

อิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการปลูกข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 *

Effect of rising air temperature and CO₂ concentration on greenhouse gases emissions from Suphanburi 1 rice variety

เครื่องมือ สัมครการ (Kruamas Smakgahn)**

วิไล เสาธน้อย (Vilai Saothongnoi)***

บทคัดย่อ

อิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการปลูกข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ทำการทดลองโดยปลูกข้าวในกระถางใช้ดินชุดกำแพงแสน (Typic Haplustalfs) โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ประกอบด้วย 3 ดำรับทดลอง คือ 1). สภาวะปกติ (C) 2). ควบคุมอุณหภูมิให้สูงกว่าสภาวะปกติ 2 องศาเซลเซียส (HT) และ 3). ควบคุมอุณหภูมิให้สูงสภาวะปกติ 2 องศาเซลเซียสและควบคุมความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้สูงกว่าสภาวะปกติ 2 เท่า (HTC)

ผลการศึกษาพบว่าเมื่อปลูกข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ในสภาวะที่อุณหภูมิอากาศและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น พบว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก คือ คาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะปกติ โดยที่สภาวะ HT ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 95.42 และ 57.93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนสภาวะ HTC ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น 3 เท่าและปล่อยก๊าซมีเทนสูงขึ้น 64.90 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะปกติ และพบว่าคุณสมบัติของดินในสภาวะ HT และ HTC มีค่าปริมาณคาร์บอนทั้งหมด ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงกว่าสภาวะปกติ นอกจากนี้ยังพบว่าสภาพแวดล้อมการเพาะปลูกที่เปลี่ยนแปลงยังส่งผลให้ผลผลิตข้าวลดลงด้วย

คำสำคัญ: การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศ, ก๊าซเรือนกระจก, การปลูกข้าว, โลกร้อน

* วัตถุประสงค์การเขียนบทความ ศึกษาอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการปลูกข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน E-mail: faaskms@ku.ac.th

(Advisors: Assistant Professor Dr. at Environmental Technology, Department of Science, Faculty of Liberal Art and Sciences, Kasetsart University Kamphaeng Saen Nakhopathom)

*** นิสิตปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

(Student of Master of Environmental Sciences, Department of Science, Faculty of Liberal Art and Sciences, Kasetsart University Kamphaeng Saen Nakhopathom)

Abstract

This study investigated effect of rising temperature and CO₂ concentration on greenhouse gases emissions from The Suphanburi 1 rice variety was planted in pot experiment by using Kampheang Sean soil series (*Typic Haplustalfs*). The experiment design by Completely Randomized Design (CRD) with three treatments of cultivation condition included 1) rice cultivation in ambient air temperature condition (C or Control), 2) rice cultivation in rising temperature condition (HT), and 3) rice cultivation in rising temperature and elevated CO₂ concentration (HCT). Rice cultivation under rising temperature and elevated CO₂ concentration emitted higher CO₂ and CH₄ emissions higher than normal condition. HT treatment induced 95.42 and 57.93% of CO₂ and CH₄ emissions over control treatment, respectively. While, HCT treatment enhanced 3 times of CO₂ emission and 64.90% of CH₄ emission over control treatment. It was found that HT and HCT soil properties presented higher total carbon content, total nitrogen, and the ratio of carbon to nitrogen than that control. In addition, rice cultivation under rising temperature and elevated CO₂ concentration reduce rice grain yield.

Keywords: Rising air temperature, greenhouse gases, rice cultivation, global warming

บทนำ

การปลูกข้าวมักถูกระบุว่าเป็นส่วนหนึ่งของสาเหตุในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ จากรายงานงานวิจัยในหลายประเทศที่ผ่านมาพบว่า นาข้าวมีการปล่อยมีเทน 25-100 เทระกรัมต่อปี (Kirk, 2004) ซึ่งก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญที่ถูกปล่อยจากการปลูกข้าว คือ ก๊าซมีเทน (CH₄) ที่เกิดจากย่อยสลายอินทรีย์สารในสภาพไร้อากาศ (Alan, 1994, Kirk, 2004) จากจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินนาสภาพของนาข้าวโดยทั่วไปที่มีลักษณะเป็นพื้นที่ชุ่มน้ำ และมีน้ำท่วมขังอยู่ตลอดฤดูกาลเพาะปลูกทำให้เกิดภาวะขาดออกซิเจนซึ่งเป็นสภาพที่เหมาะสมต่อการเกิดมีเทนโดยกิจกรรมของ Methanogenic bacteria (Denier van der Gon, 1996) และเมื่อก๊าซมีเทนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สมบูรณ์จะทำให้เกิดผลผลิตเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) (Hanson and Hanson, 1996) นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังเกิดจากกระบวนการหายใจของพืชเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานและการเจริญเติบโต (สมบุญ เตชะภินญาวัฒน์, 2548) ถูกปล่อยออกมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินอีกด้วย (Robert., 1995) ซึ่งการเกิดขึ้นของก๊าซเรือนกระจกทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อนซึ่งมีค่าศักยภาพที่ทำให้โลกร้อน (GWP₁₀₀) เท่ากับ 1 และ 28 สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทนตามลำดับ (IPCC, 2016) เมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้นย่อมส่งผลให้ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทนจากนาข้าวเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากช่วงเวลาระหว่างระยะที่ข้าวเริ่มมีการเจริญเติบโตจะเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงมากเพื่อสร้างอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโตและมีผลกระทบในการเร่งกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนให้เพิ่มขึ้น (Cheng et al., 2005)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการปลูกข้าว และปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในสภาวะการเพาะปลูกข้าวที่เปลี่ยนแปลง

วิธีการศึกษา

การออกแบบการทดลอง

การศึกษาใช้การออกแบบการทดลองแบบ Completely Randomized Design(CRD) ประกอบด้วย 3 ตำรับการทดลอง คือ 1). สภาวะปกติ (Control) 2). ควบคุมอุณหภูมิให้สูงกว่าสภาวะปกติ 2 องศาเซลเซียส (HT) และ 3). ควบคุมอุณหภูมิให้สูงสภาวะปกติ 2 องศาเซลเซียสและควบคุมความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้สูงกว่าสภาวะปกติ 2 เท่า (HTC) โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ เพื่อหาค่า F-value พร้อมทั้งค่าสถิติสำหรับเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละตำรับการทดลองตามวิธีของ DMRT (Duncan's multiple range test)

การควบคุมอุณหภูมิและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงเรือนตำรับการทดลอง HT และ HTC

โรงเรือนสร้างด้วยโครงเหล็กขนาด 2×2.5×2.5 เมตร (กว้าง×ยาว×สูง) คลุมด้วยพลาสติกแผ่นหนา 0.5 มิลลิเมตร จำนวน 2 หลัง ซึ่งติดตั้งอุปกรณ์ภายในโรงเรือนเพื่อควบคุมอุณหภูมิโดยติดตั้งเครื่องปรับอากาศต่อกับระบบควบคุมอัตโนมัติที่ใช้ปรับและควบคุมอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิอากาศปกติในขณะทำการทดลองประมาณ 2 องศาเซลเซียสในตำรับการทดลอง HT และ HTC ในตำรับการทดลอง HTC ควบคุมความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ ด้วยการติดตั้งระบบจรวดรอนิคส์เชื่อมต่อกับวาล์วเปิดปิดของถังก๊าซ CO₂ โดยกำหนดความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ 700 พีพีเอ็มซึ่งเป็นความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ ที่สูงกว่าสภาวะปกติ 2 เท่า ในเวลากลางวัน เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง (08.00-16.00 น.) ในช่วงข้าวอายุ 50 วัน (ตั้งท้อง) จนถึงระยะการเก็บเกี่ยว และตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ แบบอัตโนมัติด้วยเครื่องวัดยี่ห้อ KIMO รุ่น AQ 200 Air quality

การวิเคราะห์สมบัติของดินก่อนและหลังการเพาะปลูก

วิธีการวิเคราะห์ดินทั้งก่อนและหลังการเพาะปลูกในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้วิธีตามมาตรฐานการวิเคราะห์ดิน (ณัฐพล บัวจันทร์ และเครือมาศ สมักรการ, 2556) ดังต่อไปนี้ ค่าปฏิกิริยาดินวิเคราะห์โดยใช้ pH meter (Topp, 1993) ค่าอินทรีย์วัตถุในดินโดยใช้วิธี Walkley and Black (Walkley and Black, 1934) วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสโดยใช้ Spectrophotometer วิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมโดยใช้วิธี Atomic absorption spectrophotometer (ทัศนีย์ อัดตะนันท์ และ จงรักษ์ จันทรเจริญสุข, 2548) ค่าความหนาแน่นรวมในดินวิเคราะห์โดยใช้วิธี Clod method (สุนทรีย์ ยิ่งซึ้งवाल, 2536) และค่าปริมาณคาร์บอนทั้งหมดและไนโตรเจนทั้งหมดวิเคราะห์โดย CNS Analyzer (TruSpec N, CNS) ทำการทดลอง 5 ซ้ำในแต่ละตำรับการทดลอง เตรียมดินสำหรับการเพาะปลูกโดยนำชุดดินกำแพงแสนตากแห้งแล้วตากใส่ในกระถางพลาสติกสำหรับปลูกข้าวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 32 เซนติเมตร ในปริมาณกระถางละ 14 กิโลกรัม ซึ่งดินก่อนการเพาะปลูกมีคุณสมบัติเดียวกันทุกตำรับการทดลอง หลังการเพาะปลูกเก็บดินตัวอย่างมาวิเคราะห์แยก

ดำรับทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของสภาวะการเพาะปลูกใน 3 ดำรับทดลองดังกล่าวข้างต้น

วิธีการเพาะปลูกข้าว

ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 เป็นพันธุ์ข้าวที่มีลักษณะต้นค่อนข้างเตี้ย ความสูงเฉลี่ยประมาณ 125 เซนติเมตร ต้นตั้งแข็งแรงไม่ล้มง่าย ปล้องและกาบใบมีสีเขียว ใบสีเขียวเข้ม มีขนบนใบ มุมของยอดแผ่นใบตั้งตรง ข้อต่อระหว่างใบและกาบใบสีเขียวอ่อน ล้วนใบมีลักษณะ เป็น 2 ยอดสีเขียว หูใบสีเขียวอ่อน ปลายยอดดอกสีฟ้า ใบธงยาวค่อนข้างตั้งตรง ใบแก่ข้าว รวงยาวค่อนข้างแน่น ระบายถี่ คอรวงยาว เมล็ดข้าวเปลือกสีฟ้า ปลายยอด เมล็ดสีฟ้า มีขนบนเปลือกเมล็ด กลีบของดอกสั้น เมล็ดข้าวกล้องรูปร่างเรียวยาว 7.3 มิลลิเมตร กว้าง 2.2 มิลลิเมตรหนา 1.8 มิลลิเมตร ข้าวสุกค่อนข้างร่วนและแข็ง ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 3 สัปดาห์เป็นข้าวเจ้าที่ไม่ไวต่อช่วงแสง อายุประมาณ 120 ผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 750 กิโลกรัมต่อไร่ ข้าวเปลือก 1,000 เมล็ดมีน้ำหนักประมาณ 27.6 กรัม ด้านทานต่อโรคไหม้ โรคขอบใบแห้ง เพลี้ยกระโดด สีน้ำตาล และเพลี้ยกระโดดหลังขาว มีเสถียรภาพการให้ผลผลิตสูง แต่มีข้อจำกัดคือไม่ต้านทานโรคใบขีดสีน้ำตาล

ในการทดลองนี้ได้นำเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 มาเพาะต้นกล้าด้วยวิธีห่มเมล็ดพันธุ์ก่อนเพาะปลูก โดยใช้ผ้าขาวแช่น้ำทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง จากนั้นนำขึ้นมาทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง จนเมล็ดข้าวเริ่มมีรากงอกยาวประมาณ 1-2 มิลลิเมตร จึงนำไปหว่านในกระถางขนาด 35x45x10 (กว้างxยาวxสูง) กระถางละ 20 เมล็ด หลังจากหว่านเมล็ดข้าวลง 20 วัน ถอนต้นข้าวออกให้เหลือกระถางละ 10 ต้น และเมื่อข้าวอายุ 25 วัน ถอนต้นข้าวออกให้เหลือกระถางละ 5 ต้น โดยคัดต้นที่มีความสมบูรณ์และมีขนาดเท่า ๆ กัน ทำการทดลองดำรับทดลองละ 5 ซ้ำ ตรวจวัดและจดบันทึกการเจริญเติบโตของข้าวทุกสัปดาห์ตลอดฤดูการเพาะปลูกเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการศึกษา ซึ่งการเจริญเติบโตของข้าวที่ตรวจวัด ได้แก่ ความสูงของต้นข้าวโดยวัดความสูงตั้งแต่โคนต้นบริเวณเหนือผิวดินจนถึงยอดที่สูงที่สุดของต้นข้าว จำนวนกอข้าว จำนวนรวงข้าว จำนวนใบต่อต้น น้ำหนักรากสดและน้ำหนักรากแห้ง น้ำหนักต้นสด น้ำหนักต้นแห้งโดยการตัดต้นข้าวตรงรอยต่อระหว่างลำต้นส่วนที่อยู่เหนือดินกับรากใต้ดิน นับและชั่งน้ำหนักเมล็ดดีและเมล็ดลีบหลังการเก็บเกี่ยวและคำนวณผลผลิตต่อไร่โดยนำค่าตัวเลขจากการคำนวณปริมาณผลผลิตต่อพื้นที่ของกระถางที่ใช้เพาะปลูก มาคำนวณเป็นผลผลิตต่อพื้นที่ (ไร่)

การตรวจวัดปริมาณก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เก็บตัวอย่างอากาศโดยใช้กล่องเก็บตัวอย่างอากาศซึ่งทำจาก Acrylic ความหนา 5 มิลลิเมตร ขนาด 35x35x100 (กว้างxยาวxสูง) ด้านบนกล่องเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.5 เซนติเมตร และนำสายยางขนาดเล็ก ยาว 20 เซนติเมตร เสียบต่อเข้ากับรูที่เจาะและใช้ซิลิโคนทาบริเวณรอยต่อเพื่อปิดช่องว่างระหว่างรอยต่อ ภายในกล่องติดเทอร์โมมิเตอร์ไว้เพื่อวัดอุณหภูมิภายในกล่องเก็บตัวอย่างอากาศ ซึ่งขั้นตอนการเก็บตัวอย่างอากาศ มีดังนี้

- 1). เตรียมขวดแก้วขนาด 15 มิลลิลิตรเป็นขวดสำหรับเก็บตัวอย่างอากาศ ปิดด้วยจุกยางและปิดทับด้วยฟอลูมิเนียม กดล็อกให้แน่น และทำให้เป็นสุญญากาศโดยใช้เข็มฉีดยาดูดอากาศภายในขวดแก้วออกให้หมด

- 2). ยกกระถางข้าวตั้งในถังขนาดใหญ่แล้วเติมน้ำลงไปจนถึงจนระดับน้ำสูงเท่ากับระดับน้ำในกระถางข้าว ใช้กล่องเก็บตัวอย่างอากาศครอบกระถางข้าวซึ่งวางอยู่ในถัง เปิดจุกยางด้านบนกล่องเก็บตัวอย่าง

ออกเพื่อไล่อากาศ รอนระดับน้ำทั้งด้านนอกและด้านในกล่องเก็บตัวอย่างสูงเท่ากัน แล้วจึงปิดจุกยางพร้อมกับจับเวลาเพื่อเริ่มเก็บตัวอย่างอากาศ

3). เก็บตัวอย่างอากาศในกล่องเก็บตัวอย่างทุก 10 นาที เป็นเวลา 20 นาที เก็บตัวอย่างตั้งแต่ นาทีที่ 0, 10 และ 20 นาที โดยใช้เข็มฉีดยาดูดตัวอย่างอากาศออกจากกล่องเก็บตัวอย่างอากาศในขวดเก็บตัวอย่างสุญญากาศที่เตรียมไว้ในข้อ 1).

4). นำตัวอย่างอากาศมาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทน ด้วยเครื่อง GC รุ่น SHIMADZU 2010 Detector ชนิด Flame ionization detection (FID)

การคำนวณการปลดปล่อยก๊าซมีเทน

โดยใช้สูตรคำนวณ ดังนี้

$$F = 0.714 Sh(273/(273+T)) \quad (\text{Cai et al., 2000})$$

เมื่อ

F = การปลดปล่อยก๊าซมีเทน (มิลลิกรัมมีเทนต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

S = ค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่เปลี่ยนไปต่อเวลา

h = พื้นที่หน้าตัดของกล่องเก็บตัวอย่างอากาศ (ตารางเมตร)

T = อุณหภูมิภายในกล่องเก็บตัวอย่าง (องศาเซลเซียส)

การคำนวณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

โดยใช้สูตรคำนวณ ดังนี้

$$F = k \cdot (V/A) \cdot dC/dt \cdot (273/(273+T))$$

เมื่อ

F = ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

k = ค่าคงที่ของคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 1.250

V = ปริมาตรของกล่องเก็บตัวอย่างอากาศ (ลูกบาศก์เมตร)

A = พื้นที่หน้าตัดของกล่องเก็บตัวอย่างอากาศ (ตารางเมตร)

T = อุณหภูมิอากาศภายในกล่องเก็บตัวอย่างอากาศ

dC/dt = อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลคาร์บอนไดออกไซด์ในกล่องเก็บตัวอย่างอากาศ (มิลลิกรัมต่อหน่วยเวลา)

ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลต่อคุณสมบัติของดิน (ตารางที่ 1) โดยคุณสมบัติของดิน ได้แก่ ค่า pH ความหนาแน่น ความชื้น ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณคาร์บอนรวม ปริมาณไนโตรเจนรวม ปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม จาก 3 ตำรับทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) โดยพบว่าเมื่อสภาวะการเพาะปลูกเปลี่ยนแปลงไปจากภาวะปกติ (คือตำรับทดลอง HTC และ HT) ทำให้ค่า pH ในดินสูงขึ้น โดยทำให้ค่าความหนาแน่นของดิน ปริมาณคาร์บอนรวม

ปริมาณไนโตรเจนรวมสูงขึ้น และพบว่าดินในตำรับทดลอง HTC มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณโพแทสเซียม และปริมาณฟอสฟอรัสต่ำกว่าสภาวะปกติ แต่ในตำรับทดลอง HT พบว่าในดินมีปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณโพแทสเซียมและปริมาณฟอสฟอรัสสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะการเพาะปลูกอื่นๆ

ผลการศึกษาอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ดังนี้

น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นข้าว และ รากข้าว

ตัดฟางข้าวซึ่งเป็นส่วนเหนือดินทั้งหมดโดยถอนต้นข้าวจากพื้นที่ปลูกในช่วงเก็บเกี่ยว ล้างน้ำทำความสะอาด แล้วตัดตรงบริเวณรอยต่อระหว่างต้นข้าวกับรากข้าว นำมาชั่งน้ำหนักสด แล้วนำมาตากแดดกำจัดความชื้นให้แห้งเพื่อชั่งน้ำหนักแห้ง น้ำหนักฟางข้าวสดและน้ำหนักฟางข้าวแห้งที่ปลูกในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันทั้ง 3 สภาวะ คือ สภาวะ C, HT และ HTC มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยข้าวที่ปลูกในสภาวะ HTC มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักฟางข้าวสดและน้ำหนักฟางข้าวแห้งมากที่สุดเท่ากับ 380.88 และ 149.01 กรัมต่อกระถาง รองลงมาคือข้าวที่ปลูกในสภาวะ C มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักฟางข้าวสดและน้ำหนักฟางข้าวแห้งเท่ากับ 215.08 และ 77.14 กรัมต่อกระถาง และข้าวที่ปลูกในสภาวะ HT มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักฟางข้าวสดและน้ำหนักฟางข้าวแห้งน้อยที่สุดเท่ากับ 217.13 และ 65.52 กรัมต่อกระถาง (ตารางที่ 2) โดยข้าวที่ปลูกในสภาวะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมีจำนวนกอข้าวต่อกระถางมาก จึงส่งผลให้น้ำหนักต้นพืชสดมากกว่าสภาวะอื่นๆด้วย (Baker, 2004) ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะสนับสนุนให้เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างมวลชีวภาพและเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้มวลชีวภาพทางด้านลำต้นเพิ่มมากขึ้น โดยจะมีการสะสมธาตุไนโตรเจนบริเวณช่อดอกลดลงและเคลื่อนย้ายไปยังส่วนต่างๆ เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตโดยเฉพาะส่วนใบและลำต้นจึงส่งผลให้น้ำหนักมวลชีวภาพแห้งเพิ่มสูงขึ้น (Cheng et al., 2009) เมื่อสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นต้นข้าวมีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะปกติที่สภาวะอุณหภูมิปกติ ในขณะที่สภาวะอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นแต่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปกติไม่ทำให้มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของข้าวเพิ่มขึ้น (Olszyk et al. 1999)

คุณสมบัติของดิน ตำรับทดลอง	ก่อน เพาะปลูก	หลังเพาะปลูก		
		ควบคุม	HT	HTC
ค่าปฏิกิริยาดิน	7.06	7.54	7.53	7.14
อินทรีย์วัตถุ (เปอร์เซ็นต์)	1.8	2.05	2.24	1.35
อินทรีย์คาร์บอน (เปอร์เซ็นต์)	1.04	1.19	1.30	0.78
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	97.71	55.12	59.43	37.23
โพแทสเซียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	61.7	153.86	172.07	59.84
ความหนาแน่นรวมของดิน (กรัมต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.31	0.98	1.01	1.39
ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)	1.5	1.38	1.43	2.44
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)	0.06	0.10	0.09	0.19
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	23.49	12.83	14.22	12.75

น้ำหนักรากสดและน้ำหนักรากแห้งที่ปลูกในสภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน คือ สภาวะ C, HT และ HTC ซึ่งมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักรากสดเท่ากับ 372.57 147.48 และ 327.94 กรัมต่อกระถาง มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักรากแห้งเท่ากับ 121.46 28.90 และ 110.42 กรัมต่อกระถาง โดยน้ำหนักรากสดและน้ำหนักรากแห้งที่ปลูกในสภาวะแวดล้อมที่ต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยข้าวที่ปลูกในสภาวะ C มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักรากข้าวสดและน้ำหนักรากข้าวแห้งมากที่สุด รองลงมาคือข้าวที่ปลูกในสภาวะ HTC และข้าวที่ปลูกในสภาวะ HT มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักรากสดและแห้งน้อยที่สุดเท่ากับ 147.48 กรัมต่อกระถาง (ตารางที่ 2) โดยสภาวะที่มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นทั้งในตำรับทดลอง HT และ HTC จะส่งผลให้ข้าวหยุดการเจริญเติบโตหรือมีการเจริญเติบโตลดลงรากข้าวจึงมีการเจริญเติบโตน้อย ซึ่งสอดคล้องกับ Olszyk et al. (1999) พบว่าที่สภาวะแวดล้อมปกติต้นข้าวมีมวลชีวภาพใต้พื้นดินเท่ากับ 214 กรัมต่อตารางเมตร และเมื่อสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น (HTC) ต้นข้าวมีการเจริญเติบโตและมีมวลชีวภาพใต้พื้นดินเพิ่มขึ้น 78 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะปกติ แต่ที่สภาวะอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นแต่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปกติมวลชีวภาพใต้พื้นดินของข้าวลดลง 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะปกติ

ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นและรากข้าวที่เพาะปลูกภายใต้สภาวะ
แวดล้อมและชนิดดินที่ใช้ปลูกข้าวที่แตกต่างกัน

		น้ำหนักต้นสด (กรัม)	น้ำหนักต้นแห้ง (กรัม)	น้ำหนักรากสด (กรัม)	น้ำหนักรากแห้ง (กรัม)
คำรับทดลอง	C	215.08b	77.14b	372.57a	121.46a
	HT	217.13b	65.52b	147.48c	28.90b
	HTC	380.88a	149.01a	327.94a	110.42a
	F-test	**	**	**	**
% CV		26.56	36.27	13.18	23.74

หมายเหตุ

**มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ,ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ, C คือ สภาวะอากาศปกติ, HT คือ สภาวะที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น 2 องศาเซลเซียส, HTC คือ สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น 2 องศาเซลเซียสรวมกับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น 700 พีพีเอ็ม

ปริมาณผลผลิต

ผลผลิตจากการเพาะปลูกข้าวในสภาวะที่แตกต่างกัน คือ สภาวะ C, HT และ HTC มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ปริมาณผลผลิตต่อไร่ที่เพาะปลูกในที่สภาวะ C มีค่าเฉลี่ยปริมาณผลผลิตต่อไร่มากที่สุดเท่ากับ 639.52 กิโลกรัมต่อไร่ รองลงมาคือสภาวะ HT มีค่าเฉลี่ยปริมาณผลผลิตต่อไร่ 299.63 กิโลกรัมต่อไร่ และ สภาวะ HTC มีค่าเฉลี่ยปริมาณผลผลิตต่อไร่น้อยที่สุด คือ 160.18 กิโลกรัมต่อไร่ (ตารางที่ 3) ซึ่งเมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้นส่งผลให้ข้าวออกดอกเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นชักนำให้ดอกข้าวเป็นหมัน โดยที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับ 40-41 องศาเซลเซียส จะทำให้ข้าวไม่มีผลผลิตเนื่องจากการเจริญของดอกข้าวมีความไวต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้น (Baker and Allen, 1993 ; Kim et al., 1996; Matsui et al., 1997) นอกจากนั้นยังส่งผลให้ข้าวมีจำนวนเมล็ดข้าวลีบเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากดอกข้าวเป็นหมันไม่สามารถเจริญเป็นเมล็ดได้ (Matsui et al., 1997)

ตารางที่ 3 ปริมาณผลผลิตของข้าวภายใต้สภาวะแวดล้อมและชนิดดินที่ใช้ปลูกข้าวที่ต่างกัน

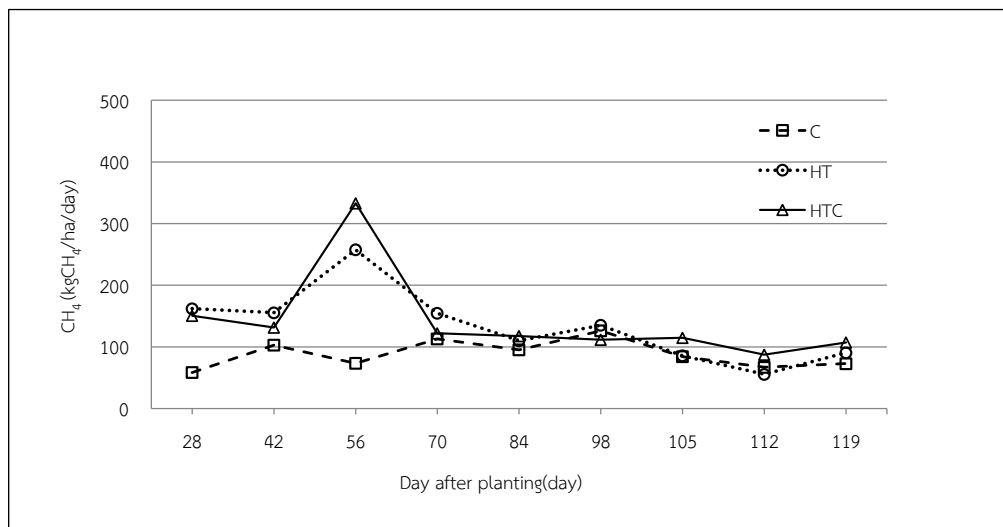
		จำนวนเมล็ดดี (เมล็ด ต่อ รวง)	จำนวนเมล็ดลีบ (เมล็ด ต่อ รวง)	น้ำหนักเมล็ดดี(กรัม ต่อ รวง)	น้ำหนักเมล็ดลีบ (กรัม ต่อ รวง)	น้ำหนักเมล็ด 1,000 เมล็ด (กรัม)	ผลผลิต (กรัม ต่อ ไร่)
ตัวรับทดลอง	C	77.04a	18.35c	2.10a	0.14b	25.74a	639.52a
	HT	44.28b	46.75b	1.05b	0.27a	23.90b	299.63b
	HTC	15.49c	65.38a	0.37c	0.28a	22.62c	160.81c
	F-test	**	**	**	*	**	**
	% CV	14.94	21.50	16.21	41.24	4.02	29.79

หมายเหตุ

**มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ, C คือ สภาวะอากาศปกติ, HT คือ สภาวะที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น 2 องศาเซลเซียส, HTCคือ สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น 2 องศาเซลเซียสร่วมกับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น 700 พีพีเอ็ม

การปล่อยก๊าซมีเทน

การเพิ่มสูงขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิต่อการปล่อยก๊าซมีเทนพบว่าปริมาณก๊าซมีเทนในสภาวะแวดล้อมที่ต่างกันทั้ง 3 สภาวะ คือ C, HT และ HTC มีค่าเฉลี่ยการปล่อยก๊าซมีเทนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยในสภาวะ HTC มีอัตราการปล่อยก๊าซมีเทนมากที่สุดเท่ากับ 1,362.82 กิโลกรัมคาร์บอนต่อเฮกตาร์ต่อฤดูกาลเพาะปลูก รองลงมาคือสภาวะ HT ซึ่งมีการปล่อยก๊าซมีเทนเท่ากับ 1,305.22 กิโลกรัมคาร์บอนต่อเฮกตาร์ต่อฤดูกาลเพาะปลูก และในสภาวะ C มีค่าการปล่อยก๊าซมีเทนน้อยที่สุดเท่ากับ 826.43 กิโลกรัมคาร์บอนต่อเฮกตาร์ต่อฤดูกาลเพาะปลูก (ภาพที่ 1) เนื่องจากในสภาวะ HTC มีปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้ข้าวมีการสังเคราะห์แสงและเจริญเติบโตได้ดี กระตุ้นให้ต้นข้าวมีการหลั่งสารอินทรีย์ เช่น น้ำตาลในรูปกรดอินทรีย์ที่ละลายได้ และกรดอะมิโนออกมามาก ซึ่งสารเหล่านี้หลั่งออกมาจากบริเวณรากข้าวเรียกว่า root exudates เป็นสารตั้งต้นในการเกิดก๊าซมีเทน (Lindau et al., 1991; Wang et al., 1997; Murakami et al., 1990) นอกจากนั้นการปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของดินและปัจจัยทางสภาพแวดล้อม คือ ปริมาณน้ำในนาข้าว อุณหภูมิ สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และวิธีการปรับปรุงดิน เป็นต้น (Parashar et al., 1991; Minami and Neue, 1994; Wang et al., 1997; Towprayoon et al., 2005; Smakgahn et al., 2009)

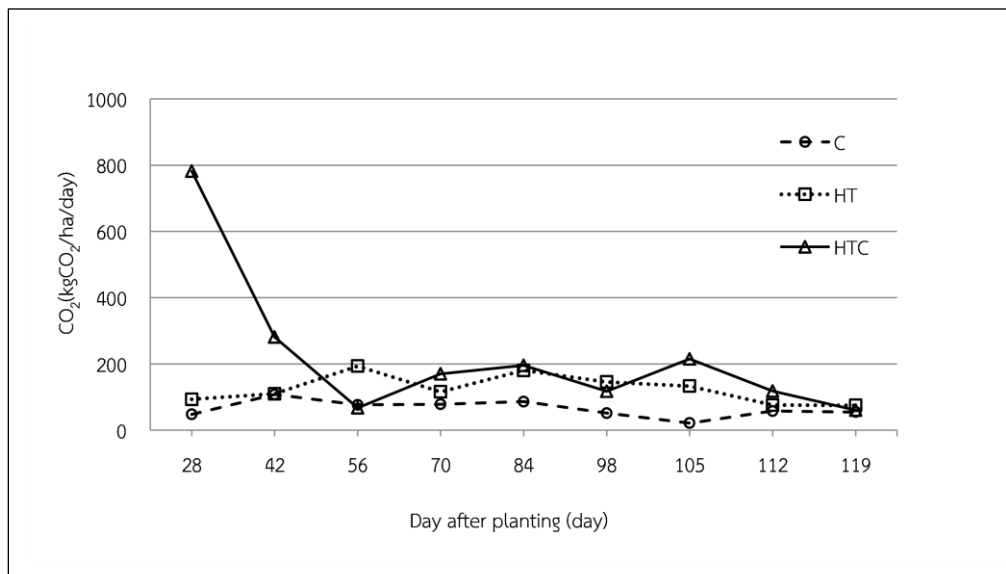


ภาพที่ 1 ปริมาณก๊าซมีเทนที่ปล่อยออกมาในช่วงฤดูการเพาะปลูกจากตำรับทดลองเพาะปลูก C คือ สภาวะอากาศปกติ HT คือ สภาวะที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น 2 องศาเซลเซียส, HTC คือ สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น 2 องศาเซลเซียสร่วมกับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น 700 พีพีเอ็ม

การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การเพิ่มสูงขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิที่มีผลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการปลูกข้าวครั้งนี้พบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการปลูกข้าวในสภาวะแวดล้อมการเพาะปลูกที่แตกต่างกันทั้ง 3 สภาวะ คือ สภาวะ C, HT และ HTC มีค่าเฉลี่ยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P \leq 0.01$) โดยในสภาวะ HTC มีอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดเท่ากับ 904.13 กิโลกรัมคาร์บอนต่อเฮกตาร์ต่อฤดูการเพาะปลูก รองลงมาคือสภาวะ HT ซึ่งมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 432.13 กิโลกรัมคาร์บอนต่อเฮกตาร์ต่อฤดูการเพาะปลูก และในสภาวะ C มีค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุดเท่ากับ 221.27 กิโลกรัมคาร์บอนต่อเฮกตาร์ต่อฤดูการเพาะปลูก

โดยค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รายวันดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งในสภาวะ HTC มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่เพิ่มสูงขึ้นกระตุ้นให้เกิดการสังเคราะห์แสงของข้าวถึงจุดสูงสุด ข้าวมีการแตกกอมากและรากข้าวมีการเจริญเติบโตได้ดี ส่งผลให้เกิดการหลั่ง Root exudates มากขึ้น ซึ่ง Root exudates เป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ถูกหมักและย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แล้วทำให้เกิดก๊าซมีเทน (Cheng et al., 2005) นอกจากนั้นในสภาวะที่อุณหภูมิอากาศเพิ่มสูงขึ้นอุณหภูมิดินจะเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกันจึงส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาจากดินในนาข้าวในรูปฟองอากาศ



ภาพที่ 2 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาในช่วงฤดูการเพาะจากดำรับทดลองเพาะปลูกที่ C คือ สภาวะอากาศปกติ HT คือ สภาวะที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น 2 องศาเซลเซียส, HTC คือ สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น 2 องศาเซลเซียสรวมกับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น 700 พีพีเอ็ม

สรุป

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากนาข้าวพบว่าภายใต้สภาวะ C, HT และ HTC มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 221.27, 432.42 และ 904.13 กิโลกรัมคาร์บอนต่อเฮกตาร์ต่อฤดูกาลเพาะปลูก ปล่อยก๊าซมีเทนเท่ากับ 826.43, 1,305.22 และ 1,362.82 กิโลกรัมคาร์บอนต่อเฮกตาร์ต่อฤดูกาลเพาะปลูก โดยที่สภาวะ HT ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 95.42 และ 57.93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนสภาวะ HTC ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 308.60 และ 64.90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สภาวะ HT และ HTC ทำให้คุณสมบัติของดินที่ใช้เพาะปลูกมีค่าปริมาณคาร์บอนทั้งหมด ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงกว่าสภาวะปกติ ดังนั้นเมื่อสภาพแวดล้อมการเพาะปลูกข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 เปลี่ยนแปลงกล่าวคืออุณหภูมิอากาศและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก คือ มีเทน และ คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งส่งผลต่อคุณสมบัติของดินและทำให้ผลผลิตข้าวลดลง

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

- ณัฐพล บัวจันทร์ และ เครือมาศ สมักรการ. (2556). “อิทธิพลของการจัดการดินต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1.” **Veridian E-Journal** 6, 3 (กันยายน-ธันวาคม): 924-934.
- ทัศนีย์ อุตตะนันท์ และ จงรัช จันทรเจริญสุข. (2548). **แบบฝึกหัดและคู่มือปฏิบัติการการวิเคราะห์ดินและพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมบุญ เตชะภินญาวัฒน์. (2548). **ชีววิทยาพืช**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จามจุรีโปรดักท์.
- สุนทรีย์ ยิ่งซิวาล. (2536). **บทปฏิบัติการปฐพีวิทยามูลฐาน**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ภาษาต่างประเทศ

- Alan, W. (1994). **Air pollution and climate change: The biological impact**. 2nd ed. Oakleigh: Cambridge press University.
- Baker, J. T. (2004). “Yield responses of southern us rice cultivars to CO₂ and temperature.” **Agricultural and forest Meteorology** 122: 129-137.
- Baker, J.T., and Allen, Jr., L.H. (1993). “Effects of CO₂ and temperature on rice: A summary of five growing seasons.” **Journal of agricultural meteorology** 48: 575-582.
- Cai, Z.C., Tsuruta, H., and Minami, K. (2000). “Methane emission from rice fields in China: measurements and influencing factors.” **J. Geophys. Res.** 17, 231-242.
- Cheng, F., Zhong, L., Zhao, N., Liu, Y., and Zhang, G. (2005). “Temperature induced changes in the starch components and biosynthetic enzymes of two rice varieties.” **Plant growth regul.** 46: 87-95.
- Cheng, W., Sakai, H., Yagi, K., and Hasegawa, T. (2009). “Interaction of elevated (CO₂) and night temperature on rice growth and yield.” **Agricultural and Forest Meteorology** 149(1): 51-58.
- Denier van der Gon, H.A.C. (1996). “**Methane emission from wetland rice fields**.” Doctoral Thesis, Wageningen Agriculture University.
- Hanson, R., and Hanson, T. (1996). “Methane Bacteria”. **American Society for Microbiology** 60(2): 439-471.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2016). “**Anthropogenic and Natural Radiative Forcing**.” IPCC assessment report, Chapter 8: 73-79.
- Kim, H.Y., Horie, T., Nakagawa, H., and Wada, K. (1996). “Effect of elevated CO₂ concentration and high temperature on growth and yield of rice II. The effect on yield and its components of Akihikari rice.” **Japanese Journal Crop Science** 65: 644-651.

- Kirk, G.J.D. (2004). **The biogeochemistry of submerged soils**. John Wiley & Sons, Ltd. West Sussex.
- Lindau, C.W., Delaune, R.D., Patrick, W.H. Jr., Bollich, P.K., and Law, V.J. (1991). "Effect of urea fertilizer and environmental factors on methane emission from a Louisiana USA rice fields." **Plant and Soil** 136: 195-203.
- Minami, K. and Neue, H.U. (1994). "Rice paddies as methane source." **Climate Change** 27: 65-73.
- Murakami, H., Kimura, M., and Wada, H. (1990). "Microbial colonization and decomposition processes in rice rhizoplane. II. Decomposition of young and old roots." **Soil Science Plant Nutrition** 36: 441-450.
- Matsui, T., Ofelia S.N., Ziska L.H., and Horie T. (1997). "Effects of high temperature and CO₂ concentration on spikelet sterility in indica rice." **Field Crops Research** 51: 213-219.
- Olszyk, D.M., Centeno, H.G.S., Ziska, L.H., Kern, J.S., and Matthews, R.B. (1999). "Global climate change rice productivity and methane emission: comparison of simulated and experimental results." **Agricultural and forest meteorology** 97: 87-101.
- Parashar, D.C., Rai, J., Gupta, P.K., and Singh, N. (1991). "Parameters affecting methane emission from paddy fields." **Ind. J. Radio Space Phys** 20: 12-17.
- Robert, L. (1995). **Soil Microbiology**. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Smakgahn, K., Fumoto, T., and Yagi, K. (2009). "Validation of revised DNDC model for methane emissions from irrigated rice fields in Thailand and sensitivity analysis of key factors." **Journal of Geophysical Research**, 114: G02017, doi:10.1029/2008JG000775, 2009
- Topp, G.C. (1993). Soil Water Content. In M.R. Carter. **Soil sampling and method of analysis**. Part 3. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers. Boca Raton.
- Towprayoon, S., Smakgahn, K. and Poonkaew, S. (2005). "Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice field." **Chemosphere** 59: 1547-1556.
- Walkley, A., and Black. I.A. (1934) "An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromi acid titration method." **Soil Science** 37: 29-38.
- Wang, B., Neue, H.U., and Smonte, H.P. (1997) "Effect of cultivar difference ('IR72', IR65598' and 'Dular') on methane emission. **Agriculture, Ecosystem, and Environment** 62:31-40.