Pathumwan Academic Journal, Vol. 2, No. 5, September - December 2012: 45 - 53

ความสัมพันธ์ทางสรีรวิทยาของต้นข้าวกับการนำพาก๊าซมีเทนจากนาข้าวสู่บรรยากาศ

Relationship between Rice Plant Physiology and Methane Transmitting in Paddy Field

กัญจน์ ศิลป์ประสิทธิ์*

ศูนย์วิจัยและการจัดการความรู้ทางพฤกษศาสตร์

คณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 ม. 7 ถนนรังสิต-นครนายก ต. องครักษ์ อ. องครักษ์ จ.นครนายก 26120โทรศัพท์ 0-2649-5000 ต่อ 21204

E-mail: Kun@swu.ac.th

Kun Silprasit*

Environment and Natural Resources Institute

Faculty of Environmental Culture and Ecotourism, Srinakharinwirot University

63 M.7 Rangsit-Nakhonnayok Rd., Ongkharak, Nakhonnayok 26120, Thailand. Tel (662) 649-5000 Ext. 21204

E-mail: Kun@swu.ac.th

บทคัดย่อ

การเกิดก๊าซมีเทนในนาข้าวมีหลายปัจจัยได้แก่ ปัจจัยด้านการจัดการในนาข้าว ของเสียและซากข้าวในนา ระบบชลประทาน ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมได้แก่ ความอุดมสมบูรณ์ของอาหาร ความร้อน แสง นอกจากนั้นยังมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของต้นข้าวเช่น ลักษณะสัณฐานวิทยา สรีรวิทยา และสายพันธุ์ของข้าว โดยเฉพาะตามความแตกต่างของสรีรวิทยาจะชัดเจนมากระหว่างสายพันธุ์ข้าวและสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน ซึ่งเกิดจากการทำงานที่แตกต่างกันของพันธุกรรม ดังนั้นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระบบสรีรวิทยาของต้นข้าวที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซมีเทนสามารถนำไปสู่การพัฒนาสายพันธุ์ข้าวที่ปล่อยก๊าซมีเทนได้น้อยแต่ยังคงคุณสมบัติที่ดีของสายพันธุ์ข้าวไว้ เพื่อพัฒนาระบบการทำนาที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้สืบไป

คำสำคัญ: ก๊าซเรือนกระจก นาข้าว ก๊าซมีเทน ต้นข้าว สรีรวิทยา

Abstract

Production of methane in paddy field depends on many factors such as factors of paddy field management including wastes from post harvesting and irrigation system, and factors of environment including nutrition, heat and light intensity. Moreover, there are factors of rice properties such as morphology, physiology and rice variety. Especially, the difference of rice physiologies is clearly related to rice varieties and habitat because of genetic function. Therefore, the study of relationship between rice physiologies and methane emission leads to the development of rice varieties for reducing methane emission but maintaining rice phenotype to improve the environmentally friendly paddy field system.

Keywords: Greenhouse gas, Paddy fields, Methane, Rice, Physiology

1. บทนำ

ก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่ส่งผลกระทบต่อบรรยากาศโลกมากที่สุด เนื่องจากเป็นก๊าซที่ไวต่อปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่ออยู่ในบรรยากาศ ก๊าซมีเทนสามารถเกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบทางเคมีในบรรยากาศ ส่งผลให้

Tutorial Paper

Received 8 September 2012

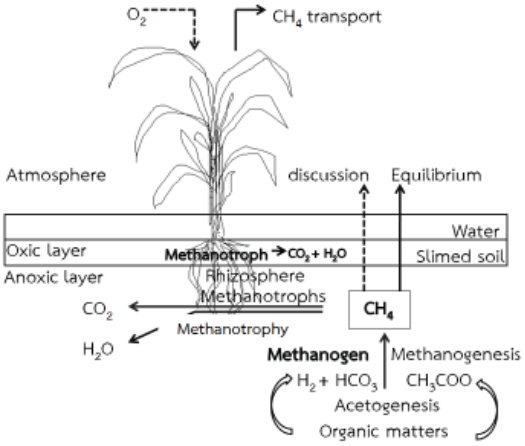
Accepted 21 December 2012

***Corresponding author.**

เกิดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีในชั้นบรรยากาศได้ ตัวอย่างเช่น ในชั้นโทรโพสเฟียร์ (troposphere) ก๊าซมีเทนจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของสารในกลุ่มไฮดรอกซิล (hydroxyl radicals) ซึ่งอนุมูลอิสระกลุ่มนี้ เป็นสารที่ช่วยในการกำจัดมลพิษต่างๆเช่น chloro-fluoro carbons (CFCs) ได้ [1] พบว่า 70 – 80 % ของก๊าซมีเทนในบรรยากาศเกิดจากกิจกรรมของสิ่งมีชีวิต ซึ่งในกิจกรรมของการเกษตรกรรมเช่น ปศุสัตว์และนาข้าวก็เป็นส่วนหนึ่งในการปลดปล่อยก๊าซมีเทน การเกิดก๊าซมีเทนในนาข้าวมีหลายปัจจัยได้แก่ ปัจจัยด้านการจัดการ เช่น การจัดการในนาข้าว ของเสียและซากข้าวในนา และระบบชลประทาน ปัจจัยด้านต้นข้าวเช่น ลักษณะสัณฐาน สรีรวิทยาและสายพันธุ์ของข้าว ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น จุลชีพพวกที่ผลิตก๊าซมีเทนและพวกที่ใช้ก๊าซมีเทน ในการศึกษาจีโนมในพืชพบว่าไม่มียีนที่สร้างเอนไซม์ในการผลิตก๊าซมีเทน ดังนั้นพืชทั่วไปไม่มีระบบชีวเคมีในการผลิตก๊าซมีเทน อย่างไรก็ตามรากพืชดูดน้ำที่มีก๊าซมีเทนละลายอยู่เมื่อพืชใช้น้ำไปจึงปลดปล่อยก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศ ซึ่งก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต้องอาศัยต้นข้าวเป็นช่องทางผ่านจากดินขึ้นสู่บรรยากาศ ดังนั้นสรีรวิทยาของต้นข้าวได้แก่ ระบบเนื้อเยื่อลำเลียงอากาศ ระบบการคายน้ำ ช่องว่างระหว่างเซลล์ ปากใบ รูพรุนขนาดเล็กที่อยู่ตามส่วนต่างของต้นข้าว รวมถึงรูปร่างลักษณะของอวัยวะ เช่น ใบ ราก ลำต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของก๊าซมีเทนได้เช่นกัน การศึกษาความสัมพันธ์ทางสรีรวิทยาของต้นข้าวกับการนำพาก๊าซมีเทนจากนาข้าวสู่บรรยากาศจะเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงพันธุ์ข้าวที่จะช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ต่อไป

2. การเกิดก๊าซมีเทนในนาข้าว

ดินในการทำนาประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ที่เกิดจากการสลายจากซากอินทรีย์วัตถุ ได้แก่สารประกอบในกลุ่มให้อิเล็คตรอน (electron donor) เช่น อะซิเทต (acetate) ฟอร์เมต (formate) เมธานอล (methanol) และเมทิลเลตเอมีน (methylatedamines) ขณะที่สารอีกกลุ่มเป็นตัวรับอิเล็กตรอน เช่นไอออน NO^{3-}, Mn^{4+}, Fe^{3+} และ SO_4^{2-} ซึ่งแบคทีเรียบางชนิดสามารถใช้อินทรีย์วัตถุเหล่านี้เพื่อไปใช้ในการสร้างพลังงานในการดำรงชีวิตโดยผ่านกระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนทำให้เกิดก๊าซมีเทนเป็นผลพลอยได้ออกมา [2] โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้นข้าวเองก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งเสริมให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจนในดินโดยออกซิเจนจะแพร่จากบริเวณดินเข้าสู่รากและจากรากเข้าสู่ลำต้นและใบ เพื่อให้เซลล์พืชนำออกซิเจนไปใช้ในกระบวนการเมตาบอริซึมของระดับเซลล์ นอกจากนี้เมื่อเซลล์รากของต้นข้าวที่อุดมไปด้วยสารต่างๆและเยื่อเมือกบริเวณรากหรือที่เรียกว่า root exudates เมื่อเกิดการเสื่อมสลายไปนั้นจะส่งเสริมการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ให้กับดินซึ่งแบคทีเรียจะนำสารเหล่านี้ไปใช้สร้างก๊าซมีเทนได้อย่างไรก็ขึ้นกับฤดูกาลในการจัดการนาข้าว เช่น



รูปที่ 1 แบบจำลองแสดงการเกิดวัฏจักรก๊าซมีเทนจากนาข้าว ดัดแปลงจาก Dubey [3] สารอินทรีย์ในดินและที่รากของต้นข้าวถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการสร้างก๊าซมีเทน ก๊าซมีเทนบางส่วนถูกสลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชั่น ส่วนที่เหลือจะแพร่เข้ารากพืชหรือแพร่ขึ้นสู่ผิวดินและบรรยากาศต่อไป

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดในนาข้าวสัมพันธ์กับการย่อยสลายของเซลล์รากในช่วงเก็บเกี่ยว (ripening stage) ในการศึกษาการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในต้นข้าว โดยใช้วิธีการติดตามธาตุรังสี ^{13}C ที่เป็นไอโซโทปแทนการใช้ ^{12}C ปกติ ใน CO_2 แสดงให้เห็นว่าสารประกอบคาร์บอนที่เป็นผลพลอยได้จาก

การสังเคราะห์แสงหรือเรียกว่า plant photosynthates เป็นสารกลุ่มหลักที่ถูกนำไปใช้ในกระบวนการสร้างก๊าซมีเทนของแบคทีเรีย [4] ซึ่งมีการสันนิษฐานว่า photosynthates ถูกปลดปล่อยจากรากและรากที่เน่าเปื่อยกลายเป็นแหล่งสารประกอบคาร์บอนในดิน ส่งผลให้จุลินทรีย์ในดินนำสารดังกล่าวไปใช้และเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ ดังรูปที่ 1 โดยสามารถกล่าวได้ว่าก๊าซมีเทนถูกผลิตด้วยกระบวนการหมักของแบคทีเรียโดยใช้สารอินทรีย์ในดินและที่รากของต้นข้าวถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการสร้างก๊าซมีเทน [5] โดยกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis) เกิดจากการทำงานของแบคทีเรียในกลุ่มเมทาโนเจน (Methanogen) ที่อาศัยในดินซึ่งเป็นบริเวณที่มีออกซิเจนต่ำหรืออาจไม่มีออกซิเจนเลย (Anoxic layer) อย่างไรก็ตามก๊าซมีเทนบางส่วนถูกใช้ในกระบวนการเมตาบอรึซึมของแบคทีเรียพวกเมทาโนโทป (Methanotroph) ที่อาศัยอยู่ในดินและในระบบรากของต้นข้าว (rhizosphere) โดยใช้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซมีเทนเข้าร่วมในปฏิกิริยากลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำดังสมการที่ (1)

$$CH_4 + 2O_2 \text{ -----> } CO_2 + 2H_2O + \text{energy} \qquad (1)$$

จากนั้นก๊าซมีเทนที่เหลือจะแพร่จากดินขึ้นสู่บรรยากาศและบางส่วนแพร่เข้าไปยังรากต้นข้าวและเข้าสู่ลำต้น ยิ่งไปกว่านั้นในดินที่มีน้ำท่วมขังหรือเปียกชุ่มมักเกิดภาวะไร้อากาศซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนและทำให้เกิดก๊าซมีเทนได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์มีเทนออกซิเดชั่นก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อปริมาณก๊าซมีเทนที่ปลดปล่อยจากต้นข้าวได้เช่นกัน โดยมีเทนออกซิเดชั่นในนาข้าวจะเกิดในดินบริเวณรากข้าว (rhizosphere) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีก๊าซมีเทนกับออกซิเจนแพร่กระจายปะปนกันอยู่ ปรากฏการณ์มีเทนออกซิเดชั่นเกิดจากการเคลื่อนที่ของออกซิเจนผ่านเนื้อเยื่อแบบแอเรงคิมา (aerenchyma) ที่ราก ซึ่งมีรูพรุนหรือเป็นโพรงเชื่อมต่อกัน ทำหน้าที่ในการสะสมอากาศและเป็นช่องว่างในการลำเลียงอากาศหรือก๊าซต่างๆ ในขณะเดียวกันที่ก๊าซมีเทนไหลจากดินไปสู่บรรยากาศทำให้ก๊าซมีเทนปะทะกับก๊าซออกซิเจนและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกันได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำตามสมการที่ (1) ส่งผลให้มีก๊าซมีเทนลดลงและพบว่าบริเวณรอยต่อจากรากกับลำต้น (root to stem transition) จะเป็นบริเวณที่เกิดออกซิเดชั่นของก๊าซมีเทนได้มาก ดังนั้นรูปร่างสันฐานและสรีรวิทยาในบริเวณดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดปริมาณการเคลื่อนที่ก๊าซมีเทนและมีผลต่อปรากฏการณ์ก๊าซมีเทนออกซิเดชั่นได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามข้าวมีความหลากหลายทางสันฐานวิทยาและสรีรวิทยา เช่น สารของ root exudates จะต่างกันไปตามสายพันธุ์ข้าวหรือความสามารถในการนำก๊าซไหลผ่าน (gas transfer capacity)จะต่างกันไปตามสายพันธุ์ [6] จึงส่งผลให้ความสามารถในการนำพาก๊าซมีเทนหรือการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจะแตกต่างกันไปในต้นข้าวได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น สายพันธุ์ Rattan เป็นสายพันธุ์ที่มีอายุการเจริญเติบโตยาวนาน จะทำให้เกิดการปล่อยก๊าซมีเทนมากกว่าสายพันธุ์ Ananda ที่มีอายุการเจริญเติบโตสั้น [7] เป็นต้น

3. บทบาทสำคัญของต้นข้าวกับการปลดปล่อยก๊าซมีเทน

3.1 เป็นแหล่งสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทน โดยสารที่หลั่งออกมาจากรากจะอุดมไปด้วยเมือกและเอนไซม์ที่หลั่งออกนอกเซลล์ (ecto-enzymes) และยังมีสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ เช่นกรดอินทรีย์ สารประกอบในกลุ่มฟีนอลและกรดอะมิโน โดยกรดอินทรีย์และกรดซิตริกจะมีมากที่สุด รองลงมาคือ เมลลิก (malic) ซัคซินิค (succinic) และกรดแลคติก (lactic) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามองค์ประกอบเหล่านี้จะแตกต่างไปตามสายพันธุ์ข้าว [8] สารที่ต้นข้าวสร้างและส่งไปสะสมที่ผิวราก (root exudates) ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสารอินทรีย์ในดิน โดยปกติสารที่สะสมที่ผิวรากในข้าวจะทำหน้าที่เป็นกลไกป้องกันตัวเองเหมือนพืชทั่วไป โดยเมื่อปริมาณสารดังกล่าวสะสมมากขึ้นจะเพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อสารที่เป็นพิษกับเซลล์ เช่น ตะกั่ว แคดเมียมและอลูมิเนียม โดยสารที่สะสมที่ผิวรากที่เป็น

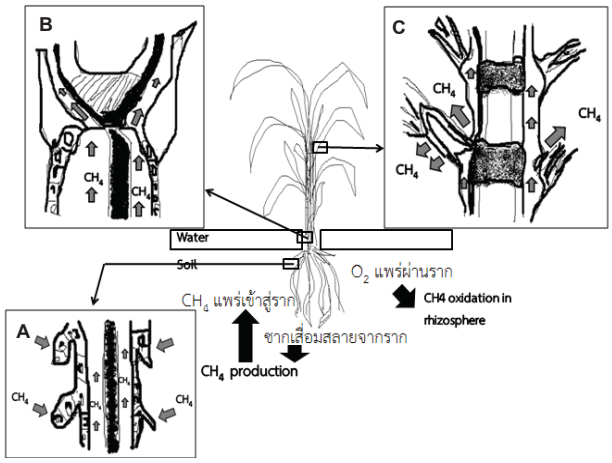
สารเมือกจะช่วยตรึงสารพิษไม่ให้เข้าสู่เซลล์ [9] ในทำนองเดียวกันในสภาวะที่ขาดธาตุอาหาร สารที่สะสมที่ผิวรากจะช่วยดูดซับและตรึงสารอาหารในดินให้อยู่ใกล้กับราก จากนั้นจะมีการหลั่งสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กและกรดอินทรีย์บางชนิด เพื่อช่วยให้เข้าทำละลายสารอาหารเหล่านั้น เช่น การหลั่งกรดซิตริกและเมลิคจำนวนมากทำให้เกิดภาวะเป็นกรดในดินบริเวณรากซึ่งจะช่วยให้เกิดการละลายของสารอนินทรีย์ ได้แก่ ฟอสเฟต เหล็ก แมงกานีส และสังกะสีได้ดีมากขึ้น [10] ในขณะที่เมื่อเกิดสภาวะที่ดินแห้งสารเมือกเหล่านี้จะช่วยให้เกิดกลไกการนำพาสารอาหารแบบ facilitate transport ทำให้สารอาหารจากอนุภาคดินเคลื่อนที่ไปยังผนังเซลล์ของรากได้ดียิ่งขึ้น

โดยสรุปได้ว่าสารอินทรีย์ที่ข้าวหลั่งออกมาและสารที่สะสมที่ผิวราก บางส่วนจะเป็นแหล่งอาหาร แหล่งคาร์บอน และแหล่งพลังงานให้จุลชีพใช้เจริญเติบโตหรือใช้ในกระบวนการเมตาบอริซึมให้ได้พลังงาน จะส่งผลให้มีการสร้างก๊าซมีเทนเป็นผลผลิต ซึ่งการหลั่งสารอินทรีย์ของข้าวจะขึ้นกับความอุดมสมบูรณ์ของสารอาหารในดินหรือสภาวะขาดอาหารของข้าว หากขาดอาหารข้าวจะหลั่งสารอินทรีย์มาก จะเอื้ออำนวยให้เกิดก๊าซมีเทนมากขึ้นด้วย การสร้างก๊าซมีเทนโดยจุลชีพในดินจะพบมากบริเวณที่มีสารอินทรีย์สะสมจากเศษพืชหรือสารอินทรีย์จากรากข้าวดังนั้นหากรากข้าวยาวลงลึกลงในดินห่างจากต้นข้าวมากจะส่งผลให้เพิ่มการเกิดก๊าซมีเทนบริเวณนั้นมากด้วย [11]

3.2 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวสู่บรรยากาศ นั้นพบว่า 90% เกิดจากการที่ก๊าซเคลื่อนที่ผ่านต้นข้าว ต้นข้าวเป็นตัวกลางสำคัญที่ให้ก๊าซมีเทนผ่านจากดินสู่บรรยากาศโดยผ่านระบบ intercellular air spaces หรือที่เรียกว่า เนื้อเยื่อแบบแอเรงคิมา (aerenchyma) ซึ่งมีรูพรุนหรือเป็นโพรงเชื่อมต่อกัน ทำให้เป็นช่องทางการเคลื่อนที่ของก๊าซต่างๆ จากรากสู่ใบหรือจากบรรยากาศผ่านเข้าสู่ใบมายังรากได้ โดยสามารถพบได้หลายๆส่วนของต้นข้าว ได้แก่ ในใบข้าว (leaf blades) ก้านใบข้าว (leaf sheaths) และลำต้น (culm) ดังนั้นขนาดและรูปร่างของระบบเนื้อเยื่อแบบแอเรงคิมามีผลต่อปริมาณการเคลื่อนที่ก๊าซมีเทนเช่นกัน

4. กลไกการเคลื่อนที่ของก๊าซมีเทนผ่านต้นข้าว

ระบบเนื้อเยื่อแบบแอเรงคิมาของข้าวและพืชอื่นๆ เป็นส่วนที่ให้ก๊าซต่างๆเคลื่อนที่ เช่น O_2, CO_2, N_2, N_2O และ CH_4 ปรากฏการณ์นี้เริ่มจากการที่ก๊าซมีเทนที่ละลายในน้ำจะแพร่เข้าหาผิวน้ำใกล้ จากนั้นจึงเคลื่อนเข้าสู่น้ำในผนังเซลล์ของราก แล้วเคลื่อนที่ไปยังชั้นคอร์เท็กซ์ (cortex) ซึ่งเป็นชั้นที่เป็นอาณาเขตระหว่างชั้นเอพิเดอร์มิส (epidermis) และสตีล (stele) ซึ่งชั้นคอร์เท็กซ์ (cortex) ประกอบด้วยเนื้อเยื่อพาเรงคิมาที่ทำหน้าที่สะสมน้ำและอาหารเป็นส่วนใหญ่ การเคลื่อนที่ของก๊าซเหล่านี้เกิดขึ้นจากแรงขับดันของความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำในดินรอบๆ รากและท่อลำเลียงในราก ก๊าซมีเทนจะออกมาจากน้ำที่ชั้น root cortex และเคลื่อนไปยังลำต้น (shoots) ด้วยช่องว่างระหว่างเซลล์ที่เรียงติดกัน (intercellular spaces) และระบบเนื้อเยื่อแบบแอเรงคิมา ก๊าซมีเทนส่วนมากถูกปล่อยออกมาจากพืชที่รูเล็กๆ ที่เรียกว่า microspores ในก้านใบล่างและข้อต่อระหว่างก้านใบกับลำต้น



รูปที่ 2 ภาพองค์รวมของการรับและปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าว ดัดแปลงจาก Nouchi และ Mariko [12] โดยเริ่มจากก๊าซมีเทนแพร่ผ่าน เนื้อเยื่อแบบแอเรงคิมาจากบริเวณราก (A) ไปยังบริเวณรอยต่อรากกับลำต้น (root-stem transitionzone, B) และออกสู่บรรยากาศบริเวณรอยต่อก้านใบกับใบข้าว (stem-leaf section zone, C) ลูกศรแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของก๊าซมีเทน

ซึ่งเป็นที่รวมของก้านใบโดยจะไม่พบการปลดปล่อยก๊าซมีเทนทางปากใบ (stomata) [12] โดยเฉพาะในข้าวจมน้ำพบว่าฟองอากาศส่วนมากจะออกมาสองทางคือ (1) ชั้นผิวของก้านใบ ในบริเวณด้านที่รับแสงแดดเรียกว่า upper epidermis cell (adaxial epidermis) และ (2) บริเวณรอยต่อของแผ่นผิวลำต้นกับก้านใบข้าวดังรูปที่ 2C

5. ปัจจัยที่ควบคุมการนำพาก๊าซมีเทนผ่านต้นข้าว

ระบบสรีรวิทยาของต้นข้าวเป็นปัจจัยที่สำคัญในการปลดปล่อยก๊าซมีเทน โดยการเคลื่อนที่ของก๊าซมีเทนอาศัยกลไกของการแพร่ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่ละลายน้ำอยู่ในดินและในดินรอบๆระบบราก นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับช่วงการเจริญเติบโต ขนาด รูปร่าง และวิธีการเพาะปลูก เช่น อัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในข้าวที่มี 9 กอจะมากกว่า 3 กอ นอกจากนั้นอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจะสัมพันธ์ของพื้นที่บนใบ (leaf area)โดยเฉพาะในช่วงแตกกอเช่นกัน [13] นอกจากนี้ระบบเนื้อเยื่อแบบแอเรงคิมา ยังมีส่วนสำคัญต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทน โดยพบว่าข้าวและพืชน้ำ (hydrophytes) ส่วนมากจะพัฒนาระบบเนื้อเยื่อแบบแอเรงคิมาทั้งในรากและลำต้นทำให้สามารถหายใจในสภาพแวดล้อมที่ขาดออกซิเจน เพื่อให้ได้พลังงานในการดำรงชีพ โดยออกซิเจนจะแพร่และเคลื่อนที่ผ่านเนื้อเยื่อแบบแอเรงคิมาไปยังราก ขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทนจะเคลื่อนที่สวนทางจากรากขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ อย่างไรก็ตามขนาดของช่องว่างในระบบเนื้อเยื่อแบบแอเรงคิมาเป็นส่วนสำคัญที่สามารถควบคุมการเคลื่อนตัวของก๊าซออกซิเจนได้และเมื่อก๊าซออกซิเจนเคลื่อนที่ไปถึงระบบราก ก็จะเร่งการทำงานของแบคทีเรียให้สามารถออกซิไดซ์ (oxidize) ก๊าซมีเทนในบริเวณรากข้าว ทำให้ส่งผลต่อปริมาณก๊าซมีเทนที่จะผ่านขึ้นมาออกสู่ชั้นบรรยากาศ อย่างไรก็ตามอัตราการปล่อยก๊าซออกซิเจนจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงการปล่อยก๊าซออกซิเจนจะลดลง ในขณะที่เมื่ออัตราการสังเคราะห์แสงและอัตราการหายใจมากขึ้นจะทำให้การปล่อยก๊าซออกซิเจนจะมากขึ้น [14]

นอกจากนั้นลักษณะข้าวจะแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนเช่น ข้าวพันธุ์ Monohar Sali ซึ่งมีต้นความสูง จำนวนใบต่อต้นมาก มวลชีวภาพของส่วนลำต้นและรากมาก ทำให้มีการเกิดก๊าซมีเทนมากที่สุดตรงกันข้ามกับพันธุ์ IR-36 ที่มีลักษณะต้นเตี้ย มวลชีวภาพน้อย นอกจากความแตกต่างของสายพันธุ์จะส่งผลต่อปริมาณการปลดปล่อยก๊าซมีเทนแล้วนั้น ช่วงอายุหรือช่วงวัยต่างๆ ยังส่งผลต่อปริมาณการปลดปล่อยก๊าซมีเทนเช่นกัน โดยในช่วงที่ข้าวออกรวงจะมีการสะสมสารอาหารมาก ทำให้มีสารประกอบอินทรีย์ให้จุลชีพสร้างก๊าซมีเทนได้ดี [15]

6. ลักษณะทางสรีระของข้าวที่เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยก๊าซมีเทน

การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจะพบมากในภาวะที่มีน้ำท่วมขังตลอด โดยเฉพาะเมื่อข้าวเข้าสู่ช่วงแตกกอ (tillering) ออกดอก (flowering) และออกรวงข้าว (ripening) [16] โดยพบว่า 90% ของการปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวเกิดจากการที่ก๊าซมีเทนเคลื่อนที่จากดินผ่านต้นข้าวสู่บรรยากาศ ดังนั้นลักษณะต้นข้าวจึงมีผลอย่างมากต่อปริมาณก๊าซมีเทนที่ออกมาจากการศึกษาพบว่าข้าวต้นเตี้ย (semi-dwarf varieties) จะปล่อยก๊าซมีเทนน้อยกว่าสายพันธุ์ที่ลำต้นสูง ซึ่งได้ทำการศึกษาในหลายสายพันธ์ข้าวทั่วโลก เช่น อินเดีย จีน ญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา ซึ่งอธิบายได้จากการที่มีมวลชีวภาพมากกว่านั่นเอง นอกจากนั้นพบว่า ความสามารถในการเคลื่อนที่ของก๊าซมีเทนจะเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับขนาดช่องท่อในระบบเนื้อเยื่อแบบแอเรงคิมาของ root-shoot transition zone (รูปที่ 2B) นอกจากนี้การปล่อยก๊าซมีเทนและไนโตรเจนไดออกไซด์ จะสัมพันธ์กับพื้นที่ใบ จำนวนใบ จำนวนต้นต่อกอและน้ำหนักแห้งของราก [17] ตัวอย่างเช่น ข้าวสองสายพันธุ์คือ Dular และ IR 72 จะมีการปล่อยก๊าซมีเทนคล้ายกันในการเพาะปลูก ขณะที่สายพันธุ์ IR 65598 จะปล่อยก๊าซมีเทนน้อย ดังนั้นสายพันธุ์ที่ต่างกันส่งผลต่อลักษณะทางสรีรวิทยาที่ต่างกันไปส่งผลต่อปริมาณก๊าซมีเทนที่ปลดปล่อยออกมา โดยลักษณะทางสรีรวิทยาของข้าวที่ส่งผลให้มีการนำพาก๊าซมีเทน

ผ่านต้นข้าวออกสู่บรรยากาศได้ดี คือ ต้นข้าวและรากที่มีขนาดใหญ่ รากมีน้ำหนักรวมมาก รากมีความยาวและจำนวนแขนงมาก จำนวนและขนาดช่องว่างระหว่างเซลล์ ใบสดมี น้ำหนักและพื้นที่ผิวมาก กอข้าวมีขนาดและจำนวนต้นมาก โดยเฉพาะความสูง น้ำหนักแห้งของลำต้น น้ำหนักแห้งของราก และจำนวนใบบนก้าน ดังตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 3 การศึกษาความสัมพันธ์ของความสามารถในการปลดปล่อยก๊าซมีเทนกับสันฐานและสรีรวิทยาของข้าว จะช่วยให้นำไปปรับปรุงพันธ์เพื่อหาพันธุ์ข้าวที่ลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนได้

6.1. ใบและก้านใบขนาดและความหนาแน่นของช่องว่างขนาดเล็กที่ผิว (micropore)

จำนวนใบมากและใบมีขนาดพื้นที่มากจะส่งเสริมให้มีจำนวนช่องว่างขนาดเล็กต่อหน่วยพื้นที่มากและช่วยให้เกิดการเคลื่อนที่ออกของก๊าซมีเทนได้ดีเช่นเดียวกับก้านใบ ซึ่งก๊าซมีเทนส่วนมากถูกปล่อยออกมาจากช่องว่างขนาดเล็กที่ผิวของก้านใบ โดยพบว่าข้าวสายพันธุ์ Basmuthi เป็นสายพันธุ์ที่มีใบกว้าง ยาว ทำให้มีพื้นที่ใบมาก ส่งผลให้ก๊าซมีเทนปลดปล่อยออกมาได้ดี [12] อย่างไรก็ตามพบว่าปากใบในบริเวณก้านใบอาจเป็นจุดสำคัญที่เป็นทางปล่อยก๊าซมีเทนได้เช่นเดียวกับปากใบที่อยู่บนใบ โดยภาพจากกล้อง Scanning electron micrograph แสดงให้เห็นช่องว่างขนาดเล็กในบริเวณผิวส่วนที่ได้รับแสงของส่วนล่างของก้านใบ [12] ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนได้เช่นกัน

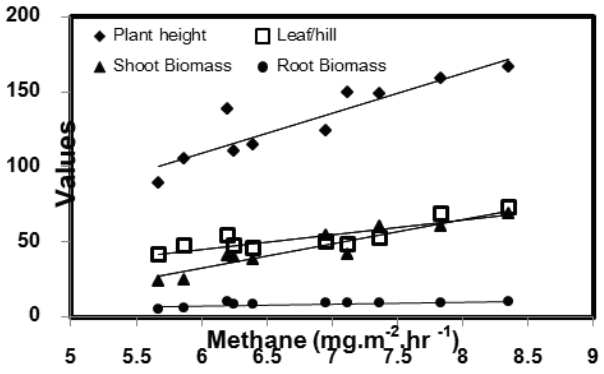
อย่างไรก็ตามการศึกษาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนที่ปากใบยังไม่ชัดเจน ซึ่งหากปากใบเป็นทางปล่อยก๊าซมีเทนได้ ความหนาแน่นของปากใบและจำนวนต้นในกออาจจะส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนได้เช่นกัน

6.2 ระบบราก

รากยาวลึกลงไปในดินมากซึ่งเป็นบริเวณที่มีก๊าซออกซิเจนน้อย จะเพิ่มโอกาสให้มีสารอินทรีย์ให้แก่กระบวนการสร้างก๊าซมีเทนโดยกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียได้ดีเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับความหนาแน่นของรากและรากที่มีมวลมาก ย่อมมีสารอินทรีย์สะสมมากในราก ซึ่งเพิ่มโอกาสให้มีสารอินทรีย์เป็นสารตั้งต้นให้แก่จุลินทรีย์เพื่อสร้างก๊าซมีเทนเช่นกัน นอกจากนั้นจำนวนแขนงของรากหากมีจำนวนมากทำให้มีสารอินทรีย์สะสมมาก เมื่อเน่าเปื่อยสลายไปจึงเป็นอาหารให้แก่ จุลินทรีย์และมีการผลิตก๊าซมีเทนได้เช่นกัน นอกจากนี้ สารอินทรีย์สะสมที่ผิวรากหรือ root exudates หากมีมากจะส่งผลต่อการเกิดก๊าซมีเทนได้มากเช่นกัน อย่างไรก็ตามความสามารถในการนำพา (transfer capacity) จะเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับขนาดช่องว่างในระบบเนื้อเยื่อแบบแอเรงคิมาในบริเวณของ root-shoot transition zone (รูปที่ 2 B)

6.3 ระบบลำต้น

ปัจจัยที่เกี่ยวกับลำต้นทั้งขนาดและความสูงของลำต้น จำนวนกอ ซึ่งพบว่าจำนวนกอน้อยและข้าวต้นเตี้ย (semi-dwarf varieties) จะปล่อยก๊าซมีเทนน้อยกว่าสายพันธุ์ที่ลำต้นสูงถึง 36% นอกจากนั้นจำนวนของข้อต่อของก้านใบกับลำต้น (node leaf-sheath junctions) ที่มีจำนวนมากจะส่งผลให้มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนได้มากเช่นกัน

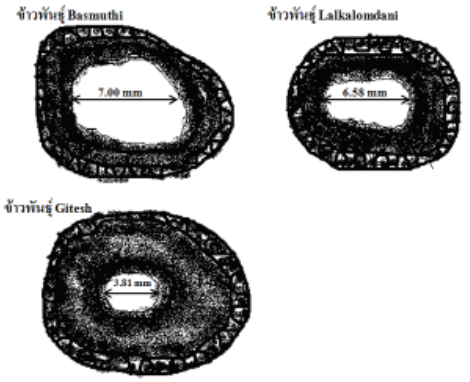


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของลักษณะบางประการกับการปลดปล่อยมีเทนดัดแปลงจาก Baruah และคณะ [17] แกนแนวตั้งแสดงตัวเลขของความสูง น้ำหนักแห้งของลำต้น น้ำหนักแห้งของรากและจำนวนใบบนก้าน แกนแนวนอนแสดงปริมาณก๊าซมีเทนที่ปลดปล่อยออกมา เป็นมิลลิกรัมต่อตารางเมตรในเวลา 1 ชั่วโมง

6.4 ระบบช่องว่างในลำต้น (medullary cavity)

ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในระบบช่องว่างในลำต้นของข้าวมีสูงมากกว่าบรรยากาศด้านนอกถึง 2900 เท่า [14] ดังนั้นก๊าซมีเทนจะแพร่ออกสู่บรรยากาศได้โดยง่าย การศึกษาขนาดของระบบช่องว่างในลำต้นจากข้าวสามสายพันธุ์ที่มีความสามารถในการปลดปล่อยก๊าซมีเทนมากน้อยต่างกันคือ สายพันธุ์ Basmuthi (ปลดปล่อยก๊าซมีเทนได้มากที่สุด) สายพันธุ์ Lalkalomdani (ปลดปล่อยก๊าซมีเทนได้ในระดับกลาง) และสายพันธุ์ Gitesh (ปลดปล่อยก๊าซมีเทนได้น้อยที่สุด) พบว่าสายพันธุ์ Basmuthi ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่ปลดปล่อยก๊าซมีเทนมากที่สุด มีขนาดของระบบช่องว่างในลำต้นหรือ medullary cavities มากที่สุด โดยมีความกว้าง 7 มิลลิเมตร ซึ่งใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับขนาดต้นที่เท่ากันจากข้าวสายพันธุ์อื่นๆ ดังรูปที่ 4

นอกจากนั้น ภาพ Scanning electron micrographs แสดงขนาดของ vascular bundles จากสายพันธุ์ Basmuthi ซึ่งมีช่องขนาดใหญ่ที่สุด ถัดมาคือสายพันธุ์ Lalkalomdani และ vascular bundles ที่มีช่องขนาดเล็กที่สุดคือสายพันธุ์ Gitesh พบว่าปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนมีความสัมพันธ์กับขนาดของช่อง vascular bundles ด้วยเช่นกัน [19] นอกจากนั้นความหนาแน่นของปากใบในข้าวสายพันธุ์ Basmuthi และ ข้าวสายพันธุ์ Bogajoha มากกว่า ข้าวสายพันธุ์ Prafulla และ ข้าวสายพันธุ์ Gitesh ยิ่งไปกว่านั้นข้าวที่มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงมักจะมีการคายน้ำมากกว่าข้าวสายพันธุ์ที่ปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่ำ อย่างไรก็ตามการผลิตข้าวที่ได้ผลผลิตไม่เต็มประสิทธิภาพนั้นจะส่งผลให้มีสารประกอบคาร์บอนที่เกิดจากการสังเคราะห์แสงในต้นข้าว เหลืออยู่มากและจะกลับคืนสู่ดินซึ่งจะกลายเป็นแหล่งคาร์บอนให้เกิดการสร้างก๊าซมีเทนได้ [5]



รูปที่ 4 ภาพตัดขวางแสดง medullary cavity ของ สายพันธุ์ Basmuthi มีความกว้าง 7 มิลลิเมตร สายพันธุ์ Lalkalomdani มีความกว้าง 6.58 มิลลิเมตร และ สายพันธุ์ Gitesh มีความกว้าง 3.81 มิลลิเมตร ดัดแปลงจาก Hsu และคณะ [18]

ปัจจัยทางสรีรวิทยาของต้นข้าวจะส่งผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทน ดังนั้นการคัดเลือกสายพันธุ์ข้าวหรือต้นข้าวที่มีลักษณะสรีรวิทยาที่ส่งผลให้มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่ำ จะสามารถนำไปสู่การปรับปรุงพันธุ์ให้ได้พันธุ์ข้าวที่มีลักษณะที่ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้

7. สรุป

พื้นที่ทำนามีบริเวณกว้าง ดังนั้นการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อปริมาณก๊าซมีเทนในบรรยากาศ โดยทั่วไปก๊าซมีเทนจะเคลื่อนที่จากนาข้าวสู่ชั้นบรรยากาศโดยใช้ต้นข้าวเป็นทางผ่านออกไป สรีรวิทยาของต้นข้าวจึงเป็นปัจจัยสำคัญอีกปัจจัยหนึ่ง ที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวได้ ดังนั้นการเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างระบบสรีรวิทยาของต้นข้าวและพันธุกรรมที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซมีเทน สามารถนำไปสู่การพัฒนาสายพันธุ์ข้าวที่ปล่อยก๊าซมีเทนได้น้อยแต่ยังคงคุณสมบัติที่ดีไว้ เพื่อพัฒนาระบบการทำนาที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] L.M. Jean, R. Pierre. “Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review.” *European Journal of Soil Biology*. vol. 37, 2001, pp. 25-50.

[2] D. C. Parashar, J. Rai, K. G.Prabhat and N. Singh. “Parameters affecting methane emission from paddy fields.” *indian journal of radio & space physics*, vol. 20, 1991, pp. 12-17.

[3] S. K. Dubey. "Microbial ecology of methane emission in rice agroecosystem : A Review." *Applied Ecology & Environmental Research*, vol. 3, 2005, pp. 1-27.

[4] T. Minoda and M. Kimura. "Contribution of photosynthesized carbon to the methane emitted from paddy fields." *Geophysical Research Letters,* vol. 21, 1994, pp. 2007-2010.

[5] D. SImone and C. Ralf. "Effect of rice plants on methane production and rhizospheric metabolism in paddy soil." *Biogeochemistry*, vol. 45, 1999, pp. 53-71.

[6] R. Wassmann, R.S. Lantin, H.U. Neue, L.V. Buendia, T.M. Corton and Y. Lu "Characterization of methane emissions in Asia III: Mitigation options and future research needs." *Nutrient Cycling in Agroecosystems,* vol. 58, 2000, pp. 23-36.

[7] T.K. Adhya, A.K. Rath, P.K. Gupta, V.R. Rao, S.N. Das, K.M. Parida, D.C. Parashar and N. Sethunathan. "Methane emission from flooded rice fields under irrigated conditions." *Biology and Fertility of Soils*. Vol. 18, 1994, pp. 243-248.

[8] A. Watanabe, Y. Satoh and M. Kimura "Estimation of the increase in CH4 emission frompaddy soils by rice straw application." *Plant and Soil.* vol. 173, 1995, pp. 225-231.

[9] W.J. Horst, A. Wagner, and H. Marshner. (1982, Mar). "Mucilage protects root meristems from aluminium injury." *Zeitschrift fur Pflanzenphysiologie*. [online] 105(5), pp. 435-444. Available: http://www.Science direct.com/science/article/pii/S0044328X8280041X.

[10] E. Hoffland, G.R. Findenegg, and J.A. Nelemans. (1989, Sep). "Solubilization of rock phosphate by rape. II. Local root exudation of organic acids as a response to P-starvation." *Plant and Soil.* [online]. 113, pp. 161-165. Available: http://link.springer.com/article/10.1007 % 2FBF02280176?LI=true#page-1.

[11] R.L. Sass, F.M. Fisher, F.T. Tuner, and M.F. Jund. "Methane emission from rice fields as influenced by solar radiation, temperature and straw incorporation." *Global Biogeochemical Cycles*. Vol. 5, 1991, pp. 335-350.

[12] I. Nouchi, and S. Mariko. Mechanism of methane transport by rice plants. In: Oremland RS (ed) Biogeochemistry of global change. New York: Chapman & Hall, 1993, pp. 336-352.

[13] B. Wang, H.U. Neue and H.P. Samonte. (1997, Oct.). "Role of rice in mediating methane emission." Plant and Soil. [On-line]. 189, pp. 107–115. Available: http://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1004 219024281?LI=true#page-1.

[14] I. Nouchi, M. Shigeru, and A. Kazuyuki. (1990, Sep). "Mechanism of Methane Transport from the Rhizosphere to the Atmosphere through Rice Plants." *Plant Physiology*. [On-line].94(1), pp. 59-66. Available: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC107718 9/.

[15] N. Gogoi, K. K.Baruah and P.K. Gupta. (2008, Jan). "Selection of rice genotypes for lower methane emission." *Agronomy for Sustainable Development*. [On-line]. 28, pp. 181-186. Available: http://link. springer.com/article/10.1051/agro%3A2008005?null#p age-1.

[16] S.S. Yang, H.L. Chang. (1998, May) "Effect of environmental conditions on methane production and emission of paddy soil." *Agriculture, Ecosystems & Environment.* [On-line]. 69(1), pp. 69-80. Available: http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809(98)00098-X.

[17] K.K. Baruah, G. Boby and P. Gogoi. (2010, Jan). "Plant physiological and soil characteristics associated with methane and nitrous oxide emission from rice paddy." *Physiology and Molecular Biology of Plants*.

[online]. 16(1), pp. 79-91. Available: http://link.Springer.com/article/10.1007%2Fs12298-010-0010-1?LI=true#page-1.

[18] Y.W. Hsu, S.K. Singh, M.Y. Chiang, Y.Y. Wu and I.F. Chang. (2009, Jan). “Strategies to lower greenhouse gas level by rice agriculture.” *African Journal of Biotechnology*. [online]. 8(2), 2009, pp. 126-132. Available:http://academicjournals.org/ajb/PDF/pdf2009/19Jan/Hsu%20et%20al.pdf.

[19] K. Das and K. K. Baruah. (2008, Oct). “Methane emission associated with anatomical and morphophysiological characteristics of rice (Oryza sativa) plant.” *Physiologia Plantarum*. 134(2), pp. 303–312.

ประวัติผู้เขียนบทความ

ดร. กัญจน์ ศิลป์ประสิทธิ์
วท.บ. ชีวเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
วท.ม. ชีวเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปร.ด. พันธุวิศวกรรม
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สถานที่ทำงานศูนย์วิจัยและการจัดการความรู้ทางพฤกษศาสตร์ คณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 63 หมู่ 7 ตำบลองครักษ์ อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

งานวิจัยที่สนใจ ชีวเคมีและพันธุศาสตร์ระดับโมเลกุล ชีวเคมีสิ่งแวดล้อม พันธุศาสตร์ในระบบนิเวศ