

ปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกภายใต้การปลูกข้าว
ที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง

Affecting Factors on Greenhouse Gas Emission under Rice Cultivation
with Alternate Wetting and Drying Water Management

ชฎาภา ใจหมั่น^{1*}, ศุภธิดา อำทอง¹, ทวี ชัยพิมผลิน² และชาคริต โชติอมรศักดิ์²

Chadapa Jaimun^{1*}, Suphathida Aumtong¹, Tawee Chaipimonplin² and Chakrit Chotamonsak²

¹สาขาปฐพีศาสตร์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

²ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

¹Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, Chiang Mai, Thailand 50290

²Department of Geography, Faculty of Social Sciences, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand 50200

*Corresponding author: miaw_831forever@hotmail.com

Abstract

Received: May 16, 2019

Revised: October 10, 2019

Accepted: October 28, 2019

The objective of this research was to study the factors that affect the emission of methane and carbon dioxide gases under rice cultivation with alternate wetting and drying water management and study the relationship of rice growth to the emission gases under various conditions in an experimental design of 2x4 Factorial in RCBD (4 replications). Under alternate wetting and drying water management, the results showed that soil applied with chemical fertilizer plus biochar and growth stages was a factor that affect greenhouse gas emissions. In this experiment, sandy clay loam applied with chemical fertilizer plus 100% biochar at the booting and milky stages, had the lowest methane gas emission at 0.60 and 0.57 gCH₄m⁻²d⁻¹. In contrast, methane gas emission was highest during the tillering stage and booting stage in the control group and in treatment applied with chemical fertilizer plus 100% biochar of sandy clay loam during the booting stage, lowest carbon dioxide gas emission was observed at 1.05 gCO₂m⁻²d⁻¹. As for rice growth showed that sandy clay loam applied with chemical fertilizer plus biochar, affecting the height and number of tillering significantly higher than the loamy sand (P<0.05).

Keywords: greenhouse gas, biochar, soil texture, growing stages of rice

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้การปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง และศึกษาความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของข้าวต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะต่างๆ วางแผนการทดลองแบบ 2x4 Factorial in RCBD (4 ซ้ำ) ผลการทดลองพบว่า การปลูกข้าวภายใต้การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งมีเนื้อดิน การใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ รวมถึงระยะการเจริญเติบโตของต้นข้าวเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในการทดลองนี้เนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% ในระยะข้าวตั้งท้อง และระยะนํ้านม มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาต่ำที่สุด มีค่า 0.60 และ 0.57 $\text{gCH}_4\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ขณะที่การปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงที่สุดอยู่ในระยะข้าวแตกกอและระยะตั้งท้องในกรรมวิธีควบคุม ส่วนกรรมวิธีที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% ของเนื้อดินทรายปนร่วน ในระยะข้าวตั้งท้อง มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาต่ำที่สุดมีค่า 1.05 $\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ส่วนการเจริญเติบโตของข้าวพบว่า เนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ มีผลทำให้ความสูงและจำนวนกอของต้นข้าวสูงกว่าเนื้อดินทรายปนร่วนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

คำสำคัญ: ก๊าซเรือนกระจก ถ่านชีวภาพ เนื้อดิน
ระยะการเจริญเติบโตของข้าว

คำนำ

การปลูกข้าวมักถูกระบุว่าเป็นส่วนหนึ่งของสาเหตุในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เนื่องจากดินปลูกข้าวส่วนใหญ่เป็นการจัดการน้ำแบบขัง (Submerged soil) และทำให้เกิดสภาพไร้อากาศ

ซึ่งมีผลต่อสมบัติของดินรวมถึงการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Aumtong, 2018) จากรายงานงานวิจัยในหลายประเทศที่ผ่านมาพบว่า นาข้าวมีการปล่อยมีเทน 25-100 เทระกรัมต่อปี (Smakgahn and Saothongnoi, 2017) ปัจจุบันก๊าซเรือนกระจกเป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อน ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ จึงมีการจัดการทางการเกษตรที่เป็นมิตรต่อสภาพภูมิอากาศ (Climate smart agriculture) เป็นการจัดการดินที่เหมาะสมเพื่อลดการปลดปล่อย CO_2 และ CH_4 จากดิน มีการกล่าวถึงการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคเกษตรมากขึ้น โดยเฉพาะการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากนาข้าว ไม่ว่าจะเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) เป็นต้น ซึ่งมีปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการและปริมาณการปลดปล่อยก๊าซดังกล่าว เช่น พันธุ์ข้าว การจัดการน้ำ การจัดการดิน การจัดการฟางข้าว การใช้ปุ๋ย และการเติมอินทรีย์วัตถุในดิน เป็นต้น โดย Yagi and Minami (1990) พบว่านาข้าวที่ปลูกในดินต่างชนิดกันในญี่ปุ่น มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่างกัน เนื่องจากดินแต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกัน

ส่วนการปลูกข้าวโดยการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Management; AWD) ที่นอกจากจะลดปริมาณการใช้น้ำในการปลูกข้าวแล้วยังสามารถลดการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มักพบในดินน้ำขัง ซึ่งเป็นสาเหตุของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในดินปลูกข้าวได้ (Aumtong, 2018) ประกอบกับการใช้อินทรีย์วัตถุเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินและส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช เช่น ถ่านชีวภาพ (Biochar) เป็นวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากมวลชีวภาพ มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความสามารถในการเพิ่มธาตุอาหารให้คงอยู่ในดินได้นานและลดความจำเป็นในการใช้ปุ๋ย ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกจากดิน อีกทั้งยังสามารถกักเก็บคาร์บอนได้โดยตรงเนื่องจากความต้านทานต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ และมีสมบัติเป็นคาร์บอนที่มีความเสถียรสูง (Wu *et al.*, 2016) สำหรับการศึกษาครั้งนี้

ได้มีสมมติฐานว่าสมบัติดิน และระยะการเจริญเติบโตของข้าวมีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก รวมถึงการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งสามารถลดการเกิดก๊าซชนิดต่างๆ เช่น CO_2 และ CH_4 ที่เป็นสาเหตุของภาวะเรือนกระจกและการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกภายใต้การปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง และศึกษาความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของข้าวต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่จะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้

อุปกรณ์และวิธีการ

วางแผนการทดลองแบบ 2x4 Factorial in RCBD (4 ซ้ำ) ประกอบด้วย Factor A คือ เนื้อดิน (Soil texture) ได้แก่ ดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy clay loam: C1) และดินทรายปนร่วน (Sandy loam: C2) Factor B คือ การใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพ 4 กรรมวิธี ได้แก่ กรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุม (Control) ไม่มีการใส่ปุ๋ยและถ่านชีวภาพ กรรมวิธีที่ 2 ปุ๋ยเคมี 100% ตามค่าวิเคราะห์ดิน (CF100%) โดยปุ๋ยเคมีที่ใช้หมายถึงปริมาณของธาตุอาหารที่ข้าวต้องการเพื่อให้ได้ผลผลิตข้าว 1,000 กก./ไร่ (Aumtong, 2018) กรรมวิธีที่ 3 ปุ๋ยเคมี 50% ตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% (CF50%+BC100%) อัตราของถ่านชีวภาพ (Biochar: BC) ใส่เท่ากับ 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ (BC100%) และกรรมวิธีที่ 4 ปุ๋ยเคมี 100% และถ่านชีวภาพ 100% (CF100%+BC100%) ดำเนินการโดยปลูกข้าวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ในกระถางขนาด 20x25 ซม. ใช้ดินน้ำหนัก 5 กก./กระถาง สำหรับการปลูกข้าวเพาะเมล็ดข้าวโดยใช้ถาดเพาะกล้า เมื่อต้นข้าวอายุ 10 วัน จึงย้ายต้นกล้ามาปลูกลงในกระถางที่กล่าวมาข้างต้น และได้ใส่ปุ๋ยเคมีตาม

ปริมาณของธาตุอาหารที่ข้าวต้องการ เพื่อให้ได้ผลผลิตข้าว 1,000 กก./ไร่ โดยมีรายละเอียดดังนี้ ปุ๋ยสูตร 46-0-0 อัตรา 35 กก./ไร่ สูตร 0-46-0 อัตรา 12 กก./ไร่ สูตร 0-0-60 อัตรา 35 กก./ไร่ โดยแบ่งใส่ปุ๋ยสูตร 46-0-0 จำนวน 2 ครั้ง ครั้งที่ 1 ใส่ปุ๋ยในระยะข้าวเริ่มแตกกอเมื่อข้าวอายุ 30 วัน และครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยในระยะข้าวเริ่มตั้งท้องเมื่อข้าวอายุ 60 วัน สำหรับการให้น้ำจะมีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (AWD) เริ่มดำเนินเมื่อข้าวอายุระหว่าง 35-70 วัน โดยเริ่มขังน้ำเหนือผิวดิน 5 ซม. นาน 3 วัน จากนั้นปล่อยระดับน้ำลดลงหรือหยุดการให้น้ำ 3 วัน แล้วจึงมีการให้น้ำในสภาพขังอีกครั้ง ทำเช่นนี้จนข้าวมีอายุ 70 วัน จากนั้นจึงให้น้ำแบบขังน้ำตลอดเวลาจนข้าวมีระยะสุกแก่ การทดลองทั้งหมดนี้ดำเนินการระหว่างวันที่ 23 เมษายน ถึง วันที่ 10 สิงหาคม พ.ศ. 2561

การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน ได้แก่ เนื้อดิน (Soil texture) โดยวิธี Hydrometer method (Onthong, 2012) ปฏิกริยาของดิน (soil pH, soil:H₂O 1:1) โดยใช้ pH meter (Mc Lean, 1982) ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Soil Organic Matter: SOM) โดยวิธี Dichromate oxidation (Walkley and Black, 1934) ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนของดิน (Soil Organic Carbon: SOC) Water Soluble Carbon (WSC) (Ghani *et al.*, 2003) Hot Water Soluble Carbon (HWSC) (Fynn *et al.*, 2003) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P) วิเคราะห์โดยการสกัดด้วย Bray II แล้วนำไปพัฒนาสีโดยวิธีของ Murphy-Riley และอ่านค่าด้วย Spectrophotometer (Watanabe and Olsen, 1962) ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable K, Ca และ Mg) โดยวิธี Atomic Absorption Spectrophotometer (Onthong, 2012)

การวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพ การเตรียมถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกลบหรือเปลือกข้าว (Rice Husk) โดยใช้กระบวนการเผาไหม้ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิในการเผา 350-600°C. เผาโดยระบบปิดใช้เวลาในการเผา 1-2 ชั่วโมง การนำถ่านชีวภาพมาใช้นั้นจะนำมาบดให้มี

ขนาดเล็กและร้อนผ่านตะแกรงขนาด 0.25 มม. สำหรับสมบัติของถ่านชีวภาพที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีสมบัติดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 8.79 ความหนาแน่นรวม 0.58 กรัม/ลบ.ซม. ค่าการนำไฟฟ้า 0.22 มิลลิซีเมนต์/ซม. ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ มีค่า 166.97, 77.85, 14.83 และ 10.36 มก./กก. ตามลำดับ

การเก็บตัวอย่างก๊าซใช้วิธี Closed static chamber method โดยเก็บตัวอย่างก๊าซภายใต้การปลูกข้าว 5 ระยะ ได้แก่ ระยะแตกกอ (Tillering stage) ระยะข้าวตั้งท้อง (Booting stage) ระยะข้าวออกดอก (Flowering) และระยะน้ำนม (Milky) โดยใช้กล่อง Acrylic ขนาด 35x35x100 ซม. (กว้างxยาวxสูง) ครอบต้นข้าว ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซในช่วงเวลา 09.00–11.00 น. นำก๊าซที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซเรือนกระจกคือ CO₂, CH₄ ที่ถูกปลดปล่อยมาจากดิน โดยใช้เครื่อง Gas Chromatography (GC) และคำนวณหาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (Emission potential, E) โดยใช้วิธีการของ Saengjan *et al.* (2015) ด้วยสมการ

$$E = \{C \times V_b \times (M_w/M_v) \times 273.2 / (273.2 + T)\} \times (1,000/5)$$

เมื่อ E = การปลดปล่อยก๊าซ CH₄ และ CO₂ (gCH₄m⁻²d⁻¹ และ gCO₂m⁻²d⁻¹)

C = ความเข้มข้นของก๊าซ CH₄ (μmole mole⁻¹)

V_b = ปริมาตรของช่องว่างในกล่องเก็บก๊าซ (m³)

M_w = น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซ CH₄ 16.123 g mole⁻¹ และ CO₂ 44.01 g mole⁻¹

M_v = ปริมาตรโมเลกุลของก๊าซ CH₄ และ CO₂ 22.41x10⁻³ m³

T = อุณหภูมิ (°C)

การวิเคราะห์ข้อมูล โดยวิเคราะห์ผลทางสถิติระหว่างการปลดปล่อยก๊าซ CO₂, CH₄ กับระยะการเจริญเติบโตของข้าวโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์แบบ Factorial in RCBD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการปลดปล่อยก๊าซ CO₂, CH₄ และความสูงของข้าวที่อายุ 45, 60, 80 และ 100 วัน รวมถึงจำนวนการแตกกอของข้าวในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายและเนื้อดินทรายปนร่วน โดยวิธี Pearson โดยนำเสนอค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, r)

ผลการวิจัย

สมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง

ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินร่วนเหนียวปนทรายและดินทรายปนร่วน ซึ่งมีความแตกต่างกันในด้านลักษณะเนื้อดินและความอุดมสมบูรณ์ของดินที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของข้าว ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของดินก่อนการทดลอง แสดงไว้ใน Table 1

Table 1 Soil chemical properties before experiment.

Soil texture	pH	SOM (%)	SOC (%)	Avail. P	K	Ca	Mg	WSC	HWSC
				mg/kg					
Sandy clay loam	6.95	2.29	1.33	31.68	89	1,702	74	8	126
Loamy sand	7.09	0.05	0.03	23.30	118	2,325	845	18	86

ผลการปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าวในระยะเวลาเจริญเติบโตต่างๆ

การปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ของดินปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งเมื่อข้าวอยู่ในระยะแตกกอ ระยะตั้งท้อง ระยะออกดอก และระยะนํ้านม พบว่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายในข้าวระยะแตกกอ ระยะออกดอก และระยะนํ้านม มีค่า 0.61, 0.70 และ 0.60 $\text{gCH}_4\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ซึ่งต่ำกว่าเนื้อดินทรายปนร่วน ส่วนเนื้อดินทั้งสองที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพ พบว่ากรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพในระยะข้าวตั้งท้องมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาต่ำที่สุด มีค่า 0.66 $\text{gCH}_4\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ซึ่งต่ำกว่ากรรมวิธีควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างเนื้อดินกับการใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพ พบว่าเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% ในระยะข้าวตั้งท้องและระยะนํ้านม มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาต่ำที่สุด มีค่า 0.60 และ 0.57 $\text{gCH}_4\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ อีกทั้งมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงที่สุดในระยะข้าวแตกกอและระยะตั้งท้องในกรรมวิธีควบคุมของดินร่วนเหนียวปนทรายและกรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 100% ในดินทรายปนร่วน มีค่า 0.84 $\text{gCH}_4\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) (Table 2)

ส่วนการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุดในระยะข้าวตั้งท้องและระยะนํ้านม ส่วนเนื้อดินทั้งสองที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพ พบว่ากรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 50% ร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาต่ำที่สุดในระยะข้าวแตกกอ มีค่า 8.63 $\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ และกรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาต่ำที่สุดในข้าวระยะตั้งท้องและระยะนํ้านม มีค่า 5.26 และ 14.24 $\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ และมีความแตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างเนื้อดินกับการใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพ พบว่ากรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% ของเนื้อดินทรายปนร่วนในระยะข้าวตั้งท้องมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาต่ำที่สุด มีค่า 1.05 $\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ และปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาสูงที่สุดในกรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 100% ในระยะข้าวออกดอก มีค่า 51.73 $\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) (Table 2)

การเจริญเติบโตของข้าว

การเจริญเติบโตของข้าวในด้านความสูงที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งโดยใช้ดินร่วนเหนียวปนทราย (C1) และดินทรายปนร่วน (C2) พบว่าเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายมีผลทำให้ความสูงของต้นข้าวทุกช่วงอายุ (20-100 วัน) สูงกว่าเนื้อดินทรายปนร่วนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างเนื้อดินและการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ พบว่าเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายในกรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 50% ตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% (CF50%+BC100%) มีความสูงต้นสูงที่สุดเมื่อข้าวอายุ 20, 60 และ 100 วัน มีค่า 15.75 ± 1.71 , 81 ± 9.56 และ 123 ± 9.45 ซม. ตามลำดับ และกรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 100% ตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% (CF100%+BC100%) มีความสูงต้นสูงที่สุดเมื่อข้าวอายุ 45, 50 และ 80 วัน มีค่า 69.5 ± 6.08 , 74.25 ± 4.57 และ 108.75 ± 11.09 ซม. ตามลำดับ และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) (Figure 1) และเนื้อดินทรายปนร่วนในกรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 50% ตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% (CF50%+BC100%) มีความสูงต้นสูงที่สุดเมื่อข้าวอายุ 20, 50, 60 และ 80 วัน มีค่า 14.25 ± 1.71 , 59.5 ± 1.29 , 62 ± 0.82 และ 83.75 ± 7.41 ซม. ตามลำดับ และกรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 100% ตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับถ่านชีวภาพ

100% (CF100%+BC100%) มีความสูงต้นสูงที่สุด เมื่อข้าวอายุ 45 วัน มีค่า 56.25 ± 4.19 ซม. และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (Figure 2)

การเจริญเติบโตของข้าวในด้านการแตกกอเมื่อข้าวอายุ 100 วัน ซึ่งอยู่ในระยะนํ้านม พบว่าเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (C1) มีการแตกกอของข้าวสูงที่สุดในกรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 100% ตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% (CF100%+BC100%) มีค่าเฉลี่ย 9.25 กอ/กระถาง รองลงมาคือ กรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 50% ตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% (CF50%+BC100%) มีค่า 9 กอ/กระถาง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (Table 3)

เมื่อพิจารณา Correlation (Pearson) เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างการปลดปล่อยก๊าซ CH_4 , CO_2 กับความสูงและจำนวนการแตกกอของข้าวในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (C1) พบว่าการปลดปล่อย CH_4 มีสหสัมพันธ์ทางตรงกับความสูงของข้าวที่อายุ 45 วัน

(ระยะแตกกอ) และอายุ 80 วัน (ระยะออกดอก) แต่การปลดปล่อย CH_4 ไม่มีสหสัมพันธ์ทางตรงกับความสูงของข้าวที่อายุ 60 วัน (ระยะตั้งท้อง) และ 100 วัน (ระยะนํ้านม) รวมถึงจำนวนการแตกกอ ส่วนการปลดปล่อย CO_2 พบว่ามีสหสัมพันธ์ทางตรงกับความสูงของข้าวที่อายุ 100 วัน (ระยะนํ้านม) รวมถึงการแตกกอของข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ส่วนเนื้อดินทรายปนร่วน (C2) พบว่าการปลดปล่อย CH_4 มีสหสัมพันธ์ทางตรงกับความสูงของข้าวที่อายุ 100 วัน (ระยะนํ้านม) รวมถึงจำนวนการแตกกอ แต่การปลดปล่อย CH_4 ไม่มีสหสัมพันธ์ทางตรงกับความสูงของข้าวที่อายุ 80 วัน (ระยะออกดอก) ส่วนการปลดปล่อย CO_2 พบว่ามีสหสัมพันธ์ทางตรงกับความสูงของข้าวที่อายุ 80 วัน (ระยะออกดอก) แต่การปลดปล่อย CO_2 ไม่มีสหสัมพันธ์ทางตรงกับความสูงของข้าวที่อายุ 45 วัน (ระยะแตกกอ) รวมถึงจำนวนการแตกกอของข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (Table 4)

Table 2 Greenhouse gas emissions of growing stages of rice under alternate wetting and drying management

Treatment	Gas emission							
	CH ₄ (gCH ₄ m ⁻² d ⁻¹)				CO ₂ (gCO ₂ m ⁻² d ⁻¹)			
	Tillering	Booting	Flowering	Milky	Tillering	Booting	Flowering	Milky
A: Soil texture (n=16)								
C1	0.61b	0.70a	0.70b	0.60b	14.35b	10.60a	33.14b	17.01a
C2	0.81a	0.69b	0.75a	0.64a	15.16a	7.01b	36.76a	14.59b
F-test A	**	**	**	**	*	**	**	**
B: Fertilizer and biochar (n=4)								
Control (no CF)	0.43c	0.73a	0.73a	0.62b	19.79a	8.07b	19.45d	15.13b
CF 100%	0.81a	0.71b	0.70b	0.61c	15.16b	15.01a	48.47a	18.63a
CF 50% + BC 100%	0.80a	0.66d	0.73a	0.62b	8.63c	6.87c	30.09c	15.18b
CF 100% + BC100%	0.79b	0.67c	0.72a	0.63a	15.43b	5.26d	41.77b	14.24c
F-test B	**	**	**	**	**	**	**	**
AxB (n=4)								
C1 Control (no CF)	0.65d	0.84a	0.68e	0.65b	17.32c	9.0b	13.53g	14.03c
C1 CF 100%	0.78c	0.73b	0.67e	0.58ef	17.35c	14.88a	45.21b	20.81a
C1 CF50% + BC100%	0.78c	0.62d	0.71d	0.60d	2.79g	9.04b	28.62e	16.44b
C1 CF100% + BC100%	0.81b	0.60e	0.72cd	0.57f	19.94b	9.47b	45.20b	16.74b
C2 Control (no CF)	0.81b	0.62d	0.78a	0.59de	22.26a	7.14c	25.38f	16.24b
C2 CF 100%	0.84a	0.69c	0.72cd	0.63c	12.98e	15.13a	51.73a	16.46b
C2 CF50% + BC100%	0.83a	0.70c	0.75b	0.65b	14.47d	4.71d	31.57d	13.93c
C2 CF100% + BC100%	0.77c	0.74b	0.73c	0.70a	10.92f	1.05e	38.35c	11.75d
F-test AxB	**	**	**	**	**	**	**	**
CV (%)	1.06	1.08	1.04	1.2	5.48	9.19	2.32	5.12

CF: chemical fertilizer; BC: biochar; C1: Sandy clay loam; C2: Loamy sand

Different letters in a column indicate significance difference among treatment. ns = no significant, * P<0.05, ** P<0.01

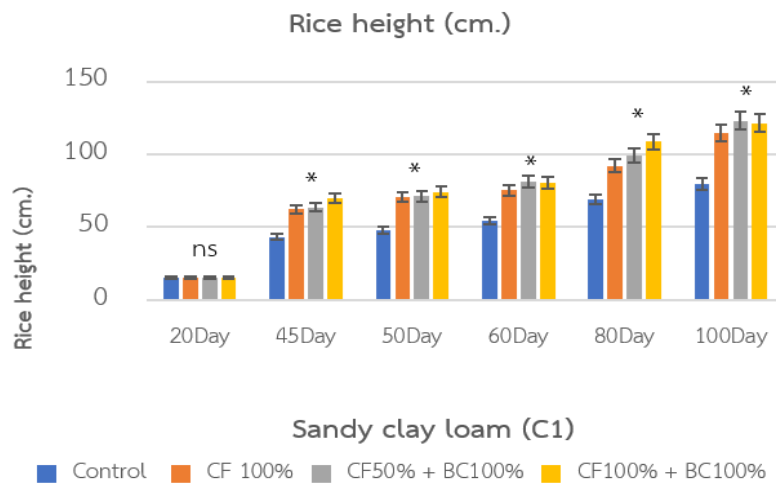


Figure 1 Rice's height at aged 20-100 days from sandy clay loam (C1)
Mean values $\pm$ standard deviations within each graph were significantly ($P < 0.05$).

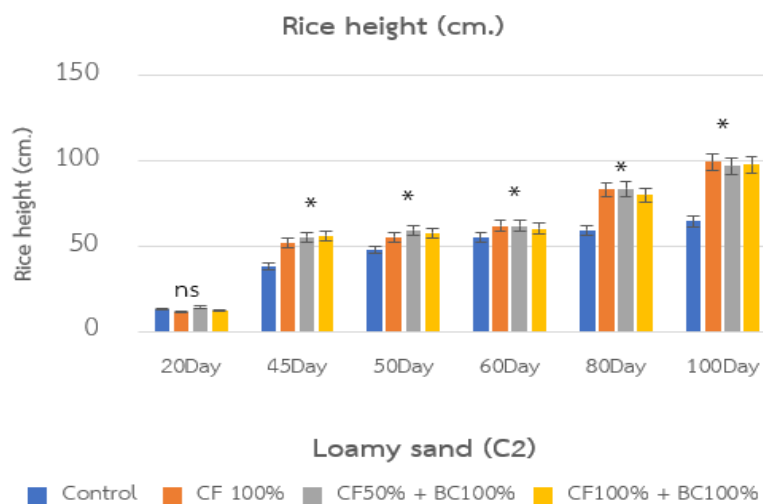


Figure 2 Rice 's height at aged 20-100 days in soil texture of loamy sand (C2)
Mean values $\pm$ standard deviations within each graph were significantly ($P < 0.05$).

Table 3 Number of tillering of rice at 100 days

Tillering	Soil texture	Treatment				F-test	CV (%)
		Control	CF	CF50%	CF 100%		
			100%	+BC 100%	+BC100%		
Number of tillering	C1	3.25 cd	7.75 a	9.00 a	9.25 a	*	18.3
(tillers/pot)	C2	2.00 d	4.50 bc	4.50 bc	6.00 b		

CF: chemical fertilizer; BC: biochar; C1, sandy clay loam; C2, Loamy sand

Different letters in a column indicate significance difference among treatment. ns = no significant, * P<0.05

Table 4 The Pearson Correlation (r) between gas emission and rice height, number of tillering

r	Sandy clay loam (C1)					Loamy sand (C2)				
	45day	60day	80day	100day	Tillering	45day	60day	80day	100day	Tillering
CH ₄	0.727	-0.828	0.686	-0.819	-0.789	-0.147	0.196	-0.718	0.555	0.843
p-value	0.001	0.000	0.003	0.000	0.000	0.587	0.467	0.002	0.026	0.000
CO ₂	-0.062	0.152	0.257	0.523	0.506	-0.824	0.037	0.526	-0.334	-0.642
p-value	0.819	0.575	0.336	0.038	0.045	0.000	0.892	0.037	0.207	0.008

วิจารณ์ผลการวิจัย

การทดลองนี้พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกภายใต้การปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งร่วมกับการใช้ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพมีอยู่หลายปัจจัย ดังนี้

เนื้อดิน จากการทดลองนี้พบว่าดินทรายปนร่วนหรือดินเนื้อหยาบมีการปลดปล่อยก๊าซสูงกว่าดินร่วนเหนียวปนทรายหรือดินเนื้อละเอียด กล่าวคือ ดินที่มีเนื้อดินหยาบหรือเป็นดินที่มีอนุภาคใหญ่จะมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซสูงกว่าดินที่มีเนื้อดินละเอียด ทั้งนี้เนื่องจากดินเนื้อหยาบมีปริมาณของช่องว่างระหว่างอนุภาคดินขนาดใหญ่อยู่มาก ทำให้ก๊าซแพร่กระจายผ่านช่องว่างในดินเข้าสู่รากและแพร่ผ่านถึงน้ำที่ขังเหนือผิวดินแล้วผ่านสู่

อากาศได้ง่าย ส่วนดินที่มีเนื้อดินละเอียดจะมีการปลดปล่อยก๊าซออกมาต่ำกว่าดินเนื้อหยาบ เนื่องจากดินเนื้อละเอียดมีช่องว่างขนาดเล็ก การแพร่กระจายและการรวมตัวของก๊าซเป็นไปได้ช้าและยากกว่า (Srisurat, 2009) สอดคล้องกับ Saengjan *et al.* (2015); Sriboottha and Saengjan (2002) พบว่าดินราชบุรีซึ่งเป็นดินเหนียวปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาได้ต่ำกว่าดินร้อยเอ็ดซึ่งเป็นดินร่วน ทั้งนี้เพราะดินร่วนมีเนื้อหยาบและมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินใหญ่ทำให้ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่าย

ระยะการเจริญเติบโตของข้าว การทดลองนี้พบว่าในระยะแตกกอหรืออายุข้าวประมาณ 35-50 วัน มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงที่สุด สอดคล้องกับ Sampanpanish and Ruensuk (2013) ที่พบว่าพันธุ์ข้าว

และชนิดของปุ๋ยมีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทน และพบการปลดปล่อยก๊าซมีเทนมากที่สุดในระยะข้าวแตกกอ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Satpathy *et al.* (1997) ที่พบว่าข้าวในระยะแตกกอนั้นมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงที่สุดเช่นกัน ซึ่งมีความเกี่ยวเนื่องกับปัจจัยด้านอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน และจากการวัดความสูงที่ 45 วัน และ 50 วัน พบว่าเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายในกรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 100% ตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีความสูงต้นสูงที่สุด เพราะความสูงและจำนวนกอของข้าวที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับถ่านชีวภาพในการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากก๊าซเรือนกระจกถูกปลดปล่อยจากดินโดยผ่านการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ และผ่านทางต้นข้าว ซึ่งลักษณะทางกายภาพของต้นข้าวที่มีช่องว่างภายในใบ ลำต้น และรากข้าว เป็นช่องทางลำเลียงของก๊าซเพื่อใช้ในการกระบวนการเมตาบอลิซึมและปลดปล่อยสู่บรรยากาศ

ดังนั้นความสูงและจำนวนกอที่มีปริมาณมากจะมีการปลดปล่อยก๊าซออกมาเหมือนกัน แต่การทดลองนี้กรรมวิธีที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพให้ความสูงและจำนวนกอข้าวสูงที่สุดแต่มีการปลดปล่อยก๊าซออกมามากที่สุด เมื่อพิจารณาการปลดปล่อยก๊าซกับระยะการเจริญเติบโตของข้าวพบว่า การปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงที่สุด $0.81 \text{ gCH}_4\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายในกรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 100% ตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% แต่มีการปลดปล่อยต่ำกว่าเนื้อดินทรายปนร่วน แสดงว่าการใช้ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพร่วมกับการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งมีผลต่อปริมาณการปลดปล่อยก๊าซและการเจริญเติบโตของข้าว มีการรายงานผลของถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตของพืชเนื่องจากถ่านชีวภาพมีสารระเหย หรือมีสารประกอบฟีนอลเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ที่อาจส่งผลต่อการงอก หรือกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน หรือการเจริญเติบโตของพืชได้ (Warnock *et al.*, 2007) แต่ Buachan (2014)

ที่ศึกษาผลกระทบจากการใช้ถ่านชีวภาพต่อผลผลิตข้าว การปลดปล่อยมีเทนและไนตรัสออกไซด์จากนาข้าว เมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ผสมถ่านชีวภาพ พบว่าการปรับปรุงดินโดยใช้ถ่านชีวภาพส่งผลให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้น และมีการปลดปล่อยไนตรัสออกไซด์จากดินลดลง แต่จะมีการปลดปล่อยมีเทนเพิ่มมากขึ้น

การใช้ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพร่วมกับการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง การทดลองนี้พบว่าการใช้ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพร่วมกับการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากดินปลูกข้าวได้ เนื่องจากการใช้ถ่านชีวภาพ (Biochar) กับดินมีจุดประสงค์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดิน และการสะสมคาร์บอน ซึ่งถ่านชีวภาพจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเพิ่มธาตุอาหาร คงอยู่ในดินได้นานและลดความจำเป็นในการใช้ปุ๋ย มีการทดสอบในแปลงเกี่ยวกับการใช้ถ่านชีวภาพลงดิน เพื่อเพิ่มการเจริญเติบโตของพืชและผลผลิตของพืชหลังจากการผสมถ่านชีวภาพในดิน พบว่าถ่านชีวภาพช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกจากดินที่สำคัญกว่านั้นถ่านชีวภาพสามารถกักเก็บคาร์บอนได้โดยตรง เนื่องจากความต้านทานต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ นำไปสู่การลดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้อีกทั้งยังสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมนุษย์ได้ถึง 12% โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการอนุรักษ์ดิน (Yongwoon *et al.*, 2013) อีกทั้งการจัดการน้ำแบบ AWD เป็นวิธีหนึ่งทีนอกจากจะลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการปลูกข้าวแล้ว ยังสามารถลดการเกิดก๊าซเรือนกระจกได้ด้วย (Shao *et al.*, 2014) สอดคล้องกับ Kohkhoo *et al.* (2015) ที่ได้ศึกษาการปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวชลประทานที่มีการจัดการน้ำและวัชพืชต่างกัน พบว่าการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง ส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซมีเทนน้อยที่สุด ส่วนการขังน้ำตลอดเวลาส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซมีเทนมากที่สุด เช่นเดียวกับ Chumvong and Kwanyuen (2008) ที่ได้ศึกษาการจัดการน้ำในนาข้าวเพื่อลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านก๊าซมีเทน พบว่าที่ระดับน้ำท่วมขังในนาข้าวสูงกว่าและนานกว่าส่งผลต่อปริมาณ

มีเทนมากกว่า และแบบเปียกสลับแห้งส่งผลกระทบน้อยที่สุดคือ เกิดมีเทนในนาข้าวน้อยที่สุด และสามารถลดปริมาณมีเทนได้ 20-81% รวมทั้งประหยัดน้ำได้ประมาณ 40-63 % และการจัดการน้ำแบบ AWD ร่วมกับการใช้ถ่านชีวภาพสามารถลดปริมาณการปลดปล่อยได้ดียิ่งขึ้น

สรุปผลการวิจัย

ปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้การปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง พบว่าการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพภายใต้การปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าวได้ จากการทดลองครั้งนี้เนื้อดินเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซ โดยพบว่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายและเนื้อดินทรายปนร่วนปลดปล่อยก๊าซต่ำลง เมื่อมีการใช้ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับการใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 1,000 กก./ไร่ เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 เนื้อดินพบว่าเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าเนื้อดินทรายปนร่วน อีกทั้งการเจริญเติบโตของต้นข้าวในแต่ละระยะก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งพบว่าข้าวที่ปลูกภายใต้การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายที่มีการจัดปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับการใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 1,000 กก./ไร่ มีผลทำให้ความสูงและจำนวนกอของต้นข้าวสูงกว่าที่ปลูกในเนื้อดินทรายปนร่วนและเมื่อข้าวอยู่ระยะแตกกอมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงที่สุดระยะน้ำมปลดปล่อยต่ำที่สุด ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปลดปล่อยสูงที่สุดในระยะออกดอกและต่ำที่สุดในระยะตั้งท้อง และการใช้ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับการใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 1,000 กก./ไร่ มีการปลดปล่อย

ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวเมื่อมีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งในดินปลูกข้าวซึ่งเราสามารถใช้เป็นแนวทางในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่จะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการการจัดการทางการเกษตรเพื่อลดผลกระทบและตั้งรับการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

เอกสารอ้างอิง

- Aumtong, S. 2018. **Paddy Soil and Management**. Chiang Mai: Faculty of Agricultural Production, Maejo University. 486 p. [in Thai]
- Buachan, N. 2014. **Carbon Stock in Rice Cultivated Soils with Different Soil Management**. Master Thesis. Kasetsart University. 91 p. [in Thai]
- Chumvong, A. and B. Kwanyuen. 2008. **Water management in paddy field for reduction of environmental impacts on methane**. 12 p. In Research Report. Bangkok: Kasetsart University. [in Thai]
- Fynn, R.W.S., R.J. Haynes, and T.G. O' Connor. 2003. Burning causes long-term change in soil organic matter content of a South African grassland. **Soil Biological and Biochemistry** 35: 677-687.

- Ghani, A.D., M. Dexter and K.W. Perrott. 2003. Hot water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. **Soil Biological and Biochemistry** 35: 1231-1243.
- Kohkhoo, R., N. Chaichana, W. Chai-arree, T. Pornprom, C. Malumpong and T. Pakoktom. 2015. Methane Emissions from Water and Weed Managements in Irrigated Paddy Rice Field. p. 431-438. *In Proceedings of 53rd Kasetsart University Annual Conference.* Bangkok: Kasetsart University. [in Thai]
- Mc Lean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. pp. 199-224. *In* Page A.L. Edition. **Methods of Soil Analysis, Part II.** Madison, WI: Chemical and Microbiological Properties, Soil Science Society of America.
- Onthong, J. 2012. **Soil and Plant Analysis Manual 1st.** Songkla: Prince of Songkla University. 168 p. [in Thai]
- Saengjan, P., S. Ro and P. Vityakon. 2015. Methane fluxes and rice yields as a function of sulfate fertilizer with incorporated rice stubble. **KKU Res. J.** 20(3): 337-345.
- Sampanpanish, P. and N. Ruensuk. 2013. Effect of rice varieties and type of fertilizer on methane emission from paddy fields. **Burapha Sci. J.** 18(1): 105-115. [in Thai]
- Satpathy, S.N., A.K. Rath, B. Ramakrishnan, V.R. Rao, T.K. Adhya and N. Sethunathan. 1997. Diurnal variation in methane efflux at different growth stages of tropical rice. **Plant and Soil** 195: 267-271.
- Shao, G.C., S. Deng, N. Liu, SE. Yu, M.H. Wang and D.L. She. 2014. Effects of controlled irrigation and drainage on growth, grain yield and water use in paddy rice. **European Journal of Agronomy** 53: 1-9.
- Smakgahn, K. and V. Saonthongnoi. 2017. Effect of rising air temperature and CO₂ concentration on greenhouse gases emissions from Suphanburi 1 rice variety. **Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University** 4(5): 131-143. [in Thai]
- Sriboottha, A. and P. Saengjan. 2002. Factors influencing methane formation and emission from paddy fields. **Academic Service Center Khon Kaen University J.** 10(3): 42-46. [in Thai]
- Srisurat, S. 2009. Reducing greenhouse gas emissions: in the case of methane gas from paddy rice fields. **Journal of Social Sciences Srinakharinwirot University** 12(2009): 115-122. [in Thai]
- Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science** 37: 29-33.

- Wantanabe, F.S. and S.R. Olsen. 1962. Calorimetric determination of phosphorus in water extracts of soil. **Soil Science** 93: 183-188.
- Warnock, D.D., J. Lehmann, T.W. Kuyper and M.C. Rillig. 2007. Mycorrhizal responses to biochar in soil: concept and mechanisms. **Plant and Soil** 300: 9-20.
- Wu, M., X. Han, T. Zhong, M. Yuan and W. Wu. 2016. Soil organic carbon content affects the stability of biochar in paddy soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 223: 59-66.
- Yagi, K. and K. Minami. 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. **Soil Science and Plant Nutrition** 36(4): 599-610.
- Yongwoon, L., J. Park, C. Ryu, K.S. Gang, W. Yang, Y.K. Park, J. Jung and S. Hyun. 2013. Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C. **Bioresource Technology** 148: 196-201.