



DEVELOPMENT OF WATER MANAGEMENT IN PADDY FIELDS
TO REDUCE METHANE EMISSION

The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage

การพัฒนาการบริหารจัดการน้ำในนาข้าวเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทน
DEVELOPMENT OF WATER MANAGEMENT IN PADDY FIELDS
TO REDUCE METHANE EMISSION

ดวงนภา วณิชสรพ์ และบัญชา ขวัญยืน

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

โทร. 034-281658 โทรสาร. 034-352053

E-mail: wanichsan@hotmail.com

บทคัดย่อ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในปี 2549 คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการจัดการน้ำในนาข้าวเพื่อลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม ผลปรากฏว่าที่ระดับท่วมขังในนาข้าวสูงกว่าและนานกว่าส่งผลต่อปริมาณก๊าซมีเทน (CH_4) มากกว่า ทั้งนี้การทำนาแบบดั้งเดิมส่งผลกระทบมากที่สุดและแบบเปียกสลับแห้งส่งผลกระทบต่อผลกระทบน้อยที่สุดคือ เกิดมีเทนในนาข้าวน้อยสุด งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงและประยุกต์ผลการวิจัยเพื่อทดสอบใช้ในการจัดการน้ำในนาข้าวจริงของเกษตรกร ผลการศึกษาพบว่า การบริหารจัดการน้ำในนาข้าวแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์เป็นวิธีการบริหารจัดการน้ำที่สามารถใช้งานได้ดี โดยสามารถลดการปลดปล่อย CH_4 ใน นาปีและนาปรังได้ถึง 80-82% และ CH_4 จะเกิดขึ้น เมื่อค่า Eh อยู่ระหว่าง -67 ถึง -347 mV นอกจากนี้การคาดการณ์การแพร่กระจายของ CH_4 ในนาปรัง ของภาคตะวันตกด้วยแบบจำลอง DNDC พบว่า การบริหารจัดการน้ำในนาข้าวแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์สามารถลดการแพร่กระจายของ CH_4 ได้ถึง 76% และลดการปลดปล่อย CH_4 เหลือเพียง 0.029 เทระกรัม/ปี

Abstract

In 2006, the authors conducted a research focused on water management in paddy fields to reduce environmental impacts. It was found that higher and longer flooding period of paddy field increased methane (CH_4) emission such that the traditional irrigation promoted the highest impacts on CH_4 emission, while the combination of shallow water depth with drying period showed the lowest impacts. This paper focused on improvement and application of water management in irrigated farm at the real field condition such that paddy fields were irrigated only when they were dry to reduce methane emission. The result showed that applied wet and dry water management was an acceptable and operational water management method. It decreased CH_4 emission up to 80-82% both in wet and dry seasons. CH_4 emission is maximum when Eh is between -67 to -347 mV. In addition, CH_4 emission prediction in the Western region of Thailand using DNDC model showed that the application of applied wet and dry water management could reduce CH_4 emission by 76% and total emission of CH_4 emission could reduce from 0.126 to 0.029 Tg/year.

1. คำนำ

ภาวะโลกร้อน (Global Warming) เป็นปัญหาใหญ่ของโลกในปัจจุบัน ซึ่งสังเกตได้จากอุณหภูมิอากาศที่สูง สาเหตุสำคัญ คือ ก๊าซเรือนกระจก ที่เกิดจากการดำเนินกิจกรรมของมนุษย์ จากสถานการณ์ปัจจุบันอำนาจการต่อรองของประเทศในตลาดพืชผลการเกษตรของโลกถูกลดลง อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากความเสื่อมโทรมของสภาพแวดล้อมที่มีสาเหตุหลักอยู่สองประการ สาเหตุแรกเป็นผลจากการปนเปื้อนของสารเคมีสู่สิ่งแวดล้อม ส่วนอีกสาเหตุหนึ่งนั้นเป็นผลกระทบที่เกิดต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก ซึ่งจากการประชุมสหประชาชาติว่าด้วยการพัฒนาสิ่งแวดล้อม (United Nations Conference on Environment and Development: UNCED) ประเทศไทยได้ลงนามในอนุสัญญาว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก (Convention on climate change) จึงมีข้อผูกพันประการสำคัญ คือ การจัดทำบัญชีแห่งชาติ และการเสนอมาตรการการปรับตัวและบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ข้าวถือเป็นอาหารหลักของประชากรโลกและมีแนวโน้มความต้องการบริโภคข้าวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกข้าวเป็นอันดับหนึ่งของโลกมานานกว่า 20 ปีติดต่อกันจนถึงปี พ.ศ. 2554 ซึ่ง [1] รายงานว่า ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวทั้งสิ้นประมาณ 69.82 ล้านไร่ ในปีเพาะปลูก 2552 ขณะเดียวกัน [2] กล่าวว่า นาข้าวถูกจัดเป็นแหล่งสำคัญในการปลดปล่อยก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญเป็นอันดับสองรองจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมีศักยภาพทำให้โลกร้อน (Global warming) มากกว่า CO_2 ถึง 23 เท่า นอกจากนี้ [3] ยังรายงานว่า ภายใต้สภาพที่น้ำท่วมขังในนาข้าว การแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างดินและบรรยากาศจะถูกยับยั้งอย่างรุนแรง ทำให้ดินขาดออกซิเจนและกลายเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ที่ผลิต CH_4 โดยมีต้นข้าวเป็นทางหลักของการปล่อย CH_4 สู่บรรยากาศ

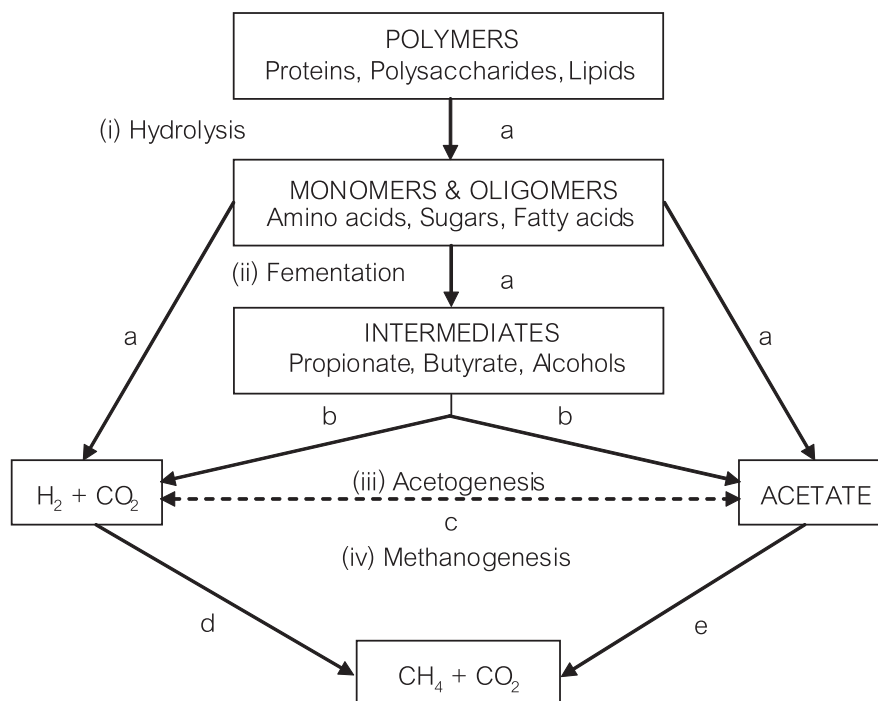
หลายปีที่ผ่านมานักวิจัยหลายท่านเห็นความสำคัญและได้ทำการศึกษาการปลดปล่อย CH_4 จากนาข้าว ด้วยวิธีการศึกษาที่แตกต่างกัน อาทิ [4] ได้ทำการวัดก๊าซมีเทนจากระบบการปลูกข้าวไร่ของประเทศไทย ซึ่งได้แก่ ข้าวไร่ นาข้าวฝน นาชลประทานที่มีการจัดการแบบเกษตรดีที่เหมาะสม (GAP) และนาชลประทานที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง พบว่า พื้นที่ปลูกข้าวนาชลประทานที่มีการจัดการแบบเกษตรดีที่เหมาะสมและนาชลประทานที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนน้อยกว่าวิธีอื่นๆ ขณะที่ [5] พบว่า นาหว่านสามารถที่จะลดการปล่อย CH_4 เมื่อเปรียบเทียบกับนาดำ ปริมาณต้นข้าวต่อหน่วยพื้นที่มีมากช่วยควบคุมวัชพืชไม่ให้เจริญเติบโตแข่งกับต้นข้าวได้ การรบกวนดินในการกำจัดวัชพืชจึงมีน้อยทำให้ CH_4 ที่ถูกกักอยู่ระหว่างอนุภาคดินไม่สามารถปล่อยออกมาได้ อีกทั้ง [6] ได้ทำการศึกษาหาวิธีการจัดการน้ำที่ดีที่สุดสำหรับการบรรเทาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวที่มีน้ำท่วมขังอย่างต่อเนื่องเป็นระยะ 2 ปี คือ ปี ค.ศ. 2005 และ 2006 ผลปรากฏว่ามีการปลดปล่อย CH_4 สูงสุดและค่าเฉลี่ยที่สูง คือ เท่ากับ 2.20 และ 1.30 มิลลิกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ในปี 2005 และ 2006 โดยในช่วงฤดู Kharif การปลดปล่อย CH_4 จะลดลงครึ่งหนึ่ง (1.02 และ 0.47 มิลลิกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับในปี 2005 และ 2006) เมื่อนาข้าวถูกให้น้ำ 2-3 วัน หลังจากที่มีน้ำขังลงดิน และมีความชื้นชลประทาน 0.15 บาร์ สามารถลด CH_4 ได้ถึง 60% (0.66 และ 0.41 มิลลิกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับในปี 2005 และ 2006) เมื่อเทียบกับนาข้าวที่มีน้ำท่วมขังอย่างสมบูรณ์โดยไม่ส่งผลกระทบต่อผลผลิตข้าว อนึ่ง [7] พบว่ามีการลดลงของค่าฟลักซ์ก๊าซมีเทน 9% เมื่อมีการระบายน้ำออกในช่วงที่ข้าวแตกกอ ขณะที่การระบายน้ำกลางฤดูและการระบายน้ำไหลก๊าซมีเทนลดลง 36.7 และ 41% ตามลำดับ และ [8] พบว่า การบริหารจัดการน้ำเป็นหนึ่งในวิธีปฏิบัติที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์จากนาข้าวในภาคตะวันออกเฉียงใต้ของจีน ซึ่งสอดคล้องกับ [9] แสดงให้เห็นว่าการบริหารจัดการน้ำเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการลดการปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว นอกจากนี้ได้พยายามลดปล่อยก๊าซมีเทนด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ เช่น [10] กล่าวว่า แบบจำลอง DNDC (DeNitrification-DeComposition) มีความสามารถในการคาดการณ์ค่าฟลักซ์ของก๊าซเรือนกระจกทั้ง 3 นั่นคือ ไนตรัสออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทน และ แบบจำลอง DNDC ได้รับการใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ เช่นเดียวกับ [11] ที่กล่าวว่า แบบจำลอง DNDC เป็นหนึ่งในแบบจำลองที่ทันสมัยที่สุดสำหรับการประเมินผลของการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากนาข้าว และถูกกล่าวถึงมากที่สุดในการจัดการปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวที่ประเทศญี่ปุ่น

จากการทบทวนงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามีความสนใจและเริ่มศึกษาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวเริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549 ทำการศึกษากาการจัดการน้ำในนาข้าวเมื่อน้ำท่วมขังที่ระดับต่างกันในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลอง เพื่อลดผลกระทบ

สิ่งแวดล้อม ผลปรากฏว่าที่ระดับท่วมขังในนาข้าวสูงกว่าและนานกว่าส่งผลต่อปริมาณมีเทนมากกว่า ทั้งนี้การทำนาแบบดั้งเดิมส่งผลกระทบมากที่สุดและแบบเปียกสลับแห้งส่งผลกระทบน้อยที่สุดคือเกิดมีเทนในนาข้าวน้อยสุด และในปี พ.ศ. 2552 ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของการขังน้ำที่มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กลอง ผลปรากฏว่า การจัดการน้ำแบบดั้งเดิมมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและมีการใช้น้ำมากที่สุด ส่วนการจัดการน้ำที่มีระยะเวลาในการขังน้ำที่ 5 วัน และ 10 วัน มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนน้อยกว่าการทำนาแบบดั้งเดิมประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งงานวิจัยทั้ง 2 ปีนี้เป็นการทดลองในแปลงทดลอง อย่างไรก็ตาม [12] World Bank และ Global Environment Facility (GEF) ได้สนับสนุนการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาปรับปรุงแนวทางการจัดการน้ำในนาข้าวที่สามารถลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวของแต่ละฤดูกาลเพาะปลูก และเกษตรกรสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง โดยไม่มีผลกระทบต่อต้นทุนผลผลิตและผลตอบแทน อีกทั้งทำการคาดการณ์ศักยภาพการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในข้าวในพื้นที่ภาคตะวันตก

1.1 การเกิดก๊าซมีเทนในนาข้าว

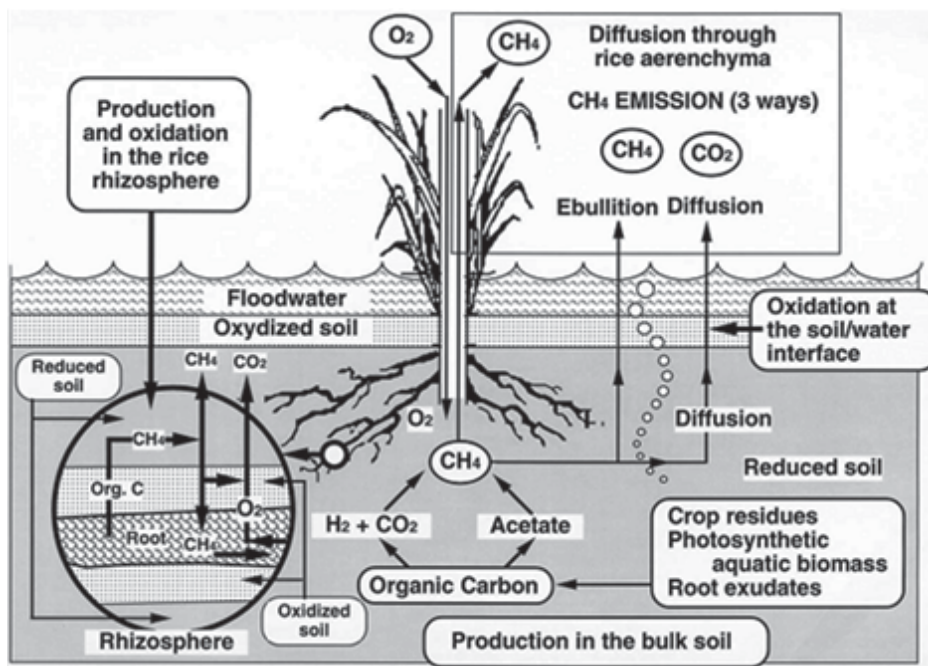
[13] สรุปว่ามีเทนในนาข้าวเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะปราศจากออกซิเจนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดอินทรีย์และขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการเกิดก๊าซมีเทน [14]

1.2 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นกับก๊าซมีเทนในนาข้าว

[15] และ [16] ได้อธิบายถึงปฏิกริยารีดักชันเหล่านี้ว่า จะเกิดขึ้นตามลำดับ และเกิดขึ้นในช่วงของคาร์บอนไดออกไซด์โพเทนเชียล (Redox potential: Eh) ที่เฉพาะเจาะจง และเกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์เฉพาะกลุ่ม โดยเริ่มจากพวกที่ต้องการออกซิเจน พวกที่อยู่ได้ทั้งในที่ที่มีออกซิเจนหรือไม่ออกซิเจน และพวกที่อยู่ไม่ได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน สำหรับปฏิกริยาที่เกิดขึ้นกับก๊าซมีเทนในนาข้าว มีด้วยกัน 5 รูปแบบ คือ 1) ปฏิกริยาออกซิเดชัน 2) การเคลื่อนมวลสาร 3) การแพร่ผ่านชั้นน้ำ 4) การเกิดฟองอากาศ และ 5) การผ่านทาง ต้นข้าว (Transport through aerenchyma) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ปฏิกริยาการเกิดก๊าซมีเทนในนาข้าว [14]

2. วิธีการ

2.1 การจัดการข้าวนา

พื้นที่ศึกษา คือ นาข้าวของเกษตรกร ตำบลวังทุ่งขวาง อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม โดยเลือกวิธีการปลูกข้าวแบบนาหว่านน้ำตมซึ่งใช้ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 และทำการปลูกข้าวในช่วงฤดูนาปีและนาปรัง โดยฤดูนาปีจะเริ่มปลูกช่วงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2553 และสิ้นสุดฤดูกาลในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2553 ส่วนฤดูนาปรังนั้นจะเริ่มปลูกเดือนมกราคม และสิ้นสุดฤดูกาลในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2554

ทั้งนี้มีการใส่ปุ๋ยเคมี 3 ครั้ง คือ หลังหว่านข้าว 25 วัน 50 วัน และ 70 วัน โดยใช้ปุ๋ยสูตร 16-20-0 ปริมาณ 35 กิโลกรัมต่อไร่ ในครั้งแรก และใช้ปุ๋ยสูตร 46-0-0 ปริมาณ 10 กิโลกรัมต่อไร่ ในครั้งที่ 2 และ 3 ขณะเดียวกันมีการใช้สารเคมีปราบวัชพืชและแมลงถึง 3 ครั้งเช่นกัน คือ ก่อนเพาะปลูก หลังเพาะปลูก 1 และ 2 เดือน ตามลำดับ

2.2 การออกแบบและจัดการนาข้าว

การปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวถูกเฝ้าระวังหลังจากหว่านเมล็ดข้าวแล้ว 30 วัน แปลงนาถูกแบ่งออกเป็น 2 แปลงย่อยขนาดแปลงละ 1 ไร่ แต่ละแปลงถูกแยกออกจากกันด้วยคันดินสูง เพื่อควบคุมระดับน้ำ โดยมีเงื่อนไขการจัดการน้ำแบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข คือ 1) นาข้าวที่ทำอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งมีน้ำท่วมขังตลอดเวลา และ 2) นาข้าวแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์ กล่าวคือการทำนาแบบนี้จะทำให้ในครั้งต่อไปก็ต่อเมื่อน้ำในนาข้าวแห้ง อนึ่งการทำนาแบบนี้วิธีการแบบเดียวกับนาข้าวของเกษตรกรแต่ปรับปรุงเพียงการควบคุมการให้น้ำเท่านั้น

2.3 การวัดการแพร่กระจายของก๊าซมีเทน

การวัดปริมาณก๊าซมีเทนจากนาข้าวที่แพร่กระจายไปในอากาศใช้วิธี The closed static chamber technique โดยนำตู้เก็บอากาศ (Chamber) ขนาด 60x50x60 เซนติเมตร พร้อมอุปกรณ์ติดตั้งไปครอบที่ต้นข้าว ปิดรูมิให้อากาศจากภายนอกเข้าไปในระบบจับเวลาเริ่มครอบและเวลาที่วัด ทั้งนี้ [17] แนะนำให้การเปิดพัดลมในตู้ครอบเป็นเวลา 30 วินาที เพื่อกวานอากาศให้สม่ำเสมอ ก่อนทำการวัด นอกจากนั้น [18] เสนอให้ทำการวัดมีเทนในช่วงเวลาประมาณ 10-11 นาฬิกา ทั้งนี้เพราะเป็นเวลาที่ปริมาณก๊าซ

มีเทนที่ปลดปล่อยออกมามีค่าใกล้เคียงค่าเฉลี่ยของวัน โดยการครอบงำกับอากาศแปลงละหนึ่งหรือสองชั้นดูจากความสูงของต้นข้าว ต่อมาใช้เครื่องมือวัดก๊าซมีเทนแบบดิจิตอลของบริษัท Testo AG ซึ่งได้ทำการปรับเทียบค่ากับเครื่อง Gas Chromatography (GC) วัดค่าความเข้มข้นของก๊าซที่เวลาต่างๆ พร้อมวัดอุณหภูมิ ค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดเป็นค่าความเข้มข้นมีหน่วยเป็น ppmv ต่อมาทำการแปลงหน่วยให้เป็นความหนาแน่นของก๊าซโดยใช้ The ideal gas law ตามคำแนะนำของ [19] ดังสมการที่ 1

$$C_i = (q_i \times M_i \times P)/(R \times T) \quad (1)$$

เมื่อ C_i คือ ความหนาแน่นของก๊าซ (g/m^3)
 q_i คือ ความเข้มข้นของก๊าซ (ppmv)
 M คือ มวลโมเลกุล
 P คือ ความดันบรรยากาศ
 R คือ ค่าคงที่มาตรฐานของก๊าซ และ
 T คือ อุณหภูมิหน่วยเคลวิน

หลังจากนั้น [20] เสนอให้คำนวณหาการแพร่กระจายของก๊าซ (Flux) โดยหาค่าความลาดชันของความหนาแน่นของก๊าซ ต่อเวลา (dC/dt) ดังสมการที่ 2

$$Flux = \left(\frac{V}{A}\right) \times \left(\frac{dC}{dt}\right) \quad (2)$$

เมื่อ Flux เป็นปริมาณก๊าซต่อพื้นที่ต่อหน่วยเวลา, V เป็นปริมาตรตู้ครอบ (ลูกบาศก์เมตร) และ A คือ พื้นที่ผิวใต้ตู้ครอบ วัดอัตราการแพร่กระจาย (ตารางเมตร)

2.4 การวัดค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Eh)

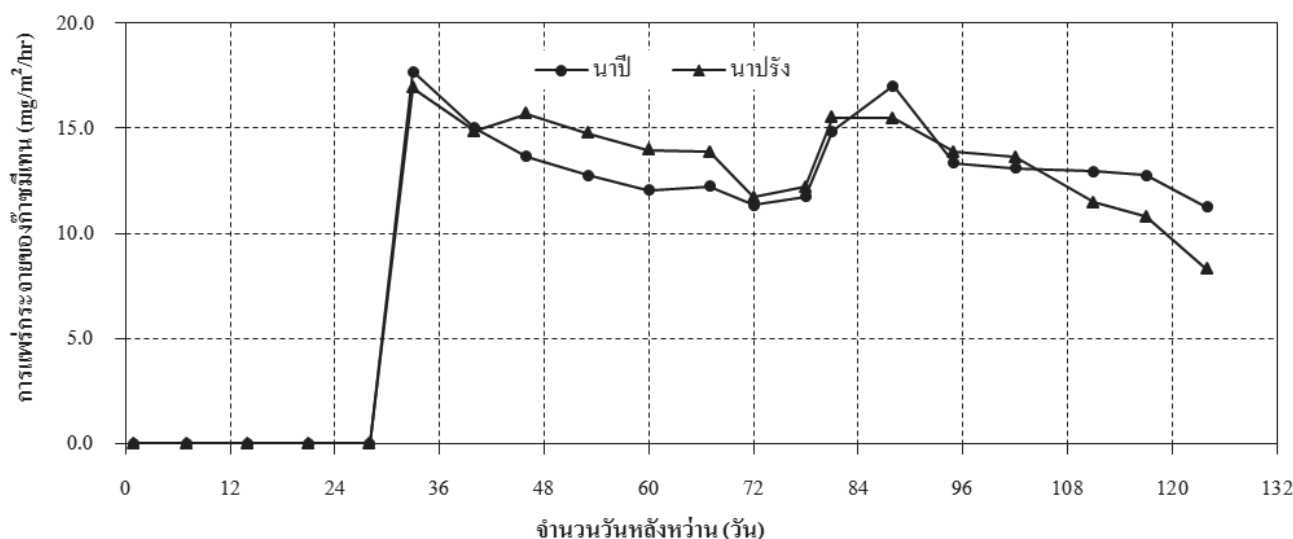
ในการศึกษาครั้งนี้ทำการวัดค่า Eh ด้วยเครื่องวัดค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล ของบริษัท WTW Model Multi 197i ซึ่งค่า Eh จะมีหน่วยเป็น มิลลิโวลต์ (mV) ส่วนช่วงเวลาที่วัดค่า Eh จะเป็นช่วงเวลาเดียวกับที่ทำการวัดปริมาณก๊าซมีเทน ทั้งนี้เนื่องจาก ค่า Eh แสดงถึงคุณสมบัติของสารละลายดินในการเกิดกระบวนการออกซิเดชันหรือรีดักชัน ซึ่งเป็นการวัดค่าความสามารถของสารละลาย ดินที่ใช้อิเล็กตรอน สำหรับการเกิด oxidizing หรือการรับอิเล็กตรอนไปใช้สำหรับ reducing agent อีกทั้ง [21] และ [22] ยังกล่าวว่า ปริมาณของการเกิดก๊าซมีเทนในดินนั้นมีความสัมพันธ์กับค่า Eh ของดินที่ลดลง ซึ่งอาจใช้เวลาเพียง 2 สัปดาห์หรือมากกว่านี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณอินทรีย์วัตถุและสภาพทางเคมีของดินในนาข้าวน้ำลึก

3. ผลการศึกษา

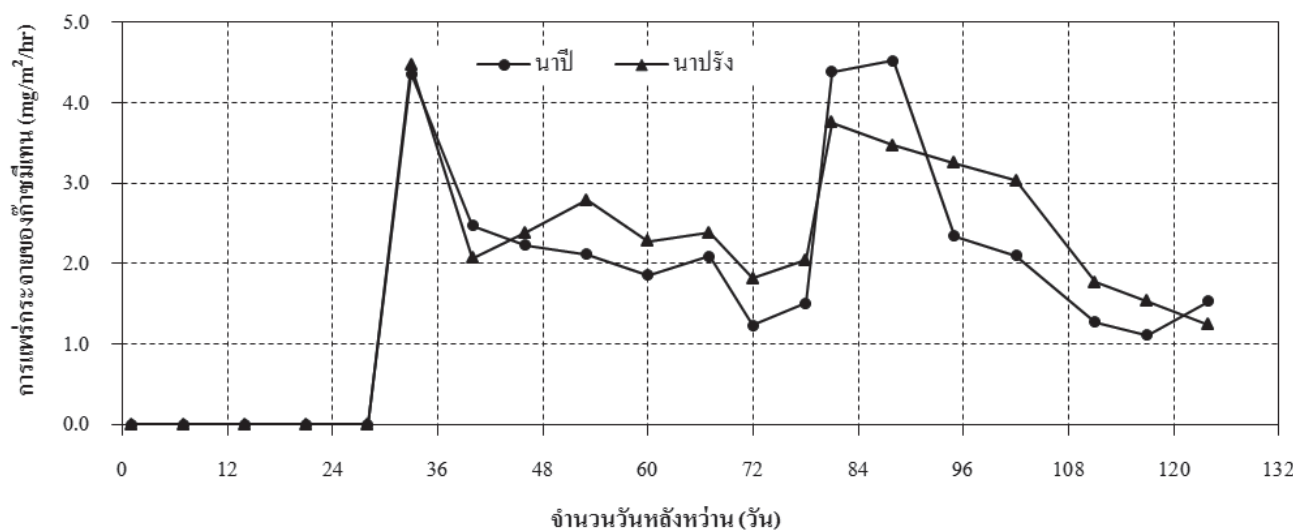
3.1 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนเมื่อมีการจัดการน้ำแตกต่างกัน

จากการศึกษาพบว่า ทั้งนาปีและนาปรังเมื่อมีการจัดการน้ำในนาข้าวแบบเดิมที่ทำในปัจจุบันนั้นมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทน มากกว่านาข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์ ซึ่งมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนตลอดฤดูกาลเพาะปลูกเท่ากับ 30.05 และ 30.41 $\text{g/m}^2/\text{crop}$ ตามลำดับ แต่หากเปลี่ยนรูปแบบการบริหารจัดการน้ำในนาข้าวแบบเดิมมาเป็นการบริหารจัดการน้ำแบบเปียก สลับแห้งประยุกต์ พบว่า การปล่อยปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาปีและนาปรังลดลงเหลือ 5.55 และ 5.82 $\text{g/m}^2/\text{crop}$ ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากนาข้าวที่มีการบริหารจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์นั้น มีช่วงระยะเวลาที่นาข้าวได้รับออกซิเจนและมีช่วงเวลาที่ดิน ในนาข้าวอยู่ในสภาวะแห้งหรือขาดน้ำ ส่งผลให้กระบวนการเกิดก๊าซมีเทนหยุดชะงักในบางเวลา ดังนั้นปริมาณก๊าซมีเทนที่ถูกปลดปล่อย จึงลดลง นอกจากนี้หากทำการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในนาปีและนาปรังระหว่างการจัดการน้ำแบบเดิมที่ทำ

ในปัจจุบันกับการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์ พบว่า ผลของการบริหารจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวได้ถึง 81-82 เปอร์เซ็นต์ และหากเปรียบเทียบการเกิดก๊าซมีเทนในนาข้าวกับฤดูกาลทำนาก็พบว่า การแพร่กระจายของก๊าซมีเทนในนาข้าวของฤดูนาปีกับนาปรังมีแนวโน้มการเกิดก๊าซมีเทนเป็นไปในทิศทางเดียวกันไม่ว่าจะมีการบริหารจัดการน้ำแบบใดซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ส่วนที่แตกต่างกันมีเพียงปริมาณก๊าซมีเทนที่ถูกปลดปล่อยมาเท่านั้น



รูปที่ 3 การแพร่กระจายของก๊าซมีเทนในนาข้าวเมื่อมีการบริหารจัดการน้ำแบบเดิมที่ทำในปัจจุบัน

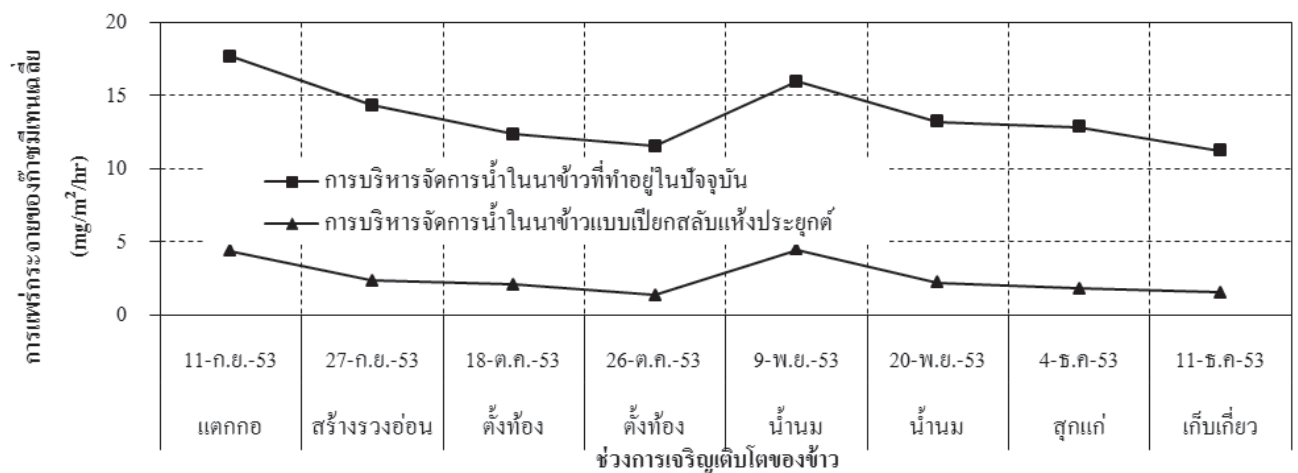


รูปที่ 4 การแพร่กระจายของก๊าซมีเทนในนาข้าวเมื่อมีการบริหารจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์

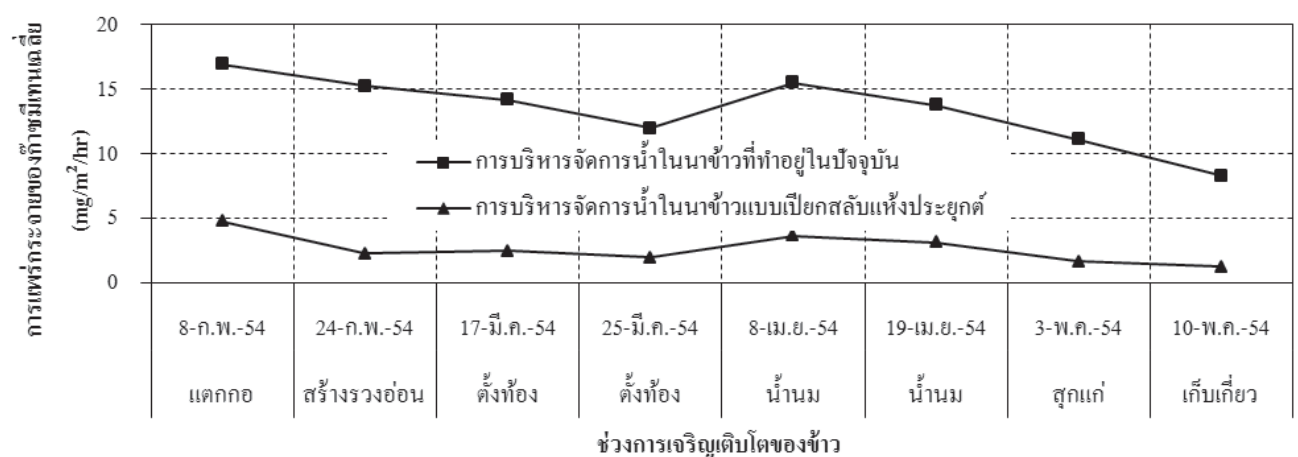
3.2 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนกับช่วงการเจริญเติบโตของข้าว

ช่วงการเจริญเติบโตของข้าวเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนของข้าวเช่นกัน จากการศึกษาหากเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซมีเทนกับช่วงการเจริญเติบโตของข้าวพบว่า การแพร่กระจายของก๊าซมีเทนมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 คือ ทุกเงื่อนไขการบริหารจัดการน้ำมีการแพร่กระจายของก๊าซมีเทนสูงในช่วงที่ต้นข้าวเริ่มแตกกอ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของข้าว ความต้องการใช้น้ำมีมาก ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซมีเทนจากดินผ่านทางลำต้นในปริมาณมาก นอกจากนั้นยังมีการใส่ปุ๋ยเคมีซึ่งเป็นตัวเร่งการปลดปล่อยปริมาณก๊าซมีเทนให้เพิ่มขึ้น ส่วนในช่วง

แตกกอเต็มที่แล้วข้าวเริ่มตั้งท้องนั้นนาข้าวอยู่ในสภาวะที่ขาดน้ำทำให้ก๊าซมีเทนลดน้อยลง และสูงขึ้นอีกครั้งในช่วงที่เมล็ดข้าวเริ่มเป็นน้านม เพราะข้าวมีความต้องการใช้น้ำมากขึ้นประกอบกับการใส่ปุ๋ยเคมีตามกำหนดระยะเวลาทำให้ก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น และก๊าซมีเทนจะค่อยๆ ลดลงในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว เนื่องจากในช่วงนี้ต้องการให้น้ำเพื่อให้เมล็ดข้าวสุกแก่เต็มที่พร้อมที่จะเก็บเกี่ยว สำหรับการแพร่กระจายของก๊าซมีเทนที่การจัดการน้ำแบบเดิมและแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์มีค่าพิสัยระหว่าง 11.24–17.69 และ 1.37–4.46 $\text{mg/m}^2/\text{hr}$ ตามลำดับสำหรับนาปี ส่วนนาปรังมีค่าพิสัยระหว่าง 8.30–16.94 และ 1.24–4.75 $\text{mg/m}^2/\text{hr}$ ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.65 และ 2.52 $\text{mg/m}^2/\text{hr}$ ตามลำดับสำหรับนาปี ส่วนนาปรังมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.38 และ 2.63 $\text{mg/m}^2/\text{hr}$ ตามลำดับ



รูปที่ 5 การแพร่กระจายของก๊าซมีเทนเฉลี่ยกับช่วงการเจริญเติบโตของข้าวในนาปี



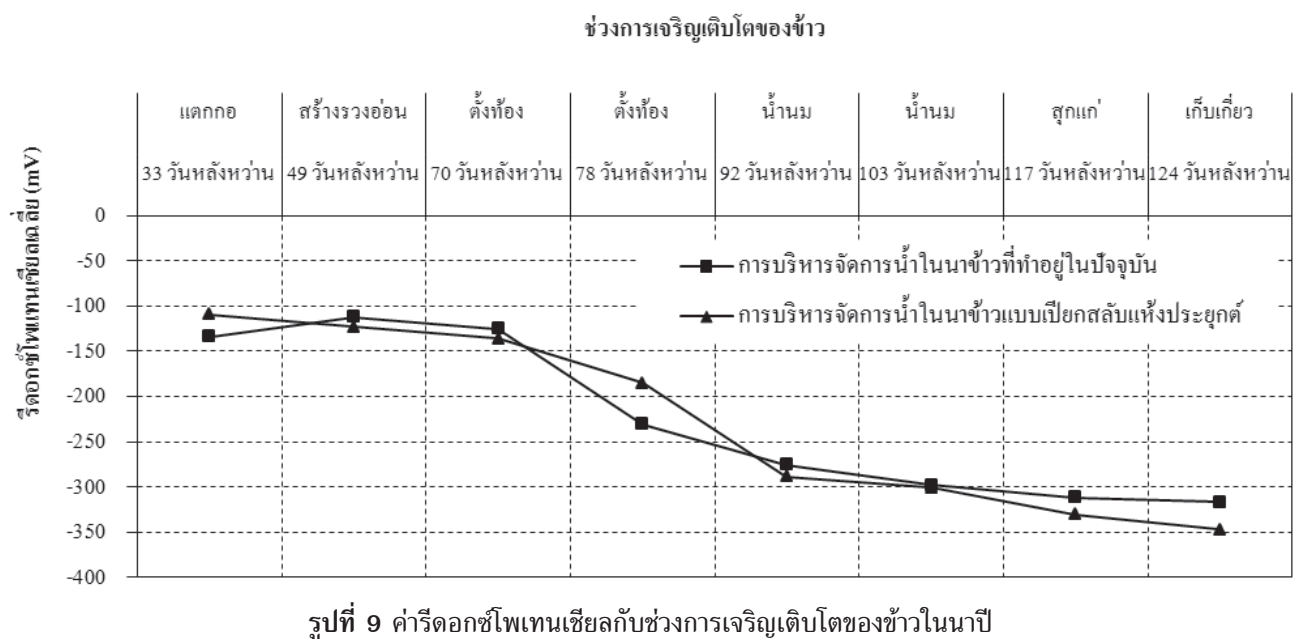
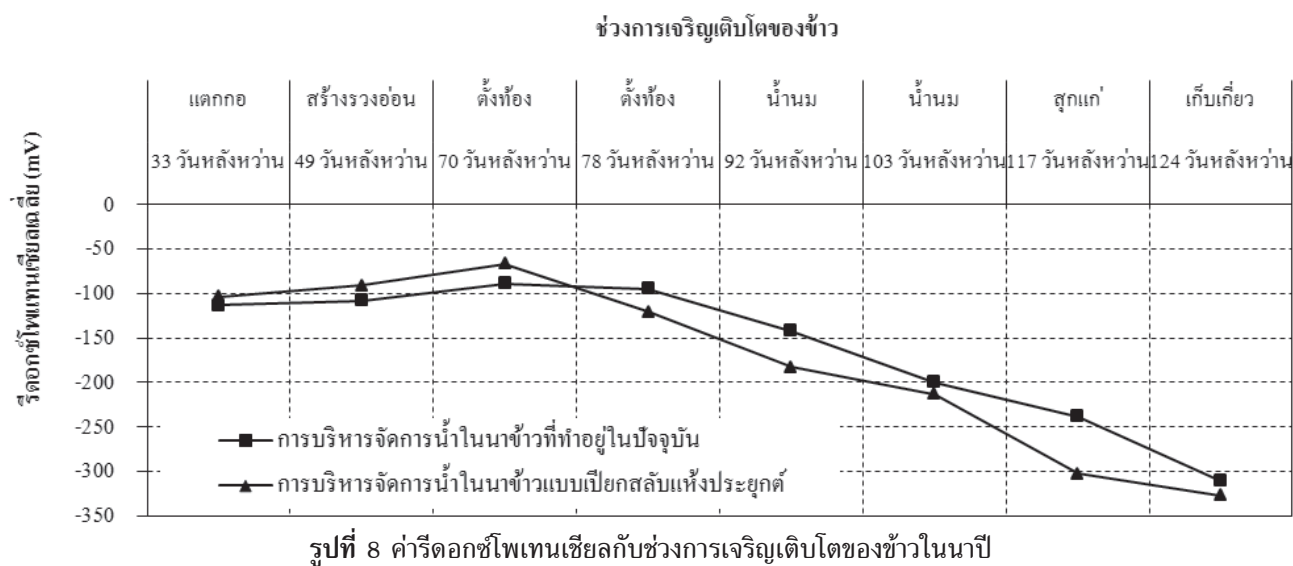
รูปที่ 6 การแพร่กระจายของก๊าซมีเทนเฉลี่ยกับช่วงการเจริญเติบโตของข้าวในนาปรัง

3.3 ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลกับช่วงการเจริญเติบโตของข้าว

ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลเป็นค่าที่ใช้วัดระดับความรุนแรงของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของดิน จากการศึกษาของ [23] พบว่า รีดอกซ์โพเทนเชียลมีการเปลี่ยนแปลง 2 ช่วง คือในระยะ เจริญเติบโตทางลำต้นและใบ โดยรีดอกซ์โพเทนเชียลจะลดลงเล็กน้อย จากนั้นเมื่อข้าวเข้าสู่ระยะเจริญเติบโตทางต้นสปีพันธุ์ หรือเมื่อข้าวอายุ 49 วัน รีดอกซ์โพเทนเชียลจะต่ำลง ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง -235 ถึง -280 mV หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งและจะลดต่ำลงอีกครั้งในวันที่ 84 จากการศึกษาพบว่า ที่เงื่อนไขการ

จัดการน้ำที่ต่างกันทั้ง 2 เงื่อนไข ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 คือ เมื่ออายุข้าวเพิ่มมากขึ้นทำให้รีดอกซ์โพเทนเชียลลดลง และค่า Eh ที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนของนาปีมีค่าระหว่าง -67 ถึง -327 mV ส่วนนาปรังค่า Eh ที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนมีค่าระหว่าง -109 ถึง -347 mV นอกจากนี้ยังพบว่าค่า Eh ที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนสูงที่สุดสำหรับการจัดการน้ำแบบเดิมและแบบเปียกสลับแห้งมีค่าเท่ากับ -113 mV และ -104 mV ตามลำดับสำหรับนาปี ส่วนนาปรังมีค่าเท่ากับ -134 mV และ -109 mV ตามลำดับ

นักวิจัยอื่นๆ เช่น [4] ยังกล่าวเพิ่มเติมว่า ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลจะสูงอีกครั้งในช่วงอายุข้าว 84 วัน ซึ่งเป็นช่วงติดเมล็ด เนื่องจากช่วงดังกล่าวมีการเคลื่อนย้ายอาหารไปสะสมในเมล็ดและพืชต้องการน้ำและแร่ธาตุจากดินจำนวนมาก จึงเป็นไปได้ที่ รากปลดปล่อยสารหลังรากมากอีกระยะหนึ่ง ในขณะที่ [24] รายงานว่า ที่สภาวะรีดักชัน Eh ในดินสามารถลดลงจากค่าบวก (600 mV) ไปยังค่าลบ (< -200 mV) ได้ แต่โดยทั่วไปค่า Eh ที่ก่อให้เกิดก๊าซมีเทนจะอยู่ในช่วง -150 ถึง -200 mV รวมทั้ง [25] เสนอว่า ก๊าซมีเทนจะเกิดขึ้นเมื่อ Eh อยู่ในช่วง -150 ถึง -350 mV



3.4 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจัดการน้ำแบบต่างๆ

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์อันได้แก่ ปริมาณการใช้น้ำ ผลผลิต ปริมาณก๊าซมีเทน รวมทั้งเปอร์เซ็นต์การลดลงของก๊าซมีเทน โดยการปรับปรุงการบริหารจัดการน้ำกับงานวิจัยครั้งที่ผ่านมา [26] ซึ่งเป็นการศึกษาในแปลงทดลองและแบ่งการจัดการน้ำออกเป็น 5 รูปแบบ คือ

- 1) การจัดการน้ำแบบน้ำตื้น (Shallow Water Depth) ทั้งสองช่วงเวลา (SS) คือ ช่วงแตกกอสูงสุดถึงกำเนิดช่อดอก (50 วันหลังหว่านและช่วงกำเนิดช่อดอก ออกดอกถึงเริ่มสุกแก่ 104 วันหลังหว่าน) โดยทั้ง 2 ช่วงนี้จะให้น้ำท่วมขังที่ระดับ 10–5 cm.
- 2) การจัดการน้ำแบบน้ำตื้นต่อด้วยแบบเปียกสลับแห้ง (SA) จะให้น้ำท่วมขังที่ระดับ 10–5 cm. และต่อด้วย 5 ถึง –5 cm.
- 3) การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying) ต่อด้วยแบบน้ำตื้น (AS) ให้น้ำท่วมขังที่ระดับ 5 ถึง –5 cm. และต่อด้วย 10–5 cm.
- 4) การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งทั้งสองช่วงเวลา (AA) คือ ช่วงแตกกอสูงสุดถึงกำเนิดช่อดอก และช่วงกำเนิดช่อดอก ออกดอกถึงเริ่มสุกแก่ จะให้น้ำท่วมขังที่ระดับ 5 ถึง –5 cm. และ
- 5) การจัดการน้ำแบบดั้งเดิม ให้ระดับน้ำท่วมขังเท่ากับ 30–20 cm.

ผลการศึกษแสดงดังตารางที่ 1 และ 2 พบว่า วิธีการจัดการน้ำแบบประยุกต์สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนได้มากที่สุด อีกครั้งยังสามารถจัดการได้ง่ายกว่าวิธีอื่นที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อผลผลิต ปริมาณการใช้น้ำ อีกทั้งสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการบริหารจัดการน้ำแบบต่างๆ ในฤดูนาปี

สิ่งที่พิจารณา	การศึกษาที่ผ่านมามีปี พ.ศ. 2549 (ส.ค.-ธ.ค.)					ปี พ.ศ. 2553 (ส.ค.-ธ.ค.)	
	TT	SS	SA	AS	AA	TT	WD
การแพร่กระจายของ CH_4 ($\text{g m}^{-2} \text{ crop}^{-1}$)	39.3	28.9	17.4	14.3	7.2	30.05	5.55
% ปริมาณ CH_4 ที่ลดลง	–	26.2	55.8	63.6	81.6	–	82
ปริมาณการใช้น้ำ (mm)	1,059.1	556.2	282.9	512.0	237.8	N/A	N/A
ผลผลิตเฉลี่ย (กก./ไร่)	724	776	884	860	876	N/A	N/A

หมายเหตุ: WD คือ การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการบริหารจัดการน้ำแบบต่างๆ ในฤดูนาปรัง

สิ่งที่พิจารณา	การศึกษาที่ผ่านมามีปี พ.ศ. 2549 (มี.ค.-ก.ค.)					ปี พ.ศ. 2553 (มี.ค.-ก.ค.)		ปี พ.ศ. 2554 (ม.ค.-พ.ค.)	
	TT	SS	SA	AS	AA	TT	WD	TT	WD
การแพร่กระจายของ CH_4 ($\text{g m}^{-2} \text{ crop}^{-1}$)	39.9	31.9	19.1	15.8	8.7	27.97	4.24	30.41	5.82
% ปริมาณ CH_4 ที่ลดลง	–	20.2	52.2	60.5	78.2	–	85	–	81
ปริมาณการใช้น้ำ (mm)	1,321.5	515.9	324.1	427.6	185.4	1,423	1,100	N/A	N/A
ผลผลิตเฉลี่ย (กก./ไร่)	716	760	880	840	840	704	828	N/A	N/A

หมายเหตุ: WD คือ การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์

3.5 การคาดการณ์การปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวทางภาคตะวันตกของประเทศไทย

การคาดการณ์โดยใช้แบบจำลอง DNDC 8.7A ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถใช้คาดการณ์การปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าว ข้อมูลที่สำคัญสำหรับแบบจำลอง DNDC ได้แก่ ข้อมูลเกี่ยวกับภูมิอากาศรายวันของปี พ.ศ. 2554 ที่ได้รับรวบรวมจากกรมอุตุนิยมวิทยา และกรมชลประทาน ข้อมูลเกี่ยวกับดินซึ่งกำหนดให้ชนิดของดินเป็นดินเหนียว และข้อมูลเกี่ยวกับการจัดการพื้นที่ สำหรับพื้นที่วิเคราะห์คือ ภาคตะวันตกของประเทศไทย ซึ่งรับน้ำจากโครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ ประกอบด้วย 4 จังหวัด ได้แก่ สุพรรณบุรี นครปฐม กาญจนบุรี และราชบุรี มีพื้นที่รวมทั้งสิ้น 3,097 ล้านไร่ ซึ่งคิดเฉพาะพื้นที่นาข้าวที่อยู่ในเขตชลประทานในช่วงฤดูทำนาปี้ง สาเหตุที่เลือกพื้นที่ภาคตะวันตก เนื่องจากเป็นแหล่งปลูกข้าวขนาดใหญ่เพียงแห่งเดียวของประเทศไทยที่มีปริมาณน้ำพอเพียงตลอดทั้งปี และไม่มีปัญหาการขาดน้ำ ดังนั้นการปรับปรุงการจัดการน้ำสามารถทำได้ง่าย โดยเกษตรกรไม่ได้รับความเสียหายต่อการขาดน้ำ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อนาข้าวทำนาแบบเดิมที่ในปัจจุบันจะมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนถึง 0.126 เทระกรัม/ปี แต่หากเปลี่ยนการจัดการน้ำเป็นการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์ พบว่า การปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาปี้งลดลงเหลือ 0.029 เทระกรัม/ปี นอกจากนี้ยังพบว่าการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนถึง 76%

4. สรุปผล

จากการศึกษาผลของการบริหารจัดการน้ำต่อการแพร่กระจายของก๊าซมีเทนในนาปีและนาปี้ง เมื่อปี พ.ศ. 2553 และ 2554 พบว่า นาปีและนาปี้งมีการแพร่กระจายของก๊าซมีเทนลดลงเมื่อมีการบริหารจัดการน้ำในนาข้าวแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์ และปริมาณก๊าซมีเทนลดลงจากที่เคยทำนาแบบเดิมที่ในปัจจุบันถึง 81-82 เปอร์เซ็นต์ ถือได้ว่าการบริหารจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์มีศักยภาพในการลดก๊าซมีเทนได้จริง นอกจากนี้ค่า Eh เป็นอีกค่าที่แสดงถึงคุณสมบัติของสารละลายดินในการเกิดกระบวนการออกซิเดชันหรือ รีดักชัน สามารถบอกได้ว่านาข้าวจะเกิดก๊าซมีเทนเมื่อใด จากการศึกษาพบว่า ค่า Eh ที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสำหรับฤดูกาลเพาะปลูกครั้งนี้ คือ -67 ถึง -347 mV สำหรับการคาดการณ์การปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวของพื้นที่ภาคตะวันตกซึ่งมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้วิธีการนี้มากที่สุดประกอบด้วยจังหวัดสุพรรณบุรี นครปฐม กาญจนบุรี และราชบุรี พบว่า การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งประยุกต์สามารถลดก๊าซมีเทนได้ถึง 76% เมื่อเปรียบเทียบกับการจัดการน้ำแบบเดิมที่ในปัจจุบัน (ลดลงจาก 0.126 เทระกรัม/ปี เหลือเพียง 0.029 เทระกรัม/ปี)

5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับทุนคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และทุนการศึกษาระดับปริญญาเอก (บุคคลภายนอก) ครั้งที่ 3 มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม รวมทั้งการอนุเคราะห์พื้นที่วิจัยจากเกษตรกรอีกทั้งผู้ช่วยเหลืองานวิจัยจากสถานีทดลองการใช้น้ำชลประทานที่ 5 (แม่กลองใหญ่) นอกจากนี้ยังได้รับอนุเคราะห์เครื่องมือสนับสนุนงานวิจัยจากศูนย์วิจัยข้าวสุพรรณบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2552. สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญ และแนวโน้มปี 2553. สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [2] ทศนีย์ อัดตะนันท์. 2543. ดินที่ใช้ปลูกข้าว. คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [3] เทียนชัย สุวรรณเวช. 2539. เคมีของดิน. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] เบญจมา สโรสภา และคณะ. 2556. รอยเท้าคาร์บอนจากระบบการปลูกข้าวที่สำคัญของประเทศไทย: การวัดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวในประเทศไทย, น.134-144. ใน การประชุมวิชาการข้าวและธัญพืชเมืองหนาว ครั้งที่ 30 สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว.
- [5] พชร แสนจันทร์ และสิริธร คมทิพย์รัตน์. 2549. การจัดการปุ๋ยและน้ำเพื่อเพิ่มผลผลิตข้าวนาหว่านน้ำตมและลดการปล่อยก๊าซมีเทน. วารสารสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. 38 : 13-32.
- [6] Khosa, M.K., B.S. Sidhu and D.K. Benbi. 2011. Methane emission from rice fields in relation to management of irrigation water. J. Environ. Biol. 32 : 169-172.

-
- [7] Tyagi, L., B. Kumari and S.N. Singh. 2010. Water management—a tool for methane mitigation from irrigated paddy fields. *Sci. Total Environ.* 408 : 1085–1090.
- [8] Hou, H., S. Peng, J. Xu, S. Yang and Z. Mao. 2012. Seasonal variations of CH₄ and N₂O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China. *Chemosphere.* 89 (7) : 884–92.
- [9] Minamikawa, K. and N. Sakai. 2006. The practical use of water management base on soil redox potential for decreasing methane emission from a paddy field in Japan. *Agri. Ecosyst. & Environ.* 116 : 181–188.
- [10] Giltrap, D.L. Li, C. and S. Saggar. 2010. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils. *Agri. Ecosyst. & Environ.* 136 : 292–300.
- [11] Katayanagi, N., Y. Furukawa, T. Fumoto, and Y. Hosen. 2012. Validation of the DNDC–Rice model based on observations of CH₄ and N₂O fluxes from rice cultivated pots under alternate wetting and drying irrigation management. *Soil Science and Plant Nutrition.* 58 : 360–372.
- [12] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2550. ศักยภาพในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย. แหล่งที่มา: <http://www.ru.ac.th/climate-change/GHG.htm>, 21 สิงหาคม 2556.
- [13] Sirintornthep, T. 2007. Methodology for Measurement of GHG from rice field. In JGSEE APN Training Workshop 1–3 May 2007, Bangkok.
- [14] Le Mer, J. and P. Roger. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *European Journal of Soil Biology.* 37 : 25–50.
- [15] ศุภสุข ประดับสุข. 2542. ผลของการระบายน้ำต่อการปล่อยก๊าซมีเทนจากการปลูกข้าวชนิดนาสวน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [16] Corton, T.M., J.B. Bajita, F.S. Grospe, R.R. Pamplona, C.A. Asis, Jr., R. Wassmam, R.S. Lantin and L.V. Buenda. 2000. Methane emission from irrigated and intensively manage rice fields in Central Luzon (Philippines). *Nutrient Cycling in Agroecosystems.* 58 : 37–54.
- [17] Bekku, Y., H. Koizumi and H. Iwaki. 1995. Measurement of Soil Respiration using Closed Chamber Method: An IRGA Technique. *Ecological Research* 10 : 369–373.
- [18] อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ. 2541. ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อมโลกจากก๊าซปฏิกิริยาเรือนกระจกต่อการทำนาข้าว. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [19] Amnat, C. 2007. Close Chamber Method to Measure CH₄ and N₂O fluxes from rice field and forest. In JGSEE APN Training Workshop 1–3 May 2007, Bangkok.
- [20] Ishigaki, T., M. Yamada, M. Nagamori, Y. Ono and Y. Inoue. 2005. Estimation of Methane Emission from Whole Waste Landfill Site using Correlation between Flux and Ground. *Environ Geol.* 48 : 845–853.
- [21] Masscheleyn P.H., R.D. DeLaune and W.H. Patrick. 1993. Methane and nitrous oxide emission from laboratory measurements of rice soil suspension: effect of soil oxidation–reduction status. *Chemosphere.* 26 : 251–260.
- [22] Wang, Z.P., R.D. DeLaune, P.H. Masscheleyn and W. H. Patrick. 1993. Soil redox and pH effect on methane production in a flooded rice soil. *Soil Sci Soc Am.* 57: 382–385.
- [23] สุชีวรรณ ยอยรู้รอบ. 2543. ความสัมพันธ์ของวิธีการปลูกข้าวและการจัดการน้ำต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [24] อัจฉรา ชุมแสง. 2551. การจัดการน้ำในนาข้าวเพื่อลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านก๊าซมีเทนและคุณภาพน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [25] Li, C. 2007. Quantifying greenhouse gas emissions from 2 soils scientific basis and modeling approach. *Soil Sci. and Plant Nutr.* 53 : 344–352.
- [26] อัจฉรา ชุมแสง. 2551. การจัดการน้ำในนาข้าวเพื่อลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมเกี่ยวกับน้ำและบรรยากาศ. *EIT eJournal.* 19 (3) : 52–59
-