แบบเสนอหัวข้อและโครงร่างการทำโครงงานทางวิศวกรรม

ประจำภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2568

1. หัวข้อโครงร่าง (Thesis Title)

ภาษาไทย (ไทย) การประยุกต์ใช้จมูกอิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่องในการประเมินปริมาณก๊าซมีเทนในนาข้าว

ภาษาอังกฤษ (English) Application of Electronic Nose Coupled with Machine Learning for Estimating Methane Emissions in Rice Paddies

2. ชื่อและรหัสนักศึกษา (Student name and code)

นาย ปัญจกุล พงษ์พานิช — รหัส 680631040
หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร

3. อาจารย์ที่ปรึกษา (Advisor)

ผศ.ดร. ณัฐวุฒิ เนียมสอน
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

4. บททำ (Introduction)

4.1. ที่มาและความสำคัญ (Overviews)

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศไทย ทั้งในด้านการส่งออกและรายได้ของเกษตรกร ในปี พ.ศ. 2567 ไทยส่งออกข้าวได้ประมาณ 10 ล้านตัน สร้างรายได้ราว 6.5 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ [1, 2]มีครัวเรือนเกษตรกรทำนาปลูกข้าวกว่า 4.6 ล้านครัวเรือน ครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 115,000 ตารางกิโลเมตร [1, 2]แม้สัดส่วนต่อผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศจะไม่สูงเท่าอุตสาหกรรมอื่น ข้าวยังเชื่อมโยงกับรายได้และการดำรงชีพของครัวเรือนในชนบทจำนวนมาก การพัฒนาการเกษตรข้าวจึงไม่ได้จำกัดอยู่ที่การเพิ่มผลผลิตเพียงอย่างเดียว แต่รวมถึงการจัดการผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากรูปแบบการปลูกด้วย

การปลูกข้าวในไทยส่วนใหญ่เป็นแบบน้ำขัง ทั้งนาปีและนาปรัง [3] เมื่อมีน้ำค้างในดินอย่างต่อเนื่อง สภาวะดินจะขาดออกซิเจน จุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทน (methanogens) จึงย่อยสลายอินทรียวัตถุและปล่อยก๊าซมีเทน (CH_4) ออกสู่บรรยากาศ ทั้งทางผิวน้ำและทางรากหรือลำต้นข้าว [4] ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีศักยภาพในการกักเก็บความร้อนสูง นาข้าวจึงเป็นหนึ่งในแหล่งปล่อย CH_4 สำคัญของภาคเกษตร โดยมีรายงานว่าสัดส่วนการปล่อยจากนาข้าวอยู่ในช่วงร้อยละ 12–26 ของก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่เกษตร [4] อย่างไรก็ตาม ปริมาณที่ปล่อยจริงเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล การจัดการน้ำ พันธุ์ข้าว และสภาพดิน หากต้องการลดการปล่อย

หรือติดตามผลของมาตรการลดก๊าซ จำเป็นต้องมีข้อมูลการวัดที่เชื่อถือได้ในระดับแปลงนา ไม่ใช่เพียงค่าเฉลี่ยในระดับภูมิภาค

ปัจจุบันมีหลายวิธีสำหรับการวัดก๊าซมีเทนจากนาข้าว โดยแต่ละวิธีเหมาะกับบริบทการใช้งานที่ต่างกัน การใช้ห้องเก็บตัวอย่าง (chamber) ร่วมกับก๊าซโครมาโทกราฟี (GC) ถือเป็นวิธีอ้างอิงที่ให้ความแม่นยำสูง [5, 6] แต่ต้องใช้แรงงานและต้นทุนมาก การเก็บข้อมูลทำได้ไม่บ่อย จึงติดตามการเปลี่ยนแปลงตลอดฤดูปลูกได้ยาก [6, 7] เครื่องวิเคราะห์สเปกโทรสโกปีและการสังเกตจากดาวเทียมให้ข้อมูลในระดับภูมิภาคหรือระดับความละเอียดสูง แต่ต้นทุนสูงและความละเอียดเชิงพื้นที่มักไม่ถึงระดับรายแปลงนา [8] ทางเลือกที่ต้นทุนต่ำกว่าคือเซ็นเซอร์ก๊าซราคาประหยัดและจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (electronic nose หรือ eNose) ซึ่งเป็นอาเรย์เซ็นเซอร์หลายตัวที่นำไปใช้ร่วมกับ machine learning (ML) ในการประเมินความเข้มข้นของก๊าซ

แนวทาง eNose ร่วมกับ ML มีศักยภาพสำหรับการประเมินความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในภาคสนาม โดยเฉพาะเมื่อนำค่าอุณหภูมิ ความชื้น และความดันบรรยากาศเข้าร่วมในแบบจำลองเพื่อชดเชยผลกระทบจากสภาพแวดล้อม [10] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยก่อนหน้าส่วนใหญ่ยังเน้นการพิสูจน์แนวคิดหรือการทดลองในห้องแล็บ มากกว่าการสร้างแบบจำลอง regression ที่ให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทน (หน่วย ppm) อย่างต่อเนื่องบนฮาร์ดแวร์ที่นำไปใช้ในแปลงจริงได้ [][][] แม้ Domènech-Gil et al. [10] จะรายงานผลที่ดีในสภาพภาคสนามทั่วไป แต่งานดังกล่าวมุ่งช่วงความเข้มข้นต่ำ (ระดับ ppb–ppm ในบรรยากาศ) ขณะที่นาข้าวไทยมีอุณหภูมิและความชื้นที่สูง การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล และสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน จึงยังจำเป็นต้องพัฒนาและตรวจสอบแบบจำลองใหม่ภายใต้เงื่อนไขแปลงนาจริง โดยอ้างอิงกับวิธี chamber–GC ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาและประเมินแบบจำลอง ML จากสัญญาณ eNose ควบคู่กับค่าอุณหภูมิ ความชื้น และความดัน บนชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น แล้วเปรียบเทียบความแม่นยำของค่าความเข้มข้น CH_4 (mg CH4/m2/hr.) กับ GC เพื่อพัฒนาเครื่องมือต้นทุนต่ำที่ใช้ในการติดตามการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากนาข้าวได้

4.2. สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature reviews)

4.2.1. การปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวและปัจจัยควบคุม

การปลูกข้าวแบบน้ำขังทำให้ดินอยู่ในสภาวะขาดออกซิเจน (anaerobic) ซึ่งเอื้อต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (methanogens) ในการย่อยสลายอินทรียวัตถุและปล่อยก๊าซมีเทน (CH_4) ออกสู่บรรยากาศ ทั้งผ่านผิวน้ำ ฟองอากาศ (ebullition) และผ่านท่อลำเลียงอากาศในต้นข้าว [1] ด้วยเหตุนี้นาข้าวจึงกลายเป็นหนึ่งในแหล่งปล่อย CH_4 จากกิจกรรมมนุษย์ที่สำคัญ โดยงานทบทวนล่าสุดประเมินว่าการปลูกข้าวปล่อย CH_4 คิดเป็นประมาณ ร้อยละ 10–12 ของการปล่อยมีเทนที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ทั่วโลก [2] หรือราวร้อยละ 11 ของการปล่อยมีเทนเชิงมนุษย์ทั้งหมดที่ระดับ $308*10^{12}$ g ต่อปี [3] เมื่อพิจารณาว่าประมาณร้อยละ 90 ของข้าวถูกผลิตและบริโภคในทวีปเอเชีย จึงเป็นภูมิภาคที่มีความสำคัญเชิงยุทธศาสตร์ต่อการลดการปล่อยก๊าซ [2]

อย่างไรก็ตาม ปริมาณการปล่อย CH_4 จากนาข้าวไม่ใช่ค่าคงที่ แต่ผันแปรสูงตามการจัดการน้ำ พันธุ์ข้าว คุณสมบัติดิน และฤดูกาล จากการศึกษาของ Nguyen et al. [1] สรุปว่าการปล่อย CH_4 และไนตรัสออกไซด์ (N_2O) จากพื้นที่นาขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดการการปลูกเป็นหลัก ในบรรดาปัจจัยเหล่านี้ การจัดการน้ำ ให้ผลชัดเจนที่สุด งานวิเคราะห์ภาพรวมจาก 47 ที่ จากการเก็บข้อมูลภาคสนาม พบว่าการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (alternate wetting and drying, AWD) ลดการปล่อย CH_4 ได้เฉลี่ยร้อยละ 64.5 ± 12.3 เมื่อเทียบกับการขังน้ำต่อเนื่อง โดยลดได้มากกว่าในเขตร้อน (ร้อยละ 68.2) และในดินเหนียว (ร้อยละ 71.3) แต่ทำให้ N_2O เพิ่มขึ้นราวร้อยละ 18.7 ส่งผลให้ศักยภาพภาวะโลกร้อนโดยรวม (GWP) ลดลงประมาณร้อยละ 42.1 [4] ผลในทิศทางเดียวกันนี้ได้รับการยืนยันและเปรียบเทียบจากการวัดด้วยเทคนิค eddy covariance ที่รายงานว่า AWD ลด CH_4 ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการขังน้ำ [5]

นอกจากการจัดการน้ำแล้ว ปัจจัยทางดินและชีวภาพก็มีบทบาทเช่นกัน งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับรากของต้นข้าวชี้ว่าการพัฒนารากข้าวและสภาพดินรอบรากส่งผลต่ออัตราการปล่อย CH_4 [6] ขณะที่ปริมาณคาร์บอนที่ใช้ได้ (carbon availability) และค่า pH ของดินเป็นตัวควบคุมสำคัญของการปล่อยตามการเพิ่มขึ้น/ลดลงตามอุณหภูมิเฉลี่ยรายปี [7] ในอีกมิติหนึ่ง Yang et al. [8] ซึ่งวิเคราะห์ภาพรวมจากการเก็บข้อมูลใน 46 ที่ พบว่าประสิทธิผลของปุ๋ยไนโตรเจนแบบ enhanced-efficiency (EENF) ต่อการลด CH_4 ขึ้นกับพันธุ์ข้าวและขั้นตอนการปลูกอย่างชัดเจน เช่น การใช้ inhibitor ลด CH_4 ได้ ร้อยละ 23.6 ในพันธุ์ไฮบริด เทียบกับเพียง ร้อยละ 8.2 ในพันธุ์อินเบรด และลดได้สูงสุดถึงร้อยละ 40.6 ในฤดูข้าวหลังของระบบปลูกสองฤดู นอกจากนี้ภายใต้การขังน้ำเป็นช่วง (intermittent flooding) inhibitor ลด CH_4 ได้ร้อยละ 24.9 ในขณะที่ภายใต้การขังน้ำต่อเนื่องผลลดลงจนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ [8] ตัวเลขเหล่านี้ยืนยันว่าพันธุ์ข้าวและมาตรการเกษตรไม่เพียงมีผลต่อการปล่อยโดยตรง แต่ยังกำหนดว่ามาตรการลดก๊าซจะ “ได้ผล” มากน้อยเพียงใดภายใต้เงื่อนไขจริง

เพื่อประมาณการปล่อยในระดับภูมิภาค จึงมีการพัฒนาแบบจำลองเชิงกระบวนการ เช่น CH4MOD [9] แต่การประมาณระดับมหาภาคยังให้ความละเอียดไม่เพียงพอต่อการติดตามการเปลี่ยนแปลงในระดับแปลงนา เมื่อประกอบกับความผันผวนสูงทั้งตามฤดูกาล ระยะการเจริญเติบโตของข้าว และช่วงเวลาในแต่ละวัน [2] จึงสรุปได้ว่าการติดตามการปล่อย CH_4 เพื่อประเมินมาตรการลดก๊าซหรือเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัดใหม่ จำเป็นต้องอาศัย การวัดซ้ำที่ความถี่เพียงพอในระดับแปลงนา ไม่ใช่การสรุปจากค่าเฉลี่ยระดับภูมิภาคเพียงครั้งเดียว ซึ่งเป็นเหตุผลหลักที่ผลักดันความต้องการเครื่องมือวัดต้นทุนต่ำที่ติดตั้งภาคสนามได้

4.2.2. วิธีการวัดปริมาณก๊าซมีเทนแบบมาตรฐาน (Static Chamber ร่วมกับ GC)

จากความต้องการข้อมูลระดับแปลงนาข้างต้น การใช้ ห้องเก็บตัวอย่างแบบปิด (static chamber) ร่วมกับ ก๊าซโครมาโทกราฟี (GC) ยังคงเป็น วิธีอ้างอิง (reference method / ground truth) ที่ได้รับการยอมรับกว้างขวางที่สุดสำหรับการวัดฟลักซ์ (flux) ของก๊าซเรือนกระจกจากดินเกษตรกรรม [10] หลักการคือครอบ chamber ลงบนผิวดินหรือผิวน้ำเป็นระยะเวลาหนึ่ง แล้วเก็บตัวอย่างอากาศภายในตามช่วงเวลา เพื่อคำนวณอัตราการสะสมความเข้มข้นของ CH_4 ต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา (เช่น mg m^{-2} h^{-1}) ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วย GC ในห้องปฏิบัติการ ในการทดลองของ Zaman et al. [10] ได้วางระเบียบวิธีมาตรฐานสำหรับการวัดก๊าซเรือนกระจกจากดินเกษตรด้วยเทคนิค non-isotopic ครอบคลุมตั้งแต่การออกแบบ chamber การเก็บตัวอย่าง จนถึงการวิเคราะห์ด้วย GC โดยทั่วไป chamber แบบเก็บ vial ด้วยมือจะครอบประมาณ 20–30 นาที และเก็บตัวอย่างหลายจุดเวลาเพื่อหาความชันของความเข้มข้น

แม้วิธีนี้จะให้ความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูง แต่ข้อจำกัดหลักของ chamber–GC อยู่ที่ ต้นทุนสูง การใช้แรงงานมาก และความถี่ในการเก็บตัวอย่างที่ต่ำ [11] โดยทั่วไปการเก็บตัวอย่างทำได้เพียงไม่กี่ครั้งต่อสัปดาห์ ทำให้เสี่ยงต่อการพลาดจับพลวัตการปล่อยแบบรายวัน (diurnal) หรือเหตุการณ์ ebullition ที่เกิดขึ้นเป็นช่วง ๆ และติดตามการเปลี่ยนแปลงตลอดฤดูปลูกได้ยาก [11]

4.2.3. วิธีการวัดปริมาณก๊าซมีเทนแบบอื่น ๆ

นอกเหนือจาก chamber–GC ยังมีวิธีการวัดและประเมิน CH_4 จากนาข้าวอีกหลายแนวทาง ซึ่งแต่ละแบบมีจุดเด่นและข้อจำกัดที่แตกต่างกันในมิติของความแม่นยำ ความละเอียดเชิงพื้นที่ ต้นทุน และความเหมาะสมกับการติดตามต่อเนื่อง โดยมีวิธีดังต่อไปนี้

เทคนิคสเปกโทรสโกปี เช่น TDLAS, CRDS และ FTIR สามารถวัดความเข้มข้น CH_4 ได้ในระดับ ppm ถึง ppb พร้อมการตอบสนองที่รวดเร็ว, ให้ความแม่นยำสูง และ เหมาะกับงานในห้องปฏิบัติการหรือสถานีตรวจวัดคงที่ แต่มี ต้นทุนที่สูง ต้องการการตั้งค่าที่ซับซ้อน และไม่คุ้มค่าต่อการติดตั้งหลายจุดในแปลงนาขนาดเล็ก หรือการติดตามอย่างต่อเนื่องตลอดฤดูปลูก ในทางปฏิบัติ การนำเครื่องมือวิเคราะห์ที่ความแม่นยำสูงใช้ร่วมกับ chamber จึงกลายเป็นทางเลือกที่พยายามลดข้อจำกัดของ GC แบบเก็บ vial จากงานวิจัยของ Vo et al. [14] ได้เปรียบเทียบ laser-based Trace Gas Analyzer (TGA) ทั้งแบบพกพาและแบบ multi-valve กับ manual chamber–GC ในข้าวนาภายใต้ AWD และการขังน้ำต่อเนื่องที่ IRRI ผลทดลองพบว่าทั้งสามวิธีให้ค่าฟลักซ์ CH_4 ใกล้เคียงกัน โดย two-way ANOVA แสดงว่าปัจจัยวิธีวัดไม่มีนัยสำคัญ ($p = 0.47$) และไม่พบ interaction กับการจัดการน้ำ ($p = 0.728$) ความต่างสูงสุดระหว่าง GC กับ multi-valve TGA อยู่ที่ 12.62 mg

CH_4 m^{-2} d^{-1} ซึ่งยังเล็กเมื่อเทียบกับระดับการปล่อยโดยรวม นอกจากนี้ประมาณร้อยละ 90 ของข้อมูล TGA ได้ R^2 ของความเข้มข้น–เวลาสูงกว่า 0.9 ทั้งที่ครอบ chamber เพียง 4 นาที เทียบกับ 30 นาทีของ GC และระบบ multi-valve สามารถครอบคลุมได้มากกว่า 110 แปลงต่อวัน เทียบกับราว 48 แปลงต่อวันของ manual GC [14] ผลเหล่านี้ชี้ว่า TGA ให้ผลเทียบเคียง GC ได้ดีและเพิ่ม throughput อย่างชัดเจน แต่ยังมีต้นทุนลงทุนสูง จึงยังไม่ใช่ทางเลือกต้นทุนต่ำสำหรับแปลงนาทั่วไป

การสังเกตจากระยะไกล (remote sensing) ทั้งจากดาวเทียมและอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ครอบคลุมพื้นที่กว้างได้ แต่ความละเอียดเชิงพื้นที่มัก ไม่ลงลึกถึงระดับรายแปลงนา Xu et al. [15] นำเสนอการผสาน AI/ML เข้ากับข้อมูล remote sensing เพื่อประเมิน CH_4 จากนาข้าว ซึ่งเหมาะกับการประเมินระดับภูมิภาคมากกว่าการติดตามแบบเรียลไทม์ในแปลงเดียว นอกจากนี้ Vo et al. [14] ยังชี้ว่าเกณฑ์ตรวจจับของดาวเทียมปัจจุบัน (ราว 100–10,000 kg CH_4 h^{-1}) ยังห่างจากอัตราปล่อยพื้นหลังของนาข้าวในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ประมาณ 0.05 kg CH_4 ha^{-1} h^{-1}) หลายระดับ ทำให้การประมาณจากระยะไกลยังต้องพึ่งการวัดภาคพื้นดินเป็น ground truth

เซ็นเซอร์ก๊าซต้นทุนต่ำ เป็นทางเลือกที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้มากที่สุด จากการวิจัยของ Rajasekar และ Selvi [16] ได้พัฒนาระบบ chamber อัตโนมัติร่วมกับเซ็นเซอร์ราคาประหยัด MQ4 และ TGS2611 เพื่อวัด CH_4 จากนาข้าวสู่บรรยากาศใกล้ผิว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ต้นทุนต่ำสามารถติดตามแนวโน้มการปล่อยในภาคสนามได้จริง และพบว่าการจัดการน้ำแบบ controlled intermittent flooding ลด CH_4 ได้เมื่อเทียบกับการขังน้ำต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้ยังต้อง สอบเทียบกับวิธีอ้างอิงอย่างสม่ำเสมอ และงานดังกล่าวใช้การแปลงค่าจากสูตรผู้ผลิต (Rs/R0) มากกว่าการใช้แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องแบบหลายเซ็นเซอร์

การประเมินด้วยการเรียนรู้ของเครื่องจากปัจจัยสิ่งแวดล้อม เป็นแนวทางล่าสุดในบริบทนาข้าว Zhang et al. [17] เสนอวิธีวัด CH_4 แบบ in-situ ความถี่สูงโดยใช้ ML กับปัจจัยน้ำ–ดิน–อากาศ (water–soil–air factors) ในลุ่มแม่น้ำแยงซี โดยแบบจำลอง Decision Tree Regressor ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 สูงถึง 0.84 เมื่อใช้ปัจจัยดินเป็นตัวแปรนำเข้า งานนี้ใกล้เคียงกับ use case ของงานวิจัยนี้มากที่สุดในด้านการใช้ ML ทำนาย CH_4 ในนาข้าว แต่ยัง ไม่ได้ใช้สัญญาณจากเซ็นเซอร์ MOS/eNose เป็นตัวแปรหลัก จึงเปิดช่องว่างสำหรับการบูรณาการสัญญาณจมูกอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับ ML โดยตรง

4.2.4. เทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์และเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง

จมูกอิเล็กทรอนิกส์ (electronic nose, eNose) เป็นระบบที่เลียนแบบการรับกลิ่นของมนุษย์ ประกอบด้วยอาเรย์ของเซ็นเซอร์ก๊าซที่มีความเลือกจำเพาะบางส่วน (partially selective) ระบบเก็บสัญญาณ และซอฟต์แวร์วิเคราะห์รูปแบบ [18] เมื่อก๊าซเป้าหมายสัมผัสพื้นผิวเซ็นเซอร์ โดยเฉพาะ

เซ็นเซอร์ชนิดโลหะออกไซด์ (metal oxide semiconductor, MOS) ความต้านทานของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของก๊าซ สัญญาณรวมจากเซ็นเซอร์หลายตัวจึงกลายเป็นเวกเตอร์หลายมิติ (smell print) ที่นำไปจำแนกชนิดหรือประเมินความเข้มข้นได้ จากการศึกษาของ Ye et al. [18] สรุปว่าการนำการเรียนรู้ของเครื่องมาใช้ทำให้ eNose สามารถทำงานได้ทั้งเชิงคุณภาพ (จำแนกชนิดก๊าซ) และเชิงปริมาณ (ประเมินความเข้มข้น)

งานวิจัยของ Domènech-Gil et al. [19] ซึ่งพัฒนา eNose ต้นทุนต่ำสำหรับการติดตาม CH_4 ในบรรยากาศ โดยใช้เซ็นเซอร์ MOS หลายตัว (Figaro TGS2611) ควบคู่กับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ ความชื้น และความดัน (BME680) แล้วใช้แบบจำลอง Partial Least Squares Regression (PLSR) ชดเชยผลกระทบจากสภาพแวดล้อม ในห้องปฏิบัติการ ระบบให้ $R^2 > 0.9$ และ RMSE < 100 ppb ในช่วง 0–9 ppm CH_4 ส่วนในสภาพภาคสนามสามารถวัดได้ถึงระดับความเข้มข้นบรรยากาศ (ราว 2 ppm) โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อน RMSE ต่ำสุดถึง 33 ppb และค่า R^2 สูงสุดถึง 0.91 [19] ผลลัพธ์นี้แสดงถึงความเป็นไปได้ของแนวทาง eNose+ML สำหรับการตรวจจับและประเมินปริมาณ CH_4 แต่ในการใช้งานจริงช่วงความเข้มข้นยังต่างจากนาข้าวที่มีความชื้นสูงและสภาพแวดล้อมซับซ้อน จึงไม่สามารถนำแบบจำลองมาใช้โดยตรง โดยข้อจำกัดที่ปรากฏซ้ำในวรรณกรรมคือ cross-sensitivity ต่อความชื้น อุณหภูมิ และก๊าซรบกวนอื่น Ahmad et al. [20] ทดลองศักยภาพของเซ็นเซอร์ MOS สำหรับ precision agriculture และเน้นว่าความไวต่อสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC) และการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมยังเป็นข้อจำกัดหลักที่ต้องชดเชยด้วยแบบจำลองหลายตัวแปร งานสนับสนุนอื่น ๆ [21],[22]ในคลังวรรณกรรมยังแสดงถึงความเป็นไปได้ของ MOS สำหรับมีเทน เช่น การออกแบบ eNose เจ็ดเซ็นเซอร์เพื่อจำแนก CH_4/CO ในก๊าซผสม และการเลือกใช้วัสดุ MOS chemiresistive สำหรับ CH_4

ในด้าน การเรียนรู้ของเครื่อง จากงานของ Baruah และ Mazumder [23] ได้การประยุกต์ ML ร่วมกับ eNose และสรุปว่าเทคนิค PCA และ SVM ถูกใช้บ่อยในงานจำแนกและวิเคราะห์รูปแบบ แต่การทำ regression เพื่อประเมินความเข้มข้นเชิงตัวเลข ยังต้องการการออกแบบ feature การแบ่งชุดข้อมูล และการสอบเทียบกับวิธีอ้างอิงอย่างเป็นระบบ ในบริบทของ CH_4 โดยเฉพาะ มีงานแสดงศักยภาพของ ML calibration หลายชิ้น เช่น Andrews et al. [24] ที่ใช้ ML สอบเทียบเซ็นเซอร์ก๊าซสำหรับติดตาม methane emissions และ Mitchell et al. [25] ที่สาธิตการสอบเทียบเซ็นเซอร์ Figaro ด้วย ML ในพื้นที่พรุ ซึ่งใกล้เคียงกับสภาพภาคสนามและให้ผลว่า แบบจำลองสามารถให้ค่า R^2 สูงมากในการสอบเทียบ (ถึงระดับ ~0.997 ในเงื่อนไขที่ควบคุม)

โดยสรุป วรรณกรรมชี้ตรงกันว่าการชดเชย cross-sensitivity ของ MOS ด้วยเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อม (T/H/P) ร่วมกับ ML เพื่อชดเชยผลของสภาพแวดล้อมต่างๆมีผลต่อความแม่นยำ [19], [20], [24] อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบงานวิจัยที่รวมทั้งสามองค์ประกอบ eNose แบบอาเรย์ MOS, ML

regression ให้ค่า ppm ต่อเนื่อง และในบริบทของนาข้าว ไว้ในงานเดียวกัน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่การพัฒนาระบบ eNose ขนาดพกพาที่สามารถชดเชยผลของสิ่งแวดล้อม และทำนายผลปริมาณ CH_4 ได้ภายใต้ขอบเขตการศึกษาที่กำหนด

5. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
6. วิธีการดำเนินงานวิจัย
7. สภานที่ในการดำเนินโครงการ (Location)
8. แผ่นการดำเนินงาน (Project timeline)
9. งบประมาณ (Budget)

เอกสารอ้างอิง (References)

[1] C. Sowcharoensuk, "Industry Outlook 2026-2028: Rice Industry," Krungsri Research, 2026. [Online]. Available: https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/agriculture/rice/io/io-rice-2026-2028

[2] T. Nation, "Thai farm incomes face pressure from global rice market shifts," *The Nation*, 2026.

[3] Thairath, "Thai Rice Exports in 2025 Surpass Targets Efforts Accelerate in 2026 to Maintain and Expand Markets," *Thairath*, 2026.

[4] H. Nguyen et al., "Carbon Footprint Reduction from Closing Rice Yield Gaps," in *Carbon Footprint of Rice Production*, 2023, pp. 149–176.

[5] P. Rajasekar and J. A. V. Selvi, "Sensing and Analysis of Greenhouse Gas Emissions from Rice Fields to the Near Field Atmosphere," *Sensors*, vol. 22, no. 11, p. 4141, 2022.

[6] M. Zaman et al., "Methodology for measuring greenhouse gas emissions from agricultural soils using non-isotopic techniques," in *Measuring Emission of Agricultural Greenhouse Gases and Developing Mitigation Options Using Nuclear and Related Techniques*, Springer, 2021, pp. 11–108.

[7] N. J. Mumu et al., "Methodological progress in the measurement of agricultural greenhouse gases," *Carbon Management*, vol. 15, no. 1, p. 2366527, 2024.

[8] L. Tyagi et al., "Environmental impacts and recent advancements in the sensing of methane: a review," *Environ. Technol. Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 191–212, 2025.

[9] M. S. Borhan and M. M. Khanaum, "Sensors and methods for measuring greenhouse gas emissions from different components of livestock production facilities," *J. Geosci. Environ. Prot.*, vol. 10, no. 12, pp. 242–272, 2022.

[10] G. Domènech-Gil et al., "Electronic nose for improved environmental methane monitoring," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 352–361, 2023.

[11] S. Baruah and D. H. Mazumder, "A Review on Application of Machine Learning Techniques Coupled With E-Nose in Healthcare Agriculture and Allied Domains," *IEEE Access*, 2025.

[12] A. Ahmad et al., "The Promise of Low-Cost Metal-Oxide Semiconductor Gas Sensors for Precision Agriculture," *Adv. Sensor Res.*, 2026.

1. Sowcharoensuk, C. *Industry Outlook 2026-2028: Rice Industry*. 2026; Available from: https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/agriculture/rice/io/io-rice-2026-2028.
2. Nation, T., *Thai farm incomes face pressure from global rice market shifts*, in *The Nation*. 2026.
3. Thairath, *Thai Rice Exports in 2025 Surpass Targets Efforts Accelerate in 2026 to Maintain and Expand Markets*, in *Thairath*. 2026.
4. Nguyen, H., et al., *Carbon Footprint Reduction from Closing Rice Yield Gaps*. 2023. p. 149-176.
5. Zaman, M., et al., *Methodology for measuring greenhouse gas emissions from agricultural soils using non-isotopic techniques*, in *Measuring emission of agricultural greenhouse gases and developing mitigation options using nuclear and related techniques: Applications of nuclear techniques for GHGs*. 2021, Springer. p. 11-108.
6. Mumu, N.J., et al., *Methodological progress in the measurement of agricultural greenhouse gases.* Carbon Management, 2024. **15**(1): p. 2366527.
7. Rajasekar, P. and J.A.V. Selvi, *Sensing and Analysis of Greenhouse Gas Emissions from Rice Fields to the Near Field Atmosphere.* Sensors, 2022. **22**(11): p. 4141.