

บทความวิจัย (Research Article)**การใช้สารปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อเพิ่มความหอมของข้าวดอกมะลิ 105 และลดการปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าว**

นิตยา ทองพูล¹, สุทธนา ปลอดสมบูรณ์¹, ช่อทิพย์ กันทโชติ¹ และ ทศนีย์ เจียรพสุธนันต์^{1*}

Usage of soil amendment to increase fragrance of Khao Dawk Mali 105 and reducing methane emissions in rice fields

Nittaya Thongpoon¹, Sutthana Plodsomboon¹, Chortip Kantachot¹ and Tassanee Jiaphasuanan^{1*}

¹ Department of Biological Science, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190

* Corresponding author: tassanee.j@ubu.ac.th

Health Science, Science and Technology Reviews. 2024;17(2):36-47.

Received: 24 March 2024; Revised: 20 July 2024; Accepted: 20 August 2024

บทคัดย่อ

การพัฒนาสารปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อลดการปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าว มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการจัดการปุ๋ยในข้าว 3 แบบ ได้แก่ การใช้ปุ๋ยเคมีแบบดั้งเดิม การใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับซัลเฟอร์ และการใช้สารปรับปรุงคุณภาพดินที่มีส่วนประกอบของถ่านชีวภาพต่อการปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวและผลผลิตของข้าว โดยทำการศึกษาดูพื้นที่แปลงทดลอง ตำบลเมืองศรีโค อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี การออกแบบชุดการทดลองประกอบด้วย 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) C (ชุดควบคุม) ไม่มีการเติมสารปรับปรุงคุณภาพดินและปุ๋ยทุกชนิด 2) F (Fertilizer) ใช้ปุ๋ยเคมีแบบดั้งเดิม 3) FS (Fertilizer/Sulfur) ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับซัลเฟอร์ และ 4) FBS (Fertilizer/Biochar/Sulfur) ใช้สารปรับปรุงคุณภาพดินที่มีส่วนประกอบของปุ๋ยเคมี ถ่านชีวภาพ และซัลเฟอร์ ติดตามวัดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซมีเทนตลอดฤดูกาลเพาะปลูก ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลอง F, FS และ FBS ที่มีการจัดการปุ๋ยในแปลงทดลองต่างกัน แสดงให้เห็นว่าชุดการทดลอง FS และ FBS สามารถลดการปล่อยมีเทนในนาข้าวได้เมื่อเทียบกับชุดการทดลอง F คิดเป็น 19.06% และ 5.68% ตามลำดับ อีกทั้งยังให้ผลผลิตข้าวสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ซึ่งมีน้ำหนักเมล็ดเฉลี่ยอยู่ที่ 91.13 และ 91.00 กรัม/บ่อ ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-pyrroline (2AP) พบว่าในแต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยชุดการทดลอง FBS ให้ปริมาณสารหอมมากที่สุดเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่น จากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของสารปรับปรุงคุณภาพดินที่ให้ผลลัพธ์การลดการปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวได้ดีกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีแบบดั้งเดิม รวมทั้งสามารถเพิ่มปริมาณสารหอม 2AP ในเมล็ดข้าวซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเพิ่มมูลค่าทางการเกษตรและการแก้ปัญหาทางสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : มีเทน, ถ่านชีวภาพ, นาข้าว, สารหอม 2AP

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Abstract

This research aimed to study the influence of fertilizer management on rice in three different regimes: chemical fertilizer alone, chemical fertilizer combined with sulfur, and the use of soil amendments containing biochar components to mitigate methane emissions in rice fields and improve rice yield. The study was conducted in experimental plots located in Mueang Sri Kai Sub-district, Warinchamrab District, Ubon Ratchathani Province. The experimental design comprised four treatments: 1) C (Control), without soil amendments and any type of fertilizer, 2) F (Fertilizer), conventional method, using only chemical fertilizer, 3) FS (Fertilizer/Sulfur), using chemical fertilizer combined with sulfur, and 4) FBS (Fertilizer/Biochar/Sulfur), using soil amendments containing chemical fertilizer, biochar, and sulfur. Methane emissions were monitored throughout the growing season. Results showed that when comparing the F, FS, and FBS treatments with different fertilizer management practices, the FS and FBS treatments reduced methane emissions in rice fields compared to the F treatment by 19.06% and 5.68%, respectively. Additionally, the FS and FBS treatments resulted in the highest rice yields, with average grain yields of 91.13 and 91.00 grams per pot, respectively. Analysis of 2-Acetyl-1-pyrroline (2AP) content revealed significant differences ($P < 0.05$) among the treatments, with the FBS treatment producing the highest 2AP content compared to the other treatments. This study demonstrates the effectiveness of soil amendments in reducing methane emissions in rice fields compared to using chemical fertilizer alone, while also increasing 2AP content in rice grains. These findings highlight the importance of soil amendments in enhancing agricultural value and addressing environmental challenges.

Keywords : Methane, Biochar, Rice fields, 2-Acetyl-1-pyrroline (2AP)

บทนำ

ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสาเหตุจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas, GHG) ปริมาณมากจากกิจกรรมของมนุษย์ ส่งผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติไม่ว่าจะเป็นชนิดพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตที่ลดลง รวมทั้งพื้นที่ป่าไม้ กระทบต่อชีวิตความเป็นอยู่ เศรษฐกิจและสังคมของมนุษย์เป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มนุษย์มีความตระหนักถึงปัญหาที่เกิดขึ้นและพยายามหาวิธีการเพื่อบรรเทาปัญหาต่างๆ โดยยึดหลักการแก้ปัญหาด้วยแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืน และในปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกให้ความสำคัญเกี่ยวกับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นอย่างมาก การมุ่งสู่ Net zero จึงเป็นเป้าหมายหลักที่สำคัญ เนื่องจากเป็นสภาวะการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ [1] ประเทศไทยเป็นอีกหนึ่งประเทศที่ได้รับการคาดการณ์ว่ามีความเสี่ยงและผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศลำดับต้นๆ ดังนั้น เพื่อรับมือกับปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้น การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจึงเป็นสิ่งที่ต้องดำเนินการอย่างเร่งด่วน ปัจจุบันประเทศไทยมีแนวทางที่จะบรรลุเป้าหมายระยะยาวของความเป็นกลางทางคาร์บอนในปี 2050 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี 2065 [2] โดยอาศัยการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศในทุกภาคส่วน จากข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยในปี 2019 พบว่าประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งสิ้น 280.72 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า นับรวมการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและป่าไม้ ซึ่งส่วนใหญ่มาจากภาคพลังงาน รองลงมาเป็นภาคเกษตร [3] ประเทศไทยมีการทำการเกษตรในทุกภูมิภาค

โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำนาข้าวเพื่อบริโภคและเป็นสินค้าส่งออก เนื่องจากข้าวเป็นพืชอาหารที่สำคัญของโลก ดังนั้นพื้นที่ที่มีการผลิตข้าวสูงจึงอาจเทียบเท่ากับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สูง เนื่องจากในระหว่างที่มีการทำนาในดินจะมีกิจกรรมของจุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนเจน (Methanogens) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทนในสภาวะที่มีน้ำท่วมขังหรือสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic) นาข้าวจึงถือเป็นแหล่งสำคัญที่ปล่อยก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งเป็นก๊าซที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนเป็นอันดับสองรองจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) [4] จากการศึกษาที่ผ่านมา มีรายงานว่า การเติมถ่านชีวภาพสามารถลดการปล่อยก๊าซมีเทนได้ โดยการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มจุลินทรีย์ในดิน [5,6] ถ่านชีวภาพจึงเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการใช้ประโยชน์ทางด้านปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ เนื่องจากคุณสมบัติของถ่านชีวภาพมีรูพรุน พื้นที่ผิวภายในสูง จึงทำให้สามารถปรับความอุดมสมบูรณ์ของดินและกักเก็บคาร์บอนในดินได้ดี อีกทั้งยังสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในนาข้าว (Greenhouse gasses, GHGs) [7, 8] นอกจากนี้ยังมีรายงานเกี่ยวกับการจัดการปุ๋ยเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าว โดยพบว่าการใช้ปุ๋ยที่มีส่วนประกอบของซัลเฟต เช่น ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนได้ [9] ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการจัดการปุ๋ยในข้าว 3 แบบ ได้แก่ การใช้ปุ๋ยเคมีแบบดั้งเดิม การใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับซัลเฟอร์ และการใช้สารปรับปรุงคุณภาพดินที่มีส่วนประกอบของถ่านชีวภาพ ปุ๋ยเคมี ร่วมกับซัลเฟอร์ ต่อการปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวและผลผลิตของข้าว

วิธีดำเนินการวิจัย

การวางแผนและการเตรียมแปลงทดลอง

การศึกษการพัฒนาสารปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อลดการปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าว โดยการศึกษาในครั้งนี้ทำการทดลอง ณ แปลงทดลองตำบลเมืองศรีโค อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี ลักษณะดินที่นำมาใช้ในห้องทดลองเป็นดินร่วนทราย (Sandy loam) โดยเนื้อดินมีส่วนประกอบของ Sand 64.19%, Silt 29.38% และ Clay 6.43% เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินพบว่ามีค่าความเป็นกรด - ด่างของดิน (pH 6.27) และมีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำ (OM มีค่า 1.08%) มีปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนในดิน 0.72% และ 0.16% ตามลำดับ และพบว่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดินต่ำ (EC มีค่า 0.4 ds/m) และปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P มีค่า 8.32 mg/kg), โพแทสเซียม (K มีค่า 0.68 mg/kg), แคลเซียม (Ca มีค่า 289.8 mg/kg) และแมกนีเซียม (Mg มีค่า 22.79 mg/kg) โดยการศึกษาในครั้งนี้ดำเนินการวิจัยในช่วงมิถุนายน - พฤศจิกายน ปี 2022 แปลงทดลองเป็นบ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร สูง 0.3 เมตร และบรรจุดินปลูกที่มีความสูงของบ่อประมาณ 0.25 เมตร ประกอบด้วย 4 ชุดการทดลอง (ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ) ดังนี้ 1) C (Control) ไม่มีการเติมสารปรับปรุงคุณภาพดินและปุ๋ยทุกชนิด 2) F (Fertilizer) ใช้ปุ๋ยเคมีแบบดั้งเดิม 3) FS (Fertilizer/Sulfur) ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับซัลเฟอร์ 3 กิโลกรัม/ไร่ และ 4) FBS (Fertilizer/Biochar/Sulfur) ใช้สารปรับปรุงคุณภาพดินที่ประกอบด้วยปุ๋ยเคมี ถ่านชีวภาพ และซัลเฟอร์ 1.5 กิโลกรัม/ไร่ โดยปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการทดลอง คือ ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต และปุ๋ยยูเรีย

สำหรับการเตรียมดินก่อนการเพาะปลูก ทำการกำจัดวัชพืชด้วยการถอนและพรวนดิน ผึ่งแดดไว้ประมาณ 5-7 วัน และขังน้ำ 5 วัน แล้วระบายน้ำออกทำให้ดินยุบตัวลงและดินมีความชื้นก่อนการเพาะปลูก การศึกษาในครั้งนี้ใช้ข้าวพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 และปลูกโดยใช้เมล็ดข้าวแห้งน้ำหนัก 3.6 กรัม/บ่อ หรือเท่ากับ 20 กิโลกรัม/ไร่ เท่ากันทุกบ่อ โรยเมล็ดข้าวให้กระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งบ่อทดลอง เมื่อข้าวเจริญเติบโตได้ 27 วัน ทำการขังน้ำที่ระดับน้ำประมาณ 10 เซนติเมตรจากผิวดิน

สารปรับปรุงคุณภาพดินที่ใช้ในการศึกษา

การเตรียมสารปรับปรุงคุณภาพดินจากถ่านชีวภาพใช้เติมในชุดการทดลอง FBS โดยถ่านชีวภาพที่ใช้เป็นถ่านจากไม้ยางพาราที่เผาด้วยความร้อนประมาณ 400 – 500 องศาเซลเซียส (°C) ซึ่งในวิธีการเตรียมเริ่มจากการบดถ่านให้ละเอียดด้วยเครื่องบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร (mm) แล้วนำมาผสมเป็นสารปรับปรุงคุณภาพดินที่ประกอบด้วยผงถ่านชีวภาพ (อัตรา 175 กรัม/บ่อ) ชัลเฟอร์ (อัตรา 0.26 กรัม/บ่อ) ปุ๋ยแอมโมเนียซัลเฟต (อัตรา 4.38 กรัม/บ่อ) ปุ๋ยยูเรีย (อัตรา 3.50 กรัม/บ่อ) และผสมทุกอย่างรวมกันโดยบดด้วยเครื่องผสม เติมน้ำและภูมิท์เพื่อเป็นตัวแทน (อัตรา 8.75 กรัม/บ่อ) จนได้เป็นเม็ดสารปรับปรุงคุณภาพดินขนาด 0.5 – 1 เซนติเมตร

สำหรับการจัดการปุ๋ยในชุดการทดลอง F ใช้ปุ๋ยเคมี 2 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยแอมโมเนียซัลเฟต และปุ๋ยยูเรีย (อัตรา 4.38 และ 3.50 กรัม/บ่อ ตามลำดับ) ส่วนชุดการทดลอง FS ใช้ปุ๋ยเคมี 2 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยแอมโมเนียซัลเฟต และปุ๋ยยูเรีย (อัตรา 4.38 และ 3.50 กรัม/บ่อ ตามลำดับ) และเติมชัลเฟอร์ในอัตรา 0.53 กรัม/บ่อ ทำการบดปุ๋ยและชัลเฟอร์ให้เป็นผงแล้วโรยลงในแปลงทดลองที่มีน้ำขังอยู่ ซึ่งคิดเทียบจากปุ๋ยแอมโมเนียซัลเฟต 25 กิโลกรัม/ไร่ และปุ๋ยยูเรีย 5 กิโลกรัม/ไร่ ตามอัตราแนะนำการใส่ปุ๋ยในนาข้าว [10]

การจัดการแปลงและการดูแลแปลงทดลอง

การดูแลแปลงทดลองระหว่างการเพาะปลูก โดยเริ่มขังน้ำเมื่ออายุข้าวได้ 27 วัน ชุดการทดลอง F, FS และ FBS ใส่ปุ๋ยหรือสารปรับปรุงคุณภาพดินในแต่ละชุดการทดลองจำนวน 2 ครั้ง คือ ช่วงอายุข้าว 50 วัน และ 90 วัน หลังการปลูกข้าว โดยมีการขังน้ำในบ่อตลอดการเพาะปลูก ซึ่งบริเวณแปลงทดลองถูกล้อมด้วยตาข่ายเพื่อป้องกันสัตว์ปิกและกำจัดวัชพืชด้วยวิธีการถอนอย่างสม่ำเสมอ

การวิเคราะห์การปล่อยก๊าซมีเทน

เก็บตัวอย่างก๊าซด้วยวิธี Static chamber Method [11] โดยเก็บตัวอย่างทุก 2 สัปดาห์ ตลอดฤดูกาลเพาะปลูก (เริ่มเก็บตัวอย่างก๊าซเมื่อข้าวอายุได้ 27 วัน และเก็บตัวอย่างก๊าซครั้งสุดท้ายเมื่อข้าวอายุ 128 วัน เก็บเกี่ยวข้าวเมื่อข้าวอายุ 140 วัน) และเก็บตัวอย่างในช่วงเวลา 09:00 – 11:00 นาฬิกา [12] โดยนำกล่องอะคริลิกทึบแสงขนาด 30×30×50 เซนติเมตร ไปครอบต้นข้าวโดยไม่ให้อากาศภายนอกเข้าไปในกล่อง วัดความสูงของกล่องที่เหนือระดับน้ำในแปลงทดลองขณะเก็บตัวอย่าง เปิดพัดลมภายในกล่องเพื่อให้ความเข้มข้นของอากาศสม่ำเสมอ พร้อมใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิภายในกล่องและเก็บตัวอย่างอากาศที่เวลา 0, 5, 10 และ 15 นาที ซึ่งสามารถเก็บตัวอย่างก๊าซด้วยไซริงค์ (Syringe) พลาสติกขนาด 20 มิลลิลิตร ดูดตัวอย่างก๊าซ 10 มิลลิลิตร และบรรจุตัวอย่างก๊าซในขวดสุญญากาศ ขนาด 10 มิลลิลิตร ที่ปิดด้วยจุกยางและฝาครอบอลูมิเนียม วิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซมีเทนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography, GC) และคำนวณอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทน โดยใช้สมการดังต่อไปนี้ [13]

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

กำหนดให้	F	คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทน (mg/m ² /hr)
	T ₀	คือ อุณหภูมิภายในกล่องเก็บตัวอย่างอากาศ (+273 K)
	T	คือ อุณหภูมิภายในกล่องเก็บตัวอย่างอากาศ (°C)
	P/P ₀	คือ ความดันอากาศไม่เปลี่ยนแปลง 1 atm
	H	คือ ความสูงกล่องในหน่วยเมตร (m)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของมีเทน
	dC/dt	คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของมีเทนในกล่องเก็บตัวอย่าง (ppm/min)

การเก็บตัวอย่างดินและการวิเคราะห์สมบัติของดิน

การเก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์สมบัติของดิน โดยเก็บตัวอย่างดินก่อนปลูกและหลังเติมสารปรับปรุงคุณภาพดินครั้งที่ 2 ในทุกชุดการทดลองที่ระดับความลึก 0 – 10 เซนติเมตร จำนวน 3 จุดในแต่ละชุดทดลอง ตากให้แห้งในที่ร่ม (air dried) บดดินและร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร วิเคราะห์สมบัติของดิน ได้แก่ ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ด้วย pH meter (Hanna HI2211), ปริมาณธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ (C, N, S) วิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบปริมาณธาตุ CHNS analyzer, ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) วิเคราะห์ Walkley and Black, ความเค็มของดิน วิเคราะห์ Saturated paste extraction, EC meter, ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P) วิเคราะห์ Bray II extraction, Spectroscopy และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม วิเคราะห์ NH_4OAc extraction, Atomic spectroscopy

การวัดผลผลิตและความหอมของข้าว

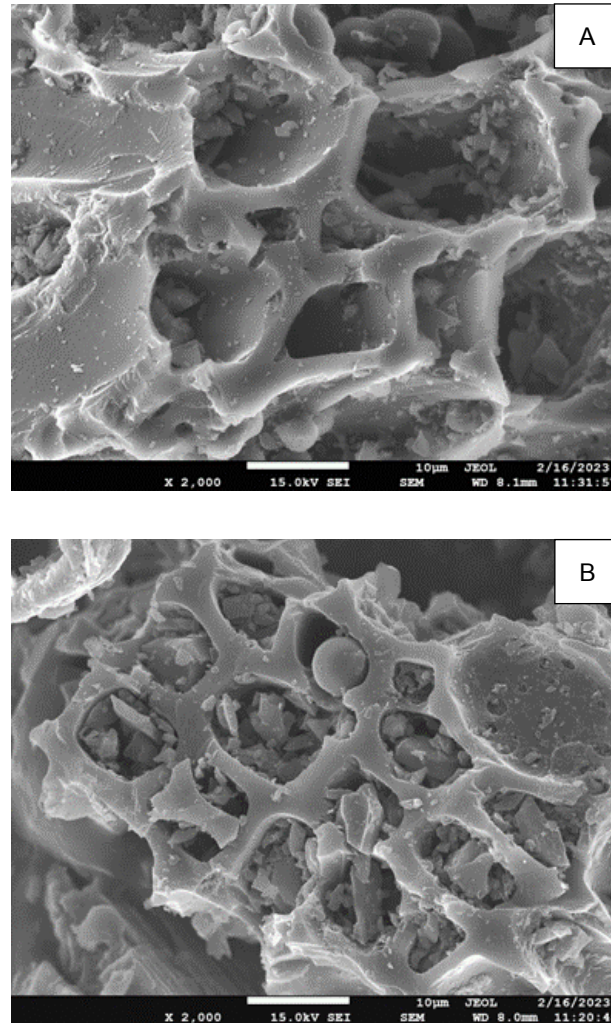
เปรียบเทียบผลผลิตของแต่ละชุดการทดลองด้วยการนับจำนวนต้นตอกอ นับจำนวนรวงตอกอ จำนวนเมล็ดทั้งหมดตอกอ และชั่งน้ำหนักของเมล็ดในแต่ละชุดการทดลองเพื่อดูปริมาณผลผลิต วิเคราะห์สารหอม 2AP ในเมล็ดข้าวโดยใช้เทคโนโลยี KASP SNPLine Super high throughput โดยห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เอกลักษณ์ดีเอ็นเอข้าวไทยเพื่อการส่งออก

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลการปล่อยก๊าซมีเทนและผลผลิตข้าวเพื่อดูความแตกต่างทางสถิติ โดยการวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนทางเดียวด้วยวิธี One-way ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างชุดการทดลองด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรม SPSS V.29.0

ผลการวิจัย

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพ (Biochar) และสารปรับปรุงคุณภาพดินที่มีส่วนประกอบของถ่านชีวภาพ (FBS - biochar) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (รูปที่ 1) จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพและสารปรับปรุงคุณภาพดิน พบว่าสารปรับปรุงคุณภาพดินมีส่วนประกอบของซัลเฟอร์ ปุ๋ยแอมโมเนียซัลเฟต ปุ๋ยยูเรีย และปุ๋ยไมท์เกาะตามพื้นผิวและในรูพรุน เมื่อวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นพบว่าสารปรับปรุงคุณภาพดินมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยรูพรุนใกล้เคียงกับถ่านชีวภาพ แต่มีปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง เนื่องจากการเติมส่วนประกอบต่างๆ ของสารปรับปรุงคุณภาพดิน และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ พบว่าปริมาณของคาร์บอนลดลงหลังจากถูกแปรรูปเป็นสารปรับปรุงคุณภาพดิน ในขณะที่ปริมาณของไนโตรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพ เนื่องจากการเติมปุ๋ยที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนและซัลเฟอร์ (ตารางที่ 1)



รูปที่ 1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพ (A) และสารปรับปรุงคุณภาพดิน (B) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

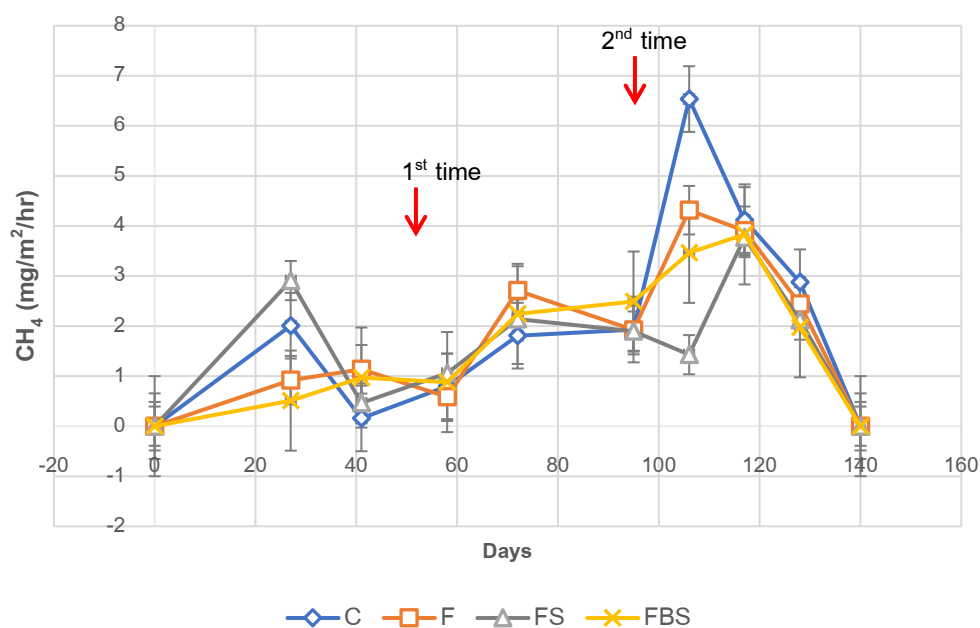
ตารางที่ 1 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของถ่านชีวภาพและสารปรับปรุงคุณภาพดิน

Treatment	Elements			
	Carbon %	Hydrogen %	Nitrogen %	Sulfur %
Biochar	75.27±0.09	3.73±0.03	0.62±0.01	0.07±0.01
FBS	59.36±0.35	5.05±0.05	1.36±0.01	1.28±0.04

ผลการวิเคราะห์การปล่อยก๊าซมีเทน

จากการศึกษาอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากแปลงทดลอง พบว่ารูปแบบการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในแปลงทดลองมีความคล้ายคลึงกันและหลังจาก 60 วัน ของการเพาะปลูก รูปแบบของการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงขึ้น เนื่องจากการมีสารอินทรีย์จากการใส่สารปรับปรุงดินรวมถึงรากพืชที่ตายและสารที่หลั่งจากรากข้าว (root exudates) ในสภาพที่มีน้ำขังในแปลงทดลอง ส่งผลให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจนในแปลงทดลองและเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยกลุ่มอาร์เคียที่สร้างมีเทน (methanogenic archaea) เปลี่ยนอินทรีย์คาร์บอนให้เป็นมีเทน [14] และในขณะเดียวกัน พบว่ามีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงสุดช่วงข้าวอายุ 106 - 117 วัน เป็นระยะน้ำนมและข้าวสุก พบว่าในช่วงนี้ชุด

การทดลอง C ซึ่งเป็นชุดควบคุมมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงสุด รองลงมาเป็นชุดการทดลอง F และ FBS อาจเนื่องมาจากการเจริญเติบโตของรากข้าวที่แข็งแรงส่งผลให้มีการหลั่งสารเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน [15] และพบว่ารูปแบบของการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในทุกชุดการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันเมื่อเข้าสู่ระยะเก็บเกี่ยว (รูปที่ 2) เมื่อพิจารณาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่อวัน โดยคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของการปล่อยมีเทนตลอดการเพาะปลูกหารด้วยจำนวนวันที่ทำการเพาะปลูก พบว่าชุดการทดลอง FS ที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับซัลเฟอร์มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่อวันต่ำที่สุดซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุมเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ใช้สารปรับปรุงคุณภาพดิน เนื่องจากชุดควบคุมไม่มีการเติมปุ๋ยและสารปรับปรุงคุณภาพดิน ส่งผลให้ปริมาณของอินทรีย์วัตถุที่เป็นสารตั้งต้นของการผลิตมีเทนจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินลดลงสอดคล้องกับการทดลองของ [16] และในขณะเดียวกันพบว่าการใช้ปุ๋ยเคมีแบบดั้งเดิมมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงกว่าชุดการทดลอง FS และ FBS (ตารางที่ 4)



รูปที่ 2 รูปแบบการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากชุดทดลอง

หมายเหตุ: 1st time; เติมปุ๋ย/สารปรับปรุงคุณภาพดินครั้งที่ 1 และ 2nd time; เติมปุ๋ย/สารปรับปรุงคุณภาพดินครั้งที่ 2

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน

การศึกษาสมบัติทางเคมีของดินในแปลงทดลองก่อนปลูก และเก็บตัวอย่างดินหลังการเติมปุ๋ยเคมีและสารปรับปรุงคุณภาพดินครั้งที่ 2 (ตารางที่ 2) พบว่าค่า pH ในทุกชุดการทดลองเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะชุดการทดลอง FBS และพบว่าค่าความเค็มของดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุที่เป็นประจุบวกมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลองหลังจากเติมปุ๋ย ยกเว้นชุดการทดลอง C และ FS ที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลง

ตารางที่ 2 สมบัติพื้นฐานของดินก่อนปลูกและดินหลังการเติมปุ๋ยและสารปรับปรุงคุณภาพดิน

Treatment	pH (1:1)	ECe (dS/m)	OM (%)	Available P (mg/kg)	Exchangeable (mg/kg)		
					K	Ca	Mg
ดินก่อนปลูก							
C	6.27	0.4	1.08	8.32	0.68	289.8	22.79
F	6.1	0.31	1.37	6.95	2.28	305.8	19.31
FS	6.3	0.4	1.43	9.04	2.61	373	18.43
FBS	6.4	0.57	1.39	9.44	1.7	318.22	26.83
ดินหลังการเติมปุ๋ยและสารปรับปรุงคุณภาพดิน							
C	6.49	0.45	0.82	14.12	41.99	438.2	56.32
F	6.27	0.76	1.4	9.24	29.76	484.6	24.51
FS	6.32	0.74	0.93	17.78	30.16	502	36.51
FBS	7.2	0.75	1.69	10.25	46.19	828.4	59.08

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ โดยวิเคราะห์ตัวอย่างดินก่อน - หลัง การเติมปุ๋ยเคมีและสารปรับปรุงคุณภาพดิน พบว่าปริมาณของคาร์บอนในชุดการทดลอง FBS สูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุกชุดการทดลอง ในขณะที่ชุดการทดลอง F ที่ใช้ปุ๋ยเคมีแบบดั้งเดิมมีปริมาณคาร์บอนลดลง และพบว่าปริมาณของไนโตรเจนลดลงในทุกชุดการทดลอง แต่ปริมาณของซัลเฟอร์เพิ่มขึ้นหลังจากเติมปุ๋ยและสารปรับปรุงคุณภาพดิน (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของดินก่อนปลูกและดินหลังการเติมปุ๋ยและสารปรับปรุงคุณภาพดิน

Treatment	ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ		
	Carbon %	Nitrogen %	Sulfur %
ดินก่อนปลูก			
C	0.72±0.07 ^c	0.16±0.01	0.08±0.01
F	0.80±0.04 ^{bc}	0.16±0.01	0.07±0.02
FS	0.89±0.02 ^{ab}	0.17±0.01	0.07±0.02
FBS	0.85±0.03 ^{ab}	0.17±0.01	0.08±0.00
ดินหลังการเติมปุ๋ยและสารปรับปรุงคุณภาพดิน			
C	0.41±0.03 ^c	0.03±0.00	0.11±0.01 ^b
F	0.77±0.07 ^c	0.03±0.01	0.11±0.01 ^b
FS	0.99±0.03 ^{bc}	0.03±0.01	0.12±0.01 ^a
FBS	2.44±0.10 ^a	0.05±0.01	0.12±0.01 ^a

ผลผลิตข้าวและความหอมของข้าว

การวิเคราะห์ผลผลิตข้าวด้วยการนับจำนวนต้น จำนวนรวง จำนวนเมล็ดและน้ำหนักของเมล็ดในแต่ละชุดการทดลองเพื่อดูปริมาณผลผลิตที่ได้ รวมทั้งวิเคราะห์ปริมาณสารหอม 2AP (2-Acetyl-1-pyrroline) เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตระหว่างชุดควบคุมและชุดการทดลอง FBS พบว่าชุดควบคุมมีจำนวนต้นและจำนวนรวงต่อกอมากกว่าชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยและสารปรับปรุงคุณภาพดินทั้ง F, FS และ FBS แต่กลับพบว่าจำนวนเมล็ดข้าวและน้ำหนักของเมล็ดข้าวของชุดควบคุมมีค่าต่ำที่สุด โดยชุดการทดลอง FBS ให้ผลผลิตของจำนวนเมล็ดและน้ำหนักเมล็ดสูงที่สุด (ตารางที่ 4) อย่างไรก็ตาม น้ำหนักของเมล็ดในแต่ละชุดการทดลอง F, FS และ FBS มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณสารหอม 2AP ในแต่ละชุดการทดลองพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยชุดการทดลอง FBS มีปริมาณสารหอม 2AP มากที่สุด (1.60 ppm) เมื่อเปรียบเทียบกับทุกชุดการทดลอง รองลงมาเป็นชุดการทดลอง FS ในขณะที่ชุดการทดลอง C และ F มีค่าต่ำที่สุด (1.23 และ 1.26 ppm ตามลำดับ) จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้สารปรับปรุงคุณภาพดิน FBS มีอิทธิพลต่อปริมาณสารหอม 2AP ในเมล็ดข้าว

ตารางที่ 4 ผลผลิตข้าว ปริมาณสารหอม 2AP และปริมาณการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าว

Treatment	plant/hill	panicle/hill	Total grain number/panicle	Seed weight (g/pot)	2AP (ppm)	CH ₄ (mg/m ² /day)
C	4.17±0.25 ^a	4.18±0.25 ^a	35.28±1.47 ^c	70.33±9.81	1.23±0.04 ^c	30.86±2.33
F	3.04±0.15 ^b	3.04±0.16 ^b	65.07±3.33 ^b	90.93±12.46	1.26±0.06 ^c	37.67±5.77
FS	2.72±0.12 ^b	2.64±0.12 ^b	62.30±2.62 ^b	91.13±15.15	1.42±0.02 ^b	30.49±1.16
FBS	1.98±0.09 ^c	1.98±0.10 ^c	94.20±4.29 ^a	91.00±4.92	1.60±0.03 ^a	35.53±3.81

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test

วิจารณ์ผลการวิจัย

การปล่อยก๊าซมีเทนจากแปลงทดลองในฤดูการเพาะปลูก 2022 พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลอง F, FS และ FBS พบว่าชุดการทดลอง FS ที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับซัลเฟอร์ มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่อวันต่ำที่สุด (30.49 mg/m²/day) รองลงมาเป็นชุดการทดลอง FBS ที่ใช้สารปรับปรุงคุณภาพดิน (35.53 mg/m²/day) ในขณะที่ชุดการทดลอง F ที่ใช้ปุ๋ยเคมีแบบดั้งเดิมมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่อวันสูงสุด (37.67 mg/m²/day) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชุดการทดลอง FS และ FBS สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวได้เมื่อเทียบกับชุดการทดลอง F เมื่อพิจารณาค่า pH ในชุดการทดลอง FS มีค่า pH 6.32 ในขณะที่ชุดการทดลอง FBS มีค่า pH 7.2 อาจส่งผลต่อจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 6.5 – 7.5 [17] และเนื่องด้วยการเติมซัลเฟอร์ทำให้ปริมาณของซัลเฟอร์ในธรรมชาติที่อยู่ในรูปของซัลเฟตเพิ่มขึ้น ซึ่งจะกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้ใช้สารตั้งต้นเดียวกับเมทาโนเจนที่ใช้ในการผลิตมีเทน จึงทำให้ปริมาณมีเทนลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ สอดคล้องกับการศึกษาของ Scholz และคณะในปี 2020 [18] ซึ่งทำการปลูกข้าวในดินที่เติม Cable bacteria จากการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตด้วยกระบวนการที่เรียกว่า Electrogenic sulfide oxidation (e-SOX) ซึ่งจะกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต เช่น *Desulfovibrionaceae* เป็นสกุลตัวอย่างของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่สามารถแยกได้จากรากข้าวด้วยการปลูกข้าวในสภาพ Soil microcosms ที่มีน้ำท่วมขัง โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้ใช้สารตั้งต้น ได้แก่ ไฮโดรเจนและอะซิเตต

ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่กลุ่มเมทาโนเจนใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนจึงมีความสัมพันธ์แบบแข่งขันกันระหว่างแบคทีเรียทั้งสองกลุ่ม [19]

สมบัติของดินหลังการเติมปุ๋ยและสารปรับปรุงคุณภาพดินที่มีถ่านชีวภาพเป็นส่วนประกอบมีปริมาณของอินทรีย์วัตถุเพิ่มสูงขึ้น โดยชุดการทดลอง FBS มีปริมาณของอินทรีย์วัตถุสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่นเนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในถ่านชีวภาพและคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่มีรูพรุนสูงจึงสามารถกักเก็บคาร์บอนในดินได้เป็นอย่างดี [20] ส่งผลให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ โดยปริมาณของอินทรีย์วัตถุ คาร์บอนในดิน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นหลังจากเติมสารปรับปรุงคุณภาพดิน

การวิเคราะห์ปริมาณผลผลิตด้วยการเปรียบเทียบน้ำหนักของเมล็ดข้าว พบว่าชุดการทดลอง FS และ FBS มีน้ำหนักของเมล็ดข้าวสูง และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณสารหอม 2AP พบว่าชุดการทดลอง FBS ที่ใช้สารปรับปรุงคุณภาพดินมีความหอมของข้าวสูงเมื่อเทียบกับทุกชุดการทดลอง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สามารถเพิ่มมูลค่าทางการเกษตรได้ เมื่อพิจารณาผลผลิตข้าวร่วมกับการปลดปล่อยก๊าซมีเทน พบว่าชุดการทดลอง FS มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่อวันต่ำที่สุด รองลงมาเป็นชุดการทดลอง FBS จึงแสดงให้เห็นว่าการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับซัลเฟอร์และการใช้สารปรับปรุงคุณภาพดินให้ผลลัพธ์การลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวได้ดี ในขณะที่ชุดการทดลอง F มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่อวันสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Dong และคณะในปี 2021 [11] ที่ทดสอบการใช้ปุ๋ยละลายช้าจากถ่านชีวภาพต่อการปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวเทียบกับการใช้ปุ๋ยแบบดั้งเดิม พบว่าการใช้ปุ๋ยเคมีแบบดั้งเดิมมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนตลอดฤดูกาลเพาะปลูกมากกว่าปุ๋ยละลายช้าจากถ่านชีวภาพ แสดงให้เห็นว่าชุดการทดลอง FS และ FBS สามารถให้ผลผลิตและลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวได้ดีกว่าชุดการทดลอง F จากการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของสารปรับปรุงคุณภาพดิน FBS ที่สามารถลดการปล่อยมีเทนในนาข้าวได้ดีกว่าการจัดการปุ๋ยแบบดั้งเดิม รวมทั้งสามารถเพิ่มผลผลิตข้าวและปริมาณสารหอม 2AP ในเมล็ดข้าว ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรและเป็นแนวทางในการพัฒนาสารปรับปรุงคุณภาพดินให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นได้

สรุปผลการวิจัย

การใช้สารปรับปรุงคุณภาพดินที่มีส่วนประกอบของถ่านชีวภาพ ซัลเฟอร์ และปุ๋ยแอมโมเนียซัลเฟต สามารถเพิ่มผลผลิตข้าวรวมทั้งปริมาณสารหอม 2AP ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเพิ่มมูลค่าทางการเกษตร รวมทั้งสามารถเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้แก่ดิน โดยพบว่าการกักเก็บคาร์บอนในดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุเพิ่มขึ้นหลังจากการเติมสารปรับปรุงคุณภาพดิน สำหรับประเด็นการปล่อยมีเทนจากนาข้าว พบว่าชุดการทดลอง FS และ FBS สามารถลดการปล่อยมีเทนในนาข้าวได้ดีกว่าชุดการทดลอง F ที่ใช้ปุ๋ยเคมีแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นการจัดการปุ๋ยในนาข้าวแบบดั้งเดิม แสดงให้เห็นว่าการใช้สารปรับปรุงคุณภาพดินสามารถลดการปล่อยมีเทนในนาข้าวได้ดีกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีแบบดั้งเดิม และสามารถเพิ่มปริมาณสารหอม 2AP ในเมล็ดข้าวได้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ประจำปีงบประมาณ 2023 ผู้วิจัยและคณะขอขอบพระคุณผู้ที่ให้การสนับสนุนในครั้งนี้เป็นอย่างยิ่ง และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ในการสนับสนุนห้องปฏิบัติการและวัสดุอุปกรณ์ตลอดระยะเวลาดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Virmani N, Agarwal S, Raut RD, Paul SK, Mahmood H. Adopting net-zero in emerging economies. *Journal of Environmental Management*. 2022 Nov;321:115978.
- [2] Ministry of Natural Resources and environment. Thailand's Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy (revised version), Office of Natural Resource and Environmental Policy and Planning; 2022. 63 p.
- [3] Ministry of Natural Resources and environment. Thailand's Fourth Biennial Update Report, Office of Natural Resource and Environmental Policy and Planning; 2022. 126 p.
- [4] Cael BB, Goodwin PA. Global methane pledge versus carbon dioxide emission reduction. *Environmental Research Letters*. 2023 Sept 25;18(10):104015.
- [5] Feng Y, Xu Y, Yu Y, Xie Z, Lin X. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 2012 Mar;46:80–8.
- [6] Qin X, Li Y, Wang H, Liu C, Li J, Wan Y, et al. Long-term effect of biochar application on yield-scaled greenhouse gas emissions in a rice paddy cropping system: A four-year case study in south china. *Science of The Total Environment*. 2016 Nov;569–570:1390–401.
- [7] Lehmann J. A handful of carbon. *Nature*. 2007 May;447(7141):143–4.
- [8] Wu Z, Zhang X, Dong Y, Li B, Xiong Z. Biochar amendment reduced greenhouse gas intensities in the rice-wheat rotation system: Six-year field observation and meta-analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019 Nov;278:107625.
- [9] Tragoolram J, Saenjan P. Effects of Sulfate Fertilizer on Rice Yields (Sakol Nakhon varieties) and Global Warming Potential. *KKU Research Journal*. 2012;419-22. (in Thai)
- [10] Rice Department, Soil and fertilizer management in rice fields [Internet]. Rice Knowledge Bank. 2016 [cited 2022 May 5]. Available from: <https://www.ricethailand.go.th> (in Thai)
- [11] Dong D, Li J, Ying S, Wu J, Han X, Teng Y, et al. Mitigation of methane emission in a rice paddy field amended with biochar-based slow-release fertilizer. *Science of The Total Environment*. 2021 Oct;792:148460.
- [12] Zheng X, Huang Y, Wang Y, Wang M. Seasonal characteristics of nitric oxide emission from a typical Chinese rice–wheat rotation during the non-waterlogged period. *Global Change Biology*. 2003 Feb;9(2):219–27.
- [13] Singh NK, Patel DB, Khalekar GD. Methanogenesis and methane emission in rice / paddy fields. *Sustainable Agriculture Reviews*. 2018;135–70.
- [14] Li C, Zhu J, Li X, Deng J, Yang W, Zhou Y, et al. CH₄ and n₂o emission and grain yield performance of three main rice-farming patterns in central China. *Agronomy*. 2023 May 25;13(6):1460.
- [15] Humphreys J, Brye KR, Rector C, Gbur EE. Methane emissions from rice across a soil organic matter gradient in Alfisols of Arkansas, USA. *Geoderma Regional*. 2019 Mar;16.

- [16] Gu X, Weng S, Li Y, Zhou X. Effects of water and fertilizer management practices on methane emissions from Paddy Soils: Synthesis and perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022 Jun 15;19(12):7324.
- [17] Sun X, Zhang W, Vassov R, Sherr I, Du N, Zwiazek JJ. Effects of elemental sulfur on soil pH and growth of Saskatoon Berry (*Amelanchier alnifolia*) and beaked hazelnut (*corylus cornuta*) seedlings. *Soil Systems*. 2022;6(2),31.
- [18] Scholz VV, Meckenstock RU, Nielsen LP, Risgaard-Petersen N. Cable bacteria reduce methane emissions from rice-vegetated soils. *Nature Communications*, 2020;11(1).
- [19] Wind T, Stubner S, Conrad R. Sulfate-reducing bacteria in rice field soil and on rice roots. *Systematic and Applied Microbiology*. 1999;22(2):269–79.
- [20] Nogués I, Mazzurco Miritana V, Passatore L, Zacchini M, Peruzzi E, Carloni S, et al. Biochar soil amendment as carbon farming practice in a Mediterranean environment. *Geoderma Regional*. 2023;33.