วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 28 (ฉบับที่ 2) พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2566
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 28 (No.2) May – August 2023 บทความวิจัย

การใช้สารปรับปรุงคุณภาพดินจากถ่านชีวภาพที่เติมกำมะถัน เพื่อลดก๊าซเรือนกระจกและเพิ่มสารหอม2AP ในข้าวขาวดอกมะลิ 105

Application of Soil Amendments from Sulfur-Biochar for Greenhouse Gas Mitigation and Increase 2-Acetyl 1-Pyrroline (2AP) of Khao Dawk Mali 105

ทัศนีย์ เจียรพสุอนันต์* และ นิตยา ทองพูล
Tassanee Jiaphasuanan* and Nittaya Thongphun
ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
Department of Biological Science, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University
Received : 27 June 2022
Revised : 5 January 2023
Accepted : 20 January 2023

บทคัดย่อ

การลดก๊าซเรือนกระจกจากการปลูกข้าวโดยให้ได้ผลผลิตข้าวสูงและมีคุณภาพความหอมเพิ่มขึ้นเป็นประเด็นที่สำคัญในการพัฒนาการเกษตรอย่างยั่งยืน จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการใส่ถ่านชีวภาพที่เติมกำมะถันต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ผลผลิตและปริมาณสารหอม 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในนาข้าวของเกษตรกรในพื้นที่ ต.ศรีไค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี วางแผนการทดลองเป็น 4 ทรีตเมนต์ ได้แก่ 1) Control (C) แปลงที่ไม่มีการเติมสารปรับปรุงดิน/ปุ๋ย 2) S-biochar1 (S1) แปลงที่มีการใส่สารปรับปรุงดินที่ประกอบด้วยถ่านชีวภาพ ผงกำมะถันและปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต 3) S-biochar2 (S2) แปลงที่มีการใส่สารปรับปรุงดินที่ประกอบด้วยถ่านชีวภาพ และผงกำมะถัน 4) Fertilizer (F) แปลงที่มีการใส่ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นปุ๋ยรองพื้น และยูเรียเป็นปุ๋ยแต่งหน้า โดยแปลง S1, S2 และ F ใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินหรือปุ๋ยเคมีตามทรีตเมนต์ ในช่วงต้นข้าวแตกกอ (Day 59) และช่วงต้นข้าวตั้งท้อง (Day 138) โดยติดตามวัดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้ง CH_4 และ N_2O ตลอดฤดูเพาะปลูก ผลการศึกษาพบว่าผลผลิตข้าวสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) จากการใช้สารปรับปรุงคุณภาพดินที่ทำจากถ่านชีวภาพที่เติมกำมะถันและแอมโมเนียมซัลเฟตในแปลง S1 ให้ผลผลิตสูงสุด 665.71 กิโลกรัม/ไร่ ทำให้ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อผลผลิตข้าว (Greenhouse gas intensity: GHGI) มีค่าน้อยที่สุด 4.90 $kgCO_2/kg$ ส่วนปริมาณสารหอม 2AP ในเมล็ดข้าว มีค่า 3.46, 3.35, 3.28 และ 3.05 ppm ในแปลง C, S2, F และ S1 ตามลำดับ ซึ่งประเด็นการเพิ่มความหอมของข้าวควรต้องมีการศึกษาร่วมกับการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งด้วย

คำสำคัญ : การปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อผลผลิตข้าว ; สารหอม 2AP ; ถ่านชีวภาพ ; กำมะถัน

Abstract

Greenhouse gas mitigation from rice cultivation with increased yield and aroma compound in rice is an important issue for sustainable agricultural development. The influence of biochar containing sulfur was evaluated on greenhouse gas emissions, yield, and 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) aroma compound of the Khao Dawk Mali 105 cultivated in rice field located on Srikai Sub-district, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani. The experimental design consists of 4 treatments 1) Control (C) no soil amendment/fertilizer, 2) S-biochar1 (S1) added soil amendment of biochar containing sulfur and ammonium sulfate fertilizer, 3) S-biochar2 (S2) added soil amendment of biochar containing sulfur 4) Fertilizer (F) added ammonium sulfate fertilizer as basal and urea as top-dress. Treatments S1, S2, and F were applied with soil amendment or chemical fertilizer in tillering stage (Day 59) and reproductive stage (Day 138). Greenhouse gas emissions (CH_4 and N_2O) were investigated throughout the cultivation season. The results showed that rice grain yield was significantly increased ($P<0.05$) by soil amendment of biochar containing sulfur and ammonium sulfate (S1), 665.71 kg/rai, resulting in the total greenhouse gas intensity (GHGI) was smallest, 4.90 kgCO_2/kg yield. 2AP in grain were 3.46, 3.35, 3.28, and 3.05 ppm in treatments C, S2, F, and S1, respectively. The issue of increasing aroma compounds in rice will be studied with water management of alternate wetting and drying.

Keywords : greenhouse gas intensity ; 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) ; biochar ; sulfur

***Corresponding author. E-mail** : tassanee.j@ubu.ac.th

บทนำ

ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจะนำมาซึ่งความสูญเสีย และกระทบต่อความเป็นอยู่และวิถีชีวิตของมนุษย์โดยรวมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สำหรับผลกระทบต่อภาคเกษตร การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ส่งผลโดยตรงต่อระบบเพาะปลูกและปริมาณผลผลิตทางการเกษตร หรืออาจส่งผลถึงการระบาดของโรคและแมลงศัตรูพืช ซึ่งจะสร้างความเสียหายต่อผลผลิตทางการเกษตร โดยเฉพาะการปลูกข้าว ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญและทำรายได้หลักให้เกษตรกรในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ การกักเก็บคาร์บอนโดยถ่านชีวภาพหรือไบโอชาร์หรือถ่าน เป็นวัสดุที่ผลิตจากชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิสหรือกระบวนการให้ความร้อนโดยปราศจากออกซิเจน ผลผลิตจากกระบวนการดังกล่าวนี้จะได้ถ่านชีวภาพที่อุดมไปด้วยคาร์บอนที่สลายตัวตามธรรมชาติได้ยากถือเป็นการสะสมคาร์บอนในดินเกษตร ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งมีเทนและไนตรัสออกไซด์จากดิน รวมถึงประโยชน์ในมิติของการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อเพิ่มผลผลิต (Thammasom *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2017; Cai *et al.*, 2017) นอกจากการแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมแล้วเรื่องการเพิ่มผลผลิตข้าวทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในเวลาเดียวกัน ข้าวหอมมะลิของประเทศไทยได้รับความนิยมจากทั้งผู้บริโภคภายในประเทศและต่างประเทศ ด้วยความเป็นเอกลักษณ์ของข้าวที่มีความนุ่มและมีกลิ่นหอม ซึ่งความหอมของข้าวนี้เกิดจากการสะสมสาร 2-acetyl 1-pyrroline (2AP) ซึ่งเป็นสารหลักที่ส่งผลให้ข้าวมีกลิ่นหอม ความหอมของข้าวนี้เป็นลักษณะตามสายพันธุ์ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาเพื่อพัฒนาความหอมของข้าวที่ผ่านมาพบว่า นอกจากลักษณะทางพันธุกรรมแล้วปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม การจัดการเพาะปลูกและสภาพพื้นที่อาจส่งผลให้ข้าวหอมพันธุ์เดียวกัน ที่ปลูกในพื้นที่ต่างกันมีความหอมแตกต่างกัน (Jongkaewwattana *et al.*, 2005; Chinachanta *et al.*, 2020) ข้าวหอมมะลิจากแหล่งปลูกภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีคุณภาพทางกายภาพ-คุณภาพทางเคมีดีที่สุด และมีความหอมมากที่สุด (Sudtasarn *et al.*, 2020) นอกจากนี้ Changsri *et al.* (2016) ได้ศึกษาการขาดน้ำหลังออกดอก 7 วันของข้าวหอมมะลิ พบว่าทำให้ปริมาณสารหอม 2AP ในเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 และกข 15 สูงกว่าการขังน้ำตลอดการเพาะปลูก ทั้งในสภาพบ่อทดลองและแปลงปลูก และในพื้นที่ที่มีสภาพดินร่วนปนทรายทำให้สภาพการขาดน้ำเกิดขึ้นเร็วกว่าดินเหนียว ส่งผลให้พบปริมาณสารหอม 2AP สูงกว่าด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าการใส่ธาตุแมงกานีส ซัลเฟอร์ และแคลเซียม ทำให้ปริมาณสารหอม 2AP ในเมล็ดข้าวสูงขึ้น โดยวิธีการเพาะปลูกที่กระตุ้นให้สารหอม 2AP ในเมล็ดข้าวสูงขึ้น เช่น การขาดน้ำหลังการออกดอก การเพิ่มปริมาณธาตุซัลเฟอร์ในดิน มีความเชื่อมโยงกับวิธีการลดก๊าซเรือนกระจกจากนาข้าวเช่นการจัดการน้ำเปียกสลับแห้ง การเติมถ่านชีวภาพ การใช้ปุ๋ยที่มีส่วนผสมของซัลเฟอร์ (Jaimun *et al.*, 2019; Chidthaisong *et al.*, 2018; Qi *et al.*, 2020) ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารปรับปรุงคุณภาพดินจากถ่านชีวภาพที่เติมกำมะถันต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยคำนึงถึงการเพิ่มผลผลิตข้าวทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพปริมาณสารหอม 2AP ในข้าวขาวดอกมะลิ 105

วิธีดำเนินการวิจัย

พื้นที่ศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสารปรับปรุงคุณภาพดินในสภาพการขาดน้ำเพื่อลดก๊าซเรือนกระจกและเพิ่มสารหอม 2AP ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยการทดลองในแปลงนาของเกษตรกรในพื้นที่ ต.ศรีไค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี (15° 6’ 24.97” N, 104° 54’ 25.41” E) ดำเนินงานวิจัยในช่วงพฤษภาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 คุณสมบัติของดินในพื้นที่เป็น ดินร่วนทราย (Sandy loam) Sand 64.19%, Silt 29.38%, Clay 6.43% คุณสมบัติทางเคมีของดินซึ่งประกอบด้วย ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH 4.44) เป็นกรดรุนแรง, ปริมาณอินทรียวัตถุต่ำมาก (OM มีค่า 0.29%), ปริมาณคาร์บอน 0.19% ไนโตรเจนในดิน 0.06%, ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ต่ำมาก (CEC มีค่า 1.88 cmol/kg), ระดับความเค็มของดิน ไม่เค็ม (EC มีค่า 0.91 ds/m) และปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ ได้แก่ ฟอสฟอรัสต่ำมาก (P มีค่า 2.00 mg/kg), โพแทสเซียมต่ำมาก (K มีค่า 6.11 mg/kg) แคลเซียมต่ำมาก (Ca มีค่า 67.98 mg/kg), แมกนิเซียมต่ำมาก (Mg มีค่า 21.30 mg/kg)

การวางแผนการทดลองและการเตรียมสารปรับปรุงคุณภาพดิน

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) แบ่งเป็น 4 แปลงทดลอง 3 ซ้ำ ขนาดแปลงละ 20 ตารางเมตร ดังนี้ 1) Control เป็นแปลงควบคุม ไม่มีการเติมสารปรับปรุงดิน/ปุ๋ยยูเรีย/ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต 2) S-biochar1 แปลงที่มีการใส่สารปรับปรุงดินสูตร 1 (ถ่านชีวภาพที่เติมกำมะถันและปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต) 3) S-biochar2 แปลงที่มีการใส่สารปรับปรุงดินสูตร 2 (ถ่านชีวภาพที่เติมกำมะถัน) และ 4) Fertilizer แปลงที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี โดยใช้ปุ๋ยรองพื้นสูตร 16-20-0 อัตรา 25 กก./ไร่ ปุ๋ยแต่งหน้าใช้ปุ๋ยสูตร 46-0-0 ในอัตรา 20 กก./ไร่ ซึ่งเป็นลักษณะการทำนาตามแบบเกษตรกรในพื้นที่ตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร

ถ่านชีวภาพในการทดลองนี้เป็นถ่านไม้ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) โดยใช้เตาดินทรงโค้ง ที่อุณหภูมิ 300-350 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 5 วัน ผลิตและจำหน่ายโดยบริษัทวี*กรีน*อะกริคัลเจอร์ จำกัด ถ่านชีวภาพมีปริมาณคาร์บอน 69.5% ไนโตรเจน 0.33% การเตรียมสารปรับปรุงคุณภาพดินเริ่มจากบดถ่านเป็นผงและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร นำมาใช้เป็นส่วนประกอบหลักของสารปรับปรุงคุณภาพดินที่ใช้ในการทดลองนี้ มี 2 สูตรคือ S-Biochar1 ประกอบด้วย ผงถ่านชีวภาพ (อัตรา 1 ตัน/ไร่) ผงกำมะถัน (อัตรา 1.5 กก./ไร่) ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต (อัตรา 20 กก./ไร่) และ S-Biochar2 ประกอบด้วย ผงถ่านชีวภาพ (อัตรา 1 ตัน/ไร่) ผงกำมะถัน (อัตรา 1.5 กก./ไร่) โดยทั้ง 2 สูตรมีวิธีการเตรียมเหมือนกันคือ ส่วนผสมทุกอย่างถูกบดและปั่นผสมรวมกันเติมน้ำและภูไมท์เพื่อเป็นตัวประสาน (อัตรา 50 กก./ไร่) จากนั้นปั่นด้วยเครื่องผสมจนเป็นเม็ดขนาด 0.5 – 1 เซนติเมตร เมื่อใช้หว่านลงไปในแปลงทดลองสารปรับปรุงคุณภาพดินจะจมตัวลงไปที่ผิวดินและตามรอยแตกของดินนา

การจัดการการเพาะปลูก

เริ่มจากการไถพรวน หว่านเมล็ดข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 อัตรา 20 กก./ไร่ ในวันที่ 6 พฤษภาคม พ.ศ. 2564 (Day 0) การจัดการน้ำเป็นไปตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นลักษณะนาน้ำฝน โดยในช่วงที่ทำการเพาะปลูกมีการวัดความสูงของน้ำ

ในนาทุกครั้งที่เก็บตัวอย่างก๊าซ การควบคุมวัชพืชโดยการตัดหญ้าและต้นข้าวในช่วง 72 วันหลังจากหว่านข้าว (Day 72) ไม่มีการใช้ยาฆ่าแมลงหรือสารกำจัดศัตรูพืช การใส่ปุ๋ยหรือสารปรับปรุงคุณภาพดินเป็นไปตามชุดทดลอง โดยการใส่สารปรับปรุงดินและปุ๋ยเคมี 2 ครั้ง ในช่วงก่อนข้าวแตกกอ (Day 59) และระยะตั้งท้อง (Day 138) เก็บเกี่ยวข้าวในวันที่ 7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 (Day 185)

การวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก

เก็บตัวอย่างก๊าซเรือนกระจกทุก 2 สัปดาห์ ตลอดการเพาะปลูกโดยวิธี Static chamber method ช่วงเวลาการเก็บตัวอย่างอยู่ในระหว่างช่วง 09.00-12.00 น. โดยนำกล่องอะคริลิคทึบแสงขนาด 30×30×50 เซนติเมตร ไปครอบต้นข้าว ปิดรูไม่ให้อากาศภายนอกเข้าไปในกล่อง วัดความสูงของกล่องที่เหนือระดับน้ำในนาขึ้นไปในขณะเก็บตัวอย่าง เปิดพัดลมภายในกล่องเพื่อให้อากาศมีความเข้มข้นสม่ำเสมอกัน พร้อมใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิภายในกล่องในขณะเก็บตัวอย่างอากาศที่เวลา 0, 5, 10 และ 15 นาที นำตัวอย่างก๊าซที่เก็บไว้ในขวดแก้วสุญญากาศไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกด้วยเครื่อง Gas Chromatography และคำนวณอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ มีเทน และไนตรัสออกไซด์ โดยวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาตามเวลาที่เก็บตัวอย่างคำนวณหาการอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของ (Zheng et al. 2003) โดยใช้สมการ

$$F = 60 \times T_0/T \times P/P_0 \times H \times \rho \times dC/dt \qquad (1)$$

เมื่อ F = อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (mg/m^2/h)

T = อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยภายในกล่องเก็บตัวอย่าง (°K)

P = ความกดอากาศ (Pa)

H = ความสูงของช่องว่างในกล่อง (m)

ρ = ความหนาแน่นของก๊าซ โดย CH_4 = 0.7154 g/l, และ N_2O = 1.963 g/l ที่สภาวะมาตรฐาน (T_0 = 273 K, $P_0 = 1\ atm$)

dC/dt = อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นก๊าซเรือนกระจก CH_4 และ N_2O ในกล่องเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่าง (ppm/min)

ผลรวมของก๊าซเรือนกระจกแต่ละตัวที่ปล่อยตลอดฤดูกาลเพาะปลูกคำนวณโดย integrate พื้นที่ใต้กราฟของอัตราการปลดปล่อยรายวันตลอดการเพาะปลูก (g/m^2)

การวิเคราะห์คุณสมบัติดิน ผลผลิตและความหอมของข้าว เก็บตัวอย่างดิน 3 จุด ที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร จากแต่ละแปลงทดลองก่อนการทดลองและหลังการใส่สารปรับปรุงดินครั้งที่ 2 เป็นเวลา 15 วัน คุณสมบัติของดินที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH), ปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ในดิน (C, N, S), ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM), ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC), ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (EC) การวัดผลผลิตข้าวหลังการเก็บเกี่ยวโดยเกี่ยว

ข้าวในพื้นที่ขนาด 1 ตารางเมตร สุ่มเก็บ 3 จุดในแต่ละแปลงทดลอง โดยชั่งน้ำหนักข้าวเปลือก การตรวจวิเคราะห์สารหอม2AP ในเมล็ดข้าว ใช้เทคโนโลยี KASP SNPline Super high throughput โดยห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เอกลักษณ์ดีเอ็นเอข้าวไทย เพื่อการส่งออก

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ นำข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ข้อมูลผลผลิตข้าว และความหอมของข้าว มาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางเดียว ด้วย One-way ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแปลงทดลองด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการวิจัย

การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของดินในการทดลองในแปลงทดลองก่อนและหลังใส่สารปรับปรุงคุณภาพดิน โดยในระหว่างการทดลองมีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดิน 2 ครั้ง คือในช่วงต้นข้าวแตกกอ และช่วงข้าวตั้งท้อง โดยใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินปริมาณ 12.5 กก./แปลง ในทรีตเมนต์ S-biochar1 และ S-biochar2 และใส่ปุ๋ยเคมี 2 ครั้งในแปลง Fertilizer ตามการออกแบบการทดลอง จากนั้นสุ่มเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร ตากดินให้แห้งในที่ร่ม (air dried) บดและทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินก่อนและหลังใส่สารปรับปรุงคุณภาพดิน (ตารางที่ 1)

Table 1 Properties of soils before and after soil amendment application

Treatment	pH (1:1)	ECe[1] (ds/m)	OM[2] (%)	C[3] (%)	N[3] (%)	CEC[4] (Me/100g)	Plant nutrients content (mg/kg)			
							P[5]	K[6]	Ca[6]	Mg[6]
Control before	4.44	0.91	0.29	0.19	0.06	1.88	2.00	6.11	67.98	21.30
Control after	4.22	0.93	1.05	0.75	0.07	2.50	3.15	12.97	52.80	32.75
S-biochar 1	3.84	1.23	1.55	1.38	0.11	2.50	5.37	10.76	113.89	12.88
S-biochar 2	4.61	0.67	1.19	1.09	0.09	2.50	7.42	18.80	79.34	21.68
Fertilizer	3.91	1.95	1.41	0.98	0.11	3.13	7.54	20.71	118.90	13.86

Notes: Analytical methods were [1] Saturated paste extraction, EC meter, [2] Walkley and Black, [3] Flash combustion, [4] NH_4OAc pH 7.0 Distillation, [5] Bray II extraction, Spectroscopy, [6] NH_4OAc extraction, Atomic spectroscopy

เปรียบเทียบคุณสมบัติของดินหลังจากที่มีการใส่ S-biochar1 (S1), S-biochar2 (S2) และแปลงใส่ปุ๋ยเคมี (F) พบว่า ดินมีอินทรียวัตถุ คาร์บอน ไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ ได้แก่ โพแทสเซียม แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแปลงควบคุม (Control) อย่างไรก็ตามปริมาณแมกนีเซียมมีค่าลดลง ส่วนค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมีค่าใกล้เคียงกันระหว่างทรีตเมนต์ที่ใส่และไม่ได้สารปรับปรุงคุณภาพดิน แต่มีค่า CEC สูงขึ้นเมื่อเทียบกับดินก่อนปลูก

ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านชีวภาพ (Biochar), และสารปรับปรุงคุณภาพดิน (S-biochar) จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ดังภาพที่ 1 และ 2

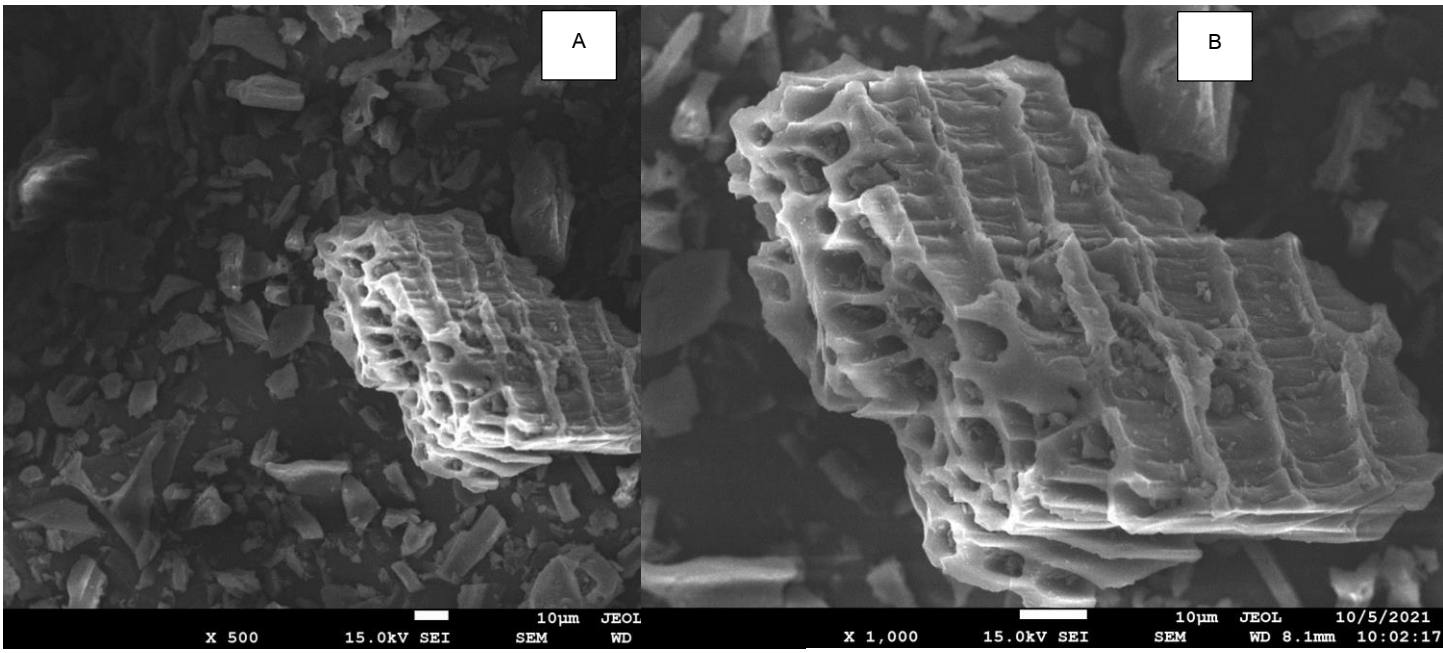

Figure 1 Surface characteristics of biochar A) magnification 500 times B) magnification 1,000 times

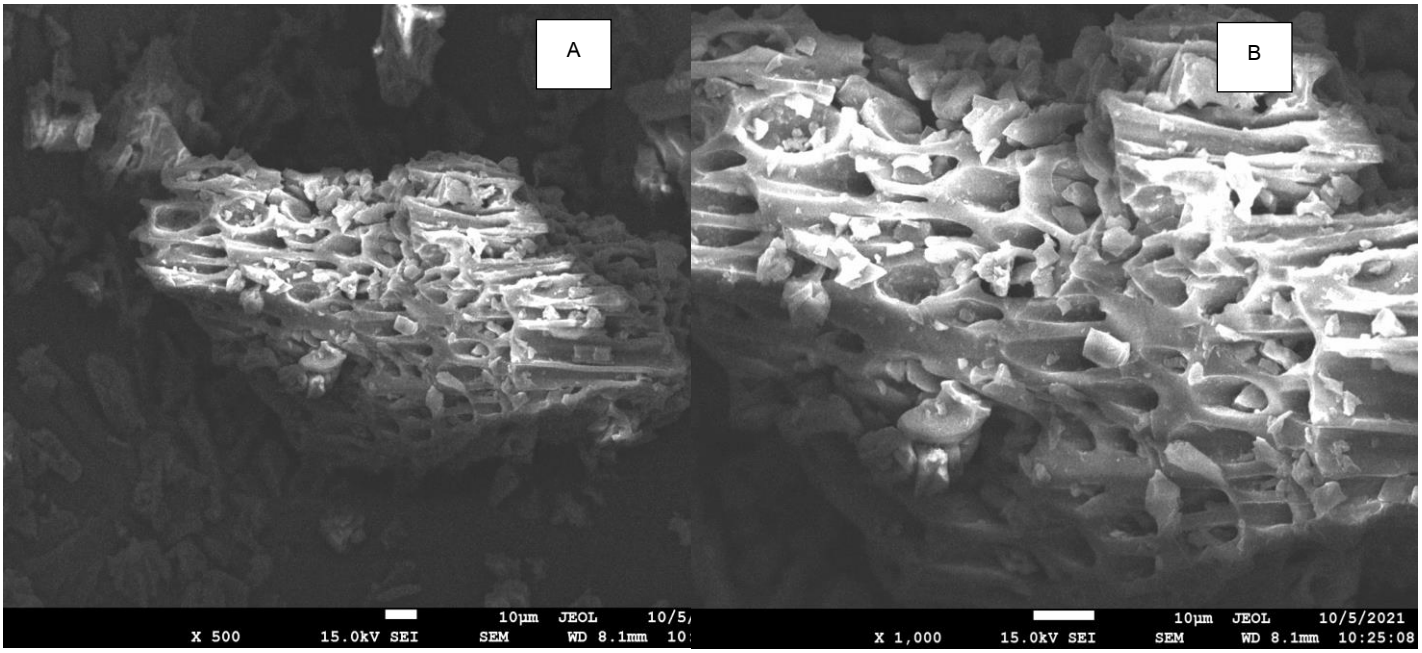

Figure 2 Surface characteristics of S-biochar1 A) magnification 500 times B) magnification 1,000 times

จากภาพถ่าย SEM ของลักษณะพื้นผิวของสารปรับปรุงคุณภาพดิน S-biochar1 พบว่ามีผงกำมะถันและปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตและภูไมท์ไปเกาะตามพื้นผิวและในรูพรุนของถ่านชีวภาพ และผลการทดลองคุณสมบัติเบื้องต้นของถ่านชีวภาพเปรียบเทียบกับสารปรับปรับปรุงคุณภาพดินพบว่า ถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และค่าเฉลี่ยของขนาดรูพรุน สูงกว่าสารปรับปรับปรุงคุณภาพดิน เนื่องจากการเติมผงกำมะถันและปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตเข้าไปในช่องว่างรูพรุนของถ่านชีวภาพได้ นอกจากนั้นยังพบว่าสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ลดลงในสารปรับปรุงคุณภาพดินจากการเติมสารต่างๆ ทำให้ปริมาณคาร์บอนลดลงในขณะที่ปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพ

ผลผลิตข้าวและความหอมของข้าว

การปลูกข้าวตั้งแต่เริ่มหว่านจนถึงระยะเก็บเกี่ยวมีอายุ 185 วัน เมื่อทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตของข้าวทั้ง 4 แปลง พบว่าแปลงที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดิน S-biochar1 ให้ผลผลิตข้าวสูงที่สุด 665.71 กิโลกรัม/ไร่ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับแปลงที่มีผลผลิตรองลงมาคือแปลงที่ใส่ปุ๋ยเคมี, แปลงS-biochar2 และแปลงควบคุม ให้ผลผลิตเมล็ดข้าวมีค่าเท่ากับ 516.16, 452.91 และ 315.15 กิโลกรัม/ไร่ ตามลำดับ ส่วนความหอมของข้าว วัดได้จากปริมาณสารหอม 2AP ในเมล็ดข้าว พบว่าแปลงควบคุมมีความหอมสูงที่สุด 3.46 ppm รองลงมาคือแปลงที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดิน S-biochar2, แปลงที่ใส่ปุ๋ยเคมี, และแปลงที่ใส่สารปรับปรุงคุณภาพดิน S-biochar1 โดยเมล็ดข้าวมีปริมาณ 2AP เท่ากับ 3.35, 3.28 และ 3.05 ppm ตามลำดับ ซึ่งความหอม 2AP ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ

Sudtasarn *et al*. (2020) พบว่า คุณสมบัติทางเคมีและความหอมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในเขตพื้นที่ส่งเสริมการปลูกข้าวหอมมะลิมีปริมาณอมิโลส 15.9% มีกลิ่นหอมระดับ 1.89 (หอมปานกลาง) ปริมาณสารหอม 2AP เฉลี่ย 2.33 ppm ปริมาณโปรตีน 6.94% ส่วนนอกเขตพื้นที่ส่งเสริมการปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณอมิโลส 15.6% มีกลิ่นหอมระดับ 1.26 (หอมเล็กน้อย) ปริมาณสารหอม 2AP เฉลี่ย 1.93 ppm ปริมาณโปรตีน 7.39% จากการศึกษาพบว่าการเติมสารปรับปรุงคุณภาพดินทั้งสูตร S-biochar1 และ S-biochar2 สามารถเพิ่มผลผลิตข้าวได้แต่ยังไม่สามารถเพิ่มปริมาณสารหอม 2AP ในเมล็ดข้าวได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับแปลงที่ใช้ปุ๋ยเคมีตามปกติ อาจเนื่องมาจากในการศึกษาครั้งนี้นาข้าวทุกแปลงมีน้ำขังในระดับ 10 – 20 เซนติเมตรจากผิวดินอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ระยะข้าวแตกกอไปจนถึงเก็บเกี่ยวทำให้ข้าวไม่มีสภาวะความเครียดน้ำ ดังการศึกษาของ Jongkaewwattana *et al.* (2005) ที่พบว่าการเจริญเติบโตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ภายใต้สภาวะความเครียดน้ำที่เกิดจากสภาพแห้งแล้งเป็นตัวกระตุ้นทำให้การสร้างสาร proline ที่เป็นสารตั้งต้นของการสังเคราะห์สารหอม 2AP ในเมล็ดข้าวและใบเพิ่มขึ้นทำให้ข้าวมีความหอมเพิ่มขึ้นได้

ผลการศึกษาก๊าซเรือนกระจกจากนาข้าว

อัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว พบว่ารูปแบบการปล่อยก๊าซมีเทนจากแปลง S-biochar1, S-biochar2 และ Fertilizer มีความคล้ายคลึงกันเนื่องจากมีการใส่สารอินทรีย์ในนาข้าวในช่วงก่อนข้าวแตกกอ (Day 59) และระยะตั้งท้อง (Day 138) ซึ่งหลังจากการใส่สารอินทรีย์แล้วมีน้ำขังทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้อากาศจึงมีการปล่อยมีเทนสูงขึ้นโดยพบปริมาณการปล่อยมีเทนสูงสุดในช่วงวันที่ 86-114 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใส่ปุ๋ยเคมีตามปกติในแปลง Fertilizer มีค่าสูงกว่าแปลง S-biochar1 เนื่องจากแอมโมเนียมซัลเฟตและซัลเฟอร์ที่เติมลงไปช่วยในการลดก๊าซมีเทนจากนาข้าว โดยกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม Sulfate reducing bacteria ซึ่งเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่แข่งขันกับกลุ่ม Methanogen ทำให้การสร้างมีเทนน้อยลงจึงทำให้การปล่อยมีเทนลดลงได้ ในขณะที่แปลง Control มีการปล่อยมีเทนน้อยในช่วงแรกของการเจริญเติบโตเนื่องจากไม่มีการเติมสารอินทรีย์ แต่จะมีการปล่อยมีเทนสูงในช่วงข้าวเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ (reproductive stage) เนื่องจาก root exudates ที่ต้นข้าวปล่อยออกมาจากรากเป็นสารคาร์บอนที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดมีเทน ซึ่งของเหลวนี้รากข้าวจะปล่อยออกมาในระยะข้าวออกดอกมากที่สุด รองลงมาเป็นระยะรวงแก่ (Kludze *et al*., 1993) จึงพบปริมาณการปล่อยมีเทนสูงในช่วง 145-170 วันของการเพาะปลูก ดังภาพที่ 3

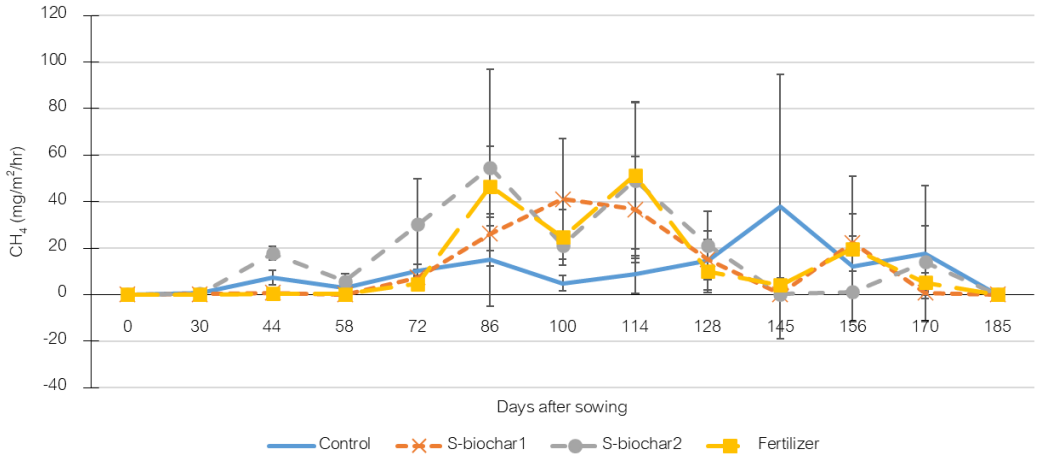

Figure 3 Methane emission during cultivation period

การตรวจวัดอัตราการปล่อยไนตรัสออกไซด์ตลอดการเพาะปลูก พบรูปแบบการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากแปลงทดลองทั้งหมดมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน คือ มีอัตราการปล่อยไนตรัสออกไซด์สูงในช่วงข้าวเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์คือระยะออกดอกถึงระยะพลับพลึง ดังภาพที่ 4 โดยแปลงทดลองที่มีอัตราการปล่อยไนตรัสออกไซด์มากที่สุด คือ S-biochar1 รองลงมาคือ S-biochar2, Fertilizer, และ Control ตามลำดับ

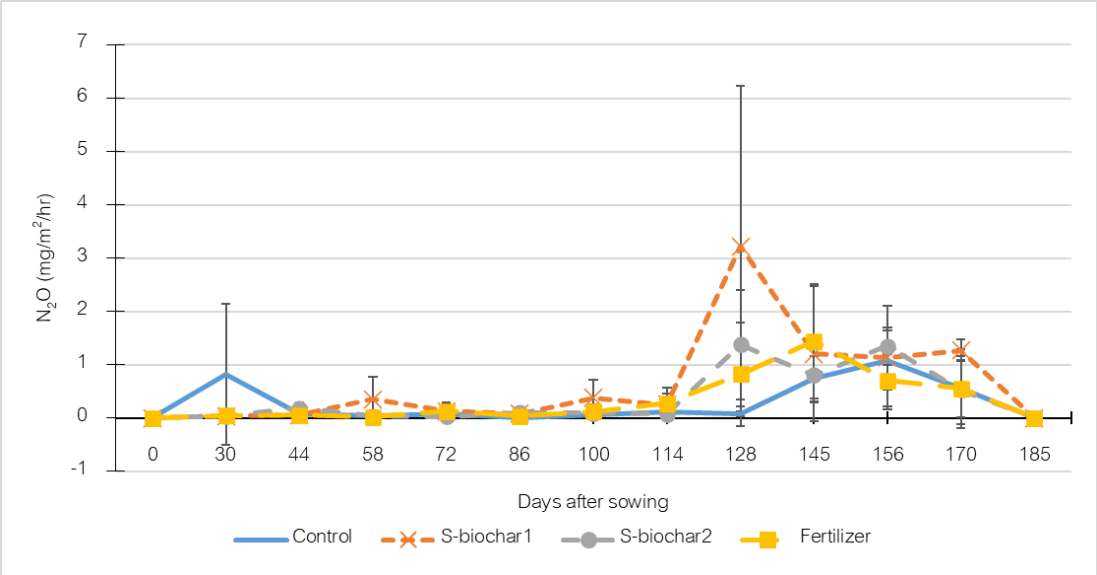

Figure 4 Nitrous oxide emission during cultivation period

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากนาข้าวตลอดการเพาะปลูก ประกอบด้วย มีเทนและไนตรัสออกไซด์ ซึ่งมีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) ในช่วงระยะเวลา 100 ปี ตาม IPCC Fifth Assessment (AR5) 2014 เท่ากับ 28 และ 265 ตามลำดับ (Myhre *et al.,* 2013) นำมาคำนวณเป็นค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยเทียบเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (GWP) พบว่าการเติมสารปรับปรุงคุณภาพดินหรือปุ๋ยเคมีในแปลง S1, S2 และ F มีค่า GWP แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามผลผลิตที่ได้เป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วย ดังแสดงในค่า Greenhouse gas intensity (GHGI) คือปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยผลผลิตข้าวที่เก็บเกี่ยวได้ และค่า 2AP คือปริมาณสารหอมในเมล็ดข้าว ดังแสดงในตารางที่ 2

Table 2 Effects of S-biochar application on greenhouse gases emission, grain yield and 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) aroma compound

Treatment	CH_4 (g/m^2)	N_2O (g/m^2)	GWP ($kgCO_2e/m^2$)	Grain yield (kg/rai)	GHGI $kgCO_2/kg$	2AP (ppm)
Control	44.69a	1.26a	1.59a	315.15a	8.05	3.46b
S-biochar1	50.52a	2.6b	2.10ab	665.71b	5.05	3.05a
S-biochar2	73.52b	1.48a	2.45b	452.91ab	8.66	3.35ab
Fertilizer	55.89ab	1.34a	1.92ab	516.16ab	5.95	3.28ab

Notes: Data followed by different letters indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$, DMRT test

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าปริมาณมีเทนและไนตรัสออกไซด์ที่ปล่อยจากแปลง Control มีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากไม่มีการเติมสารอินทรีย์หรือปุ๋ยเคมีลงไปในแปลง อย่างไรก็ตามผลผลิตที่ได้จะมีปริมาณน้อยที่สุดเช่นกัน ซึ่งโดยปกติการทำนาของเกษตรกรไทยจะใส่ปุ๋ยเคมีเพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิตข้าว ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อผลผลิตข้าว (GHGI) จึงพบว่า แปลง S-biochar1 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อผลผลิตข้าวน้อยที่สุด 4.90 $kgCO_2/kg$ รองลงมาคือแปลง Fertilizer ซึ่งเป็นการทำนาตามวิธีปกติของเกษตรกรมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อผลผลิตข้าว 5.58 $kgCO_2/kg$ ค่า GHG Intensity มีความสัมพันธ์กับคาร์บอนฟุตปริ้นท์ของข้าวหอมมะลิเนื่องจากร้อยละ 95 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมาจากการเพาะปลูก (Mungkung *et al*., 2011) ดังนั้นหากสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยการจัดการวิธีการเพาะปลูกได้อย่างเหมาะสมจะเป็นเป้าหมายสำคัญในการลดก๊าซเรือนกระจกเพื่อการพัฒนาการเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและลดแรงกดดันด้านการค้าข้าวในระดับสากล

วิจารณ์ผลการวิจัย

คุณสมบัติของดิน ปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์ในดินหลังการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดิน แสดงให้เห็นว่าการเติมสารปรับปรุงคุณภาพดินในแปลง S-biochar1 และ S-biochar2 สามารถเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินทั้งปริมาณอินทรียวัตถุ คาร์บอน ไนโตรเจน และปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ ได้แก่ โพแทสเซียม แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแปลงควบคุม (C) และหากเปรียบเทียบแปลง S-biochar1 กับแปลง Fertilizer พบว่าดินในแปลงที่ใส่สารปรับปรุงคุณภาพดิน S-biochar1 มีความอุดมสมบูรณ์ของดินดีกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการที่ถ่านชีวภาพมีโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากและมีโครงสร้างทางเคมีที่เอื้อต่อการดูดซับธาตุอาหารต่างๆ ที่มีประจุบวกได้ดี นอกจากนี้คาร์บอนในถ่านชีวภาพมีความเสถียรคล้ายโครงสร้างของฮิวมิกจึงยากต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ดิน แต่กลับช่วยส่งเสริมการย่อยสลายสารอินทรีย์อื่นที่มีความเสถียรต่ำได้เร็วขึ้น ถ่านชีวภาพจึงช่วยทำให้ดินสามารถรักษาปริมาณธาตุอาหารให้คงอยู่ในดินได้นานขึ้น (Sriburi & Wijitkosum, 2016) และทำให้ผลผลิตข้าวในแปลง S-biochar1 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับแปลงทดลองที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพ โดยผลผลิตของข้าวทั้ง 4 แปลง พบว่าแปลงที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดิน S-biochar1 (S1) ให้ผลผลิตข้าวสูงที่สุด 665.71 กิโลกรัม/ไร่ รองลงมาคือแปลงที่ใส่ปุ๋ยเคมีตามปกติ (F), สารปรับปรุงคุณภาพดิน S-biochar1 (S2) และแปลงควบคุม (C) ให้ผลผลิตเมล็ดข้าวมีค่าเท่ากับ 516.16, 452.91 และ 315.15 กิโลกรัม/ไร่ ตามลำดับ

แปลงทดลองที่มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนมากที่สุด คือ S-biochar2 รองลงมาคือ Fertilizer, S-biochar1 และ Control ตามลำดับ (ตารางที่ 2) จากข้อมูลภาคสนามการวัดระดับน้ำในนาข้าวตลอดฤดูกาลเพาะปลูก 2564 นี้พบว่ามีน้ำขังในระดับ 10 – 20 เซนติเมตรจากผิวดิน ตั้งแต่ Day72 ไปจนถึงเก็บเกี่ยว Day185 ซึ่งสภาพน้ำขังในทั้ง 4 แปลงทดลอง และปริมาณสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นในแปลงที่มีการเติมสารปรับปรุงคุณภาพดิน เป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นในนาข้าว ซึ่งส่งผลให้แปลง S-biochar2 มีอัตราการปล่อยมีเทนสูงสุด แต่เมื่อมีการเติมปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตใน S-biochar1 ทำให้มีเทนลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการใส่ถ่านชีวภาพหรือการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามไนตรัสออกไซด์กลับสูงที่สุดในแปลง S-biochar1 อันเนื่องมาจากในนาข้าวสภาพที่มีน้ำท่วมขัง การเกิดไนตรัสออกไซด์ส่วนใหญ่มาจากกระบวนการ denitrification การเติม S-biochar1 ที่มีไนเตรตเป็นองค์ประกอบสูงทำให้เกิดปริมาณไนตรัสออกไซด์สูงขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Yoo *et al*., (2016) ที่พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากฟางข้าวกระตุ้นให้เกิด N_2O ในขณะที่ CO_2 CH_4 ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งผลการศึกษาถึงอิทธิพลของการใส่ถ่านชีวภาพในนาข้าวมีทั้งกรณีที่เพิ่มและลดการเกิดไนตรัสออกไซด์ เนื่องจากกระบวนการเกิดไนตรัสออกไซด์มาได้ทั้งจากกระบวนการ nitification และ denitrification ซึ่งขึ้นอยู่กับ water-filled pore space (WFPS) (Bateman & Baggs, 2005; Sanchez-Garcia *et al*., 2014)

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อผลผลิตข้าว (Greenhouse gas intensity: GHGI) พบว่า การใช้สารปรับปรุงคุณภาพดิน S-biochar1 สามารถลด GHGI ลงได้ถึงร้อยละ 35 เมื่อเทียบกับแปลงควบคุม และ GHGI ลดลงร้อยละ 12 เมื่อเทียบกับแปลงที่ใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการใช้ถ่านชีวภาพควรใช้ควบคู่กับปุ๋ยดังสูตร S-biochar1 จึงจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้ถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการเกิดมีเทนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากการเติม S-biochar2 ในขณะที่ผลผลิตข้าว

เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับแปลงควบคุม ส่วนการศึกษาวิธีการเพิ่มสารหอม 2AP ในเมล็ดข้าวจากการเพาะปลูกโดยการเติมสารปรับปรุงคุณภาพดิน S-biochar1 และ 2 ยังไม่พบความแตกต่าง ซึ่งจากการศึกษาของ Chinachanta *et al.* (2020) พบความสัมพันธ์ของสารหอม 2AP ในเมล็ดข้าวกับ อินทรีย์วัตถุในดิน ไนโตรเจนทั้งหมด และกรดฮิวมิกในดินปลูกข้าว นอกจากนี้ Changsri *et al.* (2016) ยังพบว่าการจัดการน้ำแบบปล่อยน้ำออกหลังข้าวออกดอก 7 วัน จะช่วยเพิ่มสารหอม 2AP ในเมล็ดข้าวได้ ซึ่งการศึกษาเพิ่มเติมควรพิจารณาเรื่องดินมีสภาพแห้งในบางช่วงหรือช่วงท้ายของการเจริญเติบโตและมีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดิน S-biochar1 เพื่อเพิ่มผลผลิตทั้งในด้านน้ำหนักและความหอมของข้าวต่อไป

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้คำนึงถึงผลผลิต ความหอมของข้าว ความอุดมสมบูรณ์ของดิน และ การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้สารปรับปรุงดินจากถ่านชีวภาพที่เติมกำมะถันและปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตสามารถช่วยลดก๊าซเรือนกระจกลงได้จากการเพิ่มผลผลิตข้าว และทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์เพิ่มขึ้น แม้ว่าการเพิ่มความหอมของข้าวจะยังเป็นประเด็นที่ต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม ในแง่ของการส่งเสริมการพัฒนาการเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและลดแรงกดดันด้านการค้าข้าวในระดับสากล การใช้สารปรับปรุงดินจากถ่านชีวภาพที่เติมกำมะถันและปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต (S-biochar1) มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อผลผลิตข้าวน้อยที่สุด 4.90 $kgCO_2/kg$ ซึ่งเป็นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยการจัดการวิธีการเพาะปลูกได้อย่างเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2564 และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ในการสนับสนุนอุปกรณ์และห้องปฏิบัติการในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Bateman, E. J. & Baggs, E. M. (2005). Contributions of nitrification and denitrification to N_2O emissions from soils at different water-filled pore space. *Biology and Fertility of Soils, 41*(6), 379–388.

Cao, Y., Shan, Y., Wu, P., Zhang, P., Zhang, Z., Zhao, F. & Zhu, T. (2021). Mitigating the global warming potential of rice paddy fields by straw and straw-derived biochar amendments, *Geoderma, 396*: 115081, 9p.

Cai, F., Feng, Z. & Zhu, L. (2017). Effects of biochar on CH_4 emission with straw application on paddy soil, Soil and Landscape Ecology

Changsri, R., Sudtasarn, G., Khongsuwan, P., Rakchum, P., Suriyaarunroj, D., Chuenban, T. & Wongboon, W. (2016). Factors affecting the quality of Thai Hom Mali rice, *Thai Rice Research Journal, 7*(1), 20-44. (in Thai)

Chidthaisong, A., Cha-un, N., Rossopa, B., Buddaboon, C., Kunuthai, C., Sriphirom, P., Towprayoon, S., Tokida, T., Padre, A. T. & Minamikawa, K. (2018). Evaluating the effects of alternate wetting and drying (AWD) on methane and nitrous oxide emissions from a paddy field in Thailand. *Soil Science and Plant Nutrition*, *64*(1), 31-38.

Chinachanta, K., Herrmann, L., Lesueur, D., Jongkaewwattana, S., Santasup, C. & Shutsrirung, A. (2020). Influences of farming practices on soil properties and the 2-Acetyl-1-pyrroline content of Khao Dawk Mali 105 rice grains. *Applied and Environmental Soil Science, 2020*: 8818922, 14p.

Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jaimun, C., Aumtong, S., Chaipimonplin, T. & Chotamonsak, C. (2019). Affecting factors on greenhouse gas emission under rice cultivation with alternate wetting and drying water management. *Journal of Agri. Research & Extension, 37*(2), 47-59. (in Thai)

Jongkaewwattana, S., Meechoui, S., Tulyathan, V., Wongpornchai, S., Polthanee, A. & Pholwattana, A. (2005). Influences of environmental and farming practices on qualities of Khao Dawk Mali 105 rice, In *Proceeding Multiple Cropping Center Seminar*. (pp. 125-133). Thailand: Chiang Mai. (in Thai)

Kim, J., Yoo, G., Kim, D., Ding, W. & Kang, H. (2017). Combined application of biochar and slow-release fertilizer reduces methane emission but enhances rice yield by different mechanisms. *Applied Soil Ecology*, *117-118*, 57-62.

Kludze, H.K., DeLaune, R.D. and Patrick, W.H. (1993). Aerenchyma formation and methane and oxygen exchange in rice. *Soil Science Society of American Journal, 57*(2), 386-391

Mungkung, R., Gheewala, S.H., Poovarodom N. and Towprayoon, S. (2011). Carbon Footprinting of Rice Products. *Kasetsart Engineering Journal*, *75,* 53-60 (in Thai)

Qi, L., Pokharel, P., Chang., S. X., Zhou, P., Niu, H., He, X., Wang, Z. & Gao, M. (2020). Biochar application increased methane emission, soil carbon storage and net ecosystem carbon budget in a 2-year vegetable-rice rotation. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 292*: 106831, 12p.

Sanchez-Garcia, M., Roig, A., Sanchez-Monedero, M. A. & Cayuela, M. L. (2014). Biochar increases soil N_2O emissions produced by nitrification-mediated pathways. *Frontiers in Environmental Science, 2*(25), 1–10. doi:10.3389/fenvs.2014.00025

Sriburi, T. & Wijitkosum, S. (2016). Biochar amendment experiments in Thailand: Practical examples, In Bruckman, V.J., Varol, E.A., Uzun, B.B. & Liu, J., *Biochar A Regional Supply Chain Approach in View of Climate Chang Mitigation.* (p.368-389). Cambridge: Cambridge University Press.

Sudtasarn, G., Sukviwat, W., Maneenin, P. & Maneejan, D. (2020). Quality and aroma of Khao Dawk Mali 105 rice variety grown inside and outside of Hom Mali Rice recommended planting areas. In *Proceeding Rice and Temperate Cereal Crops Annual Conference 2020.* (pp. 37-40). Thailand: Khon Kaen. (in Thai)

Thammasom, N., Vityakon, P., Lawongsa, P. & Saenjan, P. (2016). Biochar and rice straw have different effects on soil productivity, greenhouse gas emission and carbon sequestration in Northeast Thailand paddy soil. *Agriculture and Natural Resources, 50*, 192-198.

Yoo, G., Kim, Y. J., Lee, Y. O., Ding, W. (2016). Investigation of greenhouse gas emissions from the soil amended with rice straw biochar. *KSCE Journal of Civil Engineering, 20*(6), 2197–2207. doi:10.1007/s12205-015-0449-2

Zheng, X., Huang, Y., Wang, Y., Wang, M., 2003. Seasonal characteristics of nitric oxide emission from a typical Chinese rice–wheat rotation during the non-waterlogged period. *Global Change Biology, 9*(2), 219–227.