของดินและวัสดุปลูก

4.1.1 ผลวิเคราะห์สมบัติของดินเค็ม

การศึกษาการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพในการปลูกข้าวในพื้นที่เกษตรกรรมดินเค็มในครั้งนี้ เก็บตัวอย่างดินเค็มจากตำบลหนองสรวง อำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา โดยดินเค็มที่นำมาศึกษามีรายละเอียดสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ สรุปได้ดังนี้ (ตารางที่ 4-1)

ตารางที่ 4-1 ผลวิเคราะห์สมบัติของดินก่อนการปลูกพืช

ตัวแปรที่ศึกษา	หน่วย	ดินเค็ม
ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) (ดิน : น้ำ = 1:1)	-	10.60
ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	cmol/kg	2.4
ค่าการนำไฟฟ้าขณะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (EC_e)	dS/m	68.6
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter)	%	0.19
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total N)	mg/kg	203.0
ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P)	mg/kg	13.9
ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K)	mg/kg	70.2
ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Ca)	mg/kg	540.0
ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Mg)	mg/kg	1.14
ปริมาณโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Na)	mg/kg	849.0
ปริมาณโซเดียมทั้งหมด (total Na)	%	0.83
ค่าอัตราการดูดซับโซเดียม (SAR)	-	11,707
เนื้อดิน (soil texture)	-	LS (ดินทรายปนดินร่วน)

ดินเค็มในพื้นที่มีเนื้อดินเป็นดินทรายปนดินร่วน (% sand = 81, % silt = 14, % clay = 5) ดินมีความเป็นด่างจัด (very strongly alkaline) โดยมีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 10.60 (ดิน : น้ำ = 1:1) ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกต่ำมาก (2.4 cmol/kg) ดินมีความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำมาก โดยมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพียง 0.19 % ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 203.0 mg/kg ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับปานกลาง (13.9 mg/kg) ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ในระดับปานกลาง (70.2 mg/kg) ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ในเกณฑ์ต่ำ (540 mg/kg) ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ในเกณฑ์ต่ำมาก (1.14 mg/kg) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) ค่าการนำไฟฟ้าขณะดินอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 68.6 dS/m ปริมาณโซเดียมทั้งหมดเท่ากับ 0.83 % ค่าอัตราการดูดซับโซเดียมมีค่าเท่ากับ 11,707 และค่าร้อยละของโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้เท่ากับ 58.1 ซึ่งจากการจำแนกประเภทดินเค็มของ USSL (1954) สามารถสรุปได้ว่าดินเค็มในพื้นที่ศึกษาจัดเป็นดินเค็มโซดิก (saline sodic soil)

4.1.2 ผลวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพแกลบ

ถ่านชีวภาพที่ใช้ในการศึกษาผลิตจากแกลบด้วยเตาผลิตแกลบชีวภาพ 4 x 200 ลิตร ควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการเปลี่ยนสภาพด้วยความร้อนแบบช้า (Controlled Temperature Rice Husk Biochar Retort for Slow Pyrolysis Process) (เลขที่จดสิทธิบัตร 1601001281 โดย ทวีวงศ์ ศรีบุรี) ซึ่งเป็นเตาที่พัฒนาขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกษตรกรสามารถผลิตถ่านชีวภาพใช้ได้เอง ด้วยกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากและได้ถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพดี โดยอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสอยู่ระหว่าง 400-500 องศาเซลเซียส ซึ่งถ่านชีวภาพดังกล่าวมีสมบัติทางกายภาพและเคมี (ตารางที่ 4-2) มีรายละเอียดดังนี้

ถ่านชีวภาพมีความเป็นด่างปานกลางโดยมีค่า pH 7.90 ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0.35 dS/m ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกค่อนข้างสูง (17.34 cmol/kg) ถ่านชีวภาพแกลบมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงมาก (OM 13.06 %) นอกจากนั้น ถ่านชีวภาพแกลบที่ผลิตได้ยังมีปริมาณธาตุอาหารหลักอยู่ในเกณฑ์สูง โดยมีปริมาณฟอสฟอรัส (0.29 %) ปริมาณโพแทสเซียม (1.02 %) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 0.51 % ในขณะที่ ปริมาณแคลเซียม (0.10 %) และปริมาณแมกนีเซียม (0.07 %) อยู่ในระดับต่ำ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพแกลบ พบว่า ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านชีวภาพแกลบมีค่าเท่ากับ 41.43 m²/g ค่าความพรุนเท่ากับ 0.03 cm³/g และสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของถ่านชีวภาพแกลบ (9.10) มีค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ระบุว่า ถ่านชีวภาพสามารถควบคุมความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนในดินได้ (C/N ratio น้อยกว่า 30) (โสฬส แซ่ลิ้ม, 2559)

ถ่านชีวภาพแกลบที่ผลิตได้จากเตาผลิตแกลบชีวภาพฯ มีสมบัติเป็นถ่านชีวภาพและมีความเสถียรของถ่านชีวภาพตามมาตรฐานของ European Biochar Certificate (EBC) และ International Biochar Initiative (IBI) ที่กำหนดไว้ กล่าวคือ ถ่านชีวภาพมีสัดส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) น้อยกว่า 0.7 และมีสัดส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) น้อยกว่า 0.4 (Budai et al., 2013; Weber & Quicker, 2018) ถ่านชีวภาพแกลบมีปริมาณคาร์บอนสูง (45.68 %) ซึ่งเป็นปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด และถ่านชีวภาพแกลบยังมีความคงตัวสูง (O/C มีค่า 0.2-0.6) จึงสามารถคงอยู่ในดินได้เป็นระยะเวลา 100-1,000 ปี (Spokas, 2010)

ตารางที่ 4-2 ผลวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพแกลบ และปุ๋ยคอกแห้งจากมูลวัวเนื้อ

ตัวแปรที่ศึกษา	หน่วย	ถ่านชีวภาพแกลบ	ปุ๋ยคอก
ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) (ถ่านชีวภาพหรือปุ๋ยคอก : น้ำ = 1:5)	-	7.90	8.9
ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	cmol/kg	17.34	61.33
ค่าการนำไฟฟ้า (EC) (ถ่านชีวภาพหรือปุ๋ยคอก : น้ำ = 1:5)	dS/m	0.35	13.21
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter)	%	13.06	35.45
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total N)	%	0.51	1.94
ปริมาณฟอสฟอรัส (total P)	%	0.29	1.84
ปริมาณโพแทสเซียม (total K)	%	1.02	5.22
ปริมาณแคลเซียม (total Ca)	%	0.10	2.44
ปริมาณแมกนีเซียม (total Mg)	%	0.07	0.91
ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area)	m ² /g	41.43	-
ค่าความพรุน (porosity)	cm ³ /g	0.03	-
ปริมาณคาร์บอน (C content)	%	45.68	-
สัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)	-	9.10	10.6
สัดส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C ratio)	-	0.38	-
สัดส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C ratio)	-	0.05	-

4.1.3 ผลวิเคราะห์สมบัติของปุ๋ยคอก

ในการศึกษาใช้ปุ๋ยคอกจากมูลวัวเนื้อซึ่งเป็นปุ๋ยคอกที่เกษตรกรในพื้นที่ใช้ในการทำเกษตรกรรมในชีวิตประจำวัน ผลการวิเคราะห์สมบัติของปุ๋ยคอก (ตารางที่ 4-2) พบว่า ปุ๋ยคอกดังกล่าวมีความเหมาะสมในการใช้ในการทำเกษตรกรรมตามข้อกำหนดของกรมพัฒนาที่ดิน โดยปุ๋ยคอกมีความเป็นด่าง (pH 8.9) ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง (61.33 cmol/kg) การนำไฟฟ้าเท่ากับ 13.21 dS/m โดยปุ๋ยคอกมูลวัวเนื้อนี้มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงมาก (35.45 %) และปริมาณธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชอยู่ในระดับสูงมาก ในขณะที่ ปริมาณแคลเซียม (2.44 %) และแมกนีเซียมอยู่ในเกณฑ์ต่ำ (0.91 %) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) นอกจากนี้ ปุ๋ยคอกดังกล่าวยังเป็นปุ๋ยคอกที่มีการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์จนเหลือเฉพาะส่วนที่มีความคงรูปอยู่ในดินได้เป็นระยะเวลานาน โดยมีค่า C/N เท่ากับ 10.6 (โสฬส แซ่ลิ้ม, 2559)

4.2 ผลวิเคราะห์สมบัติของดินผสมวัสดุปลูก

ภายหลังจากการผสมดิน ปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพในอัตราส่วนที่กำหนดไว้เข้าด้วยกัน จากนั้นจึงทำการพักดินที่เป็นวัสดุปลูกที่ผสมแล้วเป็นระยะเวลา 14 วัน และนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุปลูก (สมบัติของดินก่อนการปลูกข้าว) โดยดินภายหลังผสมแล้วมีสมบัติทางกายภาพและเคมีสรุปได้ ดังนี้ (ตารางที่ 4-3)

4.2.1 ค่าความเป็นกรดต่าง

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของดินก่อนการปลูกข้าวของทุกตำรับการทดลองมีความเป็นด่างจัดมาก โดยอยู่ในช่วง 9.82-10.02 โดยตำรับการทดลองที่ 4 มีค่า pH มากที่สุด (10.02) รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 3 (9.89) ตำรับการทดลองที่ 2 (9.85) และตำรับการทดลองที่ 1 (9.82) ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับดินเดิมในพื้นที่ซึ่งมีค่า pH เท่ากับ 10.60 พบว่า ค่า pH ของดินก่อนการปลูกข้าวของทุกตำรับการทดลองมีค่าน้อยกว่าของดินเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % จึงสามารถสรุปได้ว่า การใส่ปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพมีผลทำให้ความเป็นด่างของดินลดลงภายในระยะเวลา 14 วัน

ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติของดินเดิมและดินก่อนการปลูกข้าวทั้ง 4 ดำรับการทดลอง

ตัวแปร	หน่วย	ดินเดิม	ดินก่อนปลูกข้าวของดำรับการทดลองที่			
			1	2	3	4
ค่าความเป็นกรดต่าง (ดิน:น้ำ = 1:1)	-	10.60 ^a	9.82 ± 0.098 ^b	9.85 ± 0.049 ^b	9.89 ± 0.057 ^b	10.02 ± 0.147 ^b
ค่าการนำไฟฟ้าขณะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ	dS/m	68.6 ^b	74.5 ± 0.653 ^b	77.7 ± 1.470 ^b	90.4 ± 3.021 ^a	61.4 ± 8.818 ^b
ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	cmol/kg	2.4 ^{ab}	1.93 ± 0.122 ^b	4.32 ± 0.572 ^a	1.15 ± 0.131 ^b	2.78 ± 0.188 ^{ab}
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	%	0.19 ^a	0.22 ± 0.024 ^a	0.22 ± 0.016 ^a	0.20 ± 0.016 ^a	0.27 ± 0.073 ^a
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	mg/kg	203.0 ^a	131.0 ± 0.816 ^{ab}	87.50 ± 1.470 ^b	175.0 ± 3.184 ^a	87.50 ± 8.002 ^b
ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์	mg/kg	13.9 ^b	15.0 ± 0.126 ^b	18.7 ± 0.653 ^{ab}	22.8 ± 2.123 ^a	28.4 ± 1.633 ^a
ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้	mg/kg	70.2 ^c	75.40 ± 21.388 ^c	122.0 ± 8.981 ^{bc}	179.0 ± 7.348 ^b	206.0 ± 8.991 ^a
ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้	mg/kg	540.0 ^a	509 ± 4.899 ^a	512 ± 55.522 ^a	430 ± 57.971 ^a	417 ± 19.596 ^a
ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้	mg/kg	1.14 ^a	0.780 ± 0.098 ^{ab}	0.580 ± 0.065 ^b	0.530 ± 0.068 ^b	1.28 ± 0.041 ^a
ปริมาณโซเดียมทั้งหมด	%	0.83 ^a	0.88 ± 0.094 ^a	0.77 ± 0.131 ^a	0.91 ± 0.024 ^a	0.74 ± 0.057 ^a
ค่าอัตราการดูดซับโซเดียม	-	11,707 ^{ab}	10,921 ± 262.912 ^{ab}	9,355.0 ± 587.878 ^b	15,713 ± 663.812 ^a	11,240 ± 533.172 ^{ab}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรแตกต่างกัน (a, b, c) ในแนวนอน หมายถึง ตัวแปรในแต่ละดำรับการทดลอง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p<0.05) ตามวิธี

DMRT

4.2.2 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้าขณะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (EC_e) ของดินก่อนการปลูกข้าวในทุกตำรับการทดลองอยู่ในช่วง 61.4-90.4 dS/m ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ของดินเค็มจัด (USSL, 1954) ทั้งนี้ ตำรับการทดลองที่ 3 มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด (90.4 dS/m) โดยมีค่าการนำไฟฟ้าของดินสูงกว่าในตำรับการทดลองอื่น ๆ รวมทั้งดินเดิมในพื้นที่ (68.6 dS/m) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 %

4.2.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

เนื่องจากดินเดิมในพื้นที่ที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำมาก (0.19 %) ส่งผลให้ เมื่อผสมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพแล้วพบว่า ถึงแม้ว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินก่อนการปลูกข้าวของทุกตำรับการทดลองจะเพิ่มสูงกว่าในดินเดิม หากแต่ยังคงอยู่ในระดับต่ำมาก (0.20-0.27 %) โดยตำรับการทดลองที่ 4 ซึ่งเป็นตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตราสูงที่สุดมีค่าปริมาณอินทรีย์วัตถุมากที่สุด (0.27 %) รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 2 (0.22 %) ตำรับการทดลองที่ 1 (0.22 %) และตำรับการทดลองที่ 3 (0.20 %) ตามลำดับ ซึ่งการใส่ถ่านชีวภาพและปุ๋ยคอกส่งผลให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินทุกตำรับการทดลองมีค่ามากกว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเดิม แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นดังกล่าวไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.2.4 ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก

ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของดินก่อนการปลูกข้าวของทุกตำรับการทดลองอยู่ในระดับต่ำ (1.15-4.32 cmol/kg) โดยพบว่า ภายหลังจากผสมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพตามอัตราที่กำหนด กล่าวคือ ดินมีการเปลี่ยนแปลงค่า CEC ทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับดินเดิม ตำรับการทดลองที่ 2 มีค่า CEC ของดินมากที่สุด (4.32 cmol/kg) โดยมีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับดินในตำรับการทดลองที่ 1 (1.93 cmol/kg) และตำรับการทดลองที่ 3 (1.15 cmol/kg) แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับค่า CEC ของดินเดิมในพื้นที่ซึ่งเท่ากับ 2.4 cmol/kg

4.2.5 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลักของพืชในดินก่อนการเพาะปลูกทุกตำรับการทดลอง พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินเดิม โดยปริมาณธาตุอาหารดังกล่าวจัดอยู่ในระดับสูงถึงสูงมาก กล่าวคือ

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของดินทุกตำรับการทดลองอยู่ในระดับสูง (15.0-28.4 mg/kg) โดยตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยคอกมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงกว่าตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ (ตำรับการทดลองที่ 4 > ตำรับการทดลองที่ 3 > ตำรับการทดลองที่ 2) นอกจากนี้ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 มีค่ามากกว่าตำรับการทดลองที่ 1 และดินเดิมในพื้นที่ (13.9 mg/kg) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินก่อนการปลูกข้าวของทุกตำรับการทดลองอยู่ในระดับปานกลางถึงสูงมากเช่นเดียวกัน (75.4-206.0 mg/kg) โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ซึ่งปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของตำรับการทดลองที่ 4 มากกว่าตำรับการทดลองที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 มากกว่าตำรับการทดลองที่ 1 และดินเดิมในพื้นที่ (70.2 mg/kg) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สำหรับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินก่อนการปลูกข้าวในทุกตำรับการทดลอง (87.5-175.0 mg/kg) มีค่าน้อยกว่าปริมาณไนโตรเจนของดินเดิมในพื้นที่ (203.0 mg/kg) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการระเหยของ NH_3 เนื่องจาก ถ่านชีวภาพและปุ๋ยคอกยังไม่ได้จับและตรึงไนโตรเจนในดินได้อย่างดีในระยะ 14 วัน (Bruun & EL-Zehery, 2012; Jien et al., 2015; Sun et al., 2017) โดยผลการทดลองพบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมากที่สุด (175.0 mg/kg) รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 1 (131.0 mg/kg) ตำรับการทดลองที่ 2 (87.50 mg/kg) และตำรับการทดลองที่ 4 (87.50 mg/kg) ตามลำดับ ซึ่งปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินเดิมและตำรับการทดลองที่ 3 มากกว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินในตำรับการทดลองที่ 2 และตำรับการทดลองที่ 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

4.2.6 ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้และปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้

ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินก่อนการปลูกข้าวของทุกตำรับการทดลองอยู่ในช่วง 417-512 mg/kg โดยตำรับการทดลองที่ 2 มีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มากที่สุด (512 mg/kg) รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 1 (509 mg/kg) ตำรับการทดลองที่ 3 (430 mg/kg) และตำรับการทดลองที่ 4 (417 mg/kg) ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับดินเดิมในพื้นที่ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้เท่ากับ 540.0 mg/kg จะเห็นได้ว่าดินเดิมมีปริมาณมากกว่าทุกตำรับการทดลอง อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินก่อนการปลูกข้าวของทุกตำรับการทดลองอยู่ในช่วง 0.53-1.28 mg/kg โดยตำรับการทดลองที่ 4 มีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มากที่สุด (1.28 mg/kg) โดยปริมาณดังกล่าวมีค่ามากกว่าตำรับการทดลองที่ 2 (0.580 mg/kg) และตำรับการทดลองที่ 3 (0.530 mg/kg) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หากแต่ปริมาณดังกล่าวไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับดินเดิมในพื้นที่ (1.14 mg/kg)

4.2.7 ปริมาณโซเดียมทั้งหมด

ปริมาณโซเดียมทั้งหมดของดินก่อนการปลูกข้าวของทุกตำรับการทดลองอยู่ในช่วง 0.74-0.91 % ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างตำรับการทดลองและดินเดิมในพื้นที่ (0.83 %) ตำรับการทดลองที่ 3 มีปริมาณโซเดียมทั้งหมดสูงที่สุด (0.91 %) รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 1 (0.88 %) ตำรับการทดลองที่ 2 (0.77 %) และตำรับการทดลองที่ 4 (0.74 %) ตามลำดับ

4.2.8 ค่าอัตราการดูดซับโซเดียม

ค่าอัตราการดูดซับโซเดียม (SAR) ของดินก่อนการปลูกข้าวของทุกตำรับการทดลอง (9,355-15,713) มีค่าต่ำกว่าในดินเดิมในพื้นที่ (11,707) แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า SAR ของตำรับการทดลองที่ 3 (15,713) มากกว่าตำรับการทดลองที่ 2 (9,355) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ ตำรับการทดลองอื่น ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 4 (11,240) และตำรับการทดลองที่ 1 (10,921) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

กล่าวโดยสรุปแล้ว เมื่อผสมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพแก่ดินตามอัตราส่วนที่กำหนด ส่งผลให้ดินก่อนการปลูกข้าวทุกตำรับการทดลอง มีสมบัติของดินที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินเดิมในพื้นที่ โดยดินในตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตราร่วมกับปุ๋ยคอก (ตำรับการทดลองที่ 2, ตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4) มีแนวโน้มสมบัติของดินที่ดีกว่าดินเดิมในพื้นที่ โดยมีค่า pH ลดลงจากดินเดิมอย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงปริมาณอินทรีย์วัตถุที่เพิ่มขึ้นจากดินเดิม นอกจากนี้ ตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพ ยังช่วยเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบความเปลี่ยนแปลงของความเค็มของดินระหว่างดินเดิมในพื้นที่และดินก่อนปลูกข้าวในทุกตำรับการทดลอง

4.3 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินก่อนปลูกและดินหลังปลูกข้าว

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินภายหลังการปลูกข้าว ดำเนินการใน 2 รอบการเพาะปลูก กล่าวคือ ภายหลังการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 1 (เดือนสิงหาคม-ธันวาคม พ.ศ. 2562) และภายหลังการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 2 (เดือนมกราคม-เมษายน พ.ศ. 2563) ทั้งนี้ ในแต่ละรอบการเพาะปลูกไม่มีการใส่ถ่านชีวภาพและปุ๋ยคอกมูลวัวเนื้อเพิ่มเติม

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินก่อนการปลูกข้าวและภายหลังการปลูกข้าวในทั้ง 2 รอบการปลูก สรุปได้ดังนี้

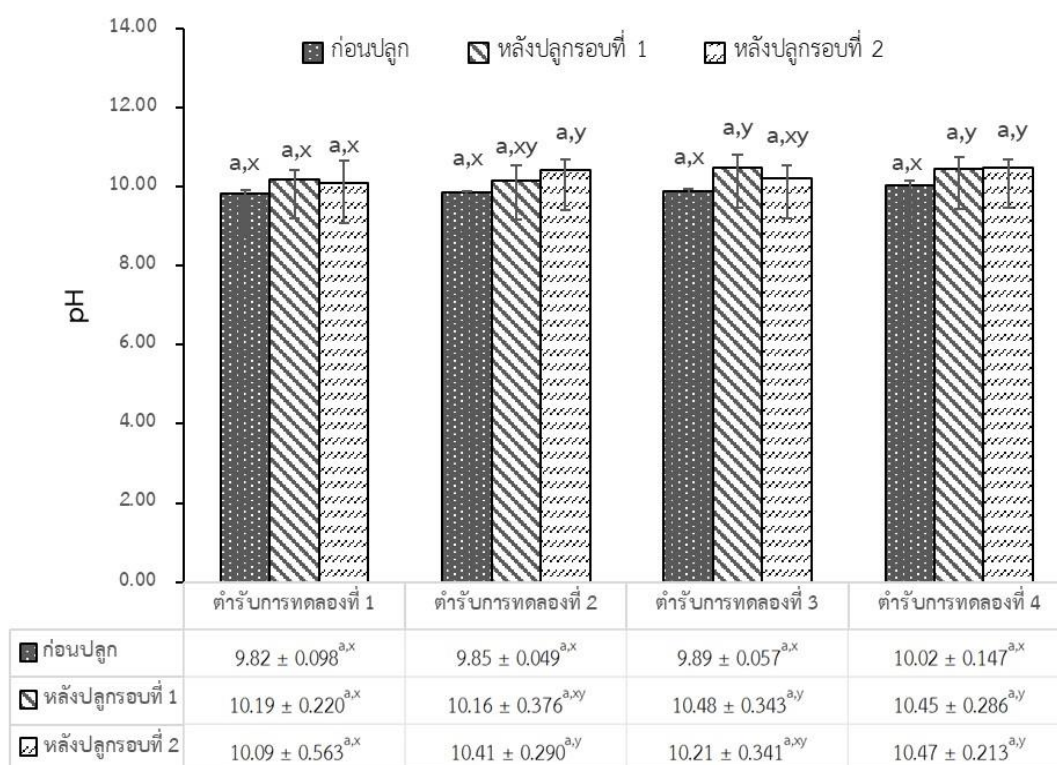
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินก่อนและหลังปลูกข้าว

4.3.1.1 ค่าความเป็นกรดต่าง

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 (10.16-10.48) มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกตำรับการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกข้าว (9.82-10.02) ในขณะที่ค่า pH ของดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 ไม่แตกต่างกับดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 (10.09-10.47) อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีรายละเอียดดังนี้ (รูปที่ 4-1)

เมื่อวิเคราะห์ความเป็นกรดต่างของดิน พบว่า ดินมีค่า pH เพิ่มขึ้นภายหลังจากการปลูกข้าวรอบที่ 1 โดยตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 มีค่า pH เพิ่มขึ้นหลังจากการปลูกข้าวรอบที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตัวอักษร x, y) ซึ่งภายหลังจากการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 1 พบว่า ตำรับการทดลองที่ 2 มีค่า pH ต่ำที่สุด (10.16) และตำรับการทดลองที่ 3 มีค่า pH สูงที่สุด (10.48) ทั้งนี้ ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างแต่ละตำรับการทดลอง (ตัวอักษร a)

ภายหลังการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 2 พบว่า ตำรับการทดลองที่ 4 มีค่า pH สูงที่สุด (10.47) ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 1 มีค่า pH ต่ำที่สุด (10.09) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับดินภายหลังการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 1 พบว่า ดินในตำรับการทดลองที่ 1 และตำรับการทดลองที่ 3 มีความเป็นต่างลดลง ส่วนดินในตำรับการทดลองที่ 2 และตำรับการทดลองที่ 4 มีความเป็นต่างเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ทั้งหมดที่กล่าวมาไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ รวมทั้ง ค่า pH ของแต่ละตำรับการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4-1 ค่าความเป็นกรดต่างของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (a, b, c) ในแนวนอน หมายถึง ตัวแปรในแต่ละตำรับการทดลองแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (x, y, z) ในแนวตั้ง หมายถึง ตัวแปรในก่อนและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และรอบที่ 2 แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

เมื่อเปรียบเทียบค่า pH ของดินก่อนทำการปลูกกับดินภายหลังการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 2 พบว่า ดินภายหลังการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 2 มีค่า pH เพิ่มขึ้นจากดินก่อนทำการปลูกในทุกตำรับการทดลอง โดยในตำรับการทดลองที่ 2 (10.41) และตำรับการทดลองที่ 4 (10.47) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร x, y)

จากผลการศึกษา ชี้ให้เห็นว่า การใส่ปุ๋ยคอกมูลวัวแห้งเพียงอย่างเดียวส่งผลให้ค่า pH ของดินไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกข้าวและหลังทำการปลูกข้าวทั้ง 2 รอบ ซึ่งแตกต่างจากตำรับการทดลองที่มีการใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตราที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงสรุปได้ว่า การใส่ถ่านชีวภาพควบคู่กับปุ๋ยคอกลงในดิน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดิน นอกจากนั้น การใส่ปุ๋ย

ร่วมกับถ่านชีวภาพทุกอัตรายังทำให้ดินภายหลังการเพาะปลูกทั้ง 2 รอบการปลูกมีค่า pH ของดินต่ำกว่าค่า pH ของดินเดิมในพื้นที่ (10.60) ด้วย

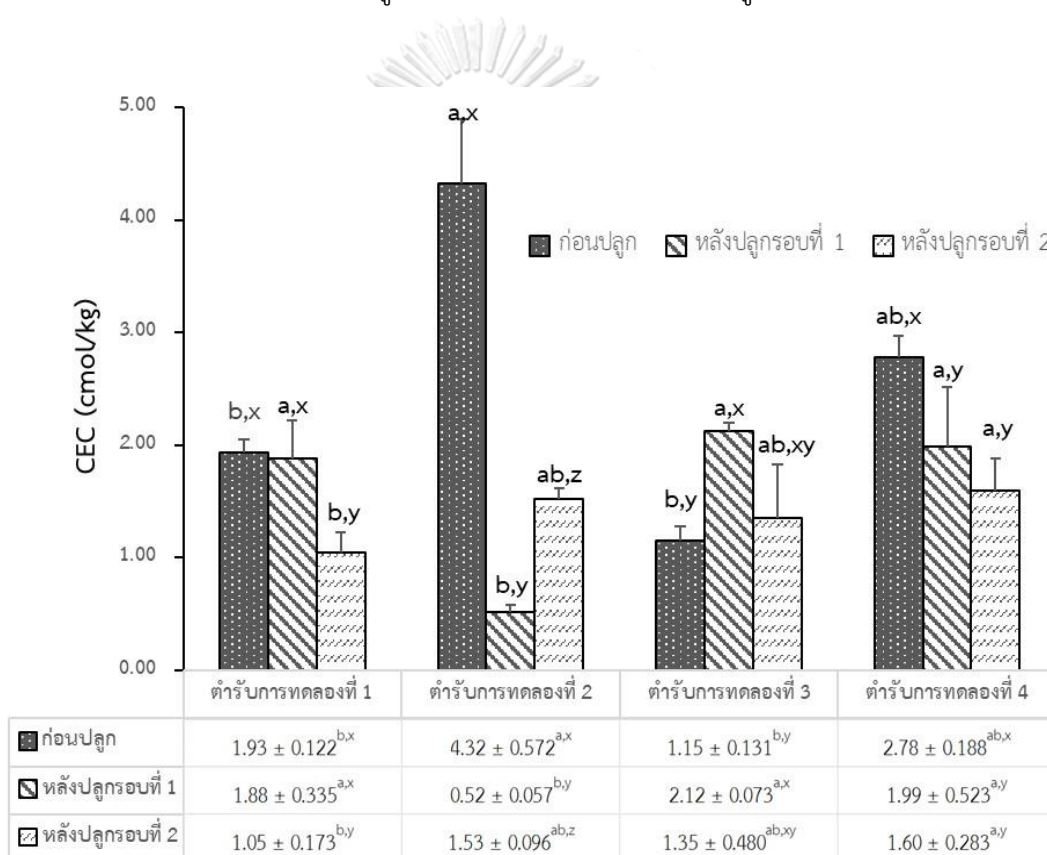
ผลการศึกษาค้นคว้านี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Wijitkosum (2020) ที่พบว่า การใช้ถ่านชีวภาพแกลบเพื่อปรับปรุงสมบัติของดินเค็ม ส่งผลให้ดินมีค่า pH (9.50-9.80) ต่ำกว่าดินที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพ (pH 10.20) เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Lashari และคณะ (2013) ที่ระบุว่า การใช้ถ่านชีวภาพลงในดินเค็มในอัตรา 12 t/ha ส่งผลให้ดินมีค่า pH (7.94) ต่ำกว่าดินที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพ (pH 8.23) รวมถึง สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Luo และคณะ (2017) ที่พบว่า ค่า pH ในดินลดลงจาก 8.03 (ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ) เป็น 7.60 (ใส่ถ่านชีวภาพอัตรา 1.5 %) ลดลงเป็น 7.72 (ใส่ถ่านชีวภาพอัตรา 5 %) และลดลงเป็น 7.84 (ใส่ถ่านชีวภาพอัตรา 10 %) และเช่นเดียวกันกับอีกหลาย ๆ งานวิจัยชี้ให้เห็นว่า การใช้ถ่านชีวภาพส่งผลให้ความเป็นต่างของดินเค็มลดลงทั้งดินเค็มโซดิกและดินโซดิก (Wu et al., 2014; Lashari et al., 2015; Sun et al., 2017)

การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดิน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก ได้แก่ ค่า pH ของถ่านชีวภาพและค่า pH ของดินเดิม (Liu & Zhang, 2012; Wu et al., 2014; Amini et al., 2016; Sun et al., 2016) และยังขึ้นอยู่กับ ประเภทของดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อุณหภูมิ กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน รวมถึง ระยะเวลาในการขังน้ำในดินด้วย (Ponnamperuma, 1972; Kaur et al., 2020)

ทั้งนี้ ดินในทุกตำรับการทดลองยังคงจัดอยู่ในระดับต่างจัดมาก โดยผลการวิเคราะห์ความเป็นกรดต่างของดินชี้ให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดินเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลจากความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในดิน (Buffer capacity) โดยในการศึกษานี้พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ระหว่างแต่ละตำรับการทดลอง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตาม ค่า pH ของดินในตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 มีแนวโน้มที่สูงกว่าตำรับการทดลองที่ 1 ที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพ ทั้งนี้ เป็นผลจากการที่เมื่อใส่ถ่านชีวภาพซึ่งมีความเป็นต่างปานกลาง (pH 7.90) ลงไปในดิน จึงเป็นการเพิ่มค่า pH ให้กับดินโดยตรง อีกทั้ง พื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพที่มีประจุลบอยู่มาก จึงจับกับ H^+ ทำให้ค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ การขังน้ำในดินยังมีผลต่อค่า pH ในดินอีกด้วย ซึ่งผลการศึกษาของ Lu และคณะ (2004) ระบุว่า การขังน้ำในดินที่มีค่า pH สูงจะส่งผลให้ค่า pH ของดินเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการละลายของคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต แต่อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาดังกล่าวไม่พบว่ามีเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ หมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด (carboxylic acid) ที่เกิดจากกระบวนการ oxidation ของถ่านชีวภาพจะส่งผลให้ค่า pH ของดินลดลง (Liu & Zhang, 2012) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างดิน ปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ ในการปลูกข้าวแบบขังน้ำในดิน เกิดกระบวนการที่หลากหลาย จึงส่งผลให้ค่า pH ในดิน มีการเปลี่ยนแปลงทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง

4.3.1.2 ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก

ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 (0.52-2.12 cmol/kg) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนทำการปลูก (1.15-4.32 cmol/kg) ยกเว้น ในตำรับการทดลองที่ 3 ที่มีค่า CEC เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตัวอักษร x, y) และยังมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.12 cmol/kg ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 2 มีค่า CEC ต่ำที่สุด (0.52 cmol/kg) และต่ำกว่าตำรับการทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตัวอักษร a, b) นอกจากนี้ ค่า CEC ในดินของทุกตำรับการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนทำการเพาะปลูก ยกเว้นตำรับการทดลองที่ 1 (รูปที่ 4-2)



รูปที่ 4-2 ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (a, b, c) ในแนวนอน หมายถึง ตัวแปรในแต่ละตำรับการทดลองแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (x, y, z) ในแนวตั้ง หมายถึง ตัวแปรในก่อนและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และรอบที่ 2 แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

ภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ค่า CEC ของดินอยู่ในช่วง 1.05-1.60 cmol/kg โดยค่า CEC ลดลงจากหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 ยกเว้น ตำรับการทดลองที่ 2 ที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร x, y, z) อีกทั้ง ตำรับการทดลองที่ 1 เป็นเพียงตำรับการทดลองเดียวที่มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญจากหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 นอกจากนี้ ตำรับการทดลองที่ 4 ซึ่งมีค่า CEC สูงที่สุด (1.60 cmol/kg) นั้น ค่าดังกล่าวยังสูงกว่าตำรับการทดลองที่ 1 (1.05 cmol/kg) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตัวอักษร a, b) อีกด้วย

เมื่อเปรียบเทียบค่า CEC ของดินระหว่างก่อนการปลูกข้าวและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีค่า CEC ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร x, y, z) ยกเว้น ตำรับการทดลองที่ 3 ที่มีค่า CEC เพิ่มขึ้นเป็น 1.35 cmol/kg

ภายหลังทำการปลูกข้าวทั้ง 2 รอบ จะเห็นได้ว่า ตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพมีค่า CEC สูงกว่าตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ โดยเฉพาะตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 เนื่องด้วยเมื่อถ่านชีวภาพอยู่ในดินเป็นระยะเวลาอันยาวนาน หมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างของถ่านชีวภาพจะเกิดการ oxidation เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันประจุลบ (หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิล) (Cheng et al., 2008) อีกทั้ง ถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวสูง เพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนประจุให้กับดิน ส่งผลให้ดินที่ใส่ถ่านชีวภาพมีค่า CEC สูงกว่าดินที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wijitkosum (2020) ที่พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพแถบในทุ้อตราส่งผลให้ค่า CEC ของดิน (7.66-8.34 cmol/kg) เพิ่มขึ้นสูงกว่าดินที่ใส่ปุ๋ยคอก (6.93 cmol/kg) และดินเดิม (5.79 cmol/kg) ในพื้นที่ โดยการใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 5.0 kg/m² ส่งผลให้ค่า CEC ในดินเพิ่มขึ้นสูงที่สุด ผลการศึกษาของ Luo และคณะ (2017) ที่พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพส่งผลให้ค่า CEC ในดินเพิ่มขึ้นจาก 2.72 cmol/kg เป็น 3.03 cmol/kg เมื่อใส่ถ่านชีวภาพอัตรา 1.5 % และมีค่า CEC เพิ่มขึ้นเป็น 3.15 cmol/kg เมื่อใส่ถ่านชีวภาพอัตรา 10 % โดยค่า CEC มีค่าสูงที่สุด (3.19 cmol/kg) เมื่อใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 5 %

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่า ดินภายหลังการเพาะปลูกทั้ง 2 รอบ ในทุกตำรับการทดลองมีค่า CEC ลดลงเมื่อเปรียบเทียบค่า CEC ของดินเดิมในพื้นที่ ซึ่งมีค่า CEC เท่ากับ 2.4 cmol/kg ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากปริมาณประจุลบ เช่น ซัลเฟต (SO₄²⁻) หรือ คลอไรด์ (Cl⁻) ในดินที่มีจำนวนน้อยลง (Abdullaeva, 2014) และจากการปลดปล่อยแคลเซียมส่วนเกินจากถ่านชีวภาพออกมาในดินที่มีปริมาณแคลเซียมมากอยู่แล้ว ทำให้แคลเซียมจับตัวกับอนุภาคอื่น ๆ โดยเฉพาะอินทรีย์วัตถุ รวมถึง การที่อินทรีย์วัตถุซึ่งมีปริมาณประจุลบมากถูกดูดซับโดยถ่านชีวภาพ ส่งผลให้พื้นที่บริเวณที่แลกเปลี่ยนประจุได้ของทั้งถ่านชีวภาพและอินทรีย์วัตถุลดลง (Prommer et al., 2014; Hailegnaw et al., 2019) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hailegnaw

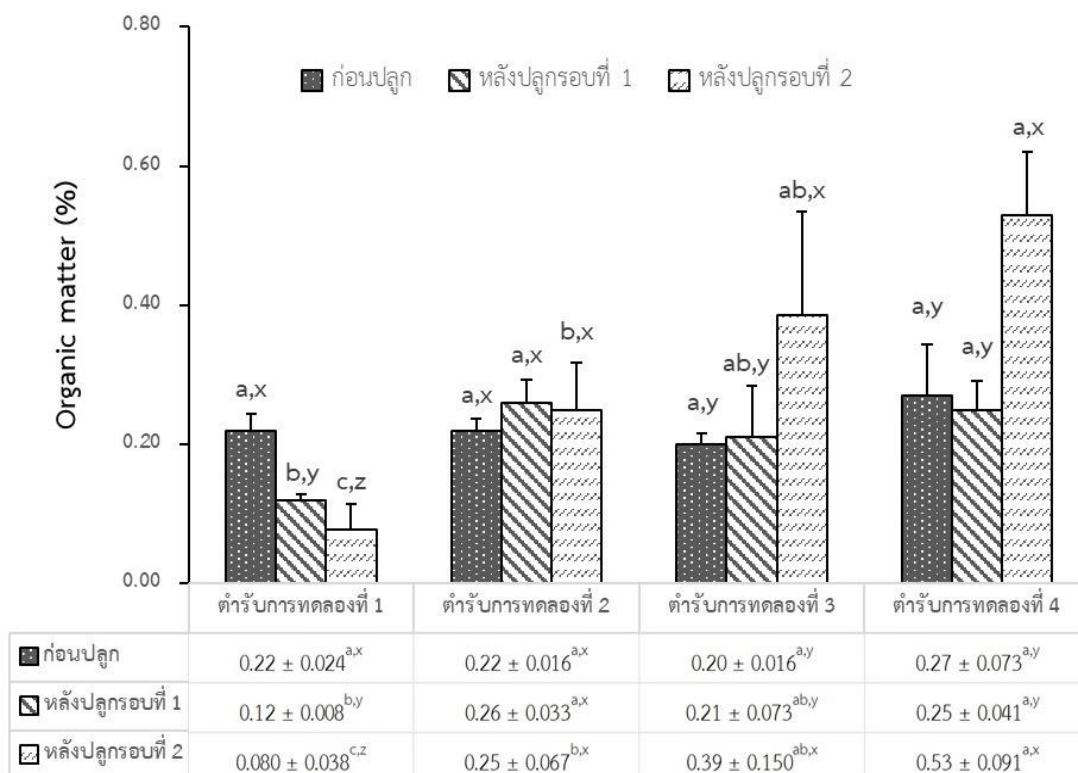
และคณะ (2019) ที่ทำการศึกษาค่าผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อดินในพื้นที่การเกษตร 10 พื้นที่พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพในดินที่มีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูง จะส่งผลให้ค่า CEC ลดลงจากดินที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพตั้งแต่ 0.2 ถึง 7.9 % เช่นเดียวกับในการศึกษานี้ที่ ดินเดิมในพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษา มีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูง (540 mg/kg) และในทุกตำรับการทดลองยังมีค่า CEC ภายหลังการเพาะปลูกทั้ง 2 รอบต่ำกว่าค่า CEC ของดินเดิม

4.3.1.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.12-0.26 % โดยตำรับการทดลองที่ 2 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงสุด และตำรับการทดลองที่ 1 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำที่สุด ซึ่งตำรับการทดลองที่ 1 เป็นเพียงตำรับการทดลองเดียวที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนปลูก อีกทั้ง ยังมีปริมาณน้อยกว่าตำรับการทดลองอื่น ๆ ที่ใส่ถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร a, b) ทั้งนี้ ภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 ในตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตราไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณอินทรีย์วัตถุกับปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ (รูปที่ 4-3)

ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 มีค่าสูงที่สุดในตำรับการทดลองที่ 4 (0.53 %) และตำรับการทดลองที่ 1 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำที่สุด (0.08 %) ซึ่งตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพ ยังคงมีอินทรีย์วัตถุมากกว่าตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตัวอักษร a, b, c) เช่นเดียวกับผลของดินภายหลังการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 1 และเมื่อเปรียบเทียบอินทรีย์วัตถุของดินหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ตำรับการทดลองที่ 1 มีอินทรีย์วัตถุลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร x, y, z)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินระหว่างก่อนการปลูกข้าวและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ตำรับการทดลองที่ 1 เป็นตำรับการทดลองเดียวที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยลดลง 0.14 % (ตัวอักษร x, y, z) ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ดินภายหลังจากการปลูกข้าวทั้ง 2 รอบของตำรับการทดลองที่ 4 ยังมีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าตำรับการทดลองที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจาก ถ่านชีวภาพแกลบมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงถึง 13.06 % การใส่ถ่านชีวภาพลงในดินจึงเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้กับดินได้โดยตรง ซึ่งผลการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินภายหลังการเพาะปลูกรอบที่ 2 ชี้ให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพมีผลต่อการเพิ่มขึ้นและคงอยู่ของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน



รูปที่ 4-3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (a, b, c) ในแนวนอน หมายถึง ตัวแปรในแต่ละตำรับการทดลองแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (x, y, z) ในแนวตั้ง หมายถึง ตัวแปรในก่อนและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และรอบที่ 2 แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

ผลการศึกษานี้ยังชี้ให้เห็นว่า ตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตรา มีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่าดินเดิมในพื้นที่ (0.19 %) และยิ่งมากกว่าในตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า การใส่ถ่านชีวภาพทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินเพิ่มขึ้น และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ในดิน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wijitkosum (2020) ที่พบว่า ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเค็มที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติของดินด้วยถ่านชีวภาพกลบมีค่าสูงขึ้น และการเพิ่มปริมาณถ่านชีวภาพส่งผลให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยการใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 2.0 kg/m^2 ส่งผลให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 0.210 % ในขณะที่ การใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 5.0 kg/m^2 ส่งผลให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 0.260 % เช่นเดียวกับการศึกษาผลของถ่านชีวภาพในพื้นที่ดินเค็มของ

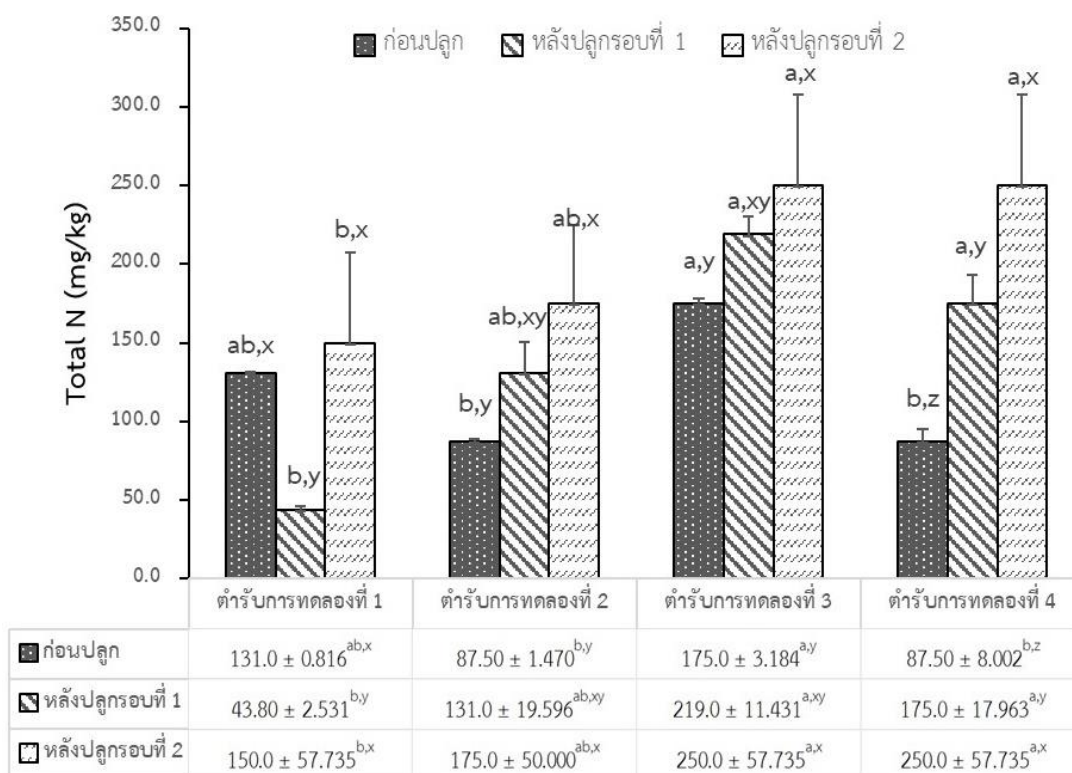
Abdullaeva (2014) ซึ่งพบว่า การใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 20 กรัม/กิโลกรัมของดิน ส่งผลให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 1.49 % และปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นเป็น 1.58 % เมื่อใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 30 กรัม/กิโลกรัมของดิน นอกจากนี้ ปริมาณอินทรีย์วัตถุจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ย สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sriburi และ Wjitkosum (2016) ที่ระบุว่า การใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์ในดินร่วนเหนียวปนทรายเพื่อปลูกข้าวไร่ ส่งผลให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุ (1.81 %) สูงกว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุในตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียว (1.74 %) และสูงกว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุในตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียว (1.55 %)

ทั้งนี้ การใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยจะช่วยเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินได้มากขึ้น นอกจากจะเป็นผลโดยตรงจากปริมาณอินทรีย์วัตถุในถ่านชีวภาพและในปุ๋ยแล้ว ในดินที่มีค่า pH สูง โดยเฉพาะดินในเขตร้อนชื้น การถูกชะและย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว อีกทั้งโครงสร้างของดินจะถูกทำลาย ซึ่งจะทำให้ความเชื่อมโยงแน่นระหว่างเม็ดดินลดลงและมีแนวโน้มที่จะถูกชะล้างหรือพังทลายมากขึ้น (Abdullaeva, 2014) ในขณะที่ การใส่ถ่านชีวภาพจะช่วยเพิ่มความพรุนและการถ่ายเทอากาศให้กับดิน ในขณะเดียวกันยังดูดซับและเก็บกักธาตุอาหารต่าง ๆ ไว้ที่ตัวถ่านชีวภาพ และรากพืชค่อย ๆ ดูดซับไปใช้ได้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน (Lehmann et al., 2011; Xiao et al., 2020; Zhao et al., 2020; วิชิตา กัลยาศิริ, 2556)

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารของดินก่อนและหลังปลูกข้าว

4.3.2.1 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 ในตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตรา มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกข้าว (87.50-175.00 mg/kg) ยกเว้น ตำรับการทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว ที่มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดลดลงจากดินก่อนปลูกข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ตัวอักษร x, y) และยังมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดต่ำที่สุด (43.80 mg/kg) ในขณะที่ตำรับการทดลองที่ 3 มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสูงที่สุด (219.00 mg/kg) และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินในตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 มีค่าสูงกว่าตำรับการทดลองที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร a, b) (รูปที่ 4-4)



รูปที่ 4-2 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (a, b, c) ในแนวนอน หมายถึง ตัวแปรในแต่ละตำรับการทดลองแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (x, y, z) ในแนวตั้ง หมายถึง ตัวแปรในก่อนและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และรอบที่ 2 แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

ภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของทุกตำรับการทดลอง (150.0-250.0 mg/kg) มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 โดยตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากันและมีค่าสูงที่สุด คือ 250.00 mg/kg ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 1 มีปริมาณไนโตรเจนในดินต่ำที่สุด (150.00 mg/kg) โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเฉพาะในตำรับการทดลองที่ 1 และตำรับการทดลองที่ 4 เท่านั้น (ตัวอักษร x, y, z)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินระหว่างก่อนการปลูกข้าวและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ทุกตำรับการทดลองที่ไถ่ถ่านชีวภาพเท่านั้นที่มีปริมาณไนโตรเจน

ทั้งหมดในดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร x, y, z) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินระหว่างก่อนการปลูกข้าวและหลังทำการปลูกข้าวในรอบที่ 1 มีเพียงดินในตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพเท่านั้น (ตำรับการทดลองที่ 1) ที่มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดลดลง ถึงแม้ว่า ภายหลังจากเพาะปลูกข้าวรอบที่ 2 จะพบว่า ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินในตำรับการทดลองที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่ค่าดังกล่าวยังคงต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับตำรับการทดลองทั้งหมด อีกทั้ง ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นยังคงไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกข้าว ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่มีการใส่ถ่านชีวภาพ มีปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบระหว่างดินก่อนการปลูกข้าวและหลังทำการปลูกข้าวทั้ง 2 รอบ นอกจากนั้น ดินหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2 ในตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 ยังมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มสูงกว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินเดิมในพื้นที่ (203.0 mg/kg) อีกด้วย

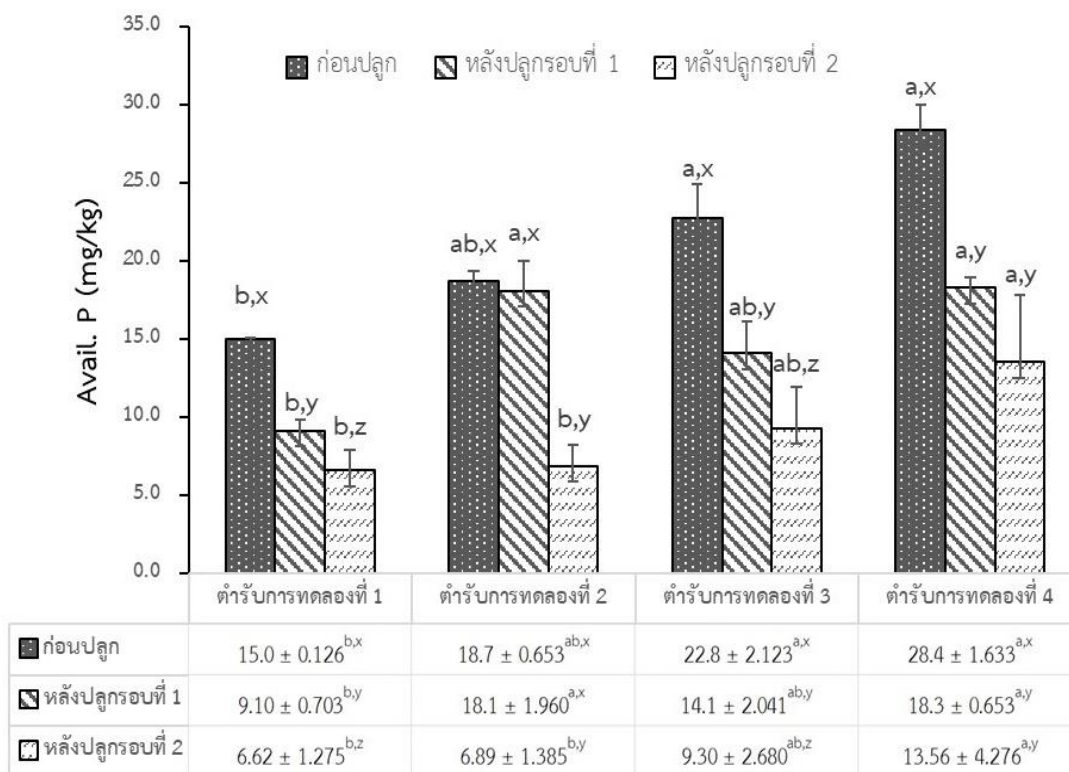
จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า การใส่ถ่านชีวภาพลงไปในดินส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ดังจะเห็นได้จาก ดินในตำรับการทดลองที่ 1 ภายหลังจากการปลูกข้าวทั้ง 2 รอบการปลูก มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่มีการใส่ถ่านชีวภาพ ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับผลการศึกษาของงานวิจัยหลายชิ้น อาทิ ผลการศึกษาของ Wijitkosum (2020) ที่พบว่า ดินเค็มที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 4.0 kg/m² ร่วมกับปุ๋ยคอกในอัตรา 1.25 kg/m² ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินเท่ากับ 0.011 % ในขณะที่ ดินที่ใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดต่ำมากจนไม่สามารถตรวจพบได้ เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Xia และคณะ (2020) ที่ระบุว่า การใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 7.5 กรัม/กระถาง ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.76 g/kg เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.72 g/kg นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านชีวภาพเป็นอัตรา 45 กรัม/กระถาง ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเป็น 1.19 g/kg

ทั้งนี้ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินที่ใส่ถ่านชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้นขึ้นเป็นผลเนื่องจากถ่านชีวภาพช่วยตรึงไนโตรเจนให้ยังคงอยู่ในดิน โดยประจุลบบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพจะจับกับ NH₄⁺ ช่วยลดการสูญเสียไนโตรเจนจากการระเหย (volatilization) ของ NH₃, N₂O และ N₂ (Bai et al., 2015; Saifullah et al., 2018; Ye et al., 2020) และเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับไนโตรเจนและการนำไนโตรเจนไปใช้ของรากพืช ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดีขึ้น (Xia et al., 2020) อีกทั้ง ถ่านชีวภาพเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ และส่งเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์ จึงมีผลอย่างมากต่อต่อวัฏจักรไนโตรเจนในดิน (Lovley et al., 1996; Kappler et al., 2014; Nelissen et al., 2014) นอกจากนั้น การปลูกข้าวด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง ยังส่งผลต่อกระบวนการ nitrification และ denitrification อีกด้วย โดยในช่วงที่ดินที่มีน้ำขัง (anaerobic condition) จะมีปริมาณออกซิเจนใน

ดินต่ำ ส่งผลให้กระบวนการ nitrification เกิดน้อยลง (คงเหลือ NH_4^+ จำนวนมาก) ในขณะที่จุลินทรีย์บางกลุ่มจะดึงออกซิเจนที่ต้องการใช้ในกิจกรรม ออกจากโมเลกุลของสารประกอบไนโตรเจน (NO_3^- , NO_2^-) ทำให้เกิดกระบวนการ denitrification และไนโตรเจนระเหยออกสู่บรรยากาศ ซึ่งในช่วงที่ไม่ได้ขังน้ำในดิน ส่งผลให้ดินมีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้น กระบวนการ nitrification จึงเกิดเพิ่มขึ้น (Tan et al., 2013; ปัทมา วิทยากร, 2547) อีกทั้ง การที่ถ่านชีวภาพช่วยเพิ่มช่องว่างระหว่างให้กับดิน ลดความหนาแน่นของดิน ส่งผลให้อากาศผ่านในดินเพิ่มมากขึ้น ย่อมส่งผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ Gunarathne และคณะ (2017) ยังระบุว่า ปฏิกริยารวมของ nitrification เป็นผลให้พืชดูดซึมไนโตรเจนน้อยลง ในขณะที่ การดูดซึมโพแทสเซียมของพืชเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการแข่งขันของไอออนทั้งสอง แต่อย่างไรก็ตาม การขังน้ำในดินอาจช่วยเพิ่มปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้เช่นกัน (Ono, 1991) นอกจากนี้ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ที่สามารถอธิบายถึงปริมาณไนโตรเจนที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ โดยหากอินทรีย์วัตถุมีค่า C/N ต่ำกว่า 20:1 มีผลทำให้กระบวนการ mineralization ของไนโตรเจนเกิดมากกว่ากระบวนการ immobilization ทำให้สารประกอบไนโตรเจนคงเหลือและถูกปลดปล่อยออกมาสู่ดินในรูปของ NH_4^+ โดยในการศึกษานี้ ถ่านชีวภาพแกลบและปุ๋ยคอก มีค่า C/N เท่ากับ 9.10 และ 10.6 ตามลำดับ (โสฬส แซ่ลิ้ม, 2559) จึงอาจกล่าวได้ว่า ทั้งถ่านชีวภาพแกลบและปุ๋ยคอก มีส่วนในการปล่อยไนโตรเจนออกมาสู่ดินเช่นกัน

4.3.2.2 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 ในทุกตำรับการทดลองอยู่ในระดับต่ำถึงสูง (9.1-18.3 mg/kg) โดยปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในทุกตำรับการทดลองมีค่าลดลงจากดินก่อนทำการปลูกข้าวที่อยู่ในระดับสูง (15.0-28.4 mg/kg) โดยตำรับการทดลองที่ 1 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำกว่าในตำรับการทดลองที่ 2 และตำรับการทดลองที่ 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ตัวอักษร a, b) ทั้งนี้ ในตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ (ตำรับการทดลองที่ 1) มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชต่ำที่สุด (9.1 mg/kg) และในตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตราสูงที่สุด (ตำรับการทดลองที่ 4) มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชสูงที่สุด (18.3 mg/kg) (รูปที่ 4-5)



รูปที่ 4-3 ปริมาณฟอสฟอรัสที่มีประโยชน์ต่อพืชของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (a, b, c) ในแนวนอน หมายถึง ตัวแปรในแต่ละตำรับการทดลองแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (x, y, z) ในแนวตั้ง หมายถึง ตัวแปรในก่อนและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และรอบที่ 2 แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

ภายหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 โดยมีค่าอยู่ในช่วง 6.62-13.56 mg/kg ซึ่งจัดอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง โดยทุกตำรับการทดลองมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร x, y, z) ยกเว้น ตำรับการทดลองที่ 4 ที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และตำรับการทดลองที่ 4 ยังเป็นตำรับการทดลองที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (13.56 mg/kg) สูงที่สุดอีกด้วย ซึ่งปริมาณดังกล่าวมากกว่าตำรับการทดลองที่ 1 และตำรับการทดลองที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร a, b) โดยปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มีปริมาณต่ำที่สุด (6.62 mg/kg) ในตำรับการทดลองที่ 1 จึงกล่าวได้ว่า อัตราการใส่ผ่านชีวภาพลงในดินส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน นอกจากนี้ ปริมาณการลดลงของฟอสฟอรัสที่เป็น

ประโยชน์ยังแปรผกผันกับปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ลงไปดิน กล่าวคือ เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง ภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 และรอบที่ 2 ดินที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตราที่สูงที่สุด (ดำรับการทดลองที่ 4; ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ลดลง 4.74 mg/kg) มีปริมาณฟอสฟอรัสในดินลดลงน้อยกว่าดินที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตราที่ต่ำที่สุด (ดำรับการทดลองที่ 2; ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ลดลง 11.21 mg/kg)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ระหว่างดินก่อนการปลูกข้าวและดินหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินทุกดำรับการทดลองมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน (ตัวอักษร x, y, z)

ทั้งนี้ หากเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของดินภายหลังการทดลองกับดินเดิมในพื้นที่ (13.9 mg/kg) พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพในดินส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินลดลงน้อยกว่าการไม่ใส่ถ่านชีวภาพ อีกทั้ง ทุกดำรับการทดลองมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อทำการปลูกข้าว โดยเฉพาะหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2 ที่มีค่าน้อยกว่าดินเดิมในพื้นที่ในทุกลำรับการทดลอง ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีปริมาณลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไปสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้าที่ระบุว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระยะเวลาผ่านไป 9 สัปดาห์ (Liu et al., 2017) และ 90 วัน (Xu et al., 2016) แต่อย่างไรก็ตาม การลดลงของปริมาณฟอสฟอรัสในดินหลังปลูกข้าวรอบที่ 2 นั้น จะเห็นได้ว่า ในดำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตราสูงที่สุด มีการลดลงของปริมาณฟอสฟอรัสน้อยที่สุด ในขณะที่ดำรับการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพมีการลดลงของปริมาณฟอสฟอรัสสูงที่สุด

การที่ปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่ถ่านชีวภาพที่เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากปริมาณของถ่านชีวภาพกลับที่ใส่ส่งผลต่อค่า pH ของดิน โดยค่า pH ของดินที่มากกว่า 8 จะทำให้ฟอสฟอรัสอยู่ในรูป PO_4^{3-} ซึ่งเป็นรูปที่พืชนำไปใช้ยาก และมีปริมาณของแคลเซียมในดินมากส่งผลให้แคลเซียมจับกับฟอสเฟตอย่างรวดเร็วแล้วตกตะกอนเป็น $CaHPO_4$ และ $Ca_3(PO_4)_2$ ซึ่งส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชลดลง ลดการเกิดเป็นรูป HPO_4^{2-} ซึ่งเป็นรูปที่คอลลอยด์ดินมักดูดซับไว้ (Naidu et al., 1991; Marks et al., 2014; Xu et al., 2014; Xu et al., 2016) โดยการศึกษาของ Xu และคณะ (2014) ทำการเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินที่มีค่าความเป็นกรดต่างแตกต่างกัน พบว่า เมื่อมีการใส่ถ่านชีวภาพในดินที่มีความเป็นกรด จะมีการดูดซับฟอสฟอรัสน้อยกว่าดินที่มีความเป็นกรด เนื่องจากเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น พื้นผิวของดินมีความเป็นลบมากขึ้น จึงจับไล่ประจุลบ (ฟอสฟอรัส) ออกไป และการใส่ถ่านชีวภาพส่งผลให้ดินที่มีความเป็นด่างมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มากขึ้น จากการศึกษาของ Saifullah และคณะ (2018)

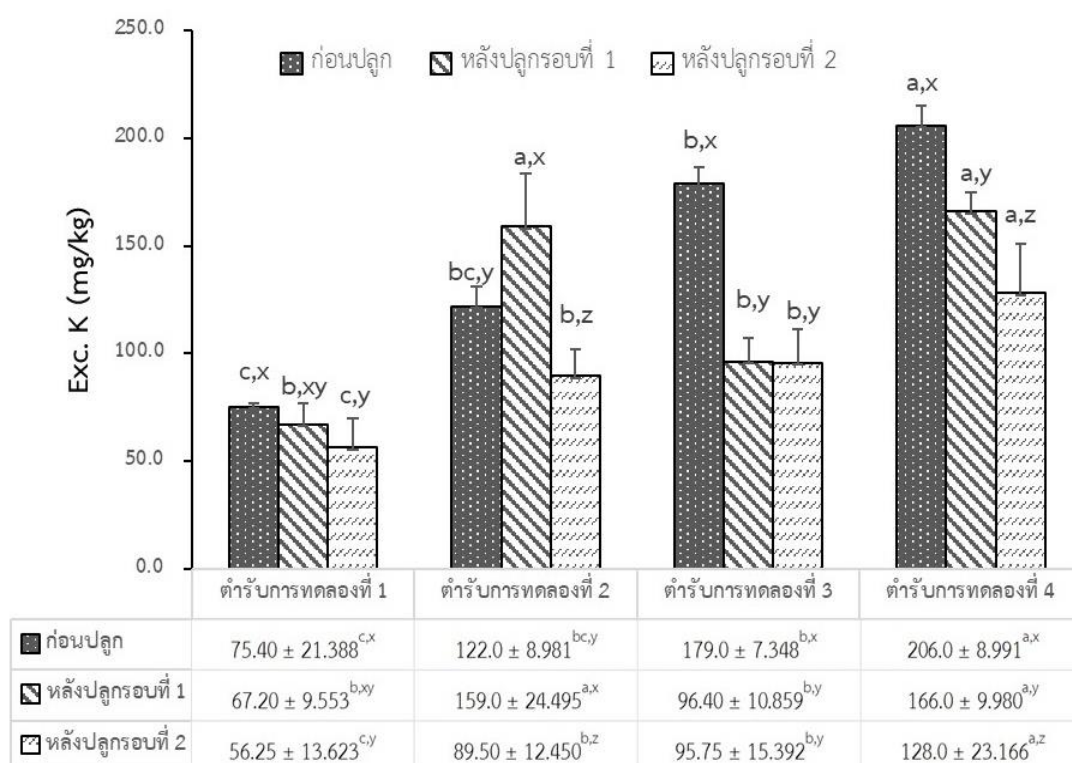
ระบุว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ขึ้นอยู่กับค่า pH และปริมาณอินทรีย์วัตถุของดิน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในครั้งนี้ที่ ดำรับการทดลองที่ 1 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุที่น้อยที่สุด ส่งผลให้ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับดำรับการทดลองอื่น ๆ เนื่องจาก อินทรีย์วัตถุในดินจะแย่งกับฟอสเฟต เพื่อจับกับพื้นผิวของดิน ช่วยลดการตรึงฟอสฟอรัสในดิน เพิ่มฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Prasad & Chakraborty, 2019) จะเห็นได้ว่า ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินที่ใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยคอก มีปริมาณมากกว่า ดินที่ใส่ปุ๋ยคอกอย่างเดียว ซึ่ง การศึกษานี้ ให้ผลสอดคล้องกับผลการศึกษานักวิจัยหลายชิ้นที่ทดลองใช้ถ่านชีวภาพในการ ปรับปรุงสมบัติของดินเค็ม อาทิ Wijitkosum (2020) ที่ชี้ให้เห็นว่า ดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็น ประโยชน์ต่อพืชเพิ่มสูงขึ้นภายหลังจากการใส่ถ่านชีวภาพแกลบร่วมกับปุ๋ยคอก โดยปริมาณ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณถ่านชีวภาพที่ใช้ เช่นเดียวกับผลการศึกษาด้าน ชีวภาพที่มีต่อดินเค็มของ Liu และคณะ (2017) และ Lashari และคณะ (2013) ที่พบว่า การใส่ถ่าน ชีวภาพสามารถเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมากกว่าการไม่ใส่ถ่านชีวภาพ อย่างไรก็ตาม ในการศึกษานี้ อาจกล่าวได้ว่าค่า pH ของดินอาจส่งผลเล็กน้อย เนื่องจากค่า pH ของดินในทุก ดำรับการทดลองมีค่ามากกว่า 8 ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า นอกจากการที่แคลเซียมจับกับฟอสเฟตและ ตกตะกอน ระยะเวลาและการปลูกข้าว ยังเป็นสาเหตุหนึ่งของการลดลงของปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็น ประโยชน์ต่อพืชในดิน

4.3.2.3 ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้

ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 (67.2-166.0 mg/kg) ลดลงจากดินก่อนการปลูกข้าว (75.4-206.0 mg/kg) ซึ่งดำรับการทดลองที่ 2 (159.0 mg/kg) และดำรับการทดลองที่ 4 (166.0 mg/kg) มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ใน ระดับสูงมาก และดำรับการทดลองทั้ง 2 ยังมีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มากกว่าในดำรับ การทดลองที่ 1 และดำรับการทดลองที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร a, b) โดย ดำรับการทดลองที่ 1 มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำที่สุด (67.20 mg/kg) ซึ่งจัดอยู่ใน ระดับปานกลาง อีกทั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนปลูก พบว่า มีเพียงดำรับการทดลองที่ 2 เท่านั้นที่ มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4-6)

ภายหลังจากการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ปริมาณลดลงจากภายหลังจากการปลูกข้าวรอบที่ 1 ในทุกดำรับการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 56.25-128.0 mg/kg ดำรับการทดลองที่ 1 มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำที่สุดและอยู่เกณฑ์ต่ำ (56.25 mg/kg) โดยมีค่าดังกล่าวต่ำกว่าดำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร

a, b, c) ในขณะที่ ดำรับการทดลองที่ 4 มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้สูงที่สุดและอยู่ในระดับสูงมาก (128.0 mg/kg) รวมถึง มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มากกว่าดำรับการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4-4 ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินในแต่ละดำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (a, b, c) ในแนวนอน หมายถึง ตัวแปรในแต่ละดำรับการทดลองแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (x, y, z) ในแนวตั้ง หมายถึง ตัวแปรในก่อนและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และรอบที่ 2 แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินก่อนการปลูกข้าวและดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ดินในทุกดำรับการทดลองมีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ตัวอักษร x, y, z) นอกจากนี้ หากเปรียบเทียบดินหลังการปลูกข้าวทั้ง 2 รอบกับดินเดิมในพื้นที่ (70.2 mg/kg) พบว่า ดำรับการทดลองที่มีการไถผ่านชีวภาพ มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่ ดำรับการทดลองที่ไม่ไถผ่านชีวภาพ

มีปริมาณดังกล่าวลดลง จึงสรุปได้ว่า การใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยคอกช่วยเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินได้มากกว่าการใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว เนื่องจาก การใส่ปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพลงในดิน จะเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ให้กับดินได้โดยตรง อีกทั้ง ประจุลบบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพจะดูดซับโพแทสเซียม (K^+) และค่อย ๆ ปล่อยออกมา แทนที่จะถูกชะล้างไปทีละอย่างแบบการใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว ทำให้ดินที่ใส่ถ่านชีวภาพมีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มากกว่าในดินที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า ถ่านชีวภาพมีผลต่อปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ซึ่งสอดคล้องกับ ผลการศึกษาของนักวิจัยที่ทำการทดลองใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงสมบัติของดินเค็มในการปลูกข้าวและข้าวสาลี และให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับผลการศึกษาครั้งนี้ อาทิ ผลการศึกษาของ Akhtar และคณะ (2015) ผลการศึกษาของ Lashari และคณะ (2013) และผลการศึกษาของ Abdul และ Abdul (2017) เป็นต้น ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการใส่ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตราสูงสุด (ดำรับการทดลองที่ 4) ทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่ามากที่สุด ในขณะที่ การใส่ปุ๋ยเพียงอย่างเดียว (ดำรับการทดลองที่ 1) ทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าน้อยที่สุด นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ในดิน ยังมีผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณถ่านชีวภาพที่ใช้ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wijitkosum (2020) ที่พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพลงในดินเค็มที่มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 14.50 mg/kg ทำให้ดินดินเค็มดังกล่าวมีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (100.00-191.00 mg/kg) สูงกว่าการไม่ใส่ถ่านชีวภาพ (38.00 mg/kg) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ถึงแม้ว่าจะใส่ถ่านชีวภาพในอัตราต่ำที่สุด (2.0 kg/m²) ก็ตาม เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Kim และคณะ (2016) ที่พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 5 % ส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้เท่ากับ 2.8 cmol_c/kg ในขณะที่ การใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 1 % ส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเท่ากับ 1.2 cmol_c/kg อีกทั้ง ในดินที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพเลย มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเท่ากับ 0.9 cmol_c/kg

ผลการศึกษาครั้งนี้ยังชี้ให้เห็นว่า ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีแนวโน้มลดลงภายหลังการปลูกข้าว เช่นเดียวกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ซึ่งการลดลงของโพแทสเซียมในดิน อาจเป็นผลมาจากการเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดินด้วยถ่านชีวภาพ ส่งผลให้ความเข้มข้นของเกลือในดินลดลง (Saifullah et al., 2018) และยังเป็นผลมาจากการปรับสมดุลของอัตราส่วนของ K:Na ซึ่งเป็นการปรับตัวของพืชทนเค็มที่จะดูดซึมโพแทสเซียมเพิ่มเข้าไป เพื่อให้สมดุลกับปริมาณโซเดียมจำนวนมากที่ดูดซึมเข้าไป (Assaha et al., 2017; Hussain et al., 2017; Xiao et al., 2020) อีกทั้ง ถ่านชีวภาพยังมีผลต่ออัตราส่วนของ K:Na ในดินอีกด้วย ดังผล

การศึกษาของ Lashari และคณะ (2015) ที่ศึกษาผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อการปลูกข้าวโพดในดินเค็ม โดยพบว่า ใบของข้าวโพดที่ปลูกในดินที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 12 t/ha มีอัตราส่วนของ K:Na เพิ่มขึ้น 61–63 % เมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกโดยไม่ใส่ถ่านชีวภาพ ซึ่งการที่ปริมาณโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นในใบ เป็นปัจจัยหลักที่บรรเทาความเครียดของเกลือให้กับพืช (Lashari et al., 2015; Saifullah et al., 2018)

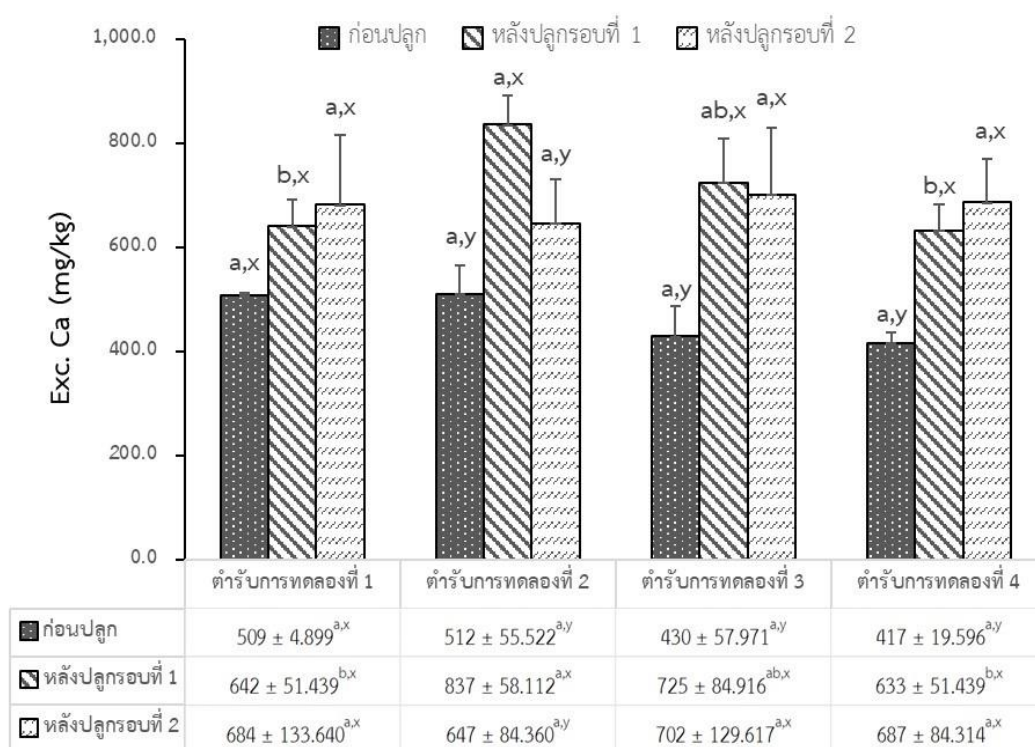
จึงอาจสรุปได้ว่า ปริมาณโพแทสเซียมในดินที่ลดลงภายหลังจากการปลูกข้าวโพดเป็นผลจากการดูดซึมโพแทสเซียมของพืช รวมถึง ผลของถ่านชีวภาพที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซึมโพแทสเซียมของพืช (Haider et al., 2016; Wang et al., 2018) ซึ่งผลการศึกษาครั้งนี้ให้ผลไปในทิศทางดังกล่าว กล่าวคือ ภายหลังจากการปลูกข้าวรอบที่ 1 พบเพียงดินในตำรับการทดลองที่ 2 เท่านั้นที่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยน สอดคล้องกับผลการเจริญเติบโตของข้าวในตำรับการทดลองที่ 2 ที่ให้ผลต่ำที่สุด (จะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 5) จึงอาจกล่าวได้ว่า ต้นข้าวในตำรับการทดลองที่ 2 ไม่ดูดดึงโพแทสเซียมเพื่อปรับสมดุลอัตราส่วนระหว่าง K:Na ทำให้การเจริญเติบโตของข้าวแย่มากที่สุด ส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมากที่สุดด้วย อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ให้ผลตรงข้ามจากงานวิจัยบางชิ้นที่กล่าวว่า ถ่านชีวภาพซึ่งมีปริมาณโพแทสเซียมอยู่สูง จะช่วยเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน เนื่องจากการเพิ่มค่า CEC ให้กับดิน (Gul & Whalen, 2016; Gunarathne et al., 2017; Farkas et al., 2020)

4.3.2.4 ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้

ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 ในทุกตำรับการทดลอง (633-837 mg/kg) เพิ่มขึ้นจากดินก่อนการปลูกข้าว (417-512 mg/kg) โดยเฉพาะในดินที่มีการใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตรา มีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มขึ้นจากดินก่อนการปลูกข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร x, y) ซึ่งตำรับการทดลองที่ 2 มีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมากที่สุด และยิ่งมากกว่าตำรับการทดลองที่ 1 (642 mg/kg) และตำรับการทดลองที่ 4 (633 mg/kg) อย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย (ตัวอักษร a, b) (รูปที่ 4-7)-

ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 ในตำรับการทดลองที่ 1 (684 mg/kg) และตำรับการทดลองที่ 4 (687 mg/kg) มีค่าเพิ่มขึ้นจากหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 2 (647 mg/kg) และตำรับการทดลองที่ 3 (702 mg/kg) มีค่าดังกล่าวลดลง โดยเฉพาะในตำรับการทดลองที่ 2 ที่มีค่าลดลงจากหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตัวอักษร x, y) ทั้งนี้ การที่ตำรับการทดลองที่ 2 และตำรับการทดลองที่ 3 มีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินลดลง อาจเป็นผลจากแคลเซียมไอออนเปลี่ยนรูปเป็นรูปที่

ไม่สามารถละลายน้ำได้ โดยจับกับฟอสฟอรัสหรือซัลเฟต โดยเฉพาะเมื่อค่า pH ของดินสูง จึงส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมและฟอสฟอรัสในดินลดลง (Esposito, 2013; Xiao et al., 2020) อย่างไรก็ตาม ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละตำรับการทดลอง (ตัวอักษร a)



รูปที่ 4-5 ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (a, b, c) ในแนวนอน หมายถึง ตัวแปรในแต่ละตำรับการทดลองแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (x, y, z) ในแนวตั้ง หมายถึง ตัวแปรในก่อนและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และรอบที่ 2 แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างก่อนการปลูกข้าวและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2 จะเห็นได้ว่า ทุกตำรับการทดลองมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร x, y) นอกจากนี้ หากเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ภายหลังการปลูกข้าวทั้ง 2 รอบ พบว่า ทุกตำรับการ

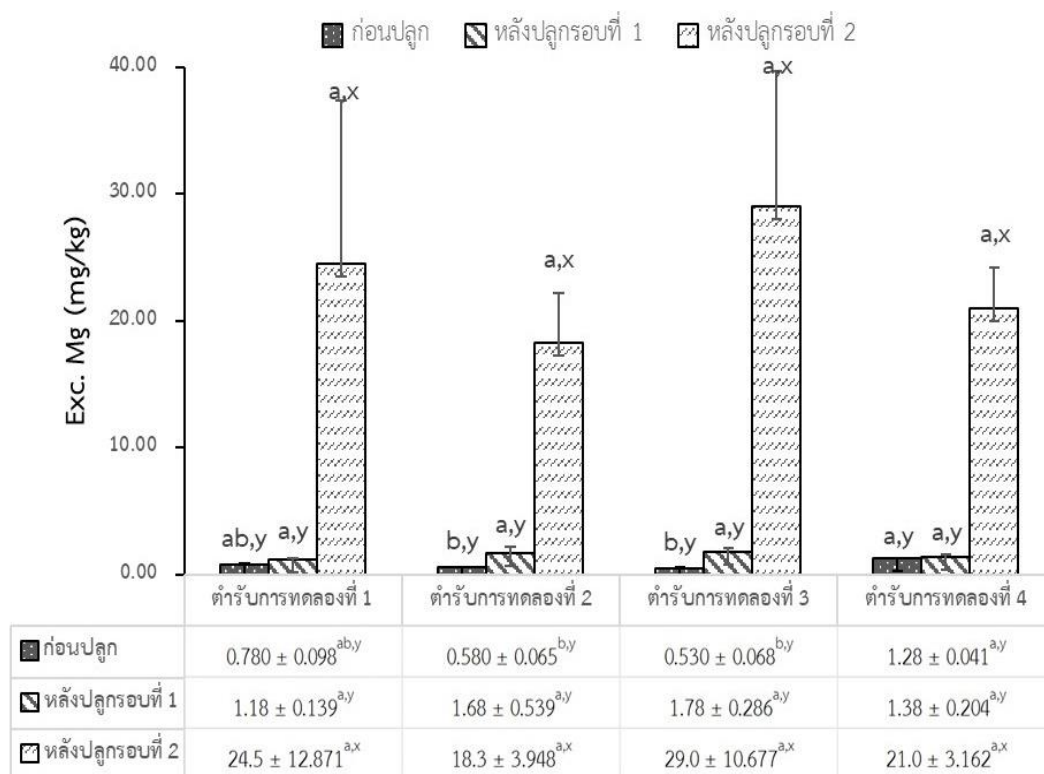
ทดลองยังมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินมากกว่าดินเดิมในพื้นที่อีกด้วย (540 mg/kg) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการใส่ปุ๋ยคอกที่ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มขึ้น

จากผลการศึกษา ชี้ให้เห็นว่า ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของตำรับการทดลองที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพ (ตำรับการทดลองที่ 1) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อทำการปลูกข้าว ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่มีการใส่ถ่านชีวภาพจะมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินเพิ่มขึ้น และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปหรือภายหลังการปลูกข้าว 2 รอบการปลูก แต่ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินไม่แปรผันตามปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ในดิน

ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 (1.18-1.78 mg/kg) เพิ่มขึ้นจากก่อนการปลูกข้าวในทุกตำรับการทดลอง (0.53-1.28 mg/kg) โดยตำรับการทดลองที่ 3 มีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้สูงที่สุด (1.78 mg/kg) ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 1 มีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำที่สุด (1.18 mg/kg) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร y) เช่นเดียวกับกับปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินระหว่างตำรับการทดลองที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร a) (รูปที่ 4-8)

ภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของทุกตำรับการทดลองเพิ่มขึ้นจากภายหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยอยู่ในช่วง 18.3-29.0 mg/kg (ตัวอักษร x, y) ตำรับการทดลองที่ 3 มีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้สูงที่สุด (29.0 mg/kg) ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 2 มีปริมาณต่ำที่สุด (18.3 mg/kg) แต่ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินระหว่างตำรับการทดลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร a)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินระหว่างก่อนการปลูกข้าวและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร x, y) อีกทั้ง ภายหลังทำการปลูกข้าวทั้ง 2 รอบ ในทุกตำรับการทดลองมีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มากกว่าดินเดิมในพื้นที่ (1.14 mg/kg) แต่ปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ลงในดินไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณแมกนีเซียมในดินอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4-6 ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (a, b, c) ในแนวนอน หมายถึง ตัวแปรในแต่ละตำรับการทดลองแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (x, y, z) ในแนวตั้ง หมายถึง ตัวแปรในก่อนและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และรอบที่ 2 แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการศึกษางานวิจัยหลายชิ้นที่ระบุว่า การใส่ถ่านชีวภาพในดินเค็มส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมในดินเค็มเพิ่มสูงขึ้น อาทิ การศึกษาของ Wijitkosum (2020) ที่ระบุว่า การใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 4.0 kg/m² ร่วมกับปุ๋ยคอกในอัตรา 1.25 kg/m² ทำให้ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมในดินเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าดินที่ใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว และเพิ่มสูงกว่าดินเดิมในพื้นที่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Major และคณะ (2010) ที่พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 20 t/ha ในการปลูกข้าวโพด ส่งผลให้ดินมีปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมสูงกว่าดินในแปลงทดลองที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพอยู่ 160.2 µg/g และ 36.6 µg/g ตามลำดับ รวมถึง ผลการศึกษาของ Chaganti และ Crohn (2015) ที่ระบุว่า ดินที่ใส่ถ่านชีวภาพมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้สูงกว่าดินที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพถึง 18 %

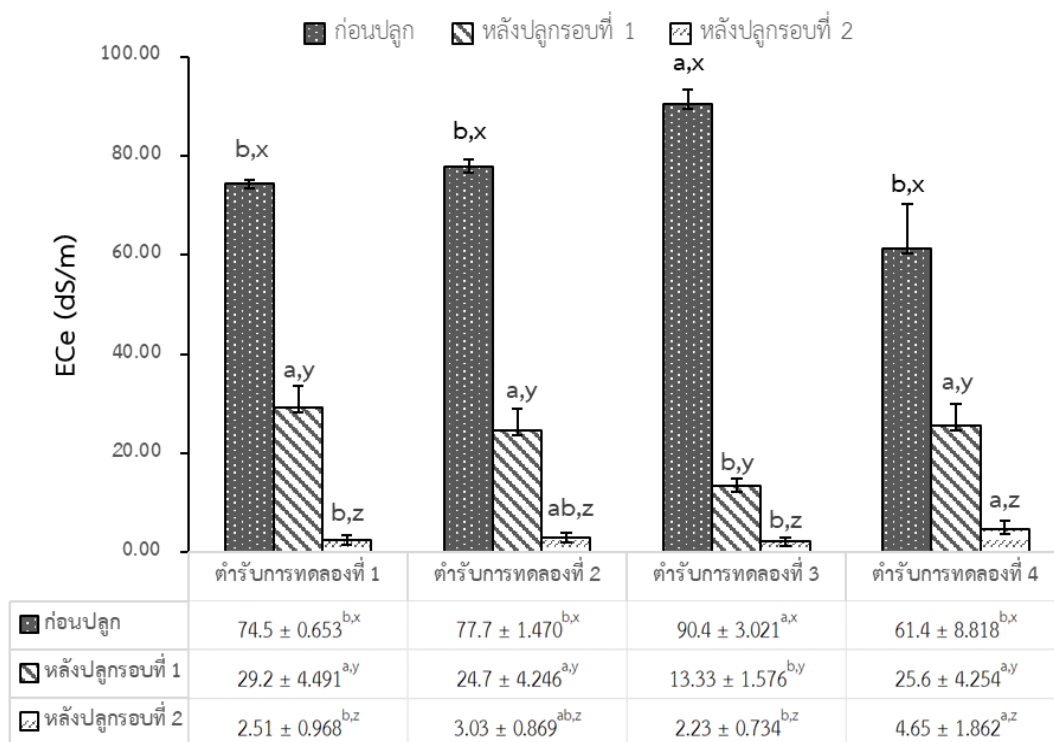
ทั้งนี้ การที่ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมในดินเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากสองปัจจัยหลัก คือ การใส่ถ่านชีวภาพและปุ๋ยคอก ทำให้ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมในดินเพิ่มขึ้นโดยตรง (Major et al., 2010; Chaganti et al., 2015; Wijitkosum, 2020) และการที่ถ่านชีวภาพมีประจุลบที่พื้นที่ผิว มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูง และมีขนาดพื้นที่ผิวมาก จึงทำให้บริเวณพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพสามารถแลกเปลี่ยนระหว่าง Na^+ กับ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ได้ ทำให้ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่ ปริมาณโซเดียมไอออนลดลง (Lashari et al., 2013; Chaganti et al., 2015) และปริมาณของไอออนบวกอื่นที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการแข่งขันระหว่างไอออน ข้าวจึงดูดซึมแคลเซียมและแมกนีเซียมไปใช้ได้น้อยลง (Esposito, 2013) นอกจากนี้ การที่ดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 มีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจาก เดิมทีพื้นที่ที่แลกเปลี่ยนประจุของดินจับกับโซเดียมไอออน แต่เมื่อปล่อยให้ น้ำบนผิวดินระเหย โซเดียมไอออนจะเข้าไปแทรกและกักเก็บโดยรูพรุนของถ่านชีวภาพ และแมกนีเซียมไอออนเข้ามาแทนที่ตรงพื้นที่ที่แลกเปลี่ยนประจุของดิน เนื่องจาก แมกนีเซียมไอออนมีอำนาจในการแทนที่สูงกว่าโซเดียมไอออน ส่งผลให้ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 เพิ่มขึ้น

นอกจากนั้น จากผลการศึกษานี้พบว่า ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินไม่ได้แปรผันตามปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ในดิน แต่การเปลี่ยนแปลงปริมาณแคลเซียมที่พบมีปัจจัยด้านระยะเวลาของถ่านชีวภาพที่อยู่ในดิน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Lashari และคณะ (2015) ที่ทดลองใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 12 t/ha ในดินเค็มที่ปลูกข้าวโพด ซึ่งพบว่า ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.26 g/kg เป็น 1.54 g/kg ภายหลังการปลูกข้าวโพดในรอบที่ 1 และเพิ่มสูงขึ้นเป็น 1.87 g/kg ภายหลังการปลูกข้าวโพดในรอบการปลูกที่ 2

4.3.3 การเปลี่ยนแปลงความเค็มของดินก่อนและหลังปลูกข้าว

4.3.3.1 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้าขณะดินอิ่มตัวด้วยน้ำของดินหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 ในทุกตำรับการทดลอง (13.33-29.2 dS/m) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนทำการปลูกข้าว (ตัวอักษร x, y, z) โดยตำรับการทดลองที่ 3 มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำที่สุด (13.33 dS/m) ซึ่งต่ำกว่าตำรับการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร a, b) ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 1 มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด (29.2 dS/m) นอกจากนี้ ผลการศึกษายังพบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 เพียงตำรับการทดลองเดียวที่ความเค็มของดินลดจากระดับเค็มจัดเหลือระดับเค็มมาก ในขณะที่ ตำรับการทดลองอื่นยังคงอยู่ในระดับเค็มจัดเช่นเดิม ตามหลักเกณฑ์ของ USSS (1954) (รูปที่ 4-9)



รูปที่ 4-7 ค่าการนำไฟฟ้าขณะดินอิ่มตัวด้วยน้ำของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (a, b, c) ในแนวนอน หมายถึง ตัวแปรในแต่ละตำรับการทดลองแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (x, y, z) ในแนวตั้ง หมายถึง ตัวแปรในก่อนและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และรอบที่ 2 แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

ค่าการนำไฟฟ้าของดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 ในทุกตำรับการทดลอง (2.23-4.65 dS/m) ลดลงจากภายหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน (ตัวอักษร x, y, z) โดยตำรับการทดลองที่ 3 มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำที่สุด (2.23 dS/m) ซึ่งจัดอยู่ในระดับดินเค็มเล็กน้อย ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 4 มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด (4.65 dS/m) ซึ่งอยู่ในระดับเค็มปานกลาง โดยตำรับการทดลองที่ 1 และตำรับการทดลองที่ 3 มีค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่าตำรับการทดลองที่ 4 อย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร a, b)

เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของดินระหว่างก่อนและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญสอดคล้องกับการศึกษาของ Lashari และคณะ (2015) ที่ระบุว่า การใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 12 t/ha ในการปลูกข้าวโพดในดินเค็ม ทำให้ค่าการนำ

ไฟฟ้าของดินลดลงจาก 8.26 dS/m เป็น 5.00 dS/m ภายหลังจากปลูกข้าวโพดในรอบการปลูกที่ 1 และยังคงลดลงภายหลังจากปลูกรอบที่ 2 คือ ค่าการนำไฟฟ้าของดินมีค่า 4.83 dS/m

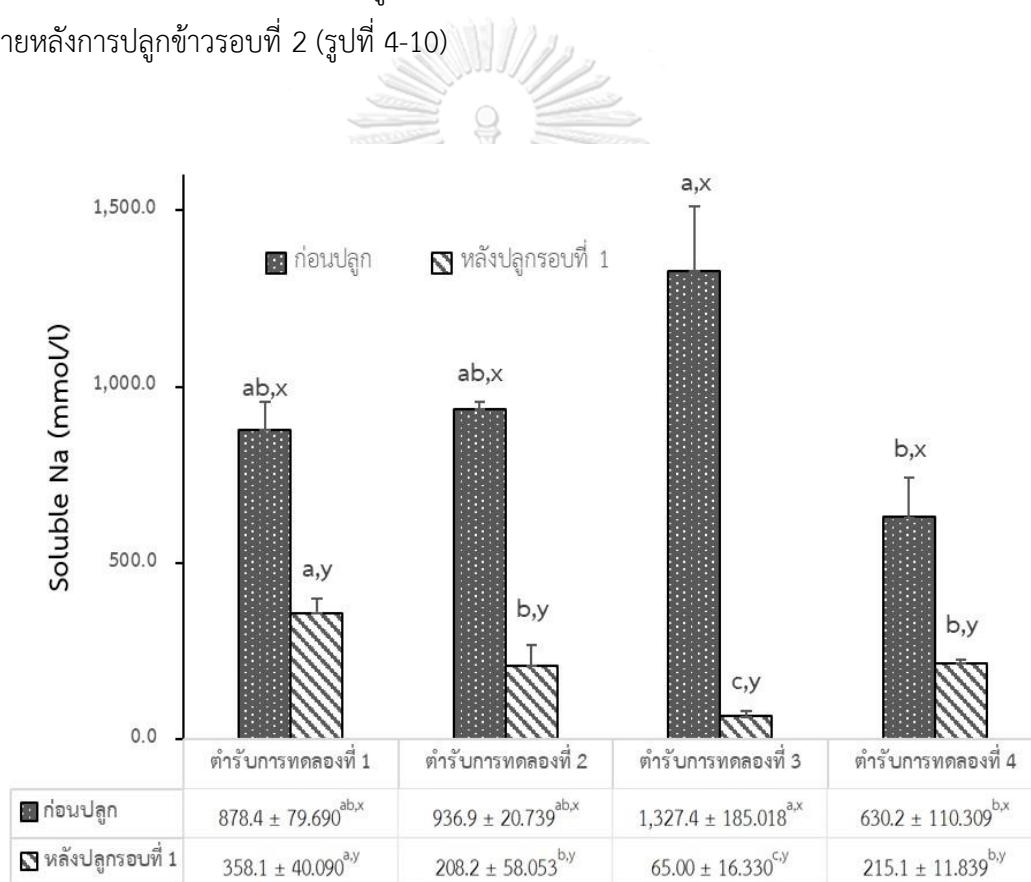
นอกจากนี้ ผลการศึกษาครั้งนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ภายหลังจากการปลูกข้าวโพดทั้ง 2 รอบ ดินมีค่าการนำไฟฟ้าลดลงต่ำกว่าดินเดิมในพื้นที่ (68.6 dS/m) ในทุกตำรับการทดลอง โดยการใส่ถ่านชีวภาพในอัตราที่เหมาะสมร่วมกับปุ๋ยจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของดินลดลงได้มากกว่าการใส่ปุ๋ยเพียงอย่างเดียว รวมถึง การศึกษาในวงบ่อซีเมนต์ที่ปิดกั้นบ่อ สามารถจำกัดการระเหยเอาเกลือที่ละลายในน้ำใต้ดินขึ้นมาสู่ผิวดินได้ ส่งผลให้ดินในทุกตำรับการทดลองมีค่าการนำไฟฟ้าที่ลดลง

ทั้งนี้ เมื่อใส่ถ่านชีวภาพลงในดินเค็ม จะทำให้ไอออนเกลือในสารละลายดินจะถูกดูดซับโดยหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพและกักเก็บไว้ในรูพรุนของถ่านชีวภาพ (Akhtar et al., 2015; Hammer et al., 2015) การใส่ถ่านชีวภาพยังช่วยลดความหนาแน่นโดยรวมของดิน ทำให้การไหลผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น การชะล้างโซเดียมไอออนได้ขึ้น และถ่านชีวภาพยังช่วยกักเก็บน้ำในดินได้ดีขึ้น ลดการระเหยของน้ำในดิน (Chaganti et al., 2015; Yue et al., 2016) ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของดินเค็มลดลง นอกจากนั้น ถ่านชีวภาพยังส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์ดิน และทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์มีสูงขึ้น ซึ่งกิจกรรมของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ดิน จะช่วยลดความเข้มข้นของไอออนที่ละลายในดินได้อย่างรวดเร็ว จึงมีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าในดินด้วย (Tejada & Gonzalez, 2006; Lehmann et al., 2011; Zhang et al., 2015)

การนำไฟฟ้าของดินที่ลดลงไม่แปรผันตามปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ลงในดิน กล่าวคือ การใส่ถ่านชีวภาพในอัตราที่สูงที่สุด ไม่ได้ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงได้มากที่สุด โดยผลการศึกษาพบว่า ภายหลังจากการปลูกข้าวโพดทั้ง 2 รอบนั้น ดินในตำรับการทดลองที่ 3 มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำที่สุด อีกทั้ง ตำรับการทดลองที่ 3 ยังมีค่าการนำไฟฟ้าที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับตำรับการทดลองที่ 4 ทั้งก่อนและหลังการปลูกข้าวโพดทั้ง 2 รอบการปลูก ทั้งนี้ เป็นผลมาจากการใส่ถ่านชีวภาพในอัตราที่สูง อาจส่งผลให้ความเข้มข้นของเกลือในดินเพิ่มขึ้น (Lehmann & Joseph, 2009) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wjitkosum (2020) ที่พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของดินเค็มที่ลดลงจากการใส่ถ่านชีวภาพกลับนั้นไม่แปรผันตามปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ลงในดิน ทั้งนี้ Saifullah และคณะ (2018) และ Lashari และคณะ (2015) สรุปรว่า ถ่านชีวภาพสามารถปรับปรุงค่าการนำไฟฟ้าของดินเค็มได้ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของดินเค็ม ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดและปริมาณของถ่านชีวภาพ ระยะเวลาในการผสม/หมักถ่านชีวภาพและดินเค็ม ปริมาณเกลือของดินและน้ำ และการชะล้างไอออนต่าง ๆ ในดิน

4.3.3.2 ปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้และปริมาณโซเดียมทั้งหมด

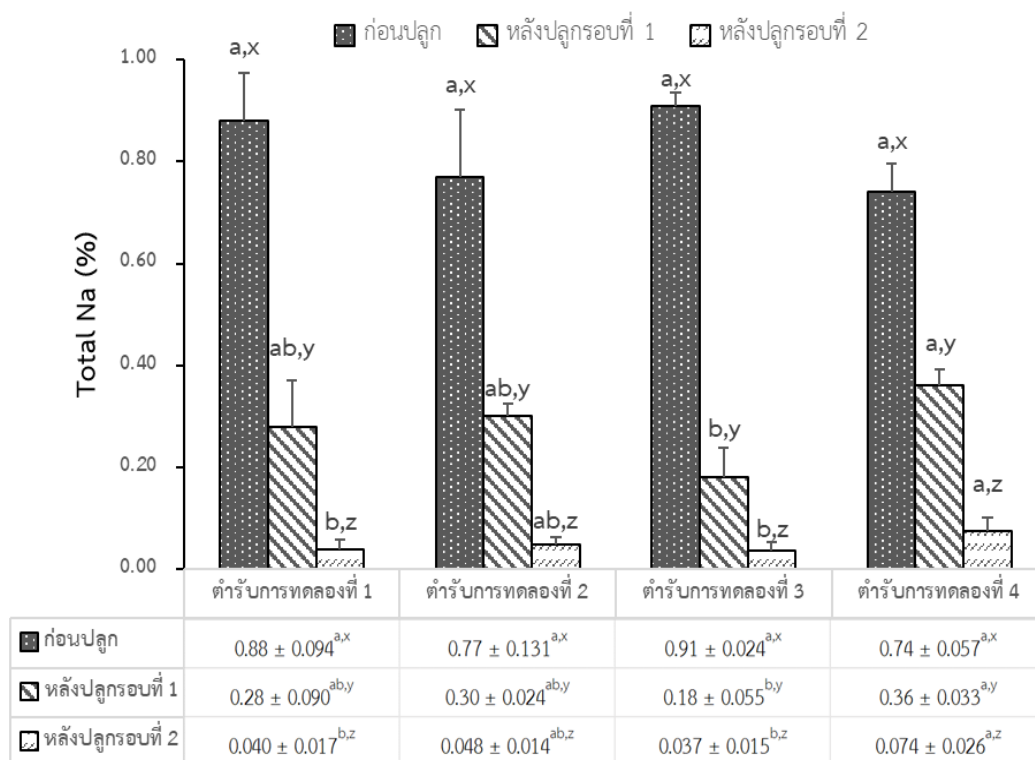
ปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้ของดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 (65.00-358.1 mmol/L) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญในทุกตำรับการทดลองจากดินก่อนการปลูกข้าว (ตัวอักษร x, y) โดยตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ (ตำรับการทดลองที่ 1) มีปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 358.1 mmol/L ซึ่งมากกว่าตำรับการทดลองอื่นที่ใส่ถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร a, b, c) ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 3 มีปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้ต่ำที่สุด (65.00 mmol/L) ทั้งนี้ เนื่องจากตัวอย่างดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 ไม่เพียงพอที่จะให้ผลการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้ที่สมบูรณ์ จึงไม่ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำของดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 (รูปที่ 4-10)



รูปที่ 4-10 ปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้ของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (a, b, c) ในแนวนอน หมายถึง ตัวแปรในแต่ละตำรับการทดลองแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (x, y, z) ในแนวตั้ง หมายถึง ตัวแปรในก่อนและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และรอบที่ 2 แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

ปริมาณโซเดียมทั้งหมดของดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 ในทุกตำรับการทดลอง (0.18-0.36 %) มีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการปลูกข้าวในทุกตำรับการทดลอง (ตัวอักษร x, y) โดยตำรับการทดลองที่ 4 มีปริมาณโซเดียมทั้งหมดสูงที่สุด (0.36 %) ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 3 มีปริมาณโซเดียมทั้งหมดต่ำที่สุด (0.18 %) ซึ่งตำรับการทดลองที่ 4 มีค่ามากกว่าตำรับการทดลองที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร a, b) (รูปที่ 4-11)



รูปที่ 4-8 ปริมาณโซเดียมทั้งหมดของดินในแต่ละตำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (a, b, c) ในแนวนอน หมายถึง ตัวแปรในแต่ละตำรับการทดลองแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (x, y, z) ในแนวตั้ง หมายถึง ตัวแปรในก่อนและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และรอบที่ 2 แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

ภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 ดินในทุกตำรับการทดลองมีปริมาณโซเดียมทั้งหมดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน (ตัวอักษร x, y, z) โดยอยู่ในช่วง 0.037-0.074 % ตำรับการทดลองที่ 3 ยังคงมีปริมาณโซเดียมทั้งหมดต่ำที่สุด

(0.037 %) เช่นเดียวกับตำรับการทดลองที่ 4 ที่มีปริมาณโซเดียมทั้งหมดสูงที่สุด (0.074 %) อีกทั้งตำรับการทดลองที่ 4 มีปริมาณโซเดียมทั้งหมดสูงกว่าตำรับการทดลองที่ 1 และตำรับการทดลองที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตัวอักษร a, b)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโซเดียมทั้งหมดในดินก่อนการปลูกข้าวและภายหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ดินในทุกตำรับการทดลองมีปริมาณโซเดียมทั้งหมดลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตัวอักษร x, y, z) นอกจากนี้ ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่า ดินในทุกตำรับการทดลองภายหลังการปลูกข้าวทั้ง 2 รอบการปลูก มีปริมาณโซเดียมทั้งหมดน้อยกว่าดินเดิมในพื้นที่ (0.83 %) สอดคล้องกับการศึกษาผลของถ่านชีวภาพแกลบลงในดินเค็มของ Wijitkosum (2020) ที่พบว่า ปริมาณโซเดียมทั้งหมดของดินลดลงน้อยกว่าดินเดิมในพื้นที่ เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ ผลการศึกษาทั้งสองดังกล่าวยังให้ผลสอดคล้องกันว่า ปริมาณโซเดียมทั้งหมดที่ลดลงไม่แปรผันตามปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ลงในดิน

ทั้งนี้ การลดลงของปริมาณโซเดียมในดินเป็นผลมาจาก ถ่านชีวภาพสามารถจับกับโซเดียมไอออนที่อยู่ในสารละลายดินได้ และเพิ่มประสิทธิภาพของพืชในการดูดซึมโพแทสเซียมไอออน จึงเป็นผลให้ปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้และปริมาณโซเดียมทั้งหมดในดินมีค่าลดลง (Akhtar et al., 2015; Lashari et al., 2015; Wijitkosum, 2020) ซึ่ง Akhtar และคณะ (2015) ได้เสนอความเป็นไปได้ของกลไกการดูดซับโซเดียมของถ่านชีวภาพ คือ การดูดซับโซเดียมของถ่านชีวภาพแบบชั่วคราว เนื่องจากแรงดึงดูดที่ไม่ได้สูงมากระหว่างโซเดียมไอออนกับพื้นผิวที่เป็นลบของถ่านชีวภาพ ทำให้พืชไม่สามารถนำโซเดียมไอออนไปใช้ได้ หรืออาจเป็นเพราะถ่านชีวภาพมีแร่ธาตุอื่นสูงมาก เช่น ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ เกิดการแลกเปลี่ยนกับโซเดียมไอออนที่อยู่ในดิน จึงทำให้ปริมาณของโซเดียมไอออนในดินลดลง (Akhtar et al., 2015; Lashari et al., 2015; Xiao et al., 2020) นอกจากนี้ การที่ปุ๋ยคอกมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุได้ค่อนข้างสูงจึงทำให้สามารถจับกับประจุบวกอื่น ๆ ได้ดีเช่นเดียวกัน จึงจะเห็นว่า ตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว มีปริมาณโซเดียมลดลงด้วยเช่นกัน และเมื่อใส่ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตราที่เหมาะสม (1.5 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์) จะยิ่งเพิ่มความสามารถจับกับประจุบวกได้ดีมากขึ้น ทำให้ปริมาณโซเดียมในดินลดลงได้มากกว่าการใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว

จากการศึกษาครั้งนี้จะเห็นได้ว่า ปริมาณโซเดียมทั้งหมดในดินมีปริมาณลดลงตามระยะเวลา กล่าวคือ ดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 มีปริมาณโซเดียมทั้งหมดต่ำกว่าดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 และดินภายหลังการผสมวัสดุปลูก ตามลำดับ เป็นผลมาจากการทำงานของถ่านชีวภาพที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำในดิน ส่งผลให้ความเข้มข้นของเกลือในดินลดลง (Saifullah et al., 2018)

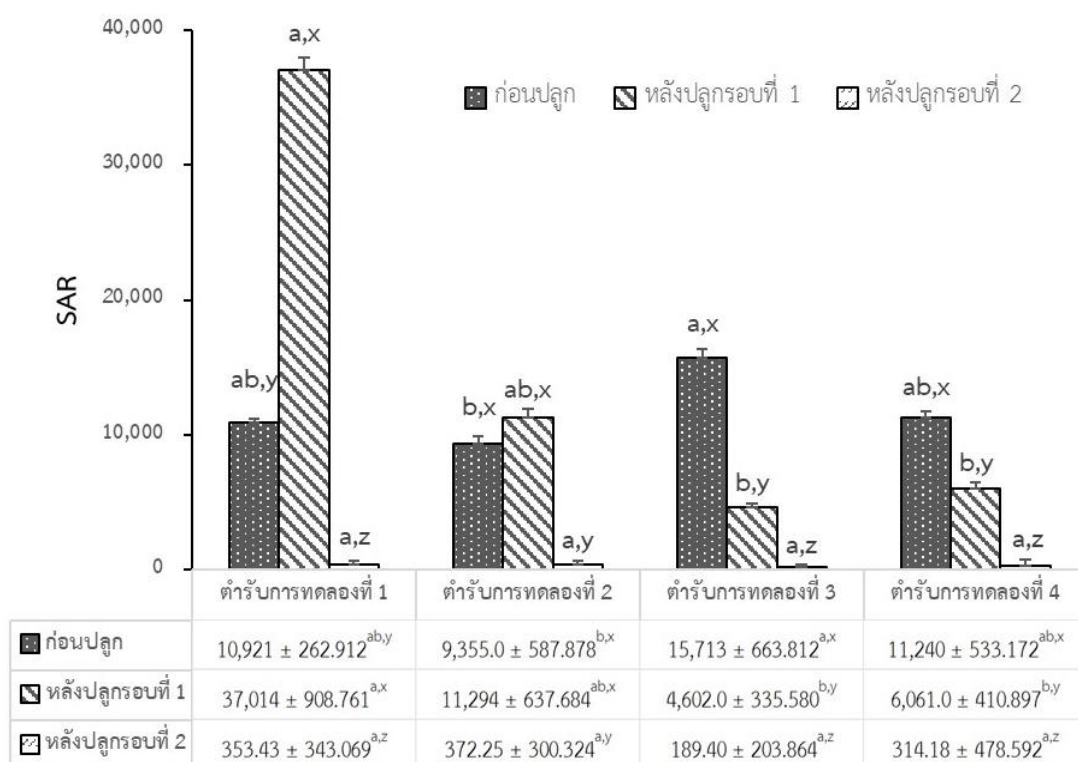
นอกจากนั้น ถ่านชีวภาพยังทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์มีสูงขึ้น ซึ่งกิจกรรมของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ดินจะช่วยลดความเข้มข้นของไอออนที่ละลายในดินได้อย่างรวดเร็ว (Tejada & Gonzalez, 2006; Lehmann et al., 2011; Zhang et al., 2015) โดยถ่านชีวภาพสามารถคงอยู่ในดินได้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน จึงทำให้การปรับปรุงสมบัติของดินเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในการศึกษานี้เป็นพืชทนเค็ม จึงมีการสะสมโซเดียมในปริมาณสูงในช่วงที่มีสภาพเค็ม (Summart et al., 2010; ไพรัช พงษ์วิเชียร, 2552) สอดคล้องกับการศึกษาของ Lashari และคณะ (2013) ที่พบว่า ดินที่ใส่ถ่านชีวภาพมีปริมาณโซเดียมลดลงภายหลังการปลูกข้าวสาธิตครั้งที่ 1 (3.69 mg/kg) และปริมาณโซเดียมมีค่าลดลงภายหลังการปลูกข้าวสาธิตรอบที่ 2 (3.39 mg/kg)

4.3.3.3 ค่าอัตราการดูดซับโซเดียม

ผลการตรวจวัดค่าอัตราการดูดซับโซเดียม (SAR) ของดินในทุกตำรับการทดลอง ภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 (4,602-37,014) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 1 และตำรับการทดลองที่ 2 มีค่า SAR เพิ่มขึ้นจากดินก่อนการปลูกข้าว โดยตำรับการทดลองที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพ (ตำรับการทดลองที่ 1) มีค่า SAR มากที่สุด (37,014) ซึ่งมากกว่าค่า SAR ของตำรับการทดลองที่ 3 (4,602.0) และตำรับการทดลองที่ 4 (6,061.0) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตัวอักษร a, b) อีกทั้ง ตำรับการทดลองที่ 1 ยังมีค่า SAR เพิ่มขึ้นจากดินก่อนการปลูกข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร x, y) ในขณะที่ ค่า SAR ของตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 ลดลงจากดินก่อนการปลูกข้าวอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ ภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 ดินในตำรับการทดลองที่ 3 มีค่า SAR ต่ำที่สุด (รูปที่ 4-12)

ภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ค่า SAR ของดินในทุกตำรับการทดลอง ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 (ตัวอักษร x, y, z) โดยมีค่าระหว่าง 189.40-372.25 ซึ่งตำรับการทดลองที่ 3 ยังคงมีค่า SAR ของดินต่ำที่สุด (189.40) และตำรับการทดลองที่ 2 มีค่า SAR ของดินสูงที่สุด (372.25) อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตัวอักษร a) ของค่า SAR ของดินในแต่ละตำรับการทดลองภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ภายหลังการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 2 ดินในทุกตำรับการทดลองมีค่า SAR ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตัวอักษร x, y, z) และการใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตราส่งผลให้ดินมีค่า SAR ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับดินเดิมในพื้นที่ (11,707) ตั้งแต่รอบการปลูกที่ 1 ในขณะที่ ดินที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพมีค่า SAR ของดินสูงกว่าดินเดิม สอดคล้องกับการศึกษาผลของถ่านชีวภาพกลบลงในดินเค็มของ Wijitkosum (2020) ที่พบว่า ค่า SAR ของดินที่ใส่ถ่านชีวภาพลดลงจากดินเดิมในพื้นที่อย่างมีนัยสำคัญ โดยการใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 5.0 kg/m² ลงในดินเค็มในพื้นที่ที่

มีค่า SAR เท่ากับ 1,158 ทำให้ดินเค็มดังกล่าวมีค่า SAR ลดลงเหลือ 10.36 ซึ่งการใส่ถ่านชีวภาพทำให้ค่า SAR ลดลงมากกว่าดินที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพที่มีค่าดังกล่าวเหลือ 12.45 เช่นเดียวกันกับกับผลการศึกษาของ Xiao และคณะ (2020) ที่พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 12 t/ha ส่งผลให้ค่า SAR ของดินลดลงถึง 64.86 % อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการไม่ใส่ถ่านชีวภาพ



รูปที่ 4-9 ค่าอัตราการดูดซับโซเดียมของดินในแต่ละดำรับการทดลอง ก่อนการปลูกข้าว หลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 2

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (a, b, c) ในแนวนอน หมายถึง ตัวแปรในแต่ละดำรับการทดลองแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกัน (x, y, z) ในแนวตั้ง หมายถึง ตัวแปรในก่อนและหลังทำการปลูกข้าวรอบที่ 1 และรอบที่ 2 แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

นอกจากนี้ จากผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า ค่า SAR มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาในการปลูกข้าว สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Lashari และคณะ (2015) ที่พบว่า การปลูกข้าวโพดในดินเค็มที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 12 t/ha ส่งผลให้ค่า SAR ของดินลดลงตามระยะเวลาที่ปลูกข้าวโพด กล่าวคือ ค่า SAR ในดินลดลงจาก 16.71 เหลือ 11.09 เมื่อปลูกข้าวโพด 1

รอบการปลูก และค่า SAR ลดลง เป็น 9.00 ภายหลังการปลูกข้าวโพดในรอบการปลูกที่ 2 ทั้งนี้ ค่าอัตราการดูดซับโซเดียมซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างโซเดียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ดังนั้น หากปริมาณของโซเดียมไอออนลดลง หรือปริมาณแคลเซียมหรือแมกนีเซียมไอออนเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า SAR ด้วย (Luo et al., 2017; Zheng et al., 2018) รวมถึง การที่ต้นข้าวดูดซึมโซเดียมไอออนเข้าไป จะส่งผลให้ค่า SAR ในดินลดลงเช่นกัน นอกจากนี้ การลดลงของค่า SAR ยังอาจเป็นผลมาจากการใส่ปุ๋ยอินทรีย์หรือปุ๋ยเคมีที่ทำให้โซเดียมไอออนถูกแทนที่ด้วยไอออนอื่น ๆ (Chhabra, 2004; Saifullah et al., 2018) แต่อย่างไรก็ตาม การใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยยังคงให้ผลการลดลงของค่า SAR ที่สูงกว่าการใส่ปุ๋ยเพียงอย่างเดียวสอดคล้องกับผลการศึกษาของงานวิจัยของ Wijitkosum (2020) Lashari และคณะ (2015) และ Chaganti และคณะ (2015)

ผลการศึกษาครั้งนี้สรุปได้ว่า การใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยคอกสามารถลดความเค็มของดินได้ดีกว่าการใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว โดยสามารถลดค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำ ปริมาณโซเดียมทั้งหมด และค่า SAR ของดินได้ โดยการลดลงของปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้ ปริมาณโซเดียมทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า และค่าอัตราการดูดซับโซเดียมในดิน ไม่ได้แปรผันตามปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ ซึ่งการลดลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีการลดลงสูงที่สุดเมื่อใส่ถ่านชีวภาพในปริมาณที่เหมาะสม โดยในการศึกษาครั้งนี้พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 1.5 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ (ตำรับการทดลองที่ 3) ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าวลดลงได้มากที่สุด สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wijitkosum (2020) ที่ระบุว่า การใส่ถ่านชีวภาพกลับในอัตรามากที่สุดไม่ได้ลดความเค็มของดินได้ดีที่สุด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโซเดียม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าอัตราการดูดซับโซเดียมในดิน ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Lashari และคณะ (2015) ที่ระบุว่า การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณโซเดียม และค่าอัตราการดูดซับโซเดียมมีความสัมพันธ์กัน

4.4 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดินเค็ม

4.4.1 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินเค็ม

ด้วยสมบัติเฉพาะตัวของถ่านชีวภาพที่มีประจุลบบนพื้นผิวจำนวนมาก ประกอบกับ การมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง และมีพื้นที่ผิวที่จะเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุได้สูง ทำให้ถ่านชีวภาพสามารถจับกับไอออนบวกในสารละลายดินได้ดีขึ้น ได้แก่ โปรตอน (H^+) ส่งผลให้ค่า pH ของดินเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า pH ของดินจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ของไอออนอื่น ๆ ในสารละลายดิน อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ ค่า pH ไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากการควบคุม

การเป็นบัฟเฟอร์ของดิน นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังสามารถจับกับไอออนบวกอื่นได้อีก ได้แก่ โซเดียมไอออน (Na^+) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ดินเป็นโซดิก ดังนั้น การลดลงของโซเดียมไอออนจะส่งผลให้ดินมีความเป็นโซดิกน้อยลง (Luo et al., 2017; Zheng et al., 2018) ซึ่งเห็นได้จากผลการศึกษาที่ค่า SAR มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป อีกทั้ง การใส่ถ่านชีวภาพยังช่วยเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุให้กับดิน การเปลี่ยนแปลงค่า CEC และการดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์ภายในดิน (Kappler et al., 2014; USDA, 2015; Tan et al., 2017; Saifullah et al., 2018) ซึ่งล้วนส่งผลให้สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินเหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของพืชมากขึ้น

4.4.2 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อธาตุอาหารของดินเค็ม

ถ่านชีวภาพมีปริมาณธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม) ในปริมาณมาก ซึ่งปริมาณธาตุอาหารดังกล่าวขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ (Liu et al., 2010; Tan et al., 2017; Kavitha et al., 2018) ซึ่งถ่านชีวภาพกลบในการศึกษานี้มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 0.51 % ปริมาณฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.29 % ปริมาณโพแทสเซียมเท่ากับ 1.02 % ปริมาณแคลเซียมเท่ากับ 0.10 % และปริมาณแมกนีเซียมเท่ากับ 0.07 % การใส่ถ่านชีวภาพลงในดินจึงช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหารในดินได้โดยตรง ประกอบกับ โครงสร้างของถ่านชีวภาพที่เป็นอะโรมาติกคาร์บอนมีความเสถียรสูงจึงถูกทำลายได้ยากในสภาพแวดล้อม (Tan et al., 2017; Weber & Quicker, 2018) โดยเฉพาะดินในเขตร้อนชื้น (Glaser et al., 2002; Mekuria & Noble, 2013) ทำให้ดินที่ใส่ถ่านชีวภาพสามารถรักษาปริมาณธาตุอาหารไว้ได้ดีกว่าดินที่ใส่ปุ๋ย

นอกจากนั้น กลไกของถ่านชีวภาพที่ช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหารในดิน คือ ถ่านชีวภาพช่วยตรึงไนโตรเจนและกักเก็บไนโตรเจนให้อยู่ในดิน และลดการระเหยออกไปในรูปของ NH_3 และ N_2O (Bai et al., 2015; Saifullah et al., 2018; Ye et al., 2020) ส่งเสริมให้รากพืชขนานไนโตรเจนไปใช้ได้ดีขึ้น (Xia et al., 2020) และมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ดิน (Nelissen et al., 2014) จึงเห็นได้จากการที่ตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพ มีแนวโน้มปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินมากกว่าตำรับที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ เช่นเดียวกันกับ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชและปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ที่พบว่า อัตราการใส่ถ่านชีวภาพลงในดินส่งผลต่อปริมาณดังกล่าวทั้งสองในดิน โดยค่า pH และปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินเป็นตัวแปรที่สำคัญที่จะส่งผลต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Saifullah et al., 2018) ซึ่งดินที่มีความเป็นด่าง จะส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมากขึ้น เนื่องจาก พื้นผิวของดินและถ่านชีวภาพมีความเป็นลบมากขึ้น จึงจับไล่ประจุลบอย่างฟอสฟอรัสออกไป (Xu et al., 2014) ในขณะที่ การที่ปริมาณ

โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการใส่ถ่านชีวภาพลงในดิน เป็นผลมาจากปริมาณโพแทสเซียมในถ่านชีวภาพโดยตรง อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาพบว่า ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินไม่แปรผันตามอัตราถ่านชีวภาพที่ใส่ในดิน แต่ปริมาณดังกล่าวทั้งสองในดินที่ใส่ถ่านชีวภาพมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าดินที่ใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว จากการศึกษาจึงเห็นได้ว่า ปริมาณธาตุอาหารหลักในดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ สอดคล้องกับผลงานวิจัยหลายชิ้น อาทิ Wijitkosum (2020) Abdul and Abdul (2017) และ Chaganti และคณะ (2015)

ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารในดินเมื่อระยะเวลาผ่านไป มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละธาตุอาหารแตกต่างกัน กล่าวคือ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป ซึ่งปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลจากถ่านชีวภาพช่วยตรึงไนโตรเจนให้ยังคงอยู่ในดิน ในขณะที่ บริเวณพื้นผิวของถ่านชีวภาพ ที่สามารถแลกเปลี่ยนระหว่างโซเดียมไอออนกับแคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออนได้ จะส่งผลให้แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ปริมาณโซเดียมไอออนลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะเวลาผ่านไปพบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ มีแนวโน้มลดลง โดยการลดลงของปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เป็นผลมาจากการที่ปริมาณแคลเซียมในดินมาก ทำให้แคลเซียมจับกับฟอสเฟตและตกตะกอน รวมถึงการดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ของข้าว ในขณะที่ การลดลงของปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ เป็นผลมาจากการปรับสมดุลอัตราส่วน K:Na ของพืชหนักเค็มที่จะดูดซึมโพแทสเซียมเพิ่มเข้าไป เพื่อให้สมดุลกับปริมาณโซเดียมจำนวนมากที่ดูดซึมเข้าไป นอกจากนี้ การที่ถ่านชีวภาพมีรูพรุนสูงสามารถคงอยู่ในดินได้เป็นระยะเวลานาน ดังนั้น จึงส่งผลให้ถ่านชีวภาพสามารถกักเก็บและตรึงธาตุอาหารไว้ในถ่านชีวภาพและค่อย ๆ ปล่อยออกมา เพื่อให้ข้าวดูดตั้งธาตุอาหารดังกล่าวไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต จึงสามารถลดการชะล้างของธาตุอาหารในดินได้ (Gan et al., 2012; Wijitkosum & Kallayasiri, 2015; Yooyen et al., 2015)

4.4.3 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อความเค็มของดินเค็ม

ถ่านชีวภาพสามารถลดความเค็มของดินเค็มโซดิกในการศึกษาครั้งนี้ได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ปริมาณของถ่านชีวภาพที่ใส่ลงไปในดิน ไม่ได้เป็นแนวโน้มเดียวกันกับการลดลงของความเค็ม กล่าวคือการใส่ถ่านชีวภาพในอัตราที่มากกว่า ไม่ได้ส่งผลให้ความเค็มของดินลดลงดีที่สุด ความเค็มของดินลดลงได้ดีที่สุด หากใส่ถ่านชีวภาพในอัตราที่เหมาะสม (อัตรา 1.5 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์)

ถ่านชีวภาพสามารถลดความเค็มของดินเค็มโดยตรง เป็นผลจากการเพิ่มปริมาณ แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน เกิดการแลกเปลี่ยนแทนที่กับโซเดียมไอออนที่อยู่ในดิน จึงทำให้ ปริมาณโซเดียมไอออนลดลง (Chaganti et al., 2015; Lashari et al., 2015) และไอออนต่าง ๆ ถูก ดูดซับโดยหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพ ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง (Wijitkosum, 2020) นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพสามารถลดความเค็มของดินได้โดยอ้อม ด้วยการลดความหนาแน่นโดยรวม ของดิน ทำให้การไหลผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น การชะล้างโซเดียมไอออนเพิ่มขึ้น (Chaganti et al., 2015; Yue et al., 2016) รวมถึง การที่ไอออนเกลือในสารละลายดินถูกกักเก็บไว้ในรูพรุนของถ่านชีวภาพ (Akhtar et al., 2015; Hammer et al., 2015) อีกทั้ง การศึกษาครั้งนี้ออกแบบการทดลองให้มีการ ปลุกข้าวในวงบ่อซีเมนต์ที่ปิดกันบ่อ จึงจำกัดการระเหยเอาเกลือที่ละลายในน้ำใต้ดินขึ้นมาสู่ผิวดินได้ จึงทำให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ถ่านชีวภาพสามารถลดความเค็มของดินลงได้ สอดคล้องกับผล การศึกษาก่อนหน้าของ Wijitkosum (2020) ที่ทำการศึกษาในพื้นที่เดียวกันและสรุปข้อสังเกตเรื่อง ของการระเหยเอาเกลือจากน้ำใต้ดินขึ้นมาสู่ผิวดินตลอดระยะเวลาการเพาะปลูก

นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพแกลบที่ใช้ในการศึกษานี้ยังมีปริมาณคาร์บอนสูง (45.68 %) และมีความเสถียรสูง (H/C เท่ากับ 0.05 และ O/C เท่ากับ 0.38) จึงคงอยู่ในดินได้เป็นระยะเวลานาน ประมาณ 100-1,000 ปี (Spokas, 2010; Budai et al., 2013; Weber & Quicker, 2018) ทำให้ ถ่านชีวภาพแกลบสามารถคงอยู่ในดินและเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในสารละลายดินโดยมีถ่านชีวภาพเป็น ตัวกลาง การปรับปรุงสภาพทางกายภาพและเคมีของดินให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช และการ ปรับปรุงสมบัติของดินได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้ดินที่ใส่ถ่านชีวภาพมีสมบัติที่ดีขึ้นในระยะยาว

กล่าวโดยสรุปแล้ว ถ่านชีวภาพสามารถปรับปรุงสมบัติของดินเค็มโซดิกได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยสมบัติของดินเค็มโซดิกมีสมบัติที่ดีขึ้น ทำให้ดินเค็มที่ไม่สามารถเพาะปลูกพืชได้ ใช้ในการปลูกข้าว ขาวดอกมะลิ 105 ได้ โดยอัตราของถ่านชีวภาพที่ส่งผลให้สมบัติของดินดีที่สุด ได้แก่ อัตรา 1.5 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ ที่ลดความเค็มของดิน (ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้ ปริมาณโซเดียมทั้งหมด และค่า SAR) ได้ดีที่สุด ในขณะที่ การใส่ถ่านชีวภาพแกลบในอัตรา 2 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ ส่งผลให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุและธาตุอาหาร (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และ โพแทสเซียม) มีค่าสูงที่สุด

บทที่ 5

ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว

5.1 ผลการศึกษาเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว

ในการศึกษาการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพในการปลูกข้าวในพื้นที่เกษตรกรรมดินเค็ม ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อการเจริญเติบโตของข้าวและผลผลิตข้าวดอกมะลิ 105 จำนวน 2 รอบการปลูก (รอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกรอบที่ 3) โดยเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของข้าวรอบที่ 1 (เดือนสิงหาคม-ธันวาคม พ.ศ. 2562) จากนั้น ทำการปลูกข้าวต่อในรอบที่ 2 (เดือนมกราคม-เมษายน พ.ศ. 2563) แต่อย่างไรก็ตาม ข้าวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวพันธุ์ไวต่อช่วงแสง ทำให้การเจริญเติบโตในรอบที่ 2 ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากไม่ใช่ช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของข้าวพันธุ์นี้ จึงไม่สามารถรายงานผลได้อย่างสมบูรณ์ จากนั้น ทำการปลูกข้าวต่อในรอบที่ 3 (เดือนกรกฎาคม-พฤศจิกายน พ.ศ. 2563) ทั้งนี้ การปลูกข้าวในแต่ละรอบมิได้ใส่ปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพแกลบเพิ่มเติม โดยผลการศึกษาการเจริญเติบโตของข้าวและผลผลิตข้าวรอบที่ 1 และรอบที่ 3 สรุปได้ ดังนี้

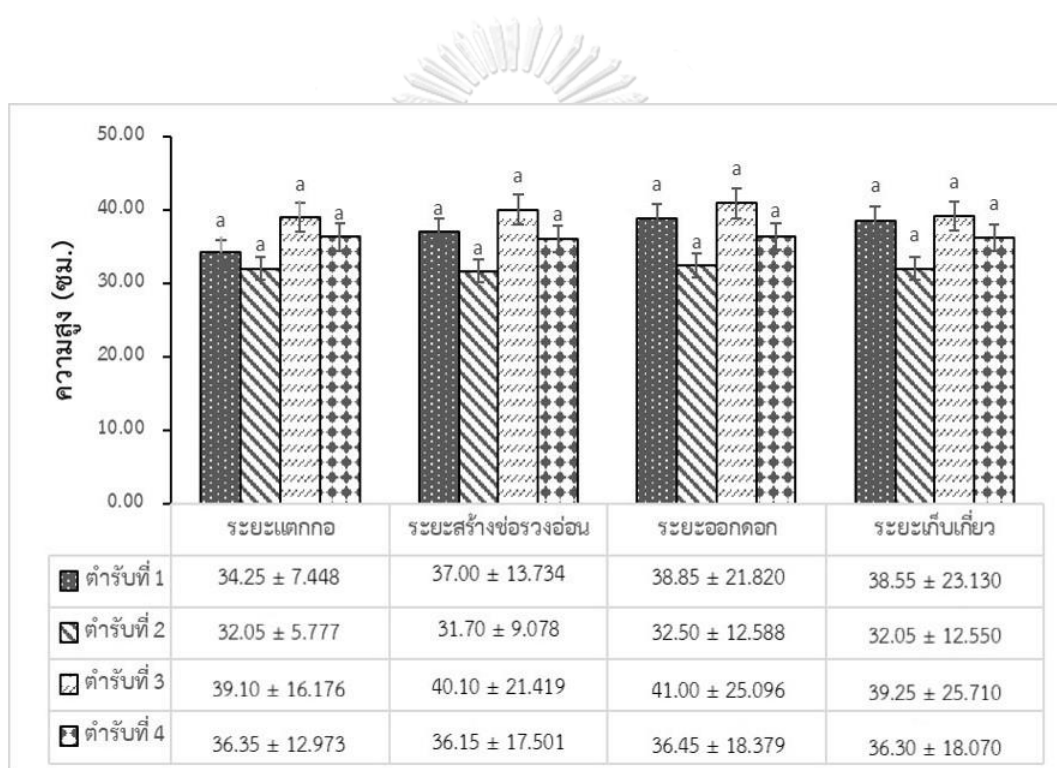
5.1.1 ความสูงของต้นข้าว

การศึกษากการเจริญเติบโตของต้นข้าวในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3 โดยการวัดความสูงตั้งแต่โคนรากจนถึงส่วนปลายยอดของต้นข้าวทุกต้นทุกวงบ่อซีเมนต์ จำนวน 20 ต้น ($n = 20$) ในทุกระยะการเจริญเติบโต ได้แก่ ระยะแตกกอ ระยะสร้างช่อรวงอ่อน ระยะออกดอก และระยะเก็บเกี่ยว และนำมาหาค่าเฉลี่ยความสูงของต้นข้าวของแต่ละตำรับการทดลอง มีรายละเอียดสรุปได้ ดังนี้

5.1.1.1 ความสูงของต้นข้าวในรอบการปลูกที่ 1

ความสูงของต้นข้าวในระยะเวลาการแตกกอในรอบการปลูกที่ 1 (รูปที่ 5-1) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 มีความสูงของต้นข้าวเฉลี่ยสูงที่สุด คือ 39.10 ซม. รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 4 (36.35 ซม.) ตำรับการทดลองที่ 1 (34.25 ซม.) และตำรับการทดลองที่ 2 (32.05 ซม.) ตามลำดับ ในระยะสร้างช่อรวงอ่อน ตำรับการทดลองที่ 3 ยังคงมีความสูงของต้นข้าวเฉลี่ยสูงที่สุด (40.10 ซม.) รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 1 (37.00 ซม.) ตำรับการทดลองที่ 4 (36.15 ซม.) และตำรับการทดลองที่ 2 (31.70 ซม.) ตามลำดับ ความสูงของต้นข้าวในระยะออกดอกยังคงเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการเจริญเติบโตในสองระยะที่ผ่านมา กล่าวคือ ตำรับการทดลองที่ 3 มีความสูง

ของต้นข้าวเฉลี่ยมากที่สุด (41.00 ซม.) โดยความสูงของต้นข้าวในตำรับการทดลองที่ 1 (38.85 ซม.) สูงกว่าความสูงของต้นข้าวในตำรับการทดลองที่ 4 (36.45 ซม.) เช่นเดียวกันกับการเจริญเติบโตใน ระยะการสร้างช่อรวงอ่อน และตำรับการทดลองที่ 2 (32.50 ซม.) เป็นตำรับการทดลองที่มีความสูง ของต้นข้าวน้อยที่สุด และในระยะเก็บเกี่ยว พบว่า ความสูงของต้นข้าวในแต่ละตำรับการทดลองยังคง เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับระยะแตกกอ ระยะสร้างช่อรวงอ่อน และระยะออกดอก กล่าวคือ ต้นข้าว ในตำรับการทดลองที่ 3 มีความสูงมากที่สุดเช่นเดียวกัน โดยมีความสูงของต้นข้าวเฉลี่ยเท่ากับ 39.25 ซม. รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 1 (38.55 ซม.) ตำรับการทดลองที่ 4 (36.30 ซม.) และตำรับ การทดลองที่ 2 (32.05 ซม.) ตามลำดับ



รูปที่ 5-1 ความสูงของต้นข้าวทั้ง 4 ระยะการเจริญเติบโตในรอบการปลูกที่ 1

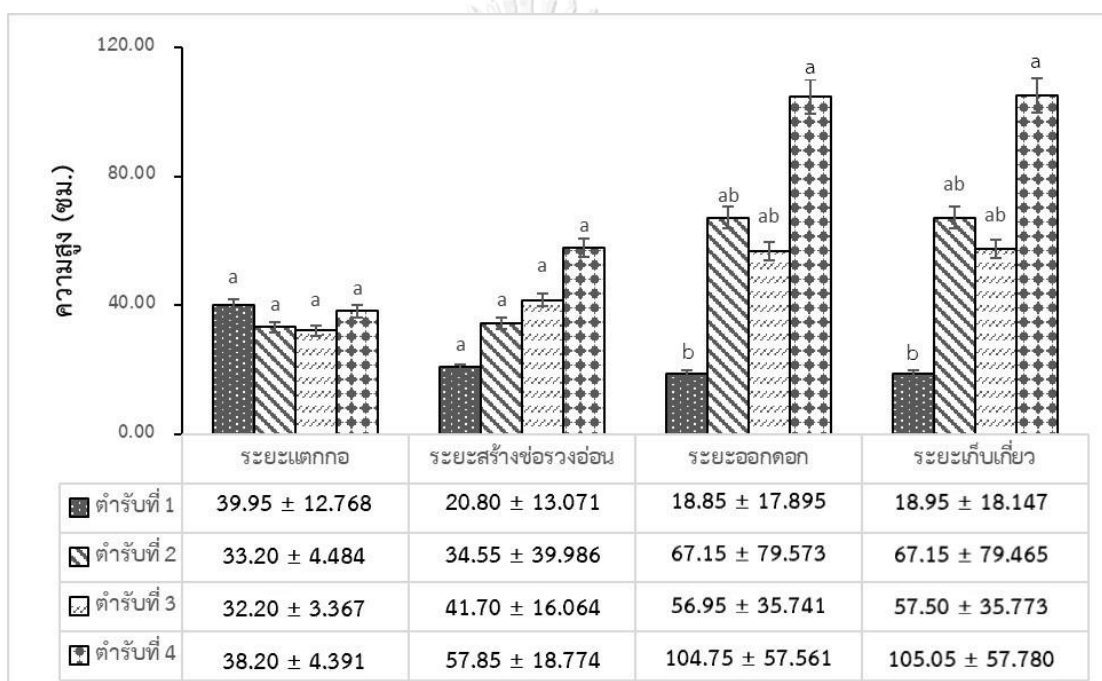
หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกัน (a) แสดงถึงผลของตำรับการทดลองที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p > 0.05$) ตามวิธี DMRT

ผลการวัดความสูงของต้นข้าวในรอบการปลูกที่ 1 ชี้ให้เห็นว่า การใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 1.5 กิโลกรัม ร่วมกับปุ๋ยในอัตรา 1 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ (ตำรับการทดลองที่ 3) ทำให้ต้นข้าวเจริญเติบโตได้ดีและมีความสูงของต้นข้าวสูงที่สุดในทุกระยะการเจริญเติบโต แต่อย่างไร

ก็ตาม ความสูงของต้นข้าวเฉลี่ยในแต่ละระยะของการเจริญเติบโตไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างตำรับการทดลองทั้งหมด

5.1.1.2 ความสูงของต้นข้าวในรอบการปลูกที่ 3

ผลการวัดความสูงของต้นข้าวในรอบการปลูกที่ 3 (รูปที่ 5-2) พบว่า ความสูงของต้นข้าวในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของตำรับการทดลองทั้งสี่ตำรับการทดลองไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันในรอบการปลูกที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 5-2 ความสูงของต้นข้าวทั้ง 4 ระยะการเจริญเติบโตในรอบการปลูกที่ 3

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกัน (a, b, ab) แสดงถึงผลของตำรับการทดลองที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p > 0.05$) ตามวิธี DMRT

ในระยะแตกกอนั้น ตำรับการทดลองที่ 1 มีความสูงของต้นข้าวเฉลี่ยสูงที่สุด (39.95 ซม.) รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 4 (38.20 ซม.) ตำรับการทดลองที่ 2 (33.20 ซม.) และตำรับการทดลองที่ 3 (32.20 ซม.) ตามลำดับ ในระยะสร้างช่อรวงอ่อน ตำรับการทดลองที่ 4 มีความสูงของต้นข้าวเฉลี่ยสูงที่สุด (57.85 ซม.) รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 3 (41.70 ซม.) ตำรับการทดลองที่ 2 (34.55 ซม.) และตำรับการทดลองที่ 1 (20.80 ซม.) ตามลำดับ ในระยะออก

ดอก ดำรับการทดลองที่ 4 ยังคงมีความสูงของต้นข้าวเฉลี่ยมากที่สุด (104.75 ซม.) รองลงมา ได้แก่ ดำรับการทดลองที่ 2 (67.15 ซม.) ดำรับการทดลองที่ 3 (56.95 ซม.) และดำรับการทดลองที่ 1 (18.85 ซม.) ตามลำดับ และในระยะเก็บเกี่ยว พบว่า ความสูงของต้นข้าวในแต่ละดำรับการทดลอง ยังคงเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับระยะออกดอก กล่าวคือ ต้นข้าวในดำรับการทดลองที่ 4 มีความสูงมากที่สุดเช่นเดียวกัน โดยมีความสูงของต้นข้าวเฉลี่ยเท่ากับ 105.05 ซม. รองลงมา ได้แก่ ดำรับการทดลองที่ 2 (67.15 ซม.) ดำรับการทดลองที่ 3 (57.50 ซม.) และดำรับการทดลองที่ 1 (18.95 ซม.) ตามลำดับ

จากการศึกษาการเจริญเติบโตของต้นข้าวในฤดูกาลปลูกที่ 3 พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 2 กิโลกรัม ร่วมกับปุ๋ยในอัตรา 1 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ (ดำรับการทดลองที่ 4) ทำให้ต้นข้าวมีความสูงเฉลี่ยของต้นข้าวสูงที่สุดในระยะสร้างช่อรวงอ่อน ระยะออกดอก และระยะเก็บเกี่ยว โดยดำรับการทดลองที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพ (ดำรับการทดลองที่ 1) มีความสูงของต้นข้าวต่ำที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบความสูงของต้นข้าวเฉลี่ยในระยะออกดอกและระยะเก็บเกี่ยว พบว่า ดำรับการทดลองที่ 1 มีความสูงของต้นข้าวต่ำกว่าในดำรับการทดลองที่ 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร a, b) โดยผลความสูงของข้าวในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3 ในระยะเก็บเกี่ยว แสดงผลในตารางที่ 5-1

จากผลการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3 (ตารางที่ 5-1) ชี้ให้เห็นว่า ต้นข้าวที่ปลูกโดยใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยคอก มีการเจริญเติบโตที่ดีกว่าการปลูกข้าวโดยใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว ซึ่งในรอบการปลูกที่ 3 พบว่า ในระยะเก็บเกี่ยวของดำรับการทดลองที่ 4 ความสูงของต้นข้าวเพิ่มขึ้นจากรอบการปลูกที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (เครื่องหมาย *) ทั้งนี้ ความสูงของต้นข้าวเป็นผลมาจากไนโตรเจนที่ช่วยในการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ (นนทียา คำบุญเรือง, 2554; วิชุดา กัลยาศิริ, 2556) ซึ่งถ่านชีวภาพจะช่วยตรึงไนโตรเจนให้ยังคงอยู่ในดิน ในขณะที่ ดำรับการทดลองที่ 1 ที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ จะสูญเสียไนโตรเจนจากการระเหยของ NH_3 (Bai et al., 2015; Ye et al., 2020)

ตารางที่ 5-1 ผลการศึกษาความสูงของข้าวในระยะเก็บเกี่ยว ของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3

ตำรับการทดลองที่	ความสูงของข้าวในระยะเก็บเกี่ยว (เซนติเมตร)	
	รอบการปลูกที่ 1	รอบการปลูกที่ 3
1	38.55 ± 23.130 ^a	18.95 ± 18.147 ^b
2	32.05 ± 12.550 ^a	67.15 ± 79.465 ^{ab}
3	39.25 ± 25.710 ^a	57.50 ± 35.773 ^{ab}
4	36.30 ± 18.070 ^{a,*}	105.05 ± 57.780 ^{a,*}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกัน (a, b, ab) แสดงถึงผลของตำรับการทดลองที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p > 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีเครื่องหมาย * หมายถึง ผลการศึกษาของการปลูกข้าวรอบที่ 1 และการปลูกข้าวรอบที่ 3 มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

5.1.2 การแตกกอและจำนวนรวงต่อพื้นที่

การศึกษากาการเจริญเติบโตในระยะการแตกกอของต้นข้าวในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3 โดยการนับแขนงของต้นข้าวในแต่ละต้น และนำมาหาค่าเฉลี่ยการแตกกอของต้นข้าวในทุกตำรับการทดลองในแต่ละต้น จำนวน 20 ต้น ($n = 20$) และการศึกษากาการเจริญเติบโตของต้นข้าวในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3 ในระยะสร้างช่อรวงอ่อนและระยะเก็บเกี่ยว โดยการนับจำนวนรวงทั้งหมดต่อวงบ่อซีเมนต์ ทั้งหมดจำนวน 20 ต้น ($n = 20$) แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยจำนวนรวงของแต่ละตำรับการทดลอง

ผลการศึกษาการแตกกอและจำนวนรวงต่อพื้นที่ของการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3 สรุปผลการศึกษาได้ ดังนี้

5.1.2.1 การแตกกอของต้นข้าวในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3

ในรอบการปลูกที่ 1 (ตารางที่ 5-2) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 1 ต้นข้าวมีการแตกกอเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 2.90 แขนง รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 3 (2.25 แขนง) ตำรับการทดลองที่ 4 (1.80 แขนง) และตำรับการทดลองที่ 2 (1.45 แขนง) ตามลำดับ โดยการแตกกอของแต่ละตำรับการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการเจริญเติบโตในระยะการแตกกอของต้นข้าวในรอบการปลูกที่ 3 พบว่า ต้นข้าวมีการแตกกอเฉลี่ยมากที่สุดในตำรับการทดลองที่ 4 (8.90 แขนง) รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 3 (7.50 แขนง) ตำรับการทดลองที่ 2 (3.10 แขนง) และตำรับการทดลองที่ 1 (1.65 แขนง) ตามลำดับ โดยการแตกกอของตำรับการทดลองที่ 1 มีค่าต่ำกว่าการแตกกอของตำรับการทดลองที่ 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร a, b) ผลดังตารางที่ 5-2 ซึ่งการแตกกอของข้าวในตำรับการทดลองที่ 4 สูงกว่าการแตกกอของข้าวในตำรับการทดลองที่ 1 ถึง 5.39 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบการแตกกอของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกข้าวที่ 3 พบว่า ตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตรามีการแตกกอของต้นข้าวเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 1 (ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ) เป็นเพียงตำรับการทดลองเดียวที่การแตกกอของข้าวลดลง นอกจากนั้น ผลการศึกษายังพบว่า มีเพียงตำรับการทดลองที่ 4 ซึ่งใส่ถ่านชีวภาพในอัตราสูงที่สุดเท่านั้น ที่ส่งผลให้การแตกกอของต้นข้าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5-2 ผลการศึกษาการแตกกอในระยะการแตกกอ ของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3

ตำรับการทดลองที่	การแตกกอ (แขนง)	
	รอบการปลูกที่ 1	รอบการปลูกที่ 3
1	2.90 ± 2.735 ^a	1.65 ± 1.248 ^b
2	1.45 ± 0.661 ^a	3.10 ± 3.711 ^{ab}
3	2.25 ± 2.241 ^a	7.50 ± 4.094 ^{ab}
4	1.80 ± 1.600 ^{a,*}	8.90 ± 6.807 ^{a,*}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกัน (a, b, ab) แสดงถึงผลของตำรับการทดลองที่ไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p > 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีเครื่องหมาย * หมายถึง ผลการศึกษาของการปลูกข้าวรอบที่ 1 และการปลูกข้าวรอบที่ 3 มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

5.1.2.2 จำนวนรวงต่อพื้นที่ของต้นข้าวในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3

ในรอบการปลูกข้าวรอบที่ 1 พบว่า ต้นข้าวทั้ง 2 ระยะ (ระยะสร้างขอรวงอ่อน และระยะเก็บเกี่ยว) ให้จำนวนรวงเฉลี่ยต่อพื้นที่เท่ากัน โดยตำรับการทดลองที่ 1 มีจำนวนรวงเฉลี่ยต่อพื้นที่มากที่สุดเท่ากับ 1.35 รวง รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 3 (1.05 รวง) และตำรับการ

ทดลองที่ 4 (0.65 รวง) โดยดำรับการทดลองที่ 2 (0.30 รวง) ให้ผลจำนวนรวงเฉลี่ยต่อพื้นที่ต่ำที่สุด ทั้งนี้ จำนวนรวงต่อพื้นที่ของแต่ละดำรับการทดลอง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการศึกษจำนวนรวงต่อพื้นที่ในรอบการปลูกที่ 3 พบว่า ดำรับการทดลองที่ 4 มีจำนวนรวงเฉลี่ยต่อพื้นที่มากที่สุดเท่ากับ 8.40 รวง รองลงมา ได้แก่ ดำรับการทดลองที่ 3 (5.80 รวง) ดำรับการทดลองที่ 2 (3.50 รวง) และดำรับการทดลองที่ 1 (0.45 รวง) ตามลำดับ โดยจำนวนรวงต่อพื้นที่ของดำรับการทดลองที่ 4 มีจำนวนมากกว่าในดำรับการทดลองที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร a, b) โดยไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างดำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพด้วยกัน

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนรวงต่อพื้นที่ระหว่างการปลูกข้าวรอบที่ 1 และการปลูกข้าวรอบที่ 3 พบว่า จำนวนรวงต่อพื้นที่ของดำรับการทดลองที่ 3 และดำรับการทดลองที่ 4 ในรอบการปลูกที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นจากรอบการปลูกที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (เครื่องหมาย *) โดยดำรับการทดลองที่ 2 ซึ่งเป็นดำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตราต่ำที่สุด ยังคงให้จำนวนรวงต่อพื้นที่เพิ่มขึ้นกว่าในรอบการปลูกที่ 1 ในขณะที่ ดำรับการทดลองที่ 1 ซึ่งใส่ปุ๋ยคอกเป็นดำรับการทดลองเดียวที่ให้จำนวนรวงต่อพื้นที่ในรอบการปลูกที่ 3 ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับรอบการปลูกที่ 1 ดังแสดงผลในตารางที่ 5-3 ทั้งนี้ การแตกกอของข้าวจะส่งผลให้จำนวนรวงต่อพื้นที่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการแตกกอและจำนวนรวงต่อพื้นที่ให้ผลการศึกษาไปในทางเดียวกัน

ตารางที่ 5-3 ผลการศึกษาจำนวนรวงต่อพื้นที่ในระยะสร้างขอรวงอ่อนและระยะเก็บเกี่ยว ของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3

ดำรับการทดลองที่	จำนวนรวงต่อพื้นที่ (รวง)	
	การปลูกรอบที่ 1	การปลูกรอบที่ 3
1	1.35 ± 1.886 ^a	0.45 ± 0.661 ^b
2	0.30 ± 0.383 ^a	3.50 ± 4.055 ^{ab}
3	1.05 ± 1.843 ^{a,*}	5.80 ± 4.173 ^{ab,*}
4	0.65 ± 1.300 ^{a,*}	8.40 ± 5.574 ^{a,*}

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกัน (a, b, ab) แสดงถึงผลของดำรับการทดลองที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p > 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีเครื่องหมาย * หมายถึง ผลการศึกษาของการปลูกข้าวรอบที่ 1 และการปลูกข้าวรอบที่ 3 มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

5.1.3 จำนวนเมล็ดต่อรวง

ในการศึกษาการเจริญเติบโตของต้นข้าวในระยะการเก็บเกี่ยวทั้งในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3 ทำโดยการหาค่าเฉลี่ยของจำนวนเมล็ดต่อรวงจากต้นข้าวทั้งหมด จำนวน 20 ต้น ($n = 20$) สรุปผลได้ (ตารางที่ 5-4) ดังนี้

5.1.3.1 จำนวนเมล็ดต่อรวงในรอบการปลูกที่ 1

ผลการนับจำนวนเมล็ดต่อรวงของต้นข้าวในรอบการปลูกที่ 1 พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 มีจำนวนเมล็ดต่อรวงเฉลี่ยมากที่สุด คือ 17.20 เมล็ด รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 1 (14.90 เมล็ด) ตำรับการทดลองที่ 4 (7.80 เมล็ด) และตำรับการทดลองที่ 2 (4.30 เมล็ด) ตามลำดับ โดยจำนวนเมล็ดต่อรวงของแต่ละตำรับการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการศึกษาจำนวนรวงต่อพื้นที่และจำนวนเมล็ดต่อรวงในรอบการปลูกที่ 1 จะเห็นได้ว่า จำนวนรวงต่อพื้นที่และจำนวนเมล็ดต่อรวงไม่มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ตำรับการทดลองที่ 1 ที่มีจำนวนรวงต่อพื้นที่มากที่สุด ไม่ได้มีจำนวนเมล็ดต่อรวงมากที่สุด ทั้งนี้ อาจเป็นผลจากธาตุอาหารหลักที่ต้นข้าวใช้ในการเจริญเติบโตของตำรับการทดลองที่ 1 ถูกนำไปใช้ในการสร้างรวงมากกว่าสร้างเมล็ด

ตารางที่ 5-4 ผลการศึกษาจำนวนเมล็ดต่อรวงในระยะเก็บเกี่ยว ของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3

ตำรับการทดลองที่	จำนวนเมล็ดต่อรวง (เมล็ด)	
	การปลูกรอบที่ 1	การปลูกรอบที่ 3
1	14.90 ± 19.881 ^a	12.15 ± 19.004 ^b
2	4.30 ± 5.178 ^a	52.75 ± 60.935 ^{ab}
3	17.20 ± 31.535 ^{a,*}	74.05 ± 50.274 ^{a,*}
4	7.80 ± 15.600 ^{a,*}	78.95 ± 21.274 ^{a,*}

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกัน (a, b, ab) แสดงถึงผลของตำรับการทดลองที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p > 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีเครื่องหมาย * หมายถึง ผลการศึกษาของการปลูกข้าวรอบที่ 1 และการปลูกข้าวรอบที่ 3 มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

5.1.3.2 จำนวนเมล็ดต่อรวงในรอบการปลูกที่ 3

ในการเก็บเกี่ยวผลผลิตในรอบการปลูกที่ 3 พบว่า จำนวนเมล็ดต่อรวงในตำรับ การทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตราสูงที่สุด (ตำรับการทดลองที่ 4) ให้ผลผลิตที่ดีที่สุด (78.95 เมล็ด) โดยจำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าวมีแปรผันตามอัตราของถ่านชีวภาพที่ใส่ กล่าวคือ ตำรับการทดลองที่ 3 (74.05 เมล็ด) ตำรับการทดลองที่ 2 (52.75 เมล็ด) และตำรับการทดลองที่ 1 (12.15 เมล็ด) ตามลำดับ จำนวนเมล็ดต่อรวงของต้นข้าวในตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 มีค่า มากกว่าตำรับการทดลองที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร a, b)

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนเมล็ดต่อรวงของต้นข้าวในรอบการปลูกที่ 1 และรอบ การปลูกที่ 3 จะเห็นได้ว่า ในตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตราให้ผลของจำนวนเมล็ดต่อ รวงของต้นข้าวเพิ่มมากขึ้นจากรอบการปลูกที่ 1 ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพให้ จำนวนเมล็ดต่อรวงของต้นข้าวลดลงจากรอบการปลูกที่ 1 โดยจำนวนเมล็ดต่อรวงต้นข้าวในตำรับการ ทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 ของการปลูกข้าวรอบที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นจากการปลูกข้าวในรอบ การปลูกที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (เครื่องหมาย *) ผลดังตารางที่ 5-4

ธาตุอาหารหลักในดินส่งผลเป็นอย่างมากต่อการสร้างเมล็ด และจำนวนเมล็ด ต่อรวง โดยฟอสฟอรัสจะช่วยในการออกดอกและสร้างเมล็ดข้าว (วิชุดา กัลยาศิริ, 2556) จะเห็นได้ จากปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 ของตำรับการทดลองที่ 1 ตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 ลดลงจากดินก่อนปลูกข้าวอย่างมีนัยสำคัญ (หัวข้อ 4.3.2.2) อีกทั้ง การที่ปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงจะกระตุ้นการสร้างตาดอก โฟแทสเซียมมีส่วนช่วยใน การสร้างคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนของเมล็ดข้าว รวมถึงช่วยในการสังเคราะห์แสง (Abdul & Abdul, 2017) ดังจะเห็นได้จากภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 พบเพียงดินในตำรับการทดลองที่ 2 เท่านั้นที่มี การเพิ่มขึ้นของปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (หัวข้อ 4.3.2.3) นอกจากนี้ แคลเซียมยังมีส่วนใน การเคลื่อนย้ายและเก็บรักษาคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนในพืชเพื่อนำไปใช้ในการสร้างผลและเมล็ด (Datta, 1981; นันทิยา คำบุญเรือง, 2554; วิชุดา กัลยาศิริ, 2556) โดยจะเห็นได้จากภายหลังการ ปลูกข้าวรอบที่ 1 ปริมาณแคลเซียมในดินของตำรับการทดลองที่ 2 มีปริมาณมากกว่าตำรับการ ทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญ (หัวข้อ 4.3.2.4) สอดคล้องกับผลการเจริญเติบโตของข้าวในการปลูกข้าว รอบที่ 1 ที่จะเห็นได้ว่าตำรับการทดลองที่ 2 ให้ผลการเจริญเติบโตของข้าวแก่ที่สุด ดังจะเห็นได้จาก จำนวนเมล็ดต่อรวง น้ำหนัก 1,000 เมล็ดดีและน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด (จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป)

5.1.4 น้ำหนัก 1,000 เมล็ดดีและน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด

การศึกษาน้ำหนัก 1,000 เมล็ดดีและน้ำหนักเมล็ดทั้งหมดในแต่ละตำรับการทดลองจากต้นข้าวจำนวน 20 ต้น ($n = 20$) ในการปลูกข้าวทั้ง 2 รอบการเพาะปลูก ได้ผลการศึกษารูปได้ ดังนี้

5.1.4.1 น้ำหนักเมล็ดทั้งหมดในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3

ผลการศึกษาน้ำหนักเมล็ดทั้งหมดของรอบการปลูกที่ 1 พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 ให้ผลผลิตข้าวที่มีน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด (18.67 กรัม) สูงที่สุด โดยตำรับการทดลองที่ 2 ให้น้ำหนักเมล็ดทั้งหมด (0.93 กรัม) ต่ำที่สุด (ผลดังตารางที่ 5-5) โดยน้ำหนักเมล็ดทั้งหมดในตำรับการทดลองที่ 1 และตำรับการทดลองที่ 3 มีน้ำหนักเมล็ดมากกว่าในตำรับการทดลองที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร a, b)

ในรอบการปลูกที่ 3 พบว่า ตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพให้น้ำหนักเมล็ดทั้งหมดของเมล็ดข้าวสูงกว่าตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ โดยน้ำหนักเมล็ดทั้งหมดของข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณถ่านชีวภาพที่ใช้ กล่าวคือ ตำรับการทดลองที่ 4 ให้น้ำหนักเมล็ดทั้งหมดสูงที่สุด (498.40 กรัม) รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 3 (469.20 กรัม) ตำรับการทดลองที่ 2 (203.70 กรัม) และตำรับการทดลองที่ 1 (7.30 กรัม) ตามลำดับ โดยผลผลิตของข้าวในตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตรามีค่ามากกว่าผลผลิตข้าวในตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตัวอักษร a, b)

เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตของข้าวในรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3 พบว่า น้ำหนักเมล็ดทั้งหมดของตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตราในรอบการปลูกที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (เครื่องหมาย *) เมื่อเปรียบเทียบกับรอบการปลูกที่ 1 ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ (ตำรับการทดลองที่ 1) ให้เมล็ดข้าวที่มีน้ำหนักเมล็ดในรอบการปลูกที่ 3 ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลในการปลูกรอบที่ 1

ตารางที่ 5-5 ผลการศึกษาน้ำหนักเมล็ดทั้งหมดในระยะเก็บเกี่ยว ของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3

ตำรับการทดลองที่	น้ำหนักเมล็ดทั้งหมด (กรัม)	
	การปลูกรอบที่ 1	การปลูกรอบที่ 3
1	15.55 ^a	7.30 ^b
2	0.93 ^{b,*}	203.70 ^{a,*}
3	18.67 ^{a,*}	469.20 ^{a,*}
4	5.63 ^{ab,*}	498.40 ^{a,*}

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกัน (a, b, ab) แสดงถึงผลของตำรับการทดลองที่ไม่มีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p > 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีเครื่องหมาย * หมายถึง ผลการศึกษาของการปลูกข้าวรอบที่ 1 และการปลูกข้าวรอบที่ 3 มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

5.1.4.2 น้ำหนัก 1,000 เมล็ดดีในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3

ในรอบการปลูกที่ 1 พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 ให้ผลผลิตข้าวที่มีน้ำหนัก 1,000 เมล็ดดี (12.67 กรัม) สูงที่สุด ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 2 ให้น้ำหนัก 1,000 เมล็ดดีต่ำที่สุด (0.01 กรัม) แสดงผลดังตารางที่ 5-6 โดยน้ำหนัก 1,000 เมล็ดดีในตำรับการทดลองที่ 1 และตำรับการทดลองที่ 3 มีน้ำหนักมากกว่าผลผลิตในตำรับการทดลองที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร a, b) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันกับผลของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมดในรอบการปลูกที่ 1

ผลการศึกษาน้ำหนักเมล็ดทั้งหมดในรอบการปลูกที่ 3 ชี้ให้เห็นว่า การใส่ถ่านชีวภาพในอัตราสูงที่สุดให้น้ำหนักเมล็ด 1,000 เมล็ดดี (34.89 กรัม) มากที่สุด และการปลูกข้าวโดยการใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียวให้ผลผลิตข้าวที่มีน้ำหนัก 1,000 เมล็ดดี ต่ำที่สุด (1.02 กรัม) โดยน้ำหนัก 1,000 เมล็ดดีในทุกตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพ ให้น้ำหนักมากกว่าผลผลิตข้าวในตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (ตัวอักษร a, b) ในขณะที่ ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในแต่ละอัตรา

ทั้งนี้ เป็นที่น่าสังเกตว่า ผลของน้ำหนักเมล็ดดี 1,000 เมล็ด และน้ำหนักเมล็ดทั้งหมดของรอบการปลูกที่ 3 ในตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 1 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ (ตำรับการทดลองที่ 2) และอัตรา 1.5 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ (ตำรับการทดลองที่ 3) ให้ผลไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลในรอบการปลูกที่ 1 แต่อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวมีความแตกต่างกันเพียง

เล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตของข้าวในรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3 (ตารางที่ 5-6) พบว่า ดำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตราให้ผลของเมล็ดดี (น้ำหนักเมล็ดดี 1,000 เมล็ด) เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตที่ได้จากการปลูกในรอบการปลูกที่ 1 โดยดำรับการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพให้ผลของน้ำหนักเมล็ดดีในรอบการปลูกที่ 3 ต่ำกว่าในรอบการปลูกที่ 1 สอดคล้องกับผลการแตกกอ จำนวนรวงต่อพื้นที่ จำนวนเมล็ดต่อรวง และน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด ทั้งนี้ น้ำหนักเมล็ดดี 1,000 เมล็ด ของดำรับการทดลองที่ 2 และดำรับการทดลองที่ 4 ในรอบการปลูกที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นจากรอบการปลูกที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 % (เครื่องหมาย *)

ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมดและน้ำหนัก 1,000 เมล็ดดี เป็นผลมาจากธาตุอาหารหลัก โดยไนโตรเจนมีส่วนช่วยในการเพิ่มน้ำหนักเมล็ดข้าว โปแทสเซียมมีส่วนช่วยในการสร้างคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนของเมล็ดข้าว และแคลเซียมมีส่วนในการเคลื่อนย้ายและเก็บรักษาคาร์โบไฮเดรต (Datta, 1981; Abdul & Abdul, 2017; วิชิตา กัลยาศิริ, 2556) ดังจะเห็นได้จากดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 ที่ปริมาณโปแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (หัวข้อ 4.3.2.3) ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (หัวข้อ 4.3.2.4) ของดำรับการทดลองที่ 2 มีค่ามากกว่าดำรับการทดลองอื่น จึงอาจกล่าวได้ว่า ข้าวที่ปลูกในดำรับการทดลองที่ 2 ไม่สามารถดูดซึมทั้งโปแทสเซียมและแคลเซียมไปใช้จึงมีปริมาณดังกล่าวในดินมากที่สุด สอดคล้องกับผลการเจริญเติบโตของข้าวในการปลูกข้าวรอบที่ 1 ที่จะเห็นได้ว่าดำรับการทดลองที่ 2 ให้ผลการเจริญเติบโตของข้าวแย่มากที่สุด ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับจำนวนเมล็ดต่อรวง

ตารางที่ 5-6 ผลการศึกษาน้ำหนัก 1,000 เมล็ดดีในระยะเก็บเกี่ยว ของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3

ดำรับการทดลองที่	น้ำหนัก 1,000 เมล็ดดี (กรัม)	
	การปลูกรอบที่ 1	การปลูกรอบที่ 3
1	7.25 ^a	1.02 ^b
2	0.01 ^{b,*}	33.95 ^{a,*}
3	12.67 ^a	33.69 ^a
4	2.12 ^{ab,*}	34.89 ^{a,*}

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกัน (a, b, ab) แสดงถึงผลของดำรับการทดลองที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p > 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีเครื่องหมาย * หมายถึง ผลการศึกษาของการปลูกข้าวรอบที่ 1 และการปลูกข้าวรอบที่ 3 มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

5.1.5 เปอร์เซ็นต์เมล็ดดี

ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีของข้าวในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3 สรุปได้ ดังนี้ (ตารางที่ 5-7)

ในรอบการปลูกที่ 1 พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 มีเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีสูงสุด คือ 66.64 % รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 1 (47.40 %) ตำรับการทดลองที่ 4 (40.00 %) และตำรับการทดลองที่ 2 (1.82 %) ตามลำดับ ซึ่งตำรับการทดลองที่ 3 ยังคงให้ผลผลิตข้าวที่มีเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีที่ดีที่สุด (66.84 %) ในรอบการปลูกที่ 3 ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 1 ให้เปอร์เซ็นต์เมล็ดดีของข้าวต่ำที่สุด (14.04 %) ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมดและน้ำหนัก 1,000 เมล็ดดี นอกจากนี้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ตำรับการทดลองที่ 4 จะให้จำนวนเมล็ดต่อรวง น้ำหนักเมล็ดทั้งหมด และน้ำหนัก 1,000 เมล็ดดีที่สุดในรอบการปลูกที่ 3 แต่เปอร์เซ็นต์เมล็ดดีของตำรับการทดลองที่ 4 ยังคงต่ำกว่าตำรับการทดลองที่ 3

จากผลการปลูกข้าวในรอบที่ 1 ชี้ให้เห็นว่า ตำรับการทดลองที่ 1 ให้ผลการเจริญเติบโตของข้าว (การแตกกอและจำนวนรวงต่อพื้นที่) ดีกว่า ตำรับการทดลองที่ 3 แต่เมื่อพิจารณาถึงผลผลิตข้าวที่ได้ กลับพบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 ให้ผลผลิตข้าว (จำนวนเมล็ดต่อรวง น้ำหนักเมล็ดทั้งหมด น้ำหนัก 1,000 เมล็ดดีและเปอร์เซ็นต์เมล็ดดี) ที่สูงกว่า ผลผลิตข้าวที่ได้จากตำรับการทดลองที่ 1 ทั้งนี้ เป็นผลเนื่องมาจากการปลูกข้าวในดินเค็ม จะส่งผลให้ข้าวขาดการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรตในช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบและระยะเริ่มสร้างช่อรวงอ่อน (Hussain et al., 2017) และการเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวจะส่งผลให้ปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลง เมล็ดลีบ น้ำหนักเมล็ดลดลง ผลผลิตต่ำ (Cha-Um & Kirdmanee, 2011; อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ซึ่งถ่านชีวภาพที่ใส่ลงไปดินช่วยลดความเค็มของดินได้ รวมถึงช่วยปรับปรุงสมบัติของดินให้เอื้อต่อการเจริญเติบโตของพืชมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากผลการวิเคราะห์สมบัติของดินที่พบว่า ดินในตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพมีสมบัติที่ดีขึ้น โดยเฉพาะค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้ ปริมาณโซเดียมทั้งหมด และค่า SAR ของตำรับการทดลองที่ 3 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่การปลูกข้าวรอบแรก และยังมีค่าต่ำกว่าตำรับการทดลองที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย

ตารางที่ 5-7 ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีในระยะเก็บเกี่ยว ของรอบการปลูกข้าวที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3

ตำรับการทดลองที่	เปอร์เซ็นต์เมล็ดดี (%)	
	การปลูกรอบที่ 1	การปลูกรอบที่ 3
1	47.40 ^{a,*}	14.04 ^{b,*}
2	1.82 ^{b,*}	55.29 ^{ab,*}
3	66.64 ^a	66.84 ^a
4	40.00 ^a	52.78 ^{ab}

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกัน (a, b, ab) แสดงถึงผลของตำรับการทดลองที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p > 0.05$) ตามวิธี DMRT และค่าเฉลี่ยที่มีเครื่องหมาย * หมายถึง ผลการศึกษาของการปลูกข้าวรอบที่ 1 และการปลูกข้าวรอบที่ 3 มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

โดยสรุปแล้ว ผลการศึกษากาการเจริญเติบโตของข้าวและผลผลิตข้าวในทั้งสองรอบการเพาะปลูกข้าว แสดงให้เห็นว่า การใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตราส่งผลให้ต้นข้าวเจริญเติบโตได้ดีกว่าการใส่เพียงปุ๋ยคอก โดยการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวในรอบการปลูกที่ 1 ยังเห็นผลไม่ชัดเจนมากนัก ดังจะเห็นได้ว่าการเจริญเติบโตของข้าวในตำรับการทดลองที่ 1 ได้แก่ ความสูง การแตกกอ จำนวนรวงต่อพื้นที่สูงกว่าตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพ แต่ผลผลิตของข้าว ได้แก่ จำนวนเมล็ดต่อรวง น้ำหนักเมล็ดทั้งหมด น้ำหนัก 1,000 เมล็ดดีและเปอร์เซ็นต์เมล็ดดี ในตำรับการทดลองที่ 1 ให้ผลต่ำกว่าในตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตราสูงที่สุด (ตำรับการทดลองที่ 3) และเมื่อปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 3 จะเห็นได้ว่า ผลการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตราให้ผลการเจริญเติบโตของข้าวและผลผลิตข้าวที่สูงกว่าตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ อีกทั้ง ข้าวที่ปลูกในวงบ่อซีเมนต์ที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพยังเป็นตำรับการทดลองเดียวที่ให้ผลผลิตและการเจริญเติบโตของข้าวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับรอบการปลูกที่ 1 ด้วย

นอกจากนั้น การใส่ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตราที่เหมาะสม ได้แก่ อัตรา 1.5 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ (ตำรับการทดลองที่ 3) และอัตรา 2 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ (ตำรับการทดลองที่ 4) ให้ผลการเจริญเติบโตของข้าวและผลผลิตข้าวที่สูงกว่าการปลูกข้าวโดยใส่ปุ๋ยคอกอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยตำรับการทดลองที่ 3 ให้ผลการเจริญเติบโตของข้าวที่ดีตั้งแต่ในรอบการปลูกที่ 1

และยังคงให้ผลดีในรอบการปลูกที่ 3 เช่นกัน ในขณะที่ ดำรับการทดลองที่ 4 เริ่มให้ผลการเจริญเติบโตของข้าวดีในรอบการปลูกที่ 3

5.2 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว

จากผลการทดลองปลูกข้าวในดินเค็มในวงบ่อซีเมนต์โดยการใส่ปุ๋ยคอก และการใส่ถ่านชีวภาพในอัตราที่แตกต่างกัน ซึ่งดำเนินการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 1 ระหว่างเดือนสิงหาคม-ธันวาคม พ.ศ. 2562 และรอบการปลูกที่ 3 ระหว่างเดือนกรกฎาคม-พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 ผลการศึกษาสรุปได้ว่า การใส่ถ่านชีวภาพสามารถปรับปรุงสมบัติของดินที่ไม่สามารถปลูกข้าวได้ ให้สามารถเพาะปลูกข้าวและให้ผลผลิตข้าวได้ในทั้ง 2 รอบการปลูก โดยการปลูกในรอบการปลูกที่ 1 นั้นให้ผลไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากกลไกการทำงานในการปรับปรุงสมบัติของดินด้วยถ่านชีวภาพจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาโดยการใส่ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงสมบัติของดินเค็มเป็นการปรับปรุงดินด้วยวิธีการทางชีวภาพซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป (Tejada & Gonzalez, 2006; Lehmann et al., 2011; Zhang et al., 2015; Wijitkosum, 2020) สอดคล้องกับผลการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวในดำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตราในรอบปลูกข้าวที่ 3 ให้ผลดีกว่าการปลูกรอบที่ 1 อย่างชัดเจน

การเจริญเติบโตของข้าวเป็นผลมาจากดินเค็มที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติของดินให้มีความเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในรอบการปลูกที่ 1 ดำรับการทดลองดำรับการทดลองที่ 3 ซึ่งใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 1.5 กิโลกรัมร่วมกับปุ๋ยคอกในอัตรา 1 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ให้ผลการเจริญเติบโตของข้าวตลอดจนผลผลิตข้าวที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับดำรับการทดลองทั้งหมด ซึ่งเมื่อพิจารณาผลวิเคราะห์สมบัติของดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 จะเห็นได้ว่า ดินเค็มได้รับการปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พารามิเตอร์ที่แสดงถึงความเค็มของดิน (ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้ ปริมาณโซเดียมทั้งหมด และค่า SAR) ซึ่งการปรับปรุงสมบัติของดินด้วยถ่านชีวภาพในอัตราดังกล่าวส่งผลให้ดำรับการทดลองที่ 3 เป็นดำรับการทดลองเดียวที่ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (EC_e เท่ากับ 13.33 dS/m) ลดลงจากดินเค็มจัดเป็นระดับดินเค็มมาก เช่นเดียวกับค่าปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้ (65.00 mmol/L) ปริมาณโซเดียมทั้งหมด (0.18 %) และค่า SAR (4,602) ในขณะที่ ดำรับการทดลองอื่น ๆ ที่ถึงแม้ว่า การนำไฟฟ้าของดิน ปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้ ปริมาณโซเดียมทั้งหมด และค่า SAR ของดินจะมีค่าจะลดลงแต่ยังคงจัดอยู่ในดินเค็มจัดเช่นเดิม นอกจากนี้ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (CEC) ในดำรับการทดลองที่ 3 ยังมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงดำรับการทดลองเดียว ในขณะที่ ดำรับการทดลองอื่น ๆ มีค่า CEC ที่ลดลง ซึ่งการที่สมบัติของดินในดำรับการทดลองที่ 3 ให้สมบัติที่ดีขึ้นและเหมาะสมแก่การเพาะปลูก จึงทำให้การเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวในดำรับการทดลองดังกล่าว

ทั้งนี้ ดินเค็มจัดที่มีความเค็มที่ลดลง เป็นผลมาจากโซเดียมไอออนถูกผ่านชีวภาพดูดซับไว้ที่หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวและภายในรูพรุนของถ่านชีวภาพ อีกทั้ง การที่ถ่านชีวภาพทำหน้าที่เหมือนตัวกลางในการแลกเปลี่ยนธาตุอาหารด้วยการค่อย ๆ ปล่อยธาตุอาหารออกมา ทำให้ธาตุอาหารอยู่ในดินได้นานขึ้นแทนที่จะถูกชะหรือระเหยไป รวมถึง ถ่านชีวภาพที่ดูดซับโซเดียมไว้และค่อย ๆ ปล่อยออกมา จะทำให้ความเป็นพิษของโซเดียมที่มีต่อพืชลดลง เนื่องจาก ปกติแล้วพืชจะดูดซึมโซเดียมแทนที่เป็นจำนวนมากจนทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช รวมถึง ถ่านชีวภาพยังช่วยปรับปรุงสมบัติของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตมากขึ้น จึงเป็นผลให้ข้าวสามารถเจริญเติบโตได้ดีขึ้นและให้ผลผลิตได้ (Mahmoodabadi et al., 2013; Akhtar et al., 2015; Saifullah et al., 2018; Wijitkosum, 2020)

ถึงแม้ว่า ในตำรับการทดลองที่ 1 ซึ่งใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียวซึ่งเป็นการเพาะปลูกโดยทั่วไปของเกษตรกรและเป็นวิธีการโดยทั่วไปในการปรับปรุงสมบัติของดินและการเพิ่มผลผลิตของข้าว ส่งผลให้ข้าวสามารถเจริญเติบโตได้เช่นเดียวกัน แต่ผลผลิตข้าว (น้ำหนักเมล็ดทั้งหมด) และคุณภาพของผลผลิต ได้แก่ น้ำหนักเมล็ดดี 1,000 เมล็ด และเปอร์เซ็นต์เมล็ดดี มีผลผลิตต่ำกว่าตำรับการทดลองที่ 3 ซึ่งคุณภาพของเมล็ดข้าว เป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการซื้อขายและกำหนดราคาข้าว โดยหากข้าวที่เกษตรกรนำไปขายให้กับโรงสี มีคุณภาพต่ำกว่าเกณฑ์ที่โรงสีกำหนด จะถูกตัดราคาขาย นอกจากนั้น เมื่อปลูกข้าวในรอบที่ 3 พบว่า การปลูกข้าวด้วยการใส่ปุ๋ยเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ข้าวมีการเจริญเติบโตและมีผลผลิตที่ลดลง ในขณะที่ การปลูกข้าวด้วยการใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตรา ร่วมกับปุ๋ย ส่งผลให้การเจริญเติบโตของข้าวและผลผลิตข้าวดีขึ้นอย่างชัดเจนในรอบการปลูกที่ 3

ผลการศึกษาครั้งนี้ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Zheng และคณะ (2018) ที่พบว่า การปลูกพืชที่ไวต่อความเค็มด้วยการใช้ถ่านชีวภาพ จะทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดีกว่าการปลูกโดยไม่ใส่ถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ แต่สำหรับการปลูกพืชทนเค็มดังเช่น ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินเค็มระดับน้อยถึงปานกลาง (ไพรัช พงษ์วีเชียร, 2560) ข้าวจะมีกลไกการปรับตัวต่อความเป็นพิษของไอออนเกลือเมื่ออยู่ในสภาพดินเค็มได้ จึงทำให้การใส่ถ่านชีวภาพไม่ส่งผลให้การเจริญเติบโตของข้าวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกโดยไม่ใส่ถ่านชีวภาพในรอบการปลูกแรก ทั้งนี้ กลไกการปรับตัวของพืชต่อความเป็นพิษของไอออนเกลือ โดยการจำกัดการนำเข้าเกลือเข้าสู่รากพืช หรือการดูดซึมไอออนเข้าสู่รากอย่างจำเพาะ (ion selectivity) ซึ่งเป็นการปรับสมดุลอัตราส่วนของโพแทสเซียมต่อโซเดียม (K:Na) ภายในต้นข้าว เมื่อต้นข้าวเจริญเติบโตในดินเค็มจะมีการสะสม Na ภายในเนื้อเยื่อ ในขณะที่ ปริมาณ K ภายในเซลล์จะลดลง ส่งผลต่ออัตราส่วนของ K:Na ดังนั้น ข้าวจึงต้องปรับสมดุลโดยเพิ่มการดูดซึม K เข้าไป (Munns et al., 2002; Hammer et al., 2015; Saifullah et al., 2018) ดังจะเห็นได้จากผล

การศึกษาสมบัติของดินภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 1 ที่ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินของตำรับการทดลองที่ 1 และตำรับการทดลองที่ 3 มีปริมาณน้อยลง และต้นข้าวในตำรับการทดลองดังกล่าว มีการเจริญเติบโตได้ดี

ผลการเจริญเติบโตของข้าวและผลผลิตข้าวในตำรับการทดลองที่ 2 ซึ่งใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 1 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ ร่วมกับปุ๋ยคอก 1 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ มีการเจริญเติบโตของข้าวต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินในตำรับการทดลองดังกล่าวที่มีค่าเพิ่มขึ้น จึงอาจเป็นสาเหตุจากความไม่สมดุลของ K:Na ภายในต้นข้าว ซึ่งการที่ต้นข้าวไม่ดูดซึม K หรือดูดซึมได้ในปริมาณที่ต่ำมาก จะทำให้ Na ภายในข้าวมีปริมาณมากและเกิดความเป็นพิษต่อต้นข้าว (Qadir & Schubert, 2002; Saifullah et al., 2018) นอกจากนี้ การเจริญเติบโตของข้าวในตำรับการทดลองที่ 4 ซึ่งเป็นตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพกลับในปริมาณที่มากที่สุด ให้ผลการเจริญเติบโตของต้นข้าวและผลผลิตข้าวต่ำเช่นเดียวกัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณถ่านชีวภาพที่มากเกินไป จึงส่งผลให้ธาตุอาหารหลักของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ถูกดูดซับด้วยถ่านชีวภาพ จึงอาจเป็นผลให้รากของต้นข้าวยังไม่สามารถดูดดึงธาตุอาหารดังกล่าวไปใช้ได้ในรอบการปลูกที่ 1 (Jones et al., 2012; Thomas et al., 2013; Chintala et al., 2014; Xu et al., 2016; Zhang et al., 2019) นอกจากนี้ ซิลิกาที่มีอยู่ปริมาณมากในแกลบข้าว ส่งผลให้เมื่อใส่ถ่านชีวภาพจากแกลบลงในดิน ภายในดินจึงมีปริมาณซิลิกามากขึ้น โดยซิลิกาถูกดูดซึมด้วยรากพืชและถูกสะสมในเนื้อเยื่อใบพืช ลดการคายน้ำของใบ โดยทำให้เซลล์ผิวของใบหนาขึ้น ป้องกันการเกิดโรคพืชจากใบ เช่น เชื้อรา หรือแมลง อีกทั้ง ซิลิกายังมีบทบาทต่อกิจกรรมทางจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตาม การที่ถ่านชีวภาพจากแกลบข้าว มีปริมาณซิลิกามาก (20 %) จะทำให้ธาตุอาหารอื่นในแกลบมีน้อยลง เมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพที่ผลิตจากชีวมวลอื่น (Rambo et al., 2011; Chen et al., 2018)

ผลการศึกษาในครั้งนี้ ให้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าของ Wijitkosum (2020) ซึ่งทำการศึกษารับปรุงสมบัติของดินเค็มโซดิกด้วยถ่านชีวภาพกลับในพื้นที่อำเภอลำทะเมนชัย เช่นเดียวกัน โดยเป็นการเพาะปลูกในแปลงปลูกจริง ซึ่งผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยคอกสามารถปรับปรุงสมบัติของดินเค็มและทำให้ข้าวสามารถเจริญเติบโตได้ แต่ปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ไม่ได้แปรผันตรงกับการเจริญเติบโตของข้าว และการเจริญเติบโตของข้าวและผลผลิตข้าวในรอบการปลูกที่ 1 นั้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยคอกและการใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว รวมถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างของการใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตราส่วนด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า ปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ลงไปไม่ได้แปรผันตรงกันกับผลผลิตของข้าวสาลี (Vaccari et al., 2011) และผลผลิตของข้าว (Zhang et al., 2012; Chen et al., 2018)

อย่างไรก็ตาม การปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์โดยการให้น้ำวิธีเปียกสลับแห้ง ทำให้ความต้องการใช้น้ำเพื่อการเพาะปลูกข้าวลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ การปลูกข้าวในพื้นที่แปลงจริง ซึ่งจำเป็นอย่างมากในพื้นที่ที่มีปัญหาเรื่องทรัพยากรน้ำไม่เพียงพอต่อการทำการเกษตร ดังเช่นจังหวัดนครราชสีมา นอกจากนี้ สิ่งสำคัญอีกประการคือ การปลูกข้าวในดินเค็มในวงบ่อซีเมนต์จะสามารถลดผลกระทบของน้ำใต้ดินเค็มในพื้นที่ที่มีต่อการปลูกข้าวได้ ซึ่งจะทำให้การระเหยและดึงเอาปริมาณเกลือที่ละลายน้ำอยู่ในน้ำใต้ดินขึ้นมาสู่ผิวดินลดลง ซึ่งปัญหาดินเค็มของพื้นที่อำเภอขามทะเลสอ เป็นผลมาจากลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ที่มีชั้นหินเกลือรองรับอยู่ด้านใต้พื้นดิน จึงส่งผลให้มีการระเหยเอาเกลือขึ้นมาสู่ผิวดินโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูแล้ง

ผลศึกษาการปลูกข้าวฤดูกาลที่ 3 ในดินเค็มในวงบ่อซีเมนต์ ระหว่างเดือนกรกฎาคม-พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 แสดงให้เห็นว่า การใส่ถ่านชีวภาพในอัตราสูงที่สุด ร่วมกับปุ๋ยคอก ส่งผลให้การเจริญเติบโตของต้นข้าว ปริมาณผลผลิตข้าว และคุณภาพของผลผลิตดีขึ้น ทั้งนี้ น้ำหนักเมล็ดน้ำหนัก 1,000 เมล็ด และเปอร์เซ็นต์เมล็ดดี โดยการเจริญเติบโตของข้าว ปริมาณและคุณภาพของผลผลิตสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการเพาะปลูกข้าวด้วยการใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว

จากการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3 มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือ ปริมาณถ่านชีวภาพกลบที่ใช้มีผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าว และตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตราสูงที่สุดให้ผลการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวที่ไม่ดีในรอบการปลูกที่ 1 แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึงรอบการปลูกที่ 3 พบว่า ตำรับการทดลองดังกล่าวให้ผลผลิตและการเจริญเติบโตของข้าวสูงที่สุด ในขณะที่ การปลูกข้าวโดยใส่ปุ๋ยคอก (ตำรับการทดลองที่ 1) ที่ให้ผลการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวที่ดีในรอบการปลูกที่ 1 กลับให้ผลผลิตข้าวและการเจริญเติบโตของต้นข้าวต่ำที่สุดในรอบการปลูกที่ 3 โดยความแตกต่างดังกล่าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งระหว่างตำรับการทดลองทั้งสองและระหว่างรอบการปลูก ทั้งนี้ เป็นเพราะธาตุอาหารจากปุ๋ยคอกถูกทำลายและชะออกไปจากดินได้ง่าย จึงพบว่า ตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียวส่งผลให้ผลผลิตข้าวในรอบการปลูกที่ 3 ลดลงจากรอบการปลูกที่ 1 ในขณะที่ ถ่านชีวภาพซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีที่มีความเสถียรสามารถคงอยู่ในดินได้เป็นระยะเวลานาน (Spokas, 2010; Budai et al., 2013; Tan et al., 2017; Weber & Quicker, 2018) จึงคงอยู่ในดินและยังคงมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติของดินได้แม้เวลาผ่านไป 3 รอบการปลูก จึงจะเห็นว่า ตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในทุกอัตราส่งผลให้การเจริญเติบโตของข้าวและผลผลิตข้าวเพิ่มสูงขึ้นในรอบการปลูกที่ 3

ทั้งนี้ ผลการศึกษาสอดคล้องกับผลการศึกษาหลายชิ้นในงานวิจัยก่อนหน้า อาทิ การศึกษาของ Major และคณะ (2010) ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อผลผลิตของข้าวสาลีเป็นระยะเวลา 4

ปี ในการเพาะปลูกในพื้นที่จริงที่ Llanos Orientales ประเทศโคลอมเบีย ผลการศึกษาพบว่า ผลผลิตของข้าวสาลีแปรผันตรงกับปริมาณถ่านชีวภาพที่ใส่ลงไป โดยในรอบการปลูกปีแรก พบว่า แปลงทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพและไม่ใส่ถ่านชีวภาพ ให้ผลผลิตของข้าวสาลีที่ไม่ได้แตกต่างกัน แต่เมื่อ รอบการปลูกในปีถัด ๆ มา พบว่า ผลผลิตของข้าวสาลีในแปลงที่ใส่ถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากรอบการปลูกก่อนหน้า โดยเฉพาะในรอบการปลูกที่ 3 ที่ให้ผลผลิตสูงสุด สอดคล้องกับ ผลการศึกษาของ Chen และคณะ (2018) และ Zhang และคณะ (2012) ที่ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากฟางข้าว ที่มีต่อผลผลิตข้าวเป็นเวลา 2 ปี ในพื้นที่จริงที่ประเทศจีน พบว่า ผลผลิตข้าวที่ ปลูกโดยการใส่ถ่านชีวภาพมีปริมาณมากกว่าการปลูกข้าวโดยไม่ใส่ถ่านชีวภาพ และในรอบการปลูกที่ 2 ให้ผลผลิตดีกว่ารอบการปลูกที่ 1 เช่นเดียวกับ การศึกษาของ Carneiro และคณะ (2021) ซึ่ง ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์และกากกาแฟ ที่มีต่อการเจริญเติบโตของหญ้า Mombasa โดยทำการทดลองจำนวน 3 รอบการปลูกในพื้นที่จริงที่ Federal University of Lavras ประเทศบราซิล ซึ่งพื้นที่ทดลองเป็นดิน Oxisol ที่มีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำ ผลการศึกษาพบว่า ถ่านชีวภาพช่วยให้การเจริญเติบโตของหญ้าในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 2 ดีขึ้น ในขณะที่ ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญในรอบการปลูกที่ 3 ซึ่งอาจเป็นผลจากการปลูกอย่างต่อเนื่อง ทำให้เมื่อ เวลาผ่านไป ฟอสฟอรัสถูกตรึงในดิน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจึงลดลง ทำให้พืชดูดซึม ฟอสฟอรัสไปใช้ได้น้อยลง แต่อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวไม่ได้ส่งผลทางลบต่อการเจริญเติบโตของหญ้า แต่อย่างใด

ในขณะที่ การศึกษาของ Liu และคณะ (2021) ชี้ให้เห็นว่า การปลูกข้าวโดยใส่ถ่านชีวภาพที่ ผลิตจากฟางข้าวสาลีร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจนในดินตะกอนที่ Zhengxinyuan Modern Agriculture Company ประเทศจีน ในรอบการปลูกที่ 1 ให้ผลผลิตข้าวที่สูงกว่า การปลูกโดยใส่เพียงปุ๋ย ไนโตรเจนเพียงอย่างเดียว โดยผลผลิตข้าวลดลงในรอบการปลูกที่ 2 ในทั้งแปลงที่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน เพียงอย่างเดียว และในแปลงที่ใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจน แต่อย่างไรก็ตาม แปลงทดลองที่ใส่ ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจนยังคงให้ผลผลิตที่ดีกว่า ทั้งมวลชีวภาพของต้นข้าว ผลผลิตของข้าว มวลชีวภาพของรากข้าว และการเพิ่มการสะสมของไนโตรเจน อีกทั้ง ยังช่วยลดความหนาแน่นของดิน ลดการชะล้างไนโตรเจน และเพิ่มคาร์บอนอินทรีย์และปริมาณฟอสฟอรัสในดินอีกด้วย

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้ถ่านชีวภาพในการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร จำเป็นต้องใช้ ปริมาณที่เหมาะสมและใช้ระยะเวลาเพื่อให้ถ่านชีวภาพสามารถปรับปรุงสมบัติของดินได้ดียิ่งขึ้น ด้วย การที่ถ่านชีวภาพมีปริมาณธาตุอาหารสูง อีกทั้ง ยังมีพื้นผิวที่สามารถจับกับธาตุอาหารอื่น ๆ ได้อีก จึงส่งผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช รวมถึง มวลของรากพืชที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถดูดซึม ธาตุอาหารได้ดีขึ้น (Yooyen et al., 2015; Sriburi & Wijitkosum, 2016; Liu et al., 2021)

อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพสามารถปรับปรุงสมบัติของดินและเพิ่มผลผลิตของพืชที่ปลูกได้ตั้งแต่รอบการปลูกแรก ทั้งในดินที่มีปัญหาความอุดมสมบูรณ์ต่ำ อาทิ Cornelissen และคณะ (2018) Kraska และคณะ (2016) และ Sriburi และ Wijitkosum (2016) ดินที่มีปัญหาทางกายภาพ เช่น ในดินทราย อาทิ Hall และ Bell (2015) และ Laghari และคณะ (2015) และในดินเค็ม อาทิ Wijitkosum (2020) Huang และคณะ (2019) และ Lashari และคณะ (2015)

การที่ถ่านชีวภาพอยู่ในดินเป็นระยะเวลาานาน จะทำให้พื้นผิวของถ่านชีวภาพมีประจุลบเพิ่มขึ้น โดยเกิดจากการออกซิเดชันอย่างต่อเนื่อง (Cheng et al., 2008) ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของทั้งดินและถ่านชีวภาพ โดยถ่านชีวภาพที่มีพื้นที่แลกเปลี่ยนประจุ และค่า CEC เพิ่มขึ้น ทำให้พืชดูดซึมสารอาหาร (ทั้งประจุบวกและลบ) ได้ดีขึ้น จึงทำให้ผลผลิตของพืชเพิ่มขึ้น รวมถึง ถ่านชีวภาพเพิ่มความเสถียรให้กับอินทรีย์วัตถุในดิน (Mia et al., 2017)

ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินด้วยถ่านชีวภาพกลับจำเป็นต้องใช้ระยะเวลา โดยถ่านชีวภาพที่มีความพร้อมอย่างมากในการดูดซับประจุต่าง ๆ อาจส่งผลในเชิงลบกับดินและพืชได้ (Jones et al., 2012) เช่น ในฤดูกาลปลูกแรก ถ่านชีวภาพที่ใส่ลงไปอาจจับกับธาตุอาหารหลัก ทำให้พืชไม่สามารถดูดซึมไปใช้ได้ แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป ถ่านชีวภาพจะค่อย ๆ ปล่อยธาตุอาหารออกมา ทำให้พืชสามารถดูดซึมไปใช้ได้ ซึ่งหลาย ๆ งานวิจัยก่อนหน้า ให้ผลเช่นเดียวกันคือ เมื่อเวลาผ่านไป ดำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพ จะเพิ่มผลผลิตของทางเกษตรกรรมจากฤดูกาลปลูกแรกอย่างมีนัยสำคัญ และยังพบว่า การใส่ถ่านชีวภาพลงในดินเพียงครั้งเดียว สามารถปรับปรุงสมบัติของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Kätterer et al., 2019; Liu et al., 2019; Joseph et al., 2020; Nan et al., 2020) โดยถ่านชีวภาพจะช่วยปรับปรุงสมบัติของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตมากขึ้น ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ เช่น ความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน เสถียรภาพของเม็ดดิน ลดความหนาแน่นของดิน รวมถึง ถ่านชีวภาพจะเพิ่มธาตุอาหารให้กับดิน (Laird et al., 2010; Burrell et al., 2016; Kätterer et al., 2019; Liu et al., 2019; Nan et al., 2020) โดย Shen และคณะ (2021) กล่าวว่า ถ่านชีวภาพช่วยเพิ่มอัตราส่วน C/N และเพิ่มเสถียรภาพของไนโตรเจนให้อยู่ภายในดิน โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวและหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนของถ่านชีวภาพ จึงทำให้ถ่านชีวภาพจับกับไนโตรเจนได้ดีขึ้น

อย่างไรก็ตาม การที่ถ่านชีวภาพสามารถปรับปรุงสมบัติของดินได้ในระยะเวลาานานกว่าการใช้ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ต้นข้าวในดำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพในทุกอัตราส่วนร่วมกับปุ๋ย มีผลผลิตที่เพิ่มขึ้นในรอบการปลูกที่ 3 ในขณะที่ ข้าวที่ปลูกในดินที่ใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียวมีผลผลิตของข้าวลดลงเมื่อปลูกในรอบการปลูกที่ 3 ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ถ่านชีวภาพกลับปรับปรุง

สมบัติของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต โดยถ่านชีวภาพแกลบมีผลทำให้ความเค็มของดินลดลงภายใน 120 วัน อีกทั้ง ยังทำให้ผลผลิตของข้าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในการปลูกข้าวฤดูกลางที่ 3



บทที่ 6

ประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ในการแก้ไขปัญหาดินเค็ม ด้วยการใช้ถ่านชีวภาพในการปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์

จากการศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพกลายเป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติดินเค็ม และทำการเพาะปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์ ทั้งฤดูกาลปลูกที่ 1 และฤดูกาลปลูกที่ 3 สามารถสรุปได้ว่า ถ่านชีวภาพแปลงในอัตราส่วน 1.5 และ 2 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ สามารถปรับปรุงสมบัติดินให้เหมาะแก่การเพาะปลูกมากที่สุด รวมถึง ให้ผลผลิตทางการเกษตรเพิ่มขึ้น อีกทั้ง ถ่านชีวภาพมีความเสถียรภาพและมีความสามารถในการคงตัวในดินได้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน (Spokas, 2010) อย่างไรก็ตาม การใช้ถ่านชีวภาพในการทำเกษตรกรรมครั้งแรก จำเป็นต้องลงทุนเพิ่มเติมในการผลิตเตาเผาถ่านชีวภาพและค่าใช้จ่ายอื่น ๆ เช่น ค่าวงบ่อซีเมนต์ เป็นต้น ทั้งนี้ อายุการใช้งานของวัสดุอุปกรณ์ดังกล่าว ขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัสดุตั้งต้นสำหรับการผลิตเตาเผาถ่านและการใช้งานเตา

ในการขยายผลการนำถ่านชีวภาพไปใช้ในการปรับปรุงสมบัติของดินเค็ม และการใช้ประโยชน์พื้นที่ดินเค็มที่ถูกทิ้งร้างเพื่อเพาะปลูกข้าว มุ่งเน้นการปรับปรุงทรัพยากรดิน การใช้พื้นที่ให้เกิดประโยชน์ ลดการเปลี่ยนการใช้ประโยชน์พื้นที่จากพื้นที่เกษตรกรรมที่ให้ผลผลิตต่ำสู่การทำอุตสาหกรรมเกลือ ซึ่งจะก่อให้เกิดการแพร่กระจายพื้นที่ดินเค็มเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังส่งผลต่อชีวิตความเป็นอยู่ของเกษตรกรอีกด้วย ในการศึกษาครั้งนี้จึงทำการประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น เพื่อฉายภาพต้นทุนที่เกษตรกรต้องใช้ในการนำถ่านชีวภาพไปใช้ในการแก้ไขปัญหาพื้นที่ดินเค็มเท่านั้น มิได้มุ่งเน้นการประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ ณ จุดคุ้มทุนหรือจุดคืนทุน โดยสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

การศึกษาในกรณีการนำไปใช้ในการทำเกษตรกรรมขนาดเล็กเน้นการพึ่งพาตนเองและสร้างความเข้มแข็งด้านอาหารให้กับครัวเรือน โดยในเบื้องต้นมีเป้าหมายเพื่อนำผลผลิตข้าวที่ได้เพื่อบริโภคในครัวเรือนเป็นอันดับแรก ซึ่งเป็นการทำเกษตรกรรมแบบอินทรีย์และไม่คิดค่าแรง โดยทำการเปรียบเทียบต้นทุนและผลผลิตที่ได้ในตำรับการทดลองทั้งหมด 3 ตำรับการทดลอง ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นรูปแบบการปลูกข้าวโดยทั่วไปของเกษตรกร คือ การใส่ปุ๋ยเพียงอย่างเดียว ตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 ซึ่งเป็นการปลูกข้าวโดยใส่ปุ๋ยคอกในอัตรา 1 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ ร่วมกับ ถ่านชีวภาพแปลงในอัตรา 1.5 และ 2 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองตำรับการทดลองให้ผลผลิตข้าวที่ดีในรอบการปลูกทั้งสองรอบการปลูก

จากการประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการเพาะปลูกในครั้งแรก (ตารางที่ 6-1) โดยกำหนดให้ เชื้อเพลิงในการเผาถ่านชีวภาพใช้วัสดุเหลือใช้จากเกษตรกรรมในพื้นที่ และการเผาถ่านชีวภาพ ได้ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพกลับ 50 % จากกลับดิบ โดยการเพาะปลูกมีต้นทุนใน 3 ส่วนหลัก (รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 6-1) ดังนี้

- 1) ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับถ่านชีวภาพ ได้แก่ ต้นทุนค่าเตาเผาถ่าน 1,500 บาท และต้นทุนกลับดิบในอัตรา 3 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ (ตำรับการทดลองที่ 3) และ 4 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ (ตำรับการทดลองที่ 4) ซึ่งมีราคากิโลกรัมละ 10 บาท
- 2) ต้นทุนเมล็ดพันธุ์ข้าวและปุ๋ยคอก โดยเมล็ดพันธุ์ข้าวคิดอัตราเหมาจ่าย กิโลกรัมละ 25 บาท ปุ๋ยคอกกิโลกรัมละ 10 บาท
- 3) ต้นทุนวงบ่อซีเมนต์พร้อมฐานปิด วงบ่อละ 150 บาท

ดังนั้น การเพาะปลูกในครั้งแรก จึงมีค่าใช้จ่ายสำหรับตำรับการทดลองที่ 1 เท่ากับ 160 บาท ตำรับการทดลองที่ 3 เท่ากับ 1,690 บาท และตำรับการทดลองที่ 4 เท่ากับ 1,700 บาท

ตารางที่ 6-1 การเปรียบเทียบต้นทุนในรอบการปลูกแรก ของการปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์ในตำรับการทดลองที่ 1 ตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4

รายการ	จำนวน	ราคาต่อ		จำนวนเงิน (บาท)		
		หน่วย	ตำรับการทดลองที่ 1	ตำรับการทดลองที่ 3	ตำรับการทดลองที่ 4	
ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับถ่านชีวภาพ						
เตาเผาถ่าน	1	1,500	0	1,500	1,500	
กลับดิบสำหรับเผา	3 และ 4 กก.	10	0	30	40	
รวมต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับถ่านชีวภาพ			0	1,530	1,540	
ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุปลูกอื่น ๆ						
วงบ่อซีเมนต์	1	150	150	150	150	
ปุ๋ยคอก	1 กก.	10	10	10	10	
รวมต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุปลูกอื่น ๆ			160	160	160	
รวมต้นทุนทั้งหมดในการลงทุนครั้งแรก			160	1,690	1,700	

การประเมินผลผลิตและรายได้จากการปลูกข้าวในรอบการปลูกแรก ภายในพื้นที่ 1 ไร่ (1,600 ตารางเมตร) กำหนดให้ พื้นที่ 1 ไร่ สามารถวางวงบ่อซีเมนต์ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร) ได้ 70 วงบ่อซีเมนต์ และกำหนดให้ ดำรับการทดลองที่มีเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีมากกว่า 50 % ได้ราคาผลผลิตข้าว 0.025 บาท/กรัม และดำรับการทดลองที่มีเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีน้อยกว่า 50 % ได้ราคาผลผลิตข้าว 0.015 บาท/กรัม (ราคา ณ เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2563)

6.1 การประเมินผลผลิตและรายได้ จากการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 1

ต้นทุนการเพาะปลูกต่อ 1 ไร่ (หรือ 70 วงบ่อซีเมนต์) ในรอบการปลูกที่ 1 มีรายละเอียด ดังนี้

- 1) ดำรับการทดลองที่ 1 (ถ่านชีวภาพอัตรา 0 กิโลกรัมต่อไร่) มีต้นทุนทั้งหมดเท่ากับ 11,250 บาท ประกอบด้วย ต้นทุนค่าปุ๋ย 700 บาท ต้นทุนค่าวงบ่อซีเมนต์ 10,500 บาท และต้นทุนเมล็ดพันธุ์ข้าว 50 บาท
- 2) ดำรับการทดลองที่ 3 (ถ่านชีวภาพอัตรา 105 กิโลกรัมต่อไร่) มีต้นทุนทั้งหมดเท่ากับ 14,850 บาท ประกอบด้วย ต้นทุนค่าเตาเผาถ่านชีวภาพ 1,500 บาท ต้นทุนค่าถ่านชีวภาพ 2,100 บาท ต้นทุนค่าปุ๋ย 700 บาท ต้นทุนค่าวงบ่อซีเมนต์ 10,500 บาท และต้นทุนเมล็ดพันธุ์ข้าว 50 บาท
- 3) ดำรับการทดลองที่ 4 (ถ่านชีวภาพอัตรา 140 กิโลกรัมต่อไร่) มีต้นทุนทั้งหมดเท่ากับ 15,500 บาท ประกอบด้วย ต้นทุนค่าเตาเผาถ่านชีวภาพ 1,500 บาท ต้นทุนค่าถ่านชีวภาพ 2,800 บาท ต้นทุนค่าปุ๋ย 700 บาท ต้นทุนค่าวงบ่อซีเมนต์ 10,500 บาท และต้นทุนเมล็ดพันธุ์ข้าว 50 บาท

ผลผลิตของข้าวเฉลี่ยต่อ 1 วงบ่อซีเมนต์ในดำรับการทดลองที่ 1 เท่ากับ 3.89 กรัม ดำรับการทดลองที่ 3 เท่ากับ 4.67 กรัม และดำรับการทดลองที่ 4 มีผลผลิตเท่ากับ 1.41 กรัม โดยอ้างอิงจากน้ำหนักเมล็ดทั้งหมดของข้าวเฉลี่ยต่อ 1 วงบ่อซีเมนต์ในบทที่ 5 (ตารางที่ 5-5) ดังนั้น ผลผลิตของข้าวต่อ 1 ไร่ (70 วงบ่อซีเมนต์) ในดำรับการทดลองที่ 1 เท่ากับ 272.30 กรัม ดำรับการทดลองที่ 3 มีผลผลิต 326.90 กรัม และดำรับการทดลองที่ 4 มีผลผลิตเท่ากับ 98.70 กรัม

ทั้งนี้ เปอร์เซ็นต์เมล็ดดีของดำรับการทดลองที่ 1 เท่ากับ 47.40 % ดำรับการทดลองที่ 3 เท่ากับ 66.64 % และดำรับการทดลองที่ 4 ให้ผลเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีเท่ากับ 40.00 % ดังนั้น ราคาผลผลิตข้าวต่อกรัมของดำรับการทดลองที่ 1 และดำรับการทดลองที่ 4 จึงเท่ากับ 0.015 บาท ในขณะที่ ราคาผลผลิตข้าวต่อกรัมของดำรับการทดลองที่ 3 เท่ากับ 0.025 บาท

รายได้จากการปลูกข้าวในตำรับการทดลองที่ 1 เท่ากับ 4.08 บาท ตำรับการทดลองที่ 3 เท่ากับ 8.17 บาท และตำรับการทดลองที่ 4 เท่ากับ 1.48 บาท เมื่อคำนวณรายได้และต้นทุนการปลูกข้าวต่อ 1 ไร่ของตำรับการทดลองทั้งสาม จะพบว่า ในรอบการปลูกที่ 1 ในทุกตำรับการทดลองยังไม่ทำให้เกิดผลกำไรจากการปลูกข้าวแต่อย่างใด

การประเมินผลผลิตและรายได้จากการปลูกข้าวในรอบแรกในวงบ่อซีเมนต์ รายละเอียดผลประเมิน แสดงดังตารางที่ 6-2

ตารางที่ 6-2 การเปรียบเทียบผลผลิตและรายได้ของการปลูกข้าวในรอบที่ 1 ของตำรับการทดลองที่ 1 ตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4

รายการ	ตำรับการทดลองที่		
	1	3	4
ผลผลิต			
น้ำหนักเมล็ดทั้งหมด (กรัม)	15.55	18.67	5.63
ผลผลิตเฉลี่ยต่อ 1 ไร่ (กรัม)	272.30	326.90	98.70
รายได้			
รายได้ต่อ 1 ไร่ (บาท)	4.08	8.17	1.48
ต้นทุน			
ต้นทุนรอบแรกทั้งหมด (บาท)	11,250.00	14,850.00	15,550.00
กำไร			
กำไรต่อ 1 ไร่ ในการปลูกรอบที่ 1 (บาท)	-11,245.92	-14,841.83	-15,548.52

6.2 การประเมินผลผลิตและรายได้จากการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 3

ในการปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 3 มีต้นทุนการเพาะปลูกเฉพาะต้นทุนค่าเมล็ดพันธุ์ข้าว คือ ตำรับการทดลองละ 50 บาท/ไร่ โดยการเพาะปลูกในรอบที่ 3 ไม่มีการใส่ถ่านชีวภาพหรือปุ๋ยเพิ่ม

ผลผลิตของข้าวเฉลี่ยต่อ 1 วงบ่อซีเมนต์ในรอบการปลูกที่ 3 ในตำรับการทดลองที่ 1 เท่ากับ 1.83 กรัม ตำรับการทดลองที่ 3 เท่ากับ 117.30 กรัม และตำรับการทดลองที่ 4 เท่ากับ 124.60 กรัม โดยอ้างอิงจากน้ำหนักเมล็ดทั้งหมดของข้าวเฉลี่ยต่อ 1 วงบ่อซีเมนต์ในบทที่ 5 (ตารางที่ 5-5) ดังนั้นผลผลิตของข้าวต่อ 1 ไร่ (70 วงบ่อซีเมนต์) ในตำรับการทดลองที่ 1 จึงเท่ากับ 128.10 กรัม ตำรับการทดลองที่ 3 เท่ากับ 8,211.00 กรัม และตำรับการทดลองที่ 4 เท่ากับ 8,722.00 กรัม

ทั้งนี้ เปอร์เซ็นต์เมล็ดดีของตำรับการทดลองที่ 1 เท่ากับ 14.04 % ตำรับการทดลองที่ 3 เท่ากับ 66.84 % และตำรับการทดลองที่ 4 ให้ผลเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีเท่ากับ 52.78 % ตามลำดับ ดังนั้น ราคาผลผลิตข้าวต่อไร่ของตำรับการทดลองที่ 1 จึงเท่ากับ 1.92 บาท ตำรับการทดลองที่ 3 เท่ากับ 205.28 บาท และตำรับการทดลองที่ 4 เท่ากับ 218.05 บาท

ดังนั้น เมื่อประเมินรายได้เปรียบเทียบกับต้นทุนในการเพาะปลูกข้าวในรอบการปลูกที่ 3 จะพบว่า การปลูกข้าวในตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 ซึ่งเป็นตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพจะให้กำไรเป็นจำนวนเงิน 155.28 และ 168.05 บาท ตามลำดับ ในขณะที่ การปลูกข้าวในตำรับการทดลองที่ 1 ให้ผลกำไรติดลบ (-48.08 บาท) กล่าวคือ การปลูกข้าวในตำรับการทดลองที่ 1 ในรอบการปลูกที่ 3 ให้ผลผลิตข้าวต่ำมากและเป็นการเพาะปลูกที่ทำให้เกษตรกรขาดทุน

การประเมินผลผลิตและรายได้จากการปลูกข้าวในการปลูกข้าวรอบที่ 3 ในวงบ่อซีเมนต์ (ตารางที่ 6-3) ให้ผลดังนี้

ตารางที่ 6-3 การเปรียบเทียบผลผลิตและรายได้ของการปลูกข้าวในรอบที่ 3 ของตำรับการทดลองที่ 1 ตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4

รายการ	ตำรับการทดลองที่		
	1	3	4
ผลผลิต			
น้ำหนักเมล็ดทั้งหมด (กรัม)	7.30	469.20	498.40
ผลผลิตเฉลี่ยต่อ 70 วงบ่อซีเมนต์ (กรัม)	128.10	8,211.00	8,722.00
รายได้			
รายได้ต่อ 1 ไร่ (บาท)	1.92	205.28	218.05
ต้นทุน			
ต้นทุนต่อ 1 ไร่ ในการปลูกรอบที่ 3 (บาท)	50.00	50.00	50.00
กำไร			
กำไรต่อ 1 ไร่ ในการปลูกรอบที่ 3 (บาท)	-48.08	155.28	168.05

จากผลการประเมินข้างต้นจะเห็นได้ว่า การนำถ่านชีวภาพรวมทั้งปุ๋ยเพื่อใช้ในการเพาะปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์จะมีต้นทุนในการดำเนินการสูงกว่าการปลูกข้าวโดยใช้ปุ๋ยเพียงอย่างเดียว โดยต้นทุนที่สูงกว่านั้นเป็นต้นทุนในส่วนของ การสร้างเตาเผาถ่านชีวภาพ ซึ่งเตาเผาถ่านชีวภาพมีอายุการใช้งานประมาณ 35-45 ครั้ง ดังนั้น ต้นทุนในส่วนของ การสร้างเตาเผาถ่านชีวภาพจึงไม่เกิดทุกรอบของการเพาะปลูก ส่งผลให้รอบการปลูกต่อมาจะมีเพียงต้นทุนในส่วนพันธุ์ข้าวเท่านั้น ซึ่งจากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า การใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเพียงครั้งเดียวในการปลูกข้าว 3 รอบการปลูกส่งผลให้ข้าวมีผลผลิตที่สูงกว่าการปลูกข้าวโดยใส่ปุ๋ยเพียงอย่างเดียวซึ่งเป็นการเพาะปลูกโดยทั่วไปของเกษตรกร และทำให้เกษตรกรมีรายได้ที่เพิ่มมากขึ้นและมีกำไรจากการดำเนินการดังกล่าว

งานวิจัยหลายชิ้นชี้ให้เห็นว่า การใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเพียง 1 ครั้งสามารถให้ผลผลิตพืชที่ดีขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ 3-5 รอบการปลูก (Major et al., 2010; Zhang et al., 2012; Chen et al., 2018) ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าว หากดำเนินการปลูกข้าวในดินเค็มในวงบ่อซีเมนต์โดยการใส่ถ่านชีวภาพในทุก 3-5 รอบการปลูก ดังนั้น ต้นทุนการใช้จ่ายจะมีเพียงต้นทุนถ่านชีวภาพ (แกลบดิบ) ซึ่งมีค่าใช้จ่ายประมาณ 30-40 บาท/วงบ่อซีเมนต์ ต้นทุนปุ๋ยเพียง 10 กิโลกรัม และต้นทุนค่าเมล็ดพันธุ์เพียง 50 บาท เท่านั้น โดยการดำเนินการในพื้นที่ขนาดใหญ่จะทำให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มมากขึ้นหรือหากดำเนินการในพื้นที่ขนาดเล็ก ผลผลิตดังกล่าวยังสามารถใช้ในการบริโภคในครัวเรือนได้

นอกจากนั้น การใส่ถ่านชีวภาพยังสามารถปรับปรุงสมบัติของดินได้ดีกว่าการใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียวอีกด้วย ดังจะเห็นได้ว่า ดินในตำรับการทดลองที่ 3 มีสมบัติที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญภายในระยะเวลาเพียง 4 เดือน (รอบการปลูกเดียว) และดินยังได้รับการปรับปรุงให้มีสมบัติที่ดีขึ้นอย่างต่อเนื่องแม้จะมีการเพาะปลูกข้าวในรอบที่ 3 ดังจะเห็นได้จากสมบัติของดินภายหลังการปลูกข้าวในรอบที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยหลายชิ้นที่ระบุว่า ถ่านชีวภาพสามารถปรับปรุงสมบัติของดินและเพิ่มผลผลิตพืชได้มากกว่า 1 รอบการปลูกพืช โดยใส่ถ่านชีวภาพเพียงครั้งเดียว (Major et al., 2010; Jones et al., 2012; Chen et al., 2018; Kätterer et al., 2019; Joseph et al., 2020; Liu et al., 2021)

ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับดินเค็มก่อนการทดลองซึ่งเป็นดินเค็มที่ไม่สามารถเพาะปลูกข้าวได้หรือให้ผลผลิตที่ต่ำมาก ทำให้ขาดทุนอย่างต่อเนื่องจนเกษตรกรไม่ทำการเพาะปลูก แล้วทิ้งพื้นที่นั้น ๆ ไว้ ส่งผลให้เกิดการแพร่กระจายพื้นที่ดินเค็มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพื้นผิวดินไม่มีพืชปกคลุมไว้ (FAO & ITPS, 2015; Shrivastava & Kumar, 2015; Wijitkosum, 2020) นอกจากนี้ เกษตรกรบางรายอาจขายที่ดินให้อุตสาหกรรมเกลือ ซึ่งจะส่งผลต่อความมั่นคงของเกษตรกรในพื้นที่เป็นอย่างมาก รวมทั้ง ผลกระทบต่อระบบนิเวศในพื้นที่ และผลกระทบต่อความมั่นคงทางอาหารในอนาคต (Venkateswarlu & Shanker, 2009; Wijitkosum, 2020; อรุณี ยูวะนิยม, 2546)

ดังนั้น การใช้ถ่านชีวภาพเพื่อปรับปรุงสมบัติของดินเค็มที่ไม่สามารถเพาะปลูกพืชได้ให้สามารถเพาะปลูกพืชและให้ผลผลิตข้าวได้ จึงส่งผลดีต่อระบบนิเวศ การใช้ประโยชน์พื้นที่ และคุณภาพชีวิตของเกษตรกรในระยะยาว ซึ่งในระยะเริ่มแรกของการดำเนินการ ผลผลิตข้าวที่ได้อาจไม่ได้ผลผลิตในปริมาณ/จำนวนที่มากพอต่อการขายเพื่อสร้างรายได้ แต่ผลผลิตดังกล่าวสามารถใช้ในการบริโภคของเกษตรกรได้ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการซื้อข้าวได้ จึงกล่าวได้ว่า การใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงสมบัติของดินเค็มไม่สามารถประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์เป็นตัวเลขนรายได้หรือผลกำไรเป็นจำนวนเงินเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมีผลกำไรที่ไม่สามารถประเมินเป็นตัวเงินได้อย่างชัดเจน ได้แก่ ผลต่อทรัพยากรดินและระบบนิเวศ โดยเฉพาะผลดีในมิติเชิงสังคม ได้แก่ ผลต่อความเป็นอยู่ ความมั่นคง และคุณภาพชีวิตของเกษตรกรจากการไม่ต้องละทิ้งถิ่นฐาน การไม่ต้องเคลื่อนย้ายแรงงานเข้าสู่เมือง การไม่ต้องขายที่ดินทำกินที่เกษตรกรเป็นเจ้าของ



บทที่ 7

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

7.1.1 ผลวิเคราะห์สมบัติของดินและถ่านชีวภาพแกลบ

ดินเค็มในพื้นที่ มีเนื้อดินเป็นดินทรายปนดินร่วน และจัดเป็นดินที่มีความเป็นด่างจัด (very strongly alkaline) โดยมีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 10.60 อีกทั้ง ความอุดมสมบูรณ์ของดินอยู่ในระดับต่ำมาก โดยมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพียง 0.19 % และดินเค็มในพื้นที่ศึกษาจัดเป็นดินเค็มโซเดียม (saline sodic soil) โดยมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 68.6 dS/m ปริมาณโซเดียมทั้งหมดเท่ากับ 0.83 % ค่าอัตราการดูดซับโซเดียมมีค่าเท่ากับ 11,707 และค่าร้อยละของโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้เท่ากับ 58.1

ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากแกลบด้วยเตาผลิตแกลบชีวภาพ 4 x 200 ลิตร ควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการเปลี่ยนสภาพด้วยความร้อนแบบช้า (เลขที่จดสิทธิบัตร 1601001281 โดยทวิวงศ์ ศรีบุรี) มีความเป็นด่างปานกลาง (ค่า pH 7.90) ถ่านชีวภาพแกลบมีความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกค่อนข้างสูง ปริมาณอินทรีย์วัตถุและปริมาณคาร์บอนสูงมาก อีกทั้ง ยังมีปริมาณธาตุอาหารหลักอยู่ในเกณฑ์สูง (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม) ในขณะที่ ปริมาณแคลเซียมและปริมาณแมกนีเซียมอยู่ในระดับต่ำ นอกจากนี้ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านชีวภาพแกลบมีค่าเท่ากับ 41.43 m²/g และมีความเสถียรในดินสูง (สัดส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอนเท่ากับ 0.38) จึงสามารถคงตัวอยู่ในดินได้เป็นระยะเวลานาน

7.1.2 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อสมบัติดิน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินเมื่อทำการปลูกข้าว โดยใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดินพบว่า ภายในฤดูปลูกเดียว (120 วัน) ดินมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่มีสมบัติดินที่ดีขึ้น โดยการใส่ถ่านชีวภาพแกลบในอัตรา 1.5 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ (ตำรับการทดลองที่ 3) เป็นเพียงตำรับเดียวที่มีค่าการนำไฟฟ้าลดลงจนเหลือ 13.33 dS/m ซึ่งจัดเป็นดินเค็มมาก จากเดิมที่ดินในพื้นที่เป็นดินเค็มจัด ในขณะที่ ตำรับการทดลองอื่นดินยังคงจัดอยู่ในระดับเค็มจัด นอกจากนี้ ตำรับการทดลองที่ 3 ยังเป็นเพียงตำรับการทดลองเดียวที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ภายหลังจากการปลูกข้าวรอบที่ 2 พบว่า ดินในทุกตำรับการทดลองมีค่าการนำไฟฟ้าลดลงจนอยู่ในระดับดินเค็มเล็กน้อย เช่นเดียวกันกับ ปริมาณโซเดียมทั้งหมดของทุกตำรับการ

ทดลองมีค่าลดลง จากผลการศึกษาจึงสรุปได้ว่า การใส่ถ่านชีวภาพแกลบ 1.5 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ (ตำรับการทดลองที่ 3) เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในดินเค็มภายในวงบ่อซีเมนต์ เนื่องจากสามารถลดค่าความเค็มของดินได้ดีที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ (ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณโซเดียมที่ละลายน้ำได้ ปริมาณโซเดียมทั้งหมด และค่า SAR) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองอื่นภายในการปลูกข้าวเพียงรอบแรก รวมถึง สมบัติของดินดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง ภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2 ในขณะที่ การใส่ถ่านชีวภาพแกลบในอัตรา 2 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ ส่งผลให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุและธาตุอาหาร (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม) มีค่าสูงที่สุด ภายหลังการปลูกข้าวรอบที่ 2

ถ่านชีวภาพมีส่วนช่วยอย่างมากในการทำให้ค่าความเค็มลดลง และปรับปรุงคุณภาพดินให้เหมาะสมต่อการเพาะปลูกมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพดิน จำเป็นอย่างมากที่จะต้องคำนึงถึง ชนิดและสัดส่วนปริมาณถ่านชีวภาพ ประเภทและสมบัติของดิน และพืชที่จะปลูก เนื่องจากถ่านชีวภาพมีสมบัติที่เฉพาะตัว และกลไกต่าง ๆ ยังมีความไม่แน่ชัด

นอกจากนี้ การปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์โดยการให้น้ำวิธีเปียกสลับแห้ง ทำให้ความต้องการใช้น้ำเพื่อการเพาะปลูกข้าวลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกข้าวในพื้นที่แปลงจริง อีกทั้ง ปัญหาดินเค็มของพื้นที่ศึกษา เป็นผลมาจากลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ที่มีชั้นหินเกลือรองรับอยู่ ด้านใต้พื้นดิน จึงส่งผลให้มีการระเหยเอาเกลือขึ้นมาสู่ผิวดินโดยเฉพาะช่วงฤดูแล้ง ดังนั้น การปลูกข้าวในดินเค็มในวงบ่อซีเมนต์จะสามารถลดผลกระทบของน้ำใต้ดินเค็มในพื้นที่ที่มีต่อการปลูกข้าวได้ ซึ่งจะทำให้การระเหยและดึงเอาปริมาณเกลือที่ละลายน้ำอยู่ในน้ำใต้ดินขึ้นมาสู่ผิวดินลดลง

7.1.3 ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว

จากการศึกษาการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว โดยใส่ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดินพบว่า ในการปลูกข้าวรอบที่ 1 การใส่ถ่านชีวภาพแกลบในอัตรา 1.5 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ (ตำรับการทดลองที่ 3) ให้ผลผลิตข้าวและเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีมากที่สุด ในขณะที่ การปลูกข้าวรอบที่ 3 พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพแกลบในอัตรา 2.0 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ (ตำรับการทดลองที่ 4) ให้ผลผลิตข้าวและเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีมากที่สุด อย่างไรก็ตาม การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตข้าวในรอบการปลูกที่ 1 และรอบการปลูกที่ 3 มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือ ตำรับการทดลองที่ 4 ให้ผลการเจริญเติบโตข้าวที่ไม่ดีในรอบการปลูกที่ 1 แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึงรอบการปลูกที่ 3 ตำรับการทดลองดังกล่าวให้ผลการเจริญเติบโตของข้าวสูงที่สุด ในขณะที่ ตำรับการทดลองที่ 1 ที่ให้ผลการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวที่ดีในรอบการปลูกที่ 1 กลับให้ผลผลิตข้าวและการเจริญเติบโตของต้นข้าวต่ำที่สุดในรอบการปลูกที่ 3 ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการใส่ถ่านชีวภาพในการเพิ่มผลผลิตทาง

การเกษตรจำเป็นต้องใช้ปริมาณที่เหมาะสมและใช้ระยะเวลาเพื่อให้ถ่านชีวภาพสามารถปรับปรุงสมบัติของดินได้ดียิ่งขึ้น

ทั้งนี้ ถ่านชีวภาพกลบปรับปรุงสมบัติของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตได้ โดยถ่านชีวภาพกลบร่วมกับปุ๋ยคอก ทำให้ความเค็มของดินลดลง และยังให้ผลผลิตข้าวมากกว่าการใส่ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว รวมถึง การใส่ถ่านชีวภาพกลบร่วมกับปุ๋ยคอก ยังคงให้ผลผลิตของข้าวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในการปลูกข้าวฤดูกลางที่ 3

7.1.4 ประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ในการแก้ไขปัญหาดินเค็มด้วยการใช้ถ่านชีวภาพในการปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์

จากการศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพกลบเป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติดินเค็ม และทำการเพาะปลูกข้าวในวงบ่อซีเมนต์ ในกรณีการนำไปใช้ในการทำเกษตรกรรมขนาดเล็ก ซึ่งเป็นการทำเกษตรกรรมแบบอินทรีย์และไม่คิดค่าแรง โดยเปรียบเทียบระหว่างตำรับการทดลองที่ 1 ตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 พบว่า ในการปลูกครั้งแรกของทุกตำรับการทดลองยังไม่เกิดผลกำไรจากการปลูกข้าว อย่างไรก็ตาม การปลูกข้าวครั้งที่ 3 ในตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 ซึ่งเป็นตำรับการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพ ให้กำไรเป็นจำนวนเงิน 155.28 และ 168.05 บาท ตามลำดับ ในขณะที่ การปลูกข้าวในตำรับการทดลองที่ 1 ให้ผลผลิตของข้าวต่ำ ส่งผลให้มีกำไรติดลบ (-48.08 บาท) ซึ่งถึงแม้การลงทุนในรอบการปลูกที่ 1 ของทุกตำรับการทดลองจะให้ผลในเชิงลบ แต่ในเชิงคุณภาพของดินในตำรับการทดลองที่ 3 พบว่า ภายในระยะเวลาเพียงรอบการปลูกแรก (120 วัน) ดินมีสมบัติที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ถ่านชีวภาพสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติดินให้เหมาะสมต่อการเพาะปลูกมากขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง อีกทั้ง การใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยคอกเพียงครั้งแรกครั้งเดียวในการปลูกข้าว ส่งผลให้ข้าวมีผลผลิตที่สูงกว่าการปลูกข้าวโดยใส่ปุ๋ยเพียงอย่างเดียว ดังนั้น การใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงสมบัติของดินเค็มเพื่อการปลูกข้าว จำเป็นจะต้องใช้ระยะเวลา อีกทั้ง การที่ดินเค็มเดิมในพื้นที่ที่ไม่สามารถเพาะปลูกพืชได้ ถูกปรับปรุงให้สามารถเพาะปลูกพืชและให้ผลผลิตข้าวได้ดี ย่อมส่งผลดีต่อระบบนิเวศและคุณภาพชีวิตของเกษตรกรในระยะยาวอีกด้วย

7.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรเพิ่มปริมาณปุ๋ยคอกที่ใส่ โดยในการศึกษานี้ใส่ปุ๋ย 1 กิโลกรัมต่อวงบ่อซีเมนต์ แต่จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณอินทรีย์วัตถุยังอยู่ในระดับต่ำมาก ซึ่งการเพิ่มปริมาณปุ๋ยคอกที่ใช้ อาจส่งผลให้สามารถดำเนินการเพาะปลูกได้มากกว่า 3 รอบการปลูกต่อการใส่ปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ 1 ครั้ง
- 2) ควรทำการศึกษาในระยะยาว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติดินเค็มจัดที่ไม่สามารถเพาะปลูกได้ให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของข้าว จำเป็นต้องใช้ระยะเวลามากในการปรับปรุงสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและเคมี
- 3) ควรทำการศึกษาปัจจัยอื่นเพิ่มเติม เช่น ปริมาณโซเดียมที่ต้นข้าวดูดดึงไว้ พื้นผิวของถ่านชีวภาพภายหลังทำการศึกษา รวมถึง ความหลากหลายทางชีวภาพภายในดิน เป็นต้น เพื่อศึกษากลไกของถ่านชีวภาพที่มีต่อสมบัติของดิน





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประเมินสมบัติทางเคมีของดิน

ตารางที่ ผ.1 ระดับความเป็นกรดต่างของดิน

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)	ระดับความเป็นกรดต่างของดิน
< 3.5	กรดรุนแรงที่สุด (ultra acid)
3.5–4.4	กรดรุนแรงมาก (extremely acid)
4.5–5.0	กรดจัดมาก (very strongly acid)
5.1–5.5	กรดจัด (strongly acid)
5.6–6.0	กรดปานกลาง (moderately acid)
6.1–6.5	กรดเล็กน้อย (slightly acid)
6.6–7.3	กลาง (neutral)
7.4–7.8	ด่างเล็กน้อย (slightly alkaline)
7.9–8.4	ด่างปานกลาง (moderately alkaline)
8.5–9.0	ด่างจัด (strongly alkaline)
> 9.0	ด่างจัดมาก (very strongly alkaline)

ที่มา : กรมพัฒนาที่ดิน, 2547

ตารางที่ ผ.2 ระดับปริมาณอินทรีย์วัตถุของดิน

ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%)	ระดับปริมาณอินทรีย์วัตถุของดิน
< 0.5	ต่ำมาก
0.5–1.0	ต่ำ
1.0–1.5	ค่อนข้างต่ำ
1.5–2.5	ปานกลาง
2.5–3.5	ค่อนข้างสูง
3.5–4.5	สูง
> 4.5	สูงมาก

ที่มา : กรมพัฒนาที่ดิน, 2547

ตารางที่ ผ.3 ระดับความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน

ค่า CEC (cmol/kg)	ระดับความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน
< 3.0	ต่ำมาก
3.0-5.0	ต่ำ
5.0-10.0	ค่อนข้างต่ำ
10.0-15.0	ปานกลาง
15.0-20.0	ค่อนข้างสูง
20.0-30.0	สูง
> 30.0	สูงมาก

ที่มา : กรมพัฒนาที่ดิน, 2547

ตารางที่ ผ.4 ระดับธาตุอาหาร (โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส แคลเซียม และแมกนีเซียม) ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของดิน

ธาตุอาหาร	ระดับความเป็นประโยชน์ในดิน (mg/kg)				
	ต่ำมาก	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	สูงมาก
ฟอสฟอรัส	< 3	3-10	11-15	16-45	> 45
โพแทสเซียม	< 30	30-60	61-90	91-120	> 120
แคลเซียม	< 400	400-1,000	1,001-2,000	2,001-4,000	>4,000
แมกนีเซียม	< 36	36-120	121-365	366-975	> 975

ที่มา : กรมพัฒนาที่ดิน, 2547

ภาคผนวก ข
ภาพวิทยานิพนธ์บางส่วน

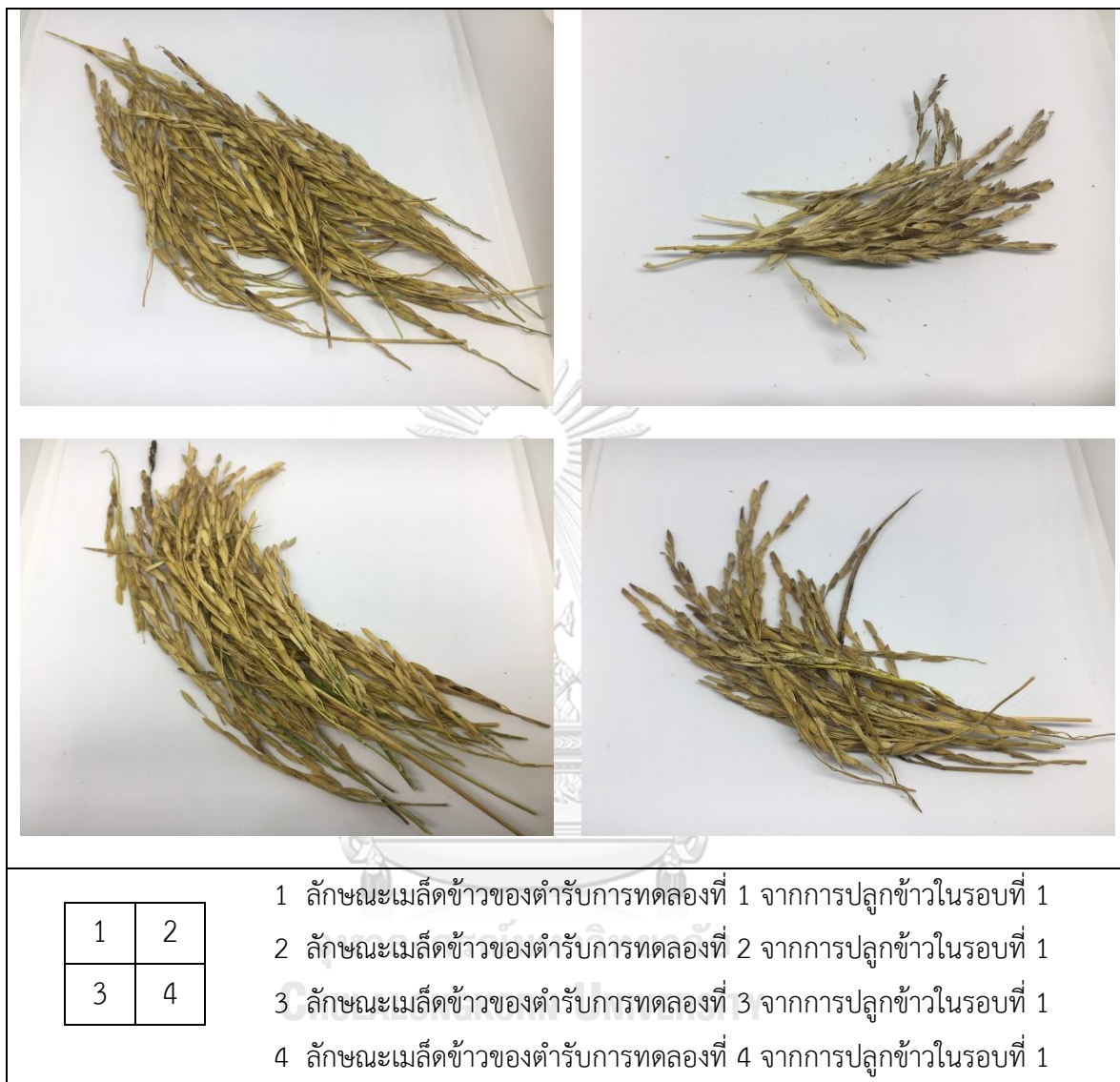


1	2
3	4

- 1 พื้นที่ศึกษาและการจัดวางวงบ่อซีเมนต์
- 2 ขณะการเตรียมวัสดุปลูก
- 3-4 พื้นที่ศึกษาระหว่างการปลูกข้าว

รูปที่ ผ.1 พื้นที่ศึกษาในระหว่างดำเนินการศึกษาวิจัย

ภาพวิทยานิพนธ์บางส่วน



รูปที่ ผ.2 ลักษณะของเมล็ดข้าว ของการปลูกข้าวในรอบที่ 1

ภาพวิทยานิพนธ์บางส่วน



รูปที่ ผ.3 ลักษณะของเมล็ดข้าว ของการปลูกข้าวในรอบที่ 3

บรรณานุกรม

- กรมการข้าว. (2553). ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105). สืบค้น 1 กรกฎาคม 2562, จาก กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว <http://www.ricethailand.go.th/rkb3/title-index.php-file=content.php&id=19.htm>
- กรมพัฒนาที่ดิน. (2547). คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พีช วัสดุปรับปรุงดิน.
- กรมพัฒนาที่ดิน. (2553ก). คู่มือการปฏิบัติงาน กระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี. สืบค้น 17 มกราคม 2562, จาก กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ <http://www.ddd.go.th/PMQA/2553/Manual/OSD-03.pdf>
- กรมพัฒนาที่ดิน. (2553ข). คู่มือการปฏิบัติงาน กระบวนการวิเคราะห์พีช ปุ๋ย และสิ่งปรับปรุงดิน. สืบค้น 17 มกราคม 2562, จาก กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ <http://www.ddd.go.th/PMQA/2553/Manual/OSD-07.pdf>
- กรมวิชาการเกษตร. (2551). คู่มือวิธีวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์ วิธีวิเคราะห์อินทรีย์วัตถุ อินทรีย์คาร์บอน อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน.
- กรมส่งเสริมการเกษตร. (2545). การเก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์สำหรับปลูกพืช หลักและวิธีการเก็บตัวอย่าง ดิน-พีช-สัตว์-น้ำ เพื่อการวิเคราะห์ทางการเกษตร (น. 1-3).
- กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร. (2543). ลักษณะการขาดธาตุอาหารของพืช. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด.
- จาวภา มະนาวนอก, สันติไมตรี ก้อนคำดี, เกษสุดา เดชภิมล, วรณวิภา แก้วประดิษฐ์ พลพินิจ, & ดร.ณิ โชติษฐยางกูร. (2560). ถ่านชีวภาพ: ผลต่อคุณสมบัติของดินและการเจริญเติบโตของข้าวนาหว่านน้ำตาม (การทดสอบในสภาพกระถาง) แก่นเกษตร, 45(2), 209-220.
- ทวีวงศ์ ศรีบุรี. (2559). ประเทศไทย Patent No. 1601001281. เต้า 4 X 200 ลิตร ผลิตแกลบชีวภาพ (4 X 200 liters Retort for Rice Husk Biochar Production).
- ทวีวงศ์ ศรีบุรี, & เสาวนีย์ วิจิตรโกสม. (2559). นวัตกรรมเพิ่มคาร์บอนอินทรีย์ในดินเพื่อการเกษตรกรรมที่ยั่งยืนในพื้นที่เกษตรกรรมดินเค็ม : โครงการนำร่องปีที่ 1 ลุ่มน้ำลำตะคอง. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นันทิยา คำบุญเรือง. (2554). ผลของช่วงแสงต่อการกำเนิดช่อดอก และประโยชน์ของการใช้ช่วงแสงสั้น

ในการปลูกข้าวนอกฤดูของข้าวดอกมะลิ 105. (วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

นุชิต ศิริทองคำ. (2557). การแก้ไขปัญหาดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยใช้ดินเคลย์นาหว่านเป็นวัสดุธรรมชาติวิทยาในการปรับปรุงดิน. ใน เอกสารการประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณี ประจำปี พ.ศ.2557

บุปผา โดภาคงาม. (2549). ดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เบญจวรรณ ฤกษ์เกษม. (2561). วิทยาการข้าวไทย: ศูนย์บริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

เบนิต เอส เวอการา. (2526). ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการปลูกข้าว. กรุงเทพฯ: ไทยวัฒนาพานิช จำกัด.

ปัญญากรณ์ พุฒอินทร์. (2562). สารานุกรมความรู้เกี่ยวกับการปลูกข้าวในวงบ่อ. สืบค้น 17 มกราคม 2562 <http://www.wdoae.doe.go.th/wp2018/wp-content/uploads/2019/08/ปลูกข้าวในวงบ่อ.pdf>

ปัทมา วิทยากร. (2547). ความอุดมสมบูรณ์ของดินชั้นสูง. ขอนแก่น: ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปานใจ สารพันโชติวิทยา, เอกชัย แก้วมาตย์, ทวีวงศ์ พูลทอง, & รัตนา ปรีดาสามารถ. (2556). การศึกษา วิจัย พัฒนาพื้นที่ดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ระยะที่ 2 : ขยายผล) จังหวัดร้อยเอ็ด. กรุงเทพฯ.

พรรณี หงสนอย, & ยุทธชัย อนุรักติพันธุ์. (2542). การปรับปรุงดินเค็มในภาคกลางเพื่อปลูกแคนตาลูป. Paper presented at the การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 37 สาขาพืช.

ไพรัช พงษ์วิเชียร. (2552). อิทธิพลของระดับความเค็มต่อผลผลิตและคุณภาพเมล็ดของข้าวขาวดอกมะลิ105: กองวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ไพรัช พงษ์วิเชียร. (2560). การเกษตรในพื้นที่ดินเค็มของประเทศไทยเพื่อรับมือกับความต้องการทางอาหาร. กองวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน.

มนตรี วันตาแสง. (2560). การศึกษาชนิดและอัตราที่เหมาะสมของถ่านชีวภาพร่วมกับการใช้ปุ๋ยเคมีต่อผลผลิตข้าวหอมมะลิ ในพื้นที่ดินเค็ม. ใน วิชาการงานพัฒนาที่ดิน ขับเคลื่อนคุณภาพชีวิตเกษตรกรสู่ความยั่งยืน, สงขลา.

ระบบแผนที่เกษตรเพื่อการบริหารจัดการเชิงรุกออนไลน์. (2558). พื้นที่ดินปัญหา. สืบค้น 20 กันยายน

2561, จาก ระบบแผนที่เกษตรเพื่อการบริหารจัดการเชิงรุกออนไลน์ <http://agri-map-online.moac.go.th/>

วัชรินทร์ ชื่นสุวรรณ. (2554). ข้าว (Rice). สืบค้น 15 พฤษภาคม 2562
<http://www.natres.psu.ac.th/Department/PlantScience/510-211/lecturenote/document/rice.pdf>

วิชุดา กัลยาศิริ. (2556). ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อผลผลิตข้าวและคุณภาพดินเหนียวปนทราย
 กรณีศึกษาตำบลป่าเต็ง อำเภอกำแพงกระเจาน จังหวัดเพชรบุรี. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต),
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิไล ปาละวิสุทธิ. (2549). การผลิตเมล็ดข้าวเชิงพาณิชย์. โรงพิมพ์กิจรุ่งเรือง กรุงเทพมหานคร: ศูนย์วิจัย
 ข้าวพิษณุโลก.

ศูนย์ภูมิอากาศ กองพัฒนาอุตุนิยมวิทยา. (2564). การสรุปลักษณะอากาศ รายเดือน. สืบค้น 17
 มกราคม 2564, จาก กรมอุตุนิยมวิทยา <http://climate.tmd.go.th/content/category/16>

ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. (2555ก). คู่มือการจัดการดินเค็มเพื่อปลูกข้าว
 19 ผลสำเร็จที่โดดเด่นของศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ: สำนักงาน
 คณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงาน โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (สำนักงาน กปร.).

ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. (2555ข). การปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105
 19 ผลสำเร็จที่โดดเด่นของศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ: สำนักงาน
 คณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงาน โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (สำนักงาน กปร.).

สมศรี อรุณินท์. (2539). ดินเค็มในประเทศไทย: กรมพัฒนาที่ดิน.

สรรพสิทธิ์ แก้วเฮ้า. (2557). การปรับปรุงคุณภาพดินเค็มโดยใช้ปุ๋ยพืชสด : ศึกษากรณีพื้นที่อ่างเก็บน้ำ
 หนองบ่อ อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย
 มหาสารคาม, 33(6), 592-602.

สำนักงานจังหวัดนครราชสีมา. (2557). บรรยายสรุปจังหวัดนครราชสีมา. สืบค้น 17 มกราคม 2562
<http://103.28.101.10/briefprovince/filedoc/30000000.pdf>

สำนักงานพิพิธภัณฑสถานเฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. (2556). การปลูกข้าวในวงบ่อ
 ซีเมนต์. สืบค้น 18 พฤศจิกายน 2561 www.wisdomking.or.th.

- เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม. (2560). การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพเพื่อความมั่นคงทางอาหารในการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. *UNISEARCH JOURNAL*, 4(3), 9-14.
- โสฬส แซ่ลิ้ม. (2559). ปุ๋ยอินทรีย์และการใช้ประโยชน์ในประเทศไทย: กลุ่มวิจัยและพัฒนาการจัดการอินทรีย์วัตถุ กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน.
- อภิวัฒน์ อินทร์นง, พักตร์เพ็ญ ภูมิพันธ์, & อรประภา เทพศิลป์วิสุทธิ์. (2559). ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณภาพข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยเคมี. *Thai Journal of Science and Technology*, 5(3), 233-245.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน คณะอุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร.
- อรุณี ยูวะนิยม. (2546). การจัดการแก้ไขปัญหาดินเค็ม. เอกสารวิชาการกลุ่มวิจัยและพัฒนาการจัดการดินเค็ม สำนักวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน, 101.
- Abdul, R., & Abdul, R. (2017). The effect of biochar application on nutrient availability of soil planted with MR219. *Journal of Microbial and Biochemical Technology*, 9(2), 583-586. doi:10.4172/1948-5948.1000345
- Abdullaeva, Y. (2014). *Biochar effects on fertility of saline and alkaline soils (Navoiy region, uzbekistan)*. (Final project), United Nations University Land Restoration Training Programme Iceland. Retrieved from <https://www.grocentre.is/static/gro/publication/439/document/abdullaeva2014.pdf>
- Agegnehu, G., Srivastava, A. K., & Bird, M. I. (2017). The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied Soil Ecology*, 119, 156-170. doi:10.1016/j.apsoil.2017.06.008
- Akhtar, S. S., Andersen, M. N., & Liu, F. (2015). Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress. *Agricultural Water Management*, 158, 61-68. doi:10.1016/j.agwat.2015.04.010
- Amini, S., Ghadiri, H., Chen, C., & Marschner, P. (2016). Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: a review. *Journal of Soils and Sediments*, 16(3), 939-953. doi:10.1007/s11368-015-1293-1

- Assaha, D. V. M., Ueda, A., Saneoka, H., Al-Yahyai, R., & Yaish, M. W. (2017). The Role of Na(+) and K(+) Transporters in Salt Stress Adaptation in Glycophytes. *Frontiers in physiology*, 8, 509-509. doi:10.3389/fphys.2017.00509
- Bai, S. H., Reverchon, F., Xu, C.-Y., Xu, Z., Blumfield, T. J., Zhao, H., . . . Wallace, H. M. (2015). Wood biochar increases nitrogen retention in field settings mainly through abiotic processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 90, 232-240. doi:10.1016/j.soilbio.2015.08.007
- Brassard, P., Godbout, S., Palacios, J. H., Jeanne, T., Hogue, R., Dubé, P., . . . Raghavan, V. (2018). Effect of six engineered biochars on GHG emissions from two agricultural soils: A short-term incubation study. *Geoderma*, 327, 73-84. doi:10.1016/j.geoderma.2018.04.022
- Brewer, C. E., Chuang, V. J., Masiello, C. A., Gonnermann, H., Gao, X., Dugan, B., . . . Davies, C. A. (2014). New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and Bioenergy*, 66, 176-185. doi:10.1016/j.biombioe.2014.03.059
- Bruun, S., & EL-Zehery, T. (2012). Biochar effect on the mineralization of soil organic matter. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47, 665-671.
- Budai, A., Zimmerman, A., Cowie, A., Webber, J., Singh, B. P., Glaser, B., . . . Joseph, S. (2013). *Biochar Carbon Stability Test Method: An assessment of methods to determine biochar carbon stability*.
- Burrell, L. D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B., & Soja, G. (2016). Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma*, 282, 96-102. doi:10.1016/j.geoderma.2016.07.019
- Carneiro, J. S. d. S., Ribeiro, I. C. A., Nardis, B. O., Barbosa, C. F., Lustosa Filho, J. F., & Melo, L. C. A. (2021). Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability. *Science of The Total Environment*, 760, 143955. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143955
- Castellini, M., Giglio, L., Niedda, M., Palumbo, A. D., & Ventrella, D. (2015). Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. *Soil and*

Tillage Research, 154, 1-13. doi:10.1016/j.still.2015.06.016

- Cha-Um, S., & Kirdmanee, C. (2011). Remediation of salt-affected soil by the addition of organic matter: an investigation into improving glutinous rice productivity. *Scientia Agricola*, 68, 406-410. doi:10.1590/S0103-90162011000400003
- Chaganti, V. N., & Crohn, D. M. (2015). Evaluating the relative contribution of physiochemical and biological factors in ameliorating a saline-sodic soil amended with composts and biochar and leached with reclaimed water. *Geoderma*, 259-260, 45-55. doi:10.1016/j.geoderma.2015.05.005
- Chaganti, V. N., Crohn, D. M., & Šimůnek, J. (2015). Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 158, 255-265. doi:10.1016/j.agwat.2015.05.016
- Chen, J.-H. (2006). *The combined use of chemical and organic fertilizers and/or biofertilizer for crop growth and soil fertility*. Paper presented at the International workshop on sustained management of the soil-rhizosphere system for efficient crop production and fertilizer use, Thailand.
- Chen, P., Wang, H.-Y., Zheng, R.-L., Zhang, B., & Sun, G.-X. (2018). Long-term effects of biochar on rice production and stabilisation of cadmium and arsenic levels in contaminated paddy soils. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 109(3-4), 415-420. doi:10.1017/S175569101800049X
- Cheng, C.-H., Lehmann, J., & Engelhard, M. H. (2008). Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(6), 1598-1610. doi:10.1016/j.gca.2008.01.010
- Chhabra, R. (2004). Classification of salt-affected soils. *Arid Land Research and Management*, 19(1), 61-79. doi:10.1080/15324980590887344
- Chintala, R., Schumacher, T. E., McDonald, L. M., Clay, D. E., Malo, D. D., Papiernik, S. K.,

- . . . Julson, J. L. (2014). Phosphorus Sorption and Availability from Biochars and Soil/Biochar Mixtures. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 42(5), 626-634. doi:10.1002/clen.201300089
- Cornelissen, G., Jubaedah, Nurida, N. L., Hale, S. E., Martinsen, V., Silvani, L., & Mulder, J. (2018). Fading positive effect of biochar on crop yield and soil acidity during five growth seasons in an Indonesian Ultisol. *Science of The Total Environment*, 634, 561-568. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.380
- Cramer, W., G.W. Yohe, M. Auffhammer, C. Huggel, U. Molau, M.A.F. da Silva Dias, . . . L. Tibig. (2014). Detection and attribution of observed impacts *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. (pp. 979-1037). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Cui, H.-J., Wang, M. K., Fu, M.-L., & Ci, E. (2011). Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar. *Journal of Soils and Sediments*, 11(7), 1135. doi:10.1007/s11368-011-0405-9
- Datta, S. K. D. (1981). *Principles and practices of rice production*. Los Baños, Philippines A Wiley-Interscience Publication.
- Esposito, N. C. (2013). *Soil nutrient availability properties of biochar*. (Master of Science in Engineering), Faculty of Cal Poly State University, San Luis Obispo.
- Fahmi, R., Bridgwater, A. V., Donnison, I. S., Yates, N., & Jones, J. M. (2008). The effect of lignin and inorganic species in biomass on pyrolysis oil yields, quality and stability. *Fuel*, 87(7), 1230-1240. doi:10.1016/j.fuel.2007.07.026
- FAO. (1988). *Salt-Affected Soils and their Management* I.P. Abrol, J.S.P. Yadav, & F. I. Massoud (Eds.),
- FAO, & ITPS. (2015). *Status of the World's Soil Resources – Main Report*. Retrieved from Rome, Italy:
- Farkas, É., Feigl, V., Gruiz, K., Vaszita, E., Fekete-Kertész, I., Tolner, M., . . . Molnár, M.

- (2020). Long-term effects of grain husk and paper fibre sludge biochar on acidic and calcareous sandy soils – A scale-up field experiment applying a complex monitoring toolkit. *Science of The Total Environment*, 138988. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138988
- Fu, P., Hu, S., Xiang, J., Sun, L., Su, S., & Wang, J. (2012). Evaluation of the porous structure development of chars from pyrolysis of rice straw: Effects of pyrolysis temperature and heating rate. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 98, 177-183. doi:10.1016/j.jaap.2012.08.005
- Gabhi, R. S., Kirk, D. W., & Jia, C. Q. (2017). Preliminary investigation of electrical conductivity of monolithic biochar. *Carbon*, 116, 435-442. doi:10.1016/j.carbon.2017.01.069
- Gai, X., Wang, H., Liu, J., Zhai, L., Liu, S., Ren, T., & Liu, H. (2014). Effects of Feedstock and Pyrolysis Temperature on Biochar Adsorption of Ammonium and Nitrate. *PLoS one*, 9(12), e113888. doi:10.1371/journal.pone.0113888
- Gan, W. J., He, Y., Zhang, X. f., Zhang, S. t., & Lin, Y. s. (2012). Effects and mechanisms of straw biochar on remediation contaminated soil in electroplating factory. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 28(3), 305-309.
- Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219-230. doi:10.1007/s00374-002-0466-4
- Gul, S., & Whalen, J. K. (2016). Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 103, 1-15. doi:10.1016/j.soilbio.2016.08.001
- Gunarathne, V., Mayakaduwa, S., & Vithanage, M. (2017). Biochar's Influence as a Soil Amendment for Essential Plant Nutrient Uptake. In M. Naeem, A. A. Ansari, & S. S. Gill (Eds.), *Essential Plant Nutrients* (pp. 47-67): Springer, Cham.
- Gupta, B., & Huang, B. (2014). Mechanism of Salinity Tolerance in Plants: Physiological, Biochemical, and Molecular Characterization. *International Journal of Genomics*,

2014, 18. doi:10.1155/2014/701596

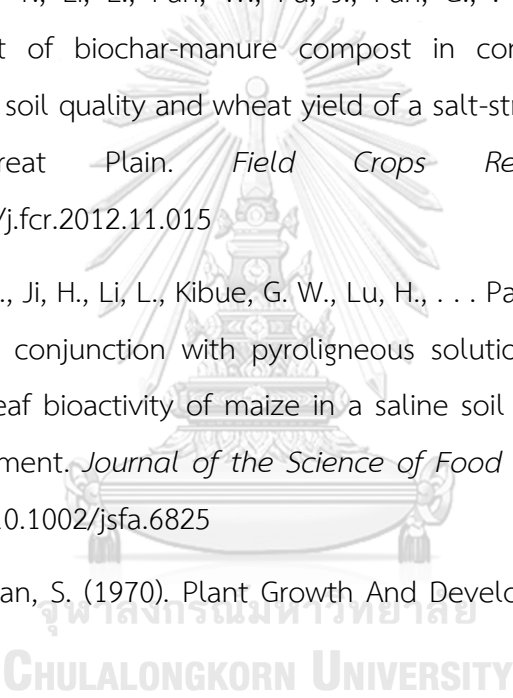
- Haider, G., Steffens, D., Moser, G., Müller, C., & Kammann, C. (2016). Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 237, 80-94. doi:10.1016/j.agee.2016.12.019
- Hailegnaw, N., Mercl, F., Pračke, K., Száková, J., & Tlustoš, P. (2019). Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment. *Journal of Soils and Sediments*, 19. doi:10.1007/s11368-019-02264-z
- Hall, D. J. M., & Bell, R. W. (2015). Biochar and Compost Increase Crop Yields but the Effect is Short Term on Sandplain Soils of Western Australia. *Pedosphere*, 25(5), 720-728. doi:10.1016/S1002-0160(15)30053-9
- Hammer, E. C., Forstreuter, M., Rillig, M. C., & Kohler, J. (2015). Biochar increases arbuscular mycorrhizal plant growth enhancement and ameliorates salinity stress. *Applied Soil Ecology*, 96, 114-121. doi:10.1016/j.apsoil.2015.07.014
- Hanay, A., Büyüksönmez, F., Kiziloglu, F. M., & Canbolat, M. Y. (2004). Reclamation of Saline-Sodic Soils with Gypsum and MSW Compost. *Compost Science & Utilization*, 12(2), 175-179. doi:10.1080/1065657X.2004.10702177
- Herath, H. M. S. K., Camps-Arbestain, M., & Hedley, M. (2013). Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol. *Geoderma*, 209-210, 188-197. doi:10.1016/j.geoderma.2013.06.016
- Hossain, M. K., Strezov, V., Chan, K. Y., Ziolkowski, A., & Nelson, P. F. (2011). Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management*, 92(1), 223-228. doi:10.1016/j.jenvman.2010.09.008
- Huang, M., Zhang, Z., Zhu, C., Zhai, Y., & Lu, P. (2019). Effect of biochar on sweet corn and soil salinity under conjunctive irrigation with brackish water in coastal saline soil. *Scientia Horticulturae*, 250, 405-413. doi:10.1016/j.scienta.2019.02.077

- Hussain, S., Zhang, J.-h., Zhong, C., Zhu, L.-f., Cao, X.-c., Yu, S.-m., . . . Jin, Q.-y. (2017). Effects of salt stress on rice growth, development characteristics, and the regulating ways: A review. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(11), 2357-2374. doi:10.1016/S2095-3119(16)61608-8
- IBI. (2015). Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that is Used in Soil. (IBI-STD-2.1). Retrieved 1 June 2020 https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf
- IEA Bioenergy. (2007). *Biomass Pyrolysis*. Retrieved from <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Task-34-Booklet.pdf>
- Jien, S.-H., Wang, C.-C., Lee, C.-H., & Lee, T.-Y. (2015). Stabilization of Organic Matter by Biochar Application in Compost-amended Soils with Contrasting pH Values and Textures. *Sustainability*, 7(10), 13317-13333.
- Jones, D. L., Rousk, J., Edwards-Jones, G., DeLuca, T. H., & Murphy, D. V. (2012). Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biology and Biochemistry*, 45, 113-124. doi:10.1016/j.soilbio.2011.10.012
- Joseph, S., Pow, D., Dawson, K., Rust, J., Munroe, P., Taherymoosavi, S., . . . Solaiman, Z. M. (2020). Biochar increases soil organic carbon, avocado yields and economic return over 4 years of cultivation. *Science of The Total Environment*, 724, 138153. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138153
- Kappler, A., Wuestner, M. L., Ruecker, A., Harter, J., Halama, M., & Behrens, S. (2014). Biochar as an Electron Shuttle between Bacteria and Fe(III) Minerals. *Environmental Science & Technology Letters*, 1(8), 339-344. doi:10.1021/ez5002209
- Kasak, K., Truu, J., Ostonen, I., Sarjas, J., Oopkaup, K., Paiste, P., . . . Truu, M. (2018). Biochar enhances plant growth and nutrient removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 639, 67-74.

doi:10.1016/j.scitotenv.2018.05.146

- Kätterer, T., Roobroeck, D., Andrén, O., Kimutai, G., Karlton, E., Kirchmann, H., . . . Röing de Nowina, K. (2019). Biochar addition persistently increased soil fertility and yields in maize-soybean rotations over 10 years in sub-humid regions of Kenya. *Field Crops Research*, 235, 18-26. doi:10.1016/j.fcr.2019.02.015
- Kaur, G., Singh, G., Motavalli, P. P., Nelson, K. A., Orłowski, J. M., & Golden, B. R. (2020). Impacts and management strategies for crop production in waterlogged or flooded soils: A review. *Agronomy Journal*, 112(3), 1475-1501. doi:10.1002/agj2.20093
- Kavitha, B., Reddy, P. V. L., Kim, B., Lee, S. S., Pandey, S. K., & Kim, K.-H. (2018). Benefits and limitations of biochar amendment in agricultural soils: A review. *Journal of Environmental Management*, 227, 146-154. doi:10.1016/j.jenvman.2018.08.082
- Khan, W.-u.-D., Ramzani, P. M. A., Anjum, S., Abbas, F., Iqbal, M., Yasar, A., . . . Khan, S. A. (2017). Potential of miscanthus biochar to improve sandy soil health, in situ nickel immobilization in soil and nutritional quality of spinach. *Chemosphere*, 185, 1144-1156. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.07.097
- Kim, H.-S., Kim, K.-R., Yang, J. E., Ok, Y. S., Owens, G., Nehls, T., . . . Kim, K.-H. (2016). Effect of biochar on reclaimed tidal land soil properties and maize (*Zea mays* L.) response. *Chemosphere*, 142, 153-159. doi:10.1016/j.chemosphere.2015.06.041
- Kraska, P., Oleszczuk, P., Andruszczak, S., Kwiecińska-Poppe, E., Różyło, K., Pałys, E., . . . Michałojć, Z. (2016). Effect of various biochar rates on winter rye yield and the concentration of available nutrients in the soil. *Plant, Soil and Environment*, 62(11), 483-489.
- Laghari, M., Mirjat, M. S., Hu, Z., Fazal, S., Xiao, B., Hu, M., . . . Guo, D. (2015). Effects of biochar application rate on sandy desert soil properties and sorghum growth. *CATENA*, 135, 313-320. doi:10.1016/j.catena.2015.08.013
- Laine, J., Simoni, S., & Calles, R. (1991). Preparation of activated carbon from coconut shell in a small scale cocurrent flow rotary kiln. *Chemical Engineering*

Communications, 99(1), 15-23. doi:10.1080/00986449108911575

- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., & Karlen, D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3), 436-442. doi:10.1016/j.geoderma.2010.05.012
- Lakhdar, A., Rabhi, M., Ghnaya, T., Montemurro, F., Jedidi, N., & Abdelly, C. (2009). Effectiveness of compost use in salt-affected soil. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1), 29-37. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.05.132
- Lashari, M. S., Liu, Y., Li, L., Pan, W., Fu, J., Pan, G., . . . Yu, X. (2013). Effects of amendment of biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain. *Field Crops Research*, 144, 113-118. doi:10.1016/j.fcr.2012.11.015
- Lashari, M. S., Ye, Y., Ji, H., Li, L., Kibue, G. W., Lu, H., . . . Pan, G. (2015). Biochar–manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from central China: a 2-year field experiment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(6), 1321-1327. doi:10.1002/jsfa.6825
- Läuchli, A., & Grattan, S. (1970). Plant Growth And Development Under Salinity Stress (pp. 1-32).  CHULALONGKORN UNIVERSITY
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). *Biochar for environmental management: An introduction*.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. London: Routledge.
- Lehmann, J., Pereira da Silva, J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., & Glaser, B. (2003). Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249(2), 343-357. doi:10.1023/a:1022833116184
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011).

- Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812-1836. doi:10.1016/j.soilbio.2011.04.022
- Levy, G. J., & Shainberg, I. (2005). SODIC SOILS. In D. Hillel (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment* (pp. 504-513). Oxford: Elsevier.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., B, O. N., . . . Neves, E. (2006). Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1719-1730. doi:10.2136/sssaj2005.0383
- Lin, Q., Zhang, L., Riaz, M., Zhang, M., Xia, H., Lv, B., & Jiang, C. (2018). Assessing the potential of biochar and aged biochar to alleviate aluminum toxicity in an acid soil for achieving cabbage productivity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 161, 290-295. doi:10.1016/j.ecoenv.2018.06.010
- Liu, B., Li, H., Li, H., Zhang, A., & Rengel, Z. (2021). Long-term biochar application promotes rice productivity by regulating root dynamic development and reducing nitrogen leaching. *GCB Bioenergy*, 13(1), 257-268. doi:10.1111/gcbb.12766
- Liu, J. X., Liao, D. Q., Oane, R., Estenor, L., Yang, X. E., Li, Z. C., & Bennett, J. (2006). Genetic variation in the sensitivity of anther dehiscence to drought stress in rice. *Field Crops Research*, 97, 87-100. doi:10.1016/j.fcr.2005.08.019
- Liu, S., Meng, J., Jiang, L., Yang, X., Lan, Y., Cheng, X., & Chen, W. (2017). Rice husk biochar impacts soil phosphorous availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types. *Applied Soil Ecology*, 116, 12-22. doi:10.1016/j.apsoil.2017.03.020
- Liu, X., Zhou, J., Chi, Z., Zheng, J., Li, L., Zhang, X., . . . Pan, G. (2019). Biochar provided limited benefits for rice yield and greenhouse gas mitigation six years following an amendment in a fertile rice paddy. *CATENA*, 179, 20-28. doi:10.1016/j.catena.2019.03.033
- Liu, X. H., & Zhang, X. C. (2012). Effect of Biochar on pH of Alkaline Soils in the Loess Plateau: Results from Incubation Experiments. *International Journal of*

Agriculture and Biology, 14, 745-750.

- Liu, Z., Zhang, F.-S., & Wu, J. (2010). Characterization and application of chars produced from pinewood pyrolysis and hydrothermal treatment. *Fuel*, 89(2), 510-514. doi:10.1016/j.fuel.2009.08.042
- Lonardo, S., Baronti, S., Primo Vaccari, F., Albanese, L., Battista, P., Miglietta, F., & Bacci, L. (2017). Biochar-based nursery substrates: The effect of peat substitution on reduced salinity. *Urban Forestry & Urban Greening*, 23, 27-34. doi:10.1016/j.ufug.2017.02.007
- Lovley, D. R., Coates, J. D., Blunt-Harris, E. L., Phillips, E. J. P., & Woodward, J. C. (1996). Humic substances as electron acceptors for microbial respiration. *Nature*, 382, 445. doi:10.1038/382445a0
- Lu, S. G., Tang, C., & Rengel, Z. (2004). Combined effects of waterlogging and salinity on electrochemistry, water-soluble cations and water dispersible clay in soils with various salinity levels. *Plant and Soil*, 264(1), 231-245. doi:10.1023/B:PLSO.0000047748.50435.fc
- Luo, X., Liu, G., Xia, Y., Chen, L., Jiang, Z., Zheng, H., & Wang, Z. (2017). Use of biochar-compost to improve properties and productivity of the degraded coastal soil in the Yellow River Delta, China. *Journal of Soils and Sediments*, 17(3), 780-789. doi:10.1007/s11368-016-1361-1
- Machado, R., & Serralheiro, R. (2017). Soil Salinity: Effect on Vegetable Crop Growth. Management Practices to Prevent and Mitigate Soil Salinization. *Horticulturae*, 3(2), 30. doi:10.3390/horticulturae3020030
- Mahmoodabadi, M., Yazdanpanah, N., Sinobas, L. R., Pazira, E., & Neshat, A. (2013). Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): Redistribution of soluble cations within the soil profile. *Agricultural Water Management*, 120, 30-38. doi:10.1016/j.agwat.2012.08.018
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J., & Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol.

Plant and Soil, 333(1), 117-128. doi:10.1007/s11104-010-0327-0

- Marks, E., Alcañiz, J., & Domene, X. (2014). Unintended effects of biochars on short-term plant growth in a calcareous soil. *Plant and Soil*, 385. doi:10.1007/s11104-014-2198-2
- Mekuria, W., & Noble, A. (2013). The Role of Biochar in Ameliorating Disturbed Soils and Sequestering Soil Carbon in Tropical Agricultural Production Systems. *Applied and Environmental Soil Science*, 2013, 354965. doi:10.1155/2013/354965
- Mia, S., Dijkstra, F. A., & Singh, B. (2017). Chapter One - Long-Term Aging of Biochar: A Molecular Understanding With Agricultural and Environmental Implications. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 141, pp. 1-51): Academic Press.
- Mohammadi, A., Cowie, A., Anh Mai, T. L., de la Rosa, R. A., Kristiansen, P., Brandão, M., & Joseph, S. (2016). Biochar use for climate-change mitigation in rice cropping systems. *Journal of Cleaner Production*, 116, 61-70. doi:10.1016/j.jclepro.2015.12.083
- Munns, R., Husain, S., Rivelli, A. R., James, R. A., Condon, A. G., Lindsay, M. P., . . . Hare, R. A. (2002). Avenues for increasing salt tolerance of crops, and the role of physiologically based selection traits. *Plant and Soil*, 247(1), 93-105. doi:10.1023/A:1021119414799
- Murtaza, G., Ghafoor, A., Owens, G., Qadir, M., & Kahlon, U. Z. (2009). Environmental and Economic Benefits of Saline-Sodic Soil Reclamation Using Low-quality Water and Soil Amendments in Conjunction with a Rice–Wheat Cropping System. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195(2), 124-136. doi:10.1111/j.1439-037X.2008.00350.x
- Naidu, R., Syers, J., Tillman, R., & Kirkman, J. (1991). Assessment of plant-available phosphate in limed, acid soils using several soil-testing procedures. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 30, 47-53. doi:10.1007/BF01048826
- Nan, Q., wang, C., Yi, Q., Zhang, L., Ping, F., Thies, J. E., & Wu, W. (2020). Biochar amendment pyrolysed with rice straw increases rice production and mitigates

- methane emission over successive three years. *Waste Management*, 118, 1-8. doi:10.1016/j.wasman.2020.08.013
- Nelissen, V., Saha, B. K., Ruyschaert, G., & Boeckx, P. (2014). Effect of different biochar and fertilizer types on N₂O and NO emissions. *Soil Biology and Biochemistry*, 70, 244-255. doi:10.1016/j.soilbio.2013.12.026
- Noguera, D., Barot, S., Laossi, K. R., Cardoso, J., Lavelle, P., & Cruz de Carvalho, M. H. (2012). Biochar but not earthworms enhances rice growth through increased protein turnover. *Soil Biology and Biochemistry*, 52, 13-20. doi:10.1016/j.soilbio.2012.04.004
- Novak, J., Sigua, G., Watts, D., Cantrell, K., Shumaker, P., Szogi, A., . . . Spokas, K. (2016). Biochars impact on water infiltration and water quality through a compacted subsoil layer. *Chemosphere*, 142, 160-167. doi:10.1016/j.chemosphere.2015.06.038
- Novak, J. M., Busscher, W. J., Laird, D. L., Ahmedna, M., Watts, D. W., & Niandou, M. A. S. (2009). Impact of Biochar Amendment on Fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil. *Soil Science*, 174(2), 105-112. doi:10.1097/SS.0b013e3181981d9a
- Ok, Y. S., Uchimiya, S. M., Chang, S. X., & Bolan, N. (2015). *Biochar: Production, characterization, and applications*: CRC Press.
- Ono, S. (1991). Effects of flooding and liming on the promotion of mineralization of soil organic nitrogen. *Soil Science and Plant Nutrition*, 37(3), 427-433.
- Oo, A. N., Iwai, C. B., & Saenjan, P. (2015). Soil Properties and Maize Growth in Saline and Nonsaline Soils using Cassava-Industrial Waste Compost and Vermicompost with or Without Earthworms. *Land Degradation & Development*, 26(3), 300-310. doi:doi:10.1002/ldr.2208
- Pessaraki, M., & Szabolcs, I. (1999). Soil Salinity and Sodicity as Particular Plant/Crop Stress Factors. In M. Pessaraki (Ed.), *Handbook of Plant and Crop Stress*.
- Pietikäinen, J., Kiikkilä, O., & Fritze, H. (2000). Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. *Oikos*, 89(2), 231-

242. doi:10.1034/j.1600-0706.2000.890203.x

- Pituya, P., Sriburi, T., & Wijitkosum, S. (2017). Optimization of Biochar Preparation from Acacia Wood for Soil Amendment. *Engineering Journal* 21, 99-105. doi:10.4186/ej.2017.21.3.63
- Ponnamperuma, F. N. (1972). The Chemistry of Submerged Soils. In N. C. Brady (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 24, pp. 29-96): Academic Press.
- Prasad, R., & Chakraborty, D. (2019). Phosphorus Basics: Understanding Phosphorus Forms and Their Cycling in the Soil. from Alabama Cooperative Extension System https://www.aces.edu/wp-content/uploads/2019/04/ANR-2535-Phosphorus-Basics_041719L.pdf
- Prommer, J., Wanek, W., Hofhansl, F., Trojan, D., Offre, P., Urich, T., . . . Soja, G. (2014). Biochar decelerates soil organic nitrogen cycling but stimulates soil nitrification in a temperate arable field trial. *PLoS one*, 9(1), e86388.
- Provin, T., & Pitt, J. L. (2001). Managing soil salinity. *Texas FARMER Collection*.
- Qadir, M., & Schubert, S. (2002). Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils. *Land Degradation & Development*, 13(4), 275-294. doi:10.1002/ldr.504
- Rambo, M., Cardoso, A., Bevilaqua, D., Rizzetti, T., Ramos, L., Korndorfer, G., & Martins, A. (2011). Silica from Rice Husk Ash as an Additive for Rice Plant. *Journal of Agronomy*, 10, 99-104. doi:10.3923/ja.2011.99.104
- Rasool, S., Hameed, A., Azooz, M. M., Muneeb-u-Rehman, Siddiqi, T. O., & Ahmad, P. (2013). Salt Stress: Causes, Types and Responses of Plants. In P. Ahmad, M. M. Azooz, & M. N. V. Prasad (Eds.), *Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress* (pp. 1-24). New York, NY: Springer New York.
- Rouquerol, F., Rouquerol, J., & Sing, K. (1999). CHAPTER 8 - Assessment of Microporosity. In F. Rouquerol, J. Rouquerol, & K. Sing (Eds.), *Adsorption by Powders and Porous Solids* (pp. 219-236). London: Academic Press.
- Saifullah, Dahlawi, S., Naeem, A., Rengel, Z., & Naidu, R. (2018). Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. *Sci Total*

Environ, 625, 320-335. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.257

- Sharma, D. P., & Rao, K. V. G. K. (1998). Strategy for long term use of saline drainage water for irrigation in semi-arid regions. *Soil and Tillage Research*, 48(4), 287-295. doi:10.1016/S0167-1987(98)00135-4
- Sharma, S. K., & Manchanda, H. R. (1996). Influence of leaching with different amounts of water on desalinization and permeability behaviour of chloride and sulphate-dominated saline soils. *Agricultural Water Management*, 31(3), 225-235. doi:10.1016/0378-3774(96)01249-8
- Shen, H., Zhang, Q., Zhang, X., Jiang, X., Zhu, S., Chen, A., . . . Xiong, Z. (2021). In situ effects of biochar field-aged for six years on net N mineralization in paddy soil. *Soil and Tillage Research*, 205, 104766. doi:10.1016/j.still.2020.104766
- Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(2), 123-131. doi:10.1016/j.sjbs.2014.12.001
- Singh, B., & Cowie, A. (2010). Characterisation and evaluation of biochars for their application as soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*, 48(7), 516-525. doi:10.1071/SR10058
- Sohi, S., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. *Advances in Agronomy - ADVAN AGRON*, 105, 47-82. doi:10.1016/S0065-2113(10)05002-9
- Spokas, K. A. (2010). Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*, 1(2), 289-303. doi:10.4155/cmt.10.32
- Sriburi, T., & Wijitkosum, S. (2016). Biochar Amendment Experiments in Thailand: Practical Examples. In J. L. Viktor J. Bruckman (Ed.), *Biochar* (pp. 368-389): Cambridge University Press.
- Suliman, W., Harsh, J. B., Abu-Lail, N. I., Fortuna, A.-M., Dallmeyer, I., & Garcia-Pérez, M. (2017). The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Science of The Total Environment*, 574,

139-147. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.09.025

- Summart, J., Thanonkeo, P., Panichajakul, S., Prathepha, P., & McManus, M. (2010). Effect of salt stress on growth, inorganic ion and proline accumulation in Thai aromatic rice, Khao Dawk Mali 105, callus culture. *African Journal of Biotechnology*, 9(2).
- Sun, H., Lu, H., Chu, L., Shao, H., & Shi, W. (2017). Biochar applied with appropriate rates can reduce N leaching, keep N retention and not increase NH₃ volatilization in a coastal saline soil. *Science of The Total Environment*, 575, 820-825. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.09.137
- Sun, J., He, F., Shao, H., Zhang, Z., & Xu, G. (2016). Effects of biochar application on Suaeda salsa growth and saline soil properties. *Environmental Earth Sciences*, 75(8), 630. doi:10.1007/s12665-016-5440-9
- Tan, X., Shao, D., Liu, H., Yang, F., Xiao, C., & Yang, H. (2013). Effects of alternate wetting and drying irrigation on percolation and nitrogen leaching in paddy fields. *Paddy and Water Environment*, 11. doi:10.1007/s10333-012-0328-0
- Tan, Z., Lin, C. S. K., Ji, X., & Rainey, T. J. (2017). Returning biochar to fields: A review. *Applied Soil Ecology*, 116, 1-11. doi:10.1016/j.apsoil.2017.03.017
- Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J. L., & Hernandez, M. T. (2006). Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(6), 1413-1421. doi:10.1016/j.soilbio.2005.10.017
- Tejada, M., & Gonzalez, J. (2006). The relationships between erodibility and erosion in a soil treated with two organic amendments. *Soil and Tillage Research*, 91(1-2), 186-198.
- Thomas, S. C., Frye, S., Gale, N., Garmon, M., Launchbury, R., Machado, N., . . . Winsborough, C. (2013). Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species. *Journal of Environmental Management*, 129, 62-68. doi:10.1016/j.jenvman.2013.05.057

- U.S. EPA. (1993). Determination of total kjeldahl nitrogen by semi-automated colorimetry (Vol. METHOD 351.2): United States Environmental Protection Agency.
- USDA. (2015). Chemical Indicators and Soil Functions Retrieved 1 July 2019, from USDA Natural Resources Conservation Service <http://go.usa.gov/zUAH>
- USSL. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils* (L. A. Richards Ed.): United States Department of Agriculture.
- Vaccari, F. P., Baronti, S., Lugato, E., Genesio, L., Castaldi, S., Fornasier, F., & Miglietta, F. (2011). Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *European Journal of Agronomy*, 34(4), 231-238. doi:10.1016/j.eja.2011.01.006
- Venkateswarlu, B., & Shanker, A. K. (2009). Climate change and agriculture: adaptation and mitigation strategies. *Indian Journal of Agronomy*, 54(2), 226-230.
- Walker, D. J., & Bernal, M. P. (2008). The effects of olive mill waste compost and poultry manure on the availability and plant uptake of nutrients in a highly saline soil. *Bioresource Technology*, 99(2), 396-403. doi:10.1016/j.biortech.2006.12.006
- Wang, L., Xue, C., Nie, X., Liu, Y., & Chen, F. (2018). Effects of biochar application on soil potassium dynamics and crop uptake. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(5), 635-643. doi:10.1002/jpln.201700528
- Warnock, D. D., Lehmann, J., Kuyper, T. W., & Rillig, M. C. (2007). Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. *Plant and Soil*, 300(1), 9-20. doi:10.1007/s11104-007-9391-5
- Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240-261. doi:10.1016/j.fuel.2017.12.054
- Wijitkosum, S. (2020). Applying Rice Husk Biochar to Revitalise Saline Sodic Soil in Khorat Plateau Area – A Case Study for Food Security Purposes. In J. S. Singh (Ed.), *Biochar Applications in Agriculture and Environment Management* (pp. 1-31): Springer, Cham.

- Wijitkosum, S., & Kallayasiri, W. (2015). The use of biochar to increase productivity of indigenous upland Rice (*Oryza sativa* L.) and improve soil properties. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 6(2), 1326-1336.
- Wilson, K. (2014). How Biochar Works in Soil. *the Biochar Journal*, 25-33.
- Wu, Y., Xu, G., & Shao, H. B. (2014). Furfural and its biochar improve the general properties of a saline soil. *Solid Earth*, 5(2), 665-671. doi:10.5194/se-5-665-2014
- Xia, H., Riaz, M., Zhang, M., Liu, B., El-Desouki, Z., & Jiang, C. (2020). Biochar increases nitrogen use efficiency of maize by relieving aluminum toxicity and improving soil quality in acidic soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 196, 110531. doi:10.1016/j.ecoenv.2020.110531
- Xiang, Y., Deng, Q., Duan, H., & Guo, Y. (2017). Effects of biochar application on root traits: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 9(10), 1563-1572. doi:10.1111/gcbb.12449
- Xiao, L., Yuan, G., Feng, L., Bi, D., & Wei, J. (2020). Soil properties and the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) in response to reed (*phragmites communis*) biochar use in a salt-affected soil in the Yellow River Delta. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 303, 107124. doi:10.1016/j.agee.2020.107124
- Xie, W., Wu, L., Zhang, Y., Wu, T., Li, X., & Ouyang, Z. (2017). Effects of straw application on coastal saline topsoil salinity and wheat yield trend. *Soil and Tillage Research*, 169, 1-6. doi:10.1016/j.still.2017.01.007
- Xu, G., Sun, J., Shao, H., & Chang, S. X. (2014). Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. *Ecological Engineering*, 62, 54-60. doi:10.1016/j.ecoleng.2013.10.027
- Xu, G., Zhang, Y., Sun, J., & Shao, H. (2016). Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil. *Science of The Total Environment*, 568, 910-915. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.06.079
- Ye, Z., Liu, L., Tan, Z., Zhang, L., & Huang, Q. (2020). Effects of pyrolysis conditions on

- migration and distribution of biochar nitrogen in the soil-plant-atmosphere system. *Science of The Total Environment*, 723, 138006. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138006
- Yooyen, J., Wijitkosum, S., & Sriburi, T. (2015). Increasing yield of soybean by adding biochar. *Journal of Environmental Research And Development*, 9(4), 1066-1074.
- Yuan, J.-H., Xu, R.-K., & Zhang, H. (2011). The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, 102(3), 3488-3497. doi:10.1016/j.biortech.2010.11.018
- Yue, Y., Guo, W. N., Lin, Q. M., Li, G. T., & Zhao, X. R. (2016). Improving salt leaching in a simulated saline soil column by three biochars derived from rice straw (*Oryza sativa* L.), sunflower straw (*Helianthus annuus*), and cow manure. *Journal of Soil and Water Conservation*, 71(6), 467-475. doi:10.2489/jswc.71.6.467
- Zhang, A., Bian, R., Pan, G., Cui, L., Hussain, Q., Li, L., . . . Yu, X. (2012). Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles. *Field Crops Research*, 127, 153-160. doi:10.1016/j.fcr.2011.11.020
- Zhang, C., Zeng, G., Huang, D., Lai, C., Chen, M., Cheng, M., . . . Wang, R. (2019). Biochar for environmental management: Mitigating greenhouse gas emissions, contaminant treatment, and potential negative impacts. *Chemical Engineering Journal*, 373, 902-922. doi:10.1016/j.cej.2019.05.139
- Zhang, H., Irving, L. J., McGill, C., Matthew, C., Zhou, D., & Kemp, P. (2010). The effects of salinity and osmotic stress on barley germination rate: sodium as an osmotic regulator. *Annals of botany*, 106(6), 1027-1035. doi:10.1093/aob/mcq204
- Zhang, Q., Yi, W., Li, Z., Wang, L., & Cai, H. (2018). Mechanical Properties of Rice Husk Biochar Reinforced High Density Polyethylene Composites. *Polymers*, 10(3), 286.
- Zhang, T., P. Walawender, W., T. Fan, L., Fan, M., Daugaard, D., & Brown, R. (2004). *Preparation of activated carbon from forest and agricultural residues through CO₂ activation* (Vol. 105).

- Zhang, T., Wang, T., Liu, K. S., Wang, L., Wang, K., & Zhou, Y. (2015). Effects of different amendments for the reclamation of coastal saline soil on soil nutrient dynamics and electrical conductivity responses. *Agricultural Water Management*, 159, 115-122. doi:10.1016/j.agwat.2015.06.002
- Zhao, R., Coles, N., Kong, Z., & Wu, J. (2015). Effects of aged and fresh biochars on soil acidity under different incubation conditions. *Soil and Tillage Research*, 146, 133-138. doi:10.1016/j.still.2014.10.014
- Zhao, W., Zhou, Q., Tian, Z., Cui, Y., Liang, Y., & Wang, H. (2020). Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain. *Science of The Total Environment*, 722, 137428. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137428
- Zheng, H., Wang, X., Chen, L., Wang, Z., Xia, Y., Zhang, Y., . . . Xing, B. (2018). Enhanced growth of halophyte plants in biochar-amended coastal soil: roles of nutrient availability and rhizosphere microbial modulation. *Plant, cell & environment*, 41(3), 517-532. doi:10.1111/pce.12944

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สิรภัทร ประเสริฐสุข
วัน เดือน ปี เกิด	12 สิงหาคม 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ในปีพ.ศ. 2560 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
รางวัลที่ได้รับ	ได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา ปีการศึกษา 2560