บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 การออกแบบการวิจัยและวิธีการศึกษา

3.1.1 กิจกรรมวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการวิจัยผสมผสานระหว่างการวิจัยเชิงปฏิบัติการ (action research) กับการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) กล่าวคือ การวิจัยเชิงปฏิบัติการ เป็นการวิจัยในสภาพแปลงนาธรรมชาติบนพื้นที่สูงแบบมีส่วนร่วมของเกษตรกร โดยที่นาที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยเป็นของเกษตรกรที่มีความต้องการพัฒนาระบบการปลูกข้าวนาน้ำน้อยเพื่อเพิ่มผลผลิต ในขณะเดียวกันก็ทำการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อศึกษาเปรียบเทียบวิธีการปลูกข้าวระบบนาน้ำน้อยและระบบนาน้ำขัง ที่มีผลต่อการผันแปรอัตราการปล่อยก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์ ปริมาณการใช้น้ำ การเจริญเติบโต ผลผลิตข้าว องค์ประกอบผลผลิตข้าว ประสิทธิภาพการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ประสิทธิภาพการใช้น้ำ รวมถึงต้นทุนและผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลสำหรับการอธิบายอรรถประโยชน์ของวิธีการปลูกข้าวด้วยระบบนาน้ำน้อยและการดำเนินการขยายผลการวิจัยต่อไปในอนาคต

3.1.2 กรรมวิธีทดลอง

1) ระบบนาน้ำขัง (continuous flooding system; CFS) ส่งน้ำตามวิธีของเกษตรกรให้มีระดับสูงจากพื้นดินประมาณ 10 ซม. ตลอดระยะเวลาการปลูกข้าวถึงเก็บเกี่ยว ส่งน้ำเข้าแปลงนาเมื่อระดับน้ำต่ำกว่า 3 ซม. ก่อนการเก็บเกี่ยวปล่อยส่งน้ำในแปลงนาแห้งประมาณ 7-10 วัน กิจกรรมการทำนาอื่นใดให้เป็นไปตามวิธีปฏิบัติของเกษตรกรบนพื้นที่สูง

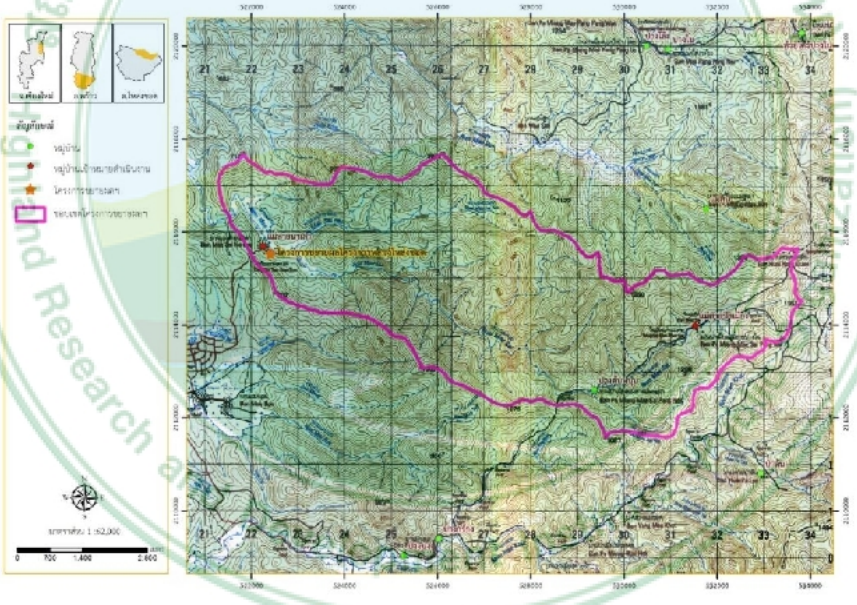
2) ระบบนาน้ำน้อย (water-saving system; WSS) ขังน้ำในแปลงนาสูง 5 ซม. ตลอดระยะเวลาการเจริญเติบโต ส่งน้ำเข้าแปลงนาเมื่อระดับน้ำต่ำกว่า 1 ซม. ทั้งนี้จะส่งน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (AWD) หรือแกล้งข้าว จำนวน 2 ครั้ง โดยระบายน้ำออกจากแปลงนาจนระดับน้ำในแปลงนาต่ำกว่าระดับรากข้าวลึกจากพื้นดินเดิม 15 ซม. หรือประมาณ 14 วัน จากนั้นส่งน้ำเข้านาให้ระดับน้ำเท่ากับระดับกักเก็บน้ำเดิม การใส่ปุ๋ยให้ปฏิบัติในช่วงเวลาที่ดินนาแตกระแหง ก่อนการเก็บเกี่ยวปล่อยส่งน้ำในแปลงนาแห้งประมาณ 7-10 วัน กิจกรรมการทำนาอื่นใดนอกเหนือจากนี้ ให้ดำเนินการเหมือนกับกรรมวิธีทดลองระบบนาน้ำขัง

3.2 พื้นที่ศึกษา

ดำเนินการศึกษาวิจัยในแปลงนาของเกษตรกรใน 2 พื้นที่ ได้แก่ บ้านแม่สายนาเลา โครงการขยายผลโครงการหลวงโหล่งขอด อำเภอพร้าว จังหวัดเชียงใหม่ และบ้านผาแตก โครงการขยายผลโครงการหลวงผาแตก อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่

3.2.1 แปลงนาทดลองบ้านแม่สายนาเลา

อยู่ในพื้นที่ดำเนินการของ โครงการขยายผลโครงการหลวงโหล่งขอด อำเภอพร้าว จังหวัดเชียงใหม่ ตั้งอยู่ที่พิกัดภูมิศาสตร์ N 19.13365 E 99.21342 เป็นแปลงนาของเกษตรกร ชาติพันธุ์ปกาเกอะญอ ชื่อ นายชาติชาย ปู่พัด แปลงนาติดกับโครงการขยายผลโครงการหลวงโหล่งขอด มีถนนขั้นระหว่างแปลงนาทดลองกับลำห้วย ในช่วงฤดูแล้ง ใช้ที่ดินปลูกพืชผัก และจะทำการปลูกข้าวต่อในฤดูฝน สภาพพื้นที่ศึกษา ณ วันที่ 29 มกราคม พ.ศ. 2558 ดังภาพที่ 2 - 7



ภาพที่ 2 พื้นที่วิจัยแปลงนาทดลอง บ้านแม่สายนาเลา โครงการขยายผลโครงการหลวงโหล่งขอด

ภาพที่ 3 พื้นที่กสิกรรมของบ้านแม่สายนาเลา มองจากโครงการขยายผลโครงการหลวงโหล่งขอด

ภาพที่ 4 ระบบลำเหมืองส่งน้ำของบ้านแม่สายนาเลา

ภาพที่ 5 การใช้ประโยชน์ที่ดินฤดูแล้งด้วยการปลูกพริกบนพื้นที่นาเดิม

ภาพที่ 6 ระบบลำเหมืองส่งน้ำจากอ่างเก็บน้ำ

ภาพที่ 7 แปลงเกษตรปลูกพริก บ้านแม่สายนาเลา ในฤดูแล้ง พ.ศ. 2558

Highland Research and Development Institute (Public Organization)

3.2.2 แปลงนาทดลองบ้านผาแตก

อยู่ในพื้นที่ดำเนินการของ โครงการขยายผลโครงการหลวงผาแตก อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ตั้งอยู่ที่พิกัดภูมิศาสตร์ N 19.07506 E 98.769479 เป็นแปลงนาของเกษตรกร ชาติพันธุ์ปกาเกอะญอ ชื่อ นายทอง คำแก ผู้ใหญ่บ้าน หมู่ 10 บ้านผาแตก แปลงนาติดน้ำแม่ริม การเข้าถึงสะดวก ในช่วงฤดูแล้ง ใช้ที่ดินปลูกถั่วเหลือง และจะทำการปลูกข้าวต่อในฤดูฝน สภาพพื้นที่ศึกษา ณ วันที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2558 ดังภาพที่ 8 – 11

ภาพที่ 8 พื้นที่วิจัยแปลงนาทดลอง บ้านผาแตก โครงการขยายผลโครงการหลวงผาแตก

ภาพที่ 9 แปลงนาในฤดูแล้งที่เกษตรกรปลูกถั่วเหลือง

ภาพที่ 10 ระบบนาขั้นบันไดบ้านผาแตก

ภาพที่ 11 เกษตรกรเจ้าของนาที่จะใช้ทำการทดลอง นายทอง คำแก ผู้ใหญ่บ้าน หมู่ 10 บ้านผาแตก

สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) Highland Research and Development Institute (Public Organization)

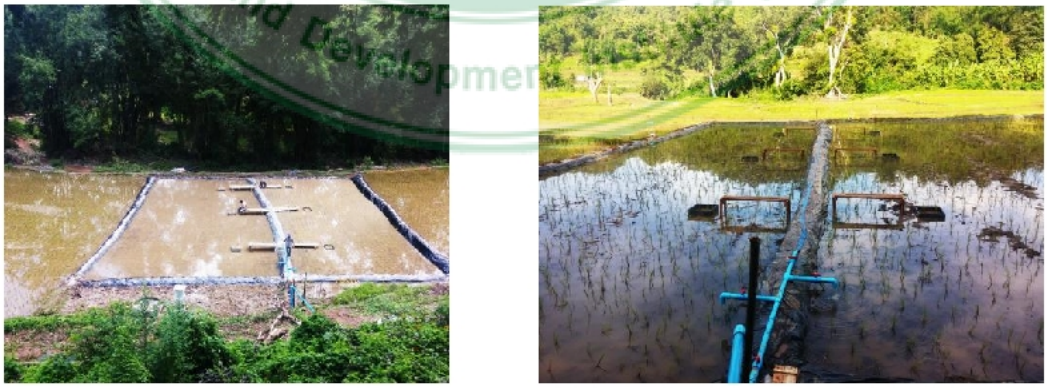
3.3 การออกแบบการทดลองและเตรียมแปลงนาทดลอง

ออกแบบแผนการทดลองแบบเจาะจง (purposive sampling) โดยการคัดเลือกแปลงนาที่จะทำวิจัยจากเกษตรกรเจ้าของนาแบบมีส่วนร่วม จำนวน 2 แปลง สำหรับ 2 กรรมวิธีทดลอง แปลงทดลองวางตัวแนวตะวันออก-ตะวันตก แปลงทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดพื้นที่แปลงทดลอง ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ขนาดพื้นที่แปลงนาทดลอง

พื้นที่วิจัย	ขนาดพื้นที่ (ตร.ม.)	
	ระบบนาน้ำขัง	ระบบนาน้ำน้อย
บ้านแม่สายนาเลา	149.2	158.5
บ้านผาแตก	317.28	180.7

การเตรียมแปลง ใช้กระทงนาเดิม สูงประมาณ 30 ซม. ด้านในของกระทงนา บุผ้าพลาสติก ลึกจากพื้นดินนาเดิม 60 ซม. เพื่อป้องกันการซึมน้ำด้านข้าง การปนเปื้อนจากการใช้ปุ๋ย และอิทธิพลจากแปลงนาข้างเคียง ทำสะพานเพื่อให้สะดวกกับการเก็บข้อมูล (ภาพที่ 12) วิธีปลูกข้าว ใช้วิธีการปักดำ ระยะปลูก 25 x 25 ซม. หลุมละ 5-10 ต้น โดยในพื้นที่ 1 ตร.ม.มีต้นข้าว 16 กอ วางระบบชลประทานระบบท่อ ที่บ้านผาแตกใช้น้ำจากลำเหมืองธรรมชาติ โดยดึงน้ำมาพักไว้บ่อซีเมนต์ สำหรับบ้านแม่สายนาเลา ใช้น้ำของคูส่งน้ำจากอ่างเก็บน้ำ การส่งน้ำใช้วิธีการไหลโดยแรงโน้มถ่วงของโลก ผ่านมาตรวัดน้ำ บันทึกปริมาตรน้ำเมื่อเริ่มและสิ้นสุดการส่งน้ำ ทำระบบการระบายน้ำรอบแปลงเพื่อรับน้ำจากนาด้านบนเบี่ยงออกนอกแปลงนาทดลองและวางท่อน้ำล้นเพื่อระบายน้ำเมื่อเกิดฝนตกหนักจนน้ำในแปลงนาสูงกว่าระดับที่กำหนด ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แปลงทดลองปลูกข้าว ณ บ้านแม่สายนาเลา (ภาพซ้าย) และ บ้านผาแตก (ภาพขวา)

3.4 ฤดูเพาะปลูกและพันธุ์ข้าว

กำหนดปลูกข้าวในฤดูนาปี พ.ศ. 2558 ระยะเวลาเริ่มการปลูกข้าวถึงเก็บเกี่ยวระหว่างเดือนกรกฎาคม - พฤศจิกายน ผันแปรไปตามความพร้อมในการปลูกข้าวของเกษตรกรในพื้นที่วิจัย โดยบ้านแม่สายนาเลา ตำบลโหล่งขอด อำเภอพร้าว จังหวัดเชียงใหม่ ปลูกข้าวพันธุ์สันป่าตอง 1 ข้าวมีอายุการเก็บเกี่ยวที่ 120-130 วัน นับตั้งแต่วันเพาะเมล็ด (day after seedling; DAS) และบ้านผาแตก ตำบลสบเปิง อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ปลูกข้าวพันธุ์ลิกา ข้าวมีอายุเก็บเกี่ยวที่ 150-160 วัน นับตั้งแต่วันเพาะเมล็ด (DAS) รายละเอียดพันธุ์ข้าวที่ใช้ในการวิจัย มีดังนี้

พันธุ์สันป่าตอง 1

ชนิด - ข้าวเหนียว

คู่ผสม - BKNLR75001-B-CNT-B-B-RST-36-2 / กข.2

ประวัติพันธุ์ - ได้จากการผสมพันธุ์ข้าวสายพันธุ์ BKNLR75001-B-CNT-B-RST-36-2 กับ พันธุ์ กข.2 ที่สถานีทดลองข้าวสันป่าตองเมื่อปี พ.ศ. 2527 ปลูกคัดเลือกจนได้สายพันธุ์ SPTLR84051-32-2-2-4

การรับรองพันธุ์ - คณะกรรมการบริหารกรมวิชาการเกษตรมีมติให้เป็นพันธุ์รับรอง เมื่อวันที่ 19 มกราคม 2543

ลักษณะประจำพันธุ์ - เป็นพันธุ์ข้าวเหนียวสูงประมาณ 119 ซม.
- ไม่ไวต่อช่วงแสง
- อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 120-130 วัน
- ทรงกอตั้งใบสีเขียวกาบใบสีเขียวใบธงตั้งตรงรวงยาวระแง้ถี่รวงแน่นคอ รวงสั้น ฟางแข็งใบแก่ช้า
- เมล็ดข้าวเปลือกสีฟาง
- ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 8 สัปดาห์
- เมล็ดข้าวเปลือกยาว x กว้าง x หนา = 10.4 x 2.9 x 2.1 มม.
- เมล็ดข้าวกล้องยาว x กว้าง x หนา = 7.1 x 2.2 x 1.8 มม.
- คุณภาพข้าวสุกเหนียวนุ่ม

ผลผลิต - ประมาณ 630 กิโลกรัมต่อไร่

ลักษณะเด่น - ต้านทานโรคไหม้และโรคขอบใบแห้ง

- ให้ผลผลิตสูง
- เป็นข้าวเหนียวที่สามารถปลูกได้ตลอดปี

ข้อควรระวัง - ไม่ต้านทานโรคใบสีส้ม
- ไม่ต้านทานแมลงบั่ว

พื้นที่แนะนำ - พื้นที่นาชลประทานภาคเหนือตอนบนและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

พันธุ์ลิกา

ชนิด - ข้าวเจ้า

ลักษณะประจำพันธุ์- ไวต่อช่วงแสง
- เมล็ดยาวเรียว สีฟาง
- ใบเกลี้ยงไม่มีขนสีใบสีเขียว สีเขี้ยวใบสีขาว
- ลักษณะลิ้นใบแหลมสีลิ้นใบสีขาวสีของกาบใบสีเขียวสีของปล้องสีเขียว
- ทรงกอแบะ
- ความสูง 120 ซม.
- จำนวนหน่อต่อกอ มี 12-15 หน่อต่อกอ
- อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 150-160 วัน

สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) Highland Research and Development Institute (Public Organization)

3.5 พารามิเตอร์ วิธีการเก็บข้อมูล วิธีวิเคราะห์ และความถี่ในการเก็บตัวอย่าง

การดำเนินการวิจัยนี้ กำหนดพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ วิธีการเก็บข้อมูล วิธีวิเคราะห์ และความถี่ในการเก็บตัวอย่าง

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์และเก็บรักษาตัวอย่าง	วิธีและความถี่การตรวจวัด
1. กรรมวิธีทดลอง 1.1 ระบบนาน้ำขัง 1.2 ระบบนาน้ำน้อย	1. แปลงนาทดลอง 2 แปลง ต่อพื้นที่ศึกษา	1. ปลูกข้าวนาปี พ.ศ. 2558
2. การเก็บตัวอย่างดิน เพื่อวิเคราะห์ 2.1 Particle size (มม.) และ texture 2.2 Percolation rate (ซม/ชั่วโมง) 2.3 Moisture retention (%) 2.4 Available moisture (%) 2.5 pH 2.6 CEC NH_4^+ extract (meq/100 กรัม) 2.7 Organic matter (%) 2.8 Total carbon (%) 2.9 Total nitrogen (%)	 2.1 Hydrometer และ texture triangle 2.2 test at 6 hr. flow 2.3 test at 1/3 และ 15 bar 2.4 test at 15 bar 2.5 pH meter 2.6 NH_4OAC pH7/ distillation 2.7 Walkly & Black 2.8 Dry combustion 2.9 Dry combustion	2. ข้อ 2.1-2.7 ใช้ผลวิจัยจากโครงการย่อยที่ 3: การศึกษาวิจัยปริมาณการใช้น้ำในแปลงนาข้าวด้วยระบบนาน้ำน้อย พ.ศ. 2557 ข้อ 2.8-2.9 เก็บตัวอย่างดินก่อนทำนา
3. ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา 3.1 ปริมาณน้ำฝนสะสม (มม./วัน) 3.2 อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด (°C) 3.3 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (%) 3.4 น้ำระเหย (มม./วัน)	 3.1 Rain gauge 3.2 ปรอทวัดอุณหภูมิ 3.3 ความชื้นสัมพัทธ์กระเปาะเปียก-แห้ง 3.4 ถาดวัดการระเหยแบบ class A pan	3. บันทึกข้อมูลรายวัน
4. อัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก: มีเทนและไนตรัสออกไซด์ ($mg/m^2/hr$)	4. เก็บตัวอย่างอากาศด้วย close chamber ที่เวลา 0 10 20 และ 30 นาที วิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรือนกระจกด้วยเครื่อง gas chromatography ภายใน 7 วัน	4. เก็บตัวอย่าง 3 ซ้ำ ต่อกรรมวิธีทดลอง เก็บตัวอย่างทุกๆ 7 วัน กรณีที่มีการแกล้งข้าว จะเก็บตัวอย่างสามวันครั้ง
5. ปริมาณการใช้น้ำในการปลูกข้าว (ลบ.ม./แฮกแตร์/วัน หรือ มม./วัน)	5. รักษาระดับน้ำในแปลงนาตามที่กำหนดตามระบบนาน้ำน้อยและระบบนาน้ำขัง โดยการชลประทานระบบท่อ	5. บันทึกปริมาตรน้ำทุกครั้งที่มีการส่งน้ำและวัดระดับน้ำในแปลงนาทุกวัน

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ วิธีการเก็บข้อมูล วิธีวิเคราะห์ และความถี่ในการเก็บตัวอย่าง

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์และเก็บรักษาตัวอย่าง	วิธีและความถี่การตรวจวัด
6. การเจริญเติบโต มวลชีวภาพ และผลผลิต		6. เก็บข้อมูลตามระยะการเจริญเติบโต 1) ระยะแตกกอ 10 % ก่อนแกล้งข้าว 2) ระยะดอกบาน-ผสมเกสร 50 % หลังแกล้งข้าว และ 3) ระยะสุกแก่ - ระยะแตกกอ 10 % และดอกบาน-ผสมเกสร 50 % สุ่มตัวอย่างในพื้นที่ 0.25 m^2 หรือข้าว 4 กอ (n=4) – ระยะสุกแก่ ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตข้าวสุ่มตัวอย่างในพื้นที่ 1 m^2 หรือข้าว 16 กอ (n=16)
6.1 ความสูงส่วนเหนือดิน (ซม/กอ)	6.1 วัดด้วยไม้บรรทัด	
6.2 จำนวนต้นต่อกอ (ต้น/กอ)	6.2 นับจำนวน	
6.3 จำนวนใบ ระยะแตกกอ (ใบ/กอ)	6.3 นับจำนวน	
6.4 ความยาวใบธง ระยะแตกกอ (ซม)	6.4 วัดด้วยไม้บรรทัด	
6.5 .ความกว้างใบธง ระยะแตกกอ (ซม)	6.5 วัดด้วยไม้บรรทัด	
6.6 ความยาวรากจากโคนต้นถึงปลายราก (ซม)	6.6 วัดด้วยไม้บรรทัด	
6.7 ความยาวรากทั้งหมด (ซม/กอ)	6.7 สุ่มตัวอย่างราก ประมาณ 30 % Scan ภาพราก แล้วตรึงภาพ (Rectification) ให้อยู่ในระบบแผนที่แบบศูนย์ลอย (Plain coordinate; unit cm) ด้วยโปรแกรม Erdas Imagine 8.4 และทำการ Digitize เส้นตามความยาวราก คำนวณระยะ ด้วยโปรแกรม Arcview 3.2a	
6.8 พื้นที่ใบ (ตร.ม.)	6.8 ดำเนินการเหมือนข้อ 6.7 แต่ Digitize พื้นที่ใบตามรูปทรงใบใช้คำสั่ง คำนวณพื้นที่ด้วยโปรแกรม Arcview 3.2a	
6.9 มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน (กรัม/กอ)	6.9 ชั่งน้ำหนักแห้งหลังอบอุณหภูมิ 60 °C	
6.10 น้ำหนักรากแห้ง (กรัม/กอ)	6.10 ชั่งน้ำหนักแห้งหลังอบอุณหภูมิ 60 °C	
6.11 พื้นที่ทรงพุ่ม (ตร.ม./กอ)	6.11 วัดขนาดทรงพุ่มแนวเหนือ-ใต้ ออก-ตก	
6.12 ดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index; LAI) (ตร.ม/ตร.ม)	6.12 LAI direct method = พื้นที่ใบ/พื้นที่ทรงพุ่ม หรือ LAI indirect method ใช้เครื่องมือ LAI pocket	
6.13 ดัชนีมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน (specific leaf weight index ; SLWI) (กรัม/ตร.ซม.)	6.13 SLWI= น้ำหนักมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน / พื้นที่ใบ	
6.14 น้ำหนักรากต่อปริมาตรดิน (root weight density; RWT) (กรัม/ลบ:ซ.ม)	6.14 RWT = น้ำหนักรากแห้งทั้งหมด (กรัม) / ปริมาตรดินจาก soil core บริเวณที่เก็บตัวอย่างรากข้าว (ลบ.ซม.)	
6.15 ความหนาแน่นของราก (root Length Density; RLD) (ซม/ลบ.ซม)	6.15 RLD = ความยาวรากทั้งหมด (ซม) / ปริมาตรดินจาก soil core บริเวณที่เก็บตัวอย่างรากข้าว (ลบ.ซม)	
6.16 อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/วัน)	6.16 Δน้ำหนักใบแห้ง/Δระยะเวลา	
6.17 อัตราการสะสมมวลชีวภาพสุทธิ (กรัม/ตร.ซม./วัน)	6.17 Δน้ำหนักใบแห้ง. lnΔพื้นที่ใบ/Δระยะเวลา	

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ วิธีการเก็บข้อมูล วิธีวิเคราะห์ และความถี่ในการเก็บตัวอย่าง

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์และเก็บรักษาตัวอย่าง	วิธีและความถี่การตรวจวัด
6.18 ผลผลิต ประกอบด้วย น้ำหนักข้าวเปลือกดี ต่อ 16 กอ หรือ 1 ตร.ม. (กรัม/กอ หรือ กรัม/ตร.ม.) และ น้ำหนักข้าวเปลือก (กก./แฮกแตร์) 6.19 องค์ประกอบผลผลิต ได้แก่ จำนวนรวง (รวง/กอ) น้ำหนักรวง (ระแง้+เมล็ด) (กรัม/รวง) น้ำหนักเมล็ดทั้งหมด (กรัม/กอ) น้ำหนักเมล็ดดี (กรัม/กอ) น้ำหนักเมล็ดลีบ (กรัม/กอ) และ น้ำหนักของข้าวเปลือก 1,000 เมล็ด (กรัม)	6.18 ชั่งน้ำหนักแห้ง นับเมล็ดดีและเมล็ดลีบ 6.19 นับจำนวนและชั่งน้ำหนักแห้ง	
7. อัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสะสม (g/ha/crop)	GHG accumulation = $\Sigma A_{t(ab)}$ เมื่อ $A_{t(ab)} = (t_b - t_a).(Ft_a - Ft_b)/2$ t_b และ t_a คือ วันที่เก็บตัวอย่าง 2 ช่วงเวลาที่ต่อเนื่องกัน Ft_aและ Ft_b คือ อัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ของ t_b และ t_a	รายฤดูกาลผลิต
8. ศักยภาพการทำให้โลกร้อน (kg CO_2eq/ha)	8.1 $GWP_{CH4} = CH_4$ emission x 21 8.2 $GWP_{N2O} = N_2O$ emission x 310 8.3 $GWP_{net} = GWP_{CH4} + GWP_{N2O}$	รายฤดูกาลผลิต
9. ศักยภาพการทำให้โลกร้อนต่อผลผลิต Yield-scaled GWP (kg CO_2eq/kg)	Yield-scaled GWP = GWP_{net} / ผลผลิต	รายฤดูกาลผลิต
10. ปริมาณการใช้น้ำในการปลูกข้าว (m^3/ha หรือ ลูกบาศก์เมตร/ไร่)	ปริมาณการใช้น้ำในการปลูกข้าว = น้ำเตรียมแปลง + ระดับน้ำในแปลงนา + การรั่วซึมลงสู่ดินชั้นล่าง + การคายระเหยของพืช) – ฝนใช้การ	รายฤดูกาลผลิต
11. อัตราผลผลิตน้ำ (m^3/kg)	ปริมาณการใช้น้ำในการปลูกข้าว / ผลผลิต	รายฤดูกาลผลิต
12. ค่าการใช้น้ำและวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (ลูกบาศก์เมตร/ตัน)	$WF_{proc} = (WF_{proc,green} + WF_{proc,blue} + WF_{proc,grey})$	รายฤดูกาลผลิต
13. ต้นทุนและผลตอบแทน ต้นทุนการผลิต อัตราการใช้ปัจจัยการผลิต แรงงาน ราคาต่อหน่วยปัจจัยการผลิต และราคาผลผลิต	คำนวณต้นทุนและผลคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วยวิธีการ B/C Ratio	รายฤดูกาลผลิต

3.6 รายละเอียดวิธีการศึกษา

3.6.1 การเตรียมความพร้อมการวิจัย

ในขั้นตอนนี้เป็นการวางแผนการวิจัย ร่วมกันระหว่าง เกษตรกรในพื้นที่เป้าหมายการวิจัย ทีมนักวิจัยของมหาวิทยาลัยมหิดล นักวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (สวพส.) และผู้ช่วยวิจัยจากโครงการขยายผลโครงการหลวงโหล่งขอดและผาแตก โดยการจัดประชุมและฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเป็นระยะต่อเนื่องตลอดการวิจัย เพื่อเตรียมความพร้อมก่อนการวิจัย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) จัดประชุมร่วมของนักวิจัย เมื่อวันที่ 29 มกราคม 2558 ณ สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (สวพส.) ผู้เข้าประชุมประกอบด้วยนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยมหิดล นักวิจัยจากสถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร มหาวิทยาลัยราชมงคลล้านนา ลำปาง นักวิจัยจากเจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (สวพส.) และเจ้าหน้าที่โครงการขยายผลโครงการหลวงโหล่งขอดและผาแตก เพื่อแนะนำโครงการ ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย ร่วมกันออกแบบวิธีการทำงานและประสานงาน

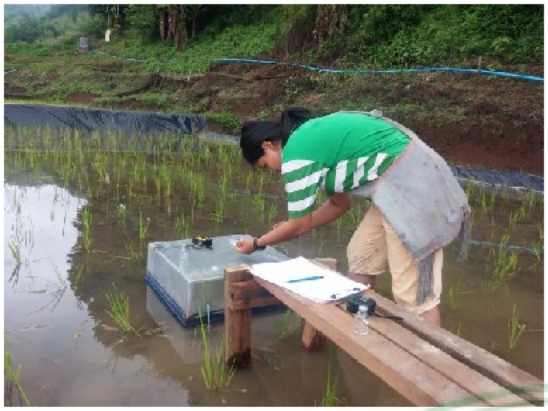
2) การฝึกอบรมการเก็บข้อมูลภาคสนาม ระหว่าง วันที่ 5-6 มีนาคม 2558 ณ สถานีทดลองการใช้น้ำชลประทานที่ 1 (แม่แตง) เพื่อเตรียมความพร้อมการเก็บข้อมูลภาคสนาม ผู้ช่วยวิจัย ประจำโครงการขยายผลโครงการหลวงโหล่งขอดและผาแตก สถานีละ 2 คน และนักวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (สวพส.) จำนวน 3 คน โดยเนื้อหาการประชุมเชิงปฏิบัติการ ประกอบด้วย การทำนาวิธีเปียกสลับแห้ง การเก็บตัวอย่างก๊าซเรือนกระจก การส่งน้ำและวัดระดับน้ำในแปลงนา และการอ่านและบันทึกข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

3.6.2 การเตรียมแปลงนาทดลองและติดตั้งอุปกรณ์เก็บตัวอย่างภาคสนาม

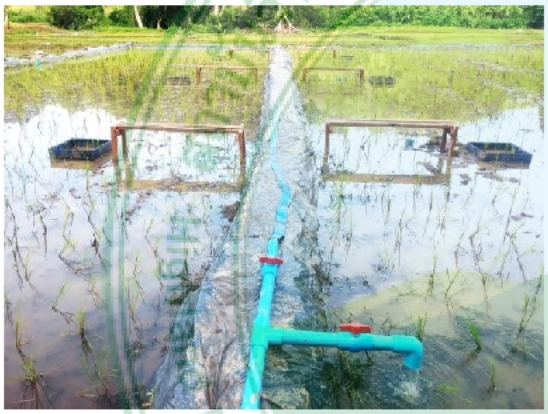
ระหว่างเดือนเมษายน-มิถุนายน พ.ศ. 2558 คณะวิจัยได้เตรียมความพร้อมการวิจัย ด้วยการสร้างชุดเก็บตัวอย่างอากาศ จำนวน 12 ชุด ประกอบด้วย ฐานรองกล่องเก็บอากาศ จำนวน 12 ชุด กล่องเก็บตัวอย่างอากาศพร้อมพัดลมและแบตเตอรี่ ความสูง 15 ซม. 6 ชุด (สำรอง 3 ชุด) ตัวต่อกล่องเก็บอากาศ ความสูง 30 ซม. จำนวน 24 ชุด ตัวต่อกล่องเก็บอากาศ ความสูง 60 ซม. 12 ชุด เครื่องมืออุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ตู้อุตุนิยมวิทยา ปรอทวัดอุณหภูมิอากาศสูงสุดและต่ำสุด เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์กระเปาะเปียก-แห้ง เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบมาตรฐาน เส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว และถาดวัดการระเหยน้ำแบบมาตรฐาน ชนิด class A pan อย่างละ 2 ชุด การกำหนดกิจกรรมในแปลงวิจัย โดยปรึกษากับเจ้าหน้าที่โครงการขยายผลฯ และเกษตรกรเพื่อวางแผนการทำงานร่วมกัน ได้แก่ การชี้แปลงรังวัดพื้นที่วิจัย การขนส่งและเก็บรักษาเครื่องมือ

วิจัย รวมถึงการจัดหาเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สันป่าตอง 1 ให้เกษตรกรบ้านแม่สายนาเลา เพื่อหว่านกล้า ส่วนพันธุ์ข้าวลิกา จะใช้ของเกษตรกรบ้านผาแตก ซึ่งเป็นผู้ผลิตเมล็ดพันธุ์ไว้ใช้เองในฤดูกาลผลิตที่ผ่านมา โดยก่อนการปักดำ จะดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์เก็บตัวอย่างอากาศ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ระบบชลประทานแบบท่อ มิเตอร์วัดปริมาณการส่งน้ำ และ ติดตั้งไม้ระดับวัดการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในแปลงนา พร้อมฝึกอบรมเจ้าหน้าที่โครงการขยายผลโครงการหลวงทั้งสองแห่ง ให้มีความพร้อมในการเก็บข้อมูล

สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน)
Highland Research and Development Institute (Public Organization)



ภาพที่ 13 การเก็บตัวอย่างอากาศด้วยวิธี closed chamber โดยเจ้าหน้าที่โครงการขยายผลโครงการหลวงผาแตก (ซ้ายมือ) และโหล่งขอด (ขวามือ)



ภาพที่ 14 การส่งน้ำและบันทึกระดับน้ำในแปลงนา โครงการขยายผลโครงการหลวงผาแตก (ซ้ายมือ) และโครงการขยายผลโครงการหลวงโหล่งขอด (ขวามือ)

ภาพที่ 15 เครื่องมืออุตุนิยมวิทยา

3.6.3 วิธีทำนาระบบนาน้ำขังและระบบนาน้ำน้อย

3.6.3.1 ระดับการกักเก็บน้ำในแปลงนา

- ระบบนาน้ำขัง ส่งน้ำให้ได้ระดับน้ำในแปลงนาสูงจากพื้นดินตามความต้องการของเกษตรกร โดยเฉลี่ย 10 ซม. การส่งน้ำจะกระทำเมื่อระดับน้ำเหนือพื้นดินต่ำกว่า 3 ซม.

- ระบบนาน้ำน้อย ส่งน้ำให้ได้ระดับน้ำในแปลงนาสูงจากพื้นดิน 5 ซม. การส่งน้ำจะกระทำเมื่อระดับน้ำเหนือพื้นดินต่ำกว่า 1 ซม. แต่จะมีการปรับลดระดับน้ำตามความต้องการน้ำของต้นข้าวในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต โดยใช้วิธีการแกล้งข้าว คือ การปล่อยน้ำเข้าแปลงนาในช่วง “เปียก” รอให้ระดับน้ำคงที่แล้วอ่านความสูงของน้ำจากไม้บรรทัดที่ติดไว้เพื่อนำไปคำนวณปริมาณน้ำที่ไหลเข้าแปลงนา และ การปล่อยน้ำให้แห้งในช่วง “แห้ง” จะมีการปล่อยน้ำให้แห้งต่ำจากพื้นดินประมาณ 15 ซม. หรือ ประมาณ 14 วัน จำนวน 2 ครั้ง แกล้งข้าวครั้งแรกหลังเมื่อข้าวอายุ 21-28 วันหลังปักดำ (days after transplanting; DAT) แกล้งข้าวครั้งที่ 2 เมื่อข้าวอายุ 60 DAT ซึ่งเป็นระยะแตกกอสูงสุด และจะปล่อยให้แห้งอีกครั้งก่อนการเก็บเกี่ยว 10 วัน วิธีการติดตามตรวจสอบระดับความชื้นหลังจากการแกล้งข้าว ใช้ท่อแกล้งข้าว ทำจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ซม. สูง 25 ซม. โดยเจาะรูทั้งหมด 8 แถวระยะห่างเท่า ๆ กันแถวละ 5 รู นำท่อที่ได้มาฝังลงในดินที่แปลงนาโดยให้ท่อลึกลงไปในดิน 20 ซม. ทำการควักดินในกระบอกท่อออกจนถึงก้นท่อเพื่อให้เห็นระดับน้ำใต้ดิน

3.6.3.2 การใส่ปุ๋ยและกำจัดวัชพืช

ก่อนการใส่ปุ๋ยจะกำจัดวัชพืชก่อน วิธีการใส่ปุ๋ยใช้วิธีหว่าน สูตรปุ๋ยและอัตราการใส่ปุ๋ยอ้างอิงอัตราการใส่ปุ๋ยของเกษตรกร โดยที่บ้านผาแตกและบ้านแม่สายนาเลา เกษตรกรใส่ปุ๋ย สูตร 15-15-15 อัตรา 5 กิโลกรัม/ไร่ ในช่วงแกล้งข้าวครั้งที่ 2 และฉีดยาฆ่าแมลง 1 ครั้ง

3.6.4 วิธีวัดปริมาณการส่งน้ำเพื่อการปลูกข้าวและบันทึกข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

บันทึกระดับน้ำในแปลงนาทุกวัน ในวันที่ส่งน้ำ บันทึกตัวเลขมาตรวัดน้ำก่อนและหลังการส่งน้ำ เพื่อคำนวณปริมาณการใช้น้ำ แสดงผลเป็นหน่วยลิตรต่อพื้นที่ หรือ มม. สำหรับข้อมูลอุตุนิยมวิทยาให้บันทึกค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด ปริมาณน้ำฝนสะสม 24 ชั่วโมง ความชื้นสัมพัทธ์ และค่าการระเหยน้ำ

3.6.5 วิธีเก็บตัวอย่างอากาศ วิเคราะห์ความเข้มข้น และอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

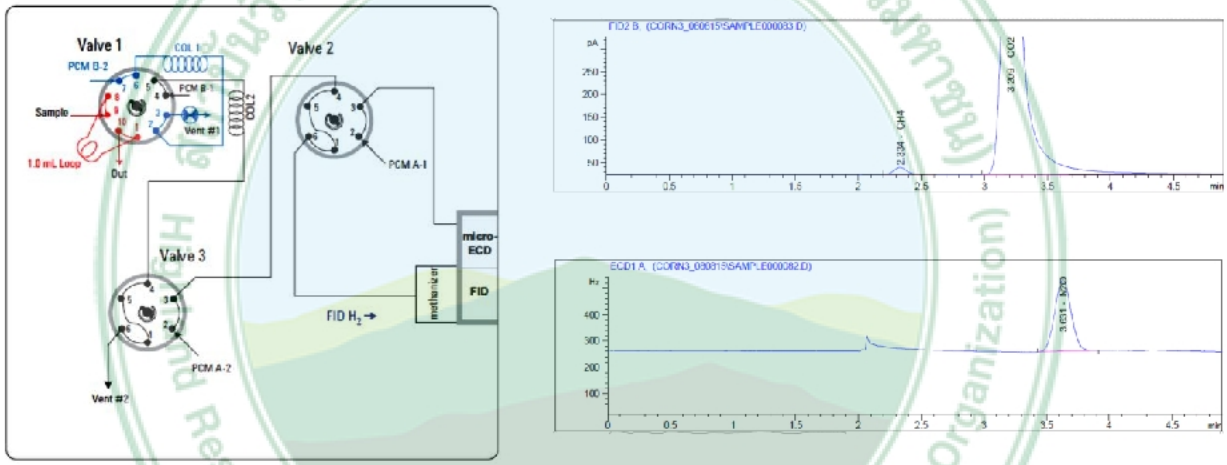
3.6.5.1 วิธีเก็บตัวอย่างอากาศ

เก็บตัวอย่างอากาศจากนาข้าว ด้วยกล่องเก็บตัวอย่างอากาศแบบปิด (gas collecting chamber) ซึ่งมีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ 1) ส่วนฐาน (chamber based) ทำจากแผ่นเหล็กเคลือบสีกันสนิม ขนาดกว้าง 50 ซม. ยาว 50 ซม. สูง 20 ซม. ฝังลงในดินลึกประมาณ 10 ซม. และ 2) ส่วนฝาครอบ (chamber covered) ทำจากแผ่นอะครีลิคใส ขนาดกว้าง 50 ซม. ยาว 50 ซม. สามระดับความสูง คือ 15 30 และ 60 ซม. เลือกใช้ด้วยการต่อฝาครอบเป็นชั้นๆ ตามระดับความสูงของต้นข้าว ภายในกล่องเก็บตัวอย่างอากาศติดตั้งพัดลมเพื่อหมุนเวียนอากาศให้เท่ากันทั่วทั้ง chamber เริ่มเก็บตัวอย่างอากาศเวลา 10:00-12:00 น. โดยใช้ syringe ที่ทำจาก polypropylene ขนาด 25 มิลลิลิตร และเข็มฉีดยาเบอร์ 26 ดูดอากาศตัวอย่างในกล่องเก็บตัวอย่าง ผ่าน 3 ways stopcock จำนวน 25 มิลลิลิตร แล้วฉีดตัวอย่างไว้ในขวดแก้วสุญญากาศ (pre-evacuated vials) ขนาด 20 มิลลิลิตร เก็บตัวอย่าง 4 ครั้ง ต่อ 1 chamber ที่เวลา 0 10 20 และ 30 นาที ขณะเก็บตัวอย่างทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิในกล่องเก็บตัวอย่างและอุณหภูมิดินที่ระดับความลึกจากผิวดิน 5 ซม. ในการเก็บตัวอย่างจะทำการเก็บตัวอย่างในฤดูเพาะปลูก เพื่อศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยจะทำการเก็บก๊าซเรือนกระจกสัปดาห์ละ 1 ครั้ง ในช่วงการใส่ปุ๋ยและแกล้งข้าวจะทำการเก็บตัวอย่างก๊าซเรือนกระจกสามวันครั้ง หลังจากนั้นเก็บสัปดาห์ละ 1 ครั้งตามปกติ จนถึงหลังเก็บเกี่ยวผลผลิต

3.6.5.2 วิธีวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจก: มีเทนและไนตรัสออกไซด์

ความเข้มข้นมีเทนและไนตรัสออกไซด์ในตัวอย่างอากาศ จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง gas chromatography (GC) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 6890 ประมวลผลด้วย software Chemstation โดยใช้ gastight syringe ความจุ 2.5 cc ประกอบเข้ากับเข็มชนิด side hold ดูดตัวอย่างอากาศจากขวดตัวอย่างฉีดเข้า sampling loop ปริมาตร 1 cc ซึ่งเครื่อง GC ดังกล่าว ติดตั้ง gas sampling valves ชนิด 6 ports จำนวน 2 ตัว และ ชนิด 10 ports จำนวน 1 ตัว (ภาพที่ 5) ทำหน้าที่แยกไอน้ำและออกซิเจนออกจากอากาศตัวอย่างด้วย pre column และระบายตัวอย่างส่วนที่ไม่ต้องการวิเคราะห์ด้วยวิธี back flush ผ่านทางท่อระบาย ทั้งนี้เพื่อป้องกันการรบกวนการทำงานของ detector ในขณะเดียวกัน gas sampling valves จะทำหน้าที่สลับตัวอย่างอากาศเข้าสู่ detector ที่ต่อแบบอนุกรม (stack detectors) จำนวน 2 ตัว โดยตัวอย่างจะวิเคราะห์ไนตรัสออกไซด์ ด้วย micro electron capture detector (μECD) เป็นลำดับแรก และ มีเทน ด้วย flame ionization detector (FID) เป็นลำดับสุดท้าย องค์ประกอบของระบบแยกสาร ได้แก่ stationary

phase ประกอบด้วย pre column ชนิด packed column stainless steel (SS) ชนิด Porapak Q 80/100 mesh ความยาว 6’ x 1/8” OD และ analytical column ชนิด capillary plot column ชนิด HP plot/Q Film thickness 40 micron ความยาว 30 m. x 0.53 mm.OD โดยมีสภาวะการทำงาน (GC conditions) ดังนี้ oven temperature 70 °C isothermal mobile phase ใช้ N_2 เป็น carrier gas ที่ flow rate 34.3 mL/min constant pressure 16.45 psi ความเข้มข้นของ N_2O วิเคราะห์ด้วย μECD ที่ temperature 385 °C N_2 make-up gas flow rate 20 mL/min และ CH_4 วิเคราะห์ด้วย FID ที่ temperature 350 °C, H^2 flow rate 50 mL/min, air zero flow rate 500 mL/min, และ N_2 make-up gas flow rate 5 mL/min ส่วน ปริมาณความเข้มข้นของอากาศตัวอย่างถูกวัดสอบด้วย mixed gas standards CH_4 และ N_2O ความเข้มข้น 11.4 ppm v และ 1.1 ppm v ตามลำดับ



ภาพที่ 16 ระบบ gas sampling valve และ โครมาโตรแกรม มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์ มาตรฐาน ความเข้มข้น 11.4, 995, และ 1.1 ppm v ตามลำดับ (Linde, Thailand)

3.6.5.3 วิธีคำนวณอัตราการปล่อย CH_4 และ N_2O (Peng *et al.*, 2011)

$$F = [(10^{-5}. \mu P) / (R.\{T+273.2\})] . H . (dC/dt) \quad (1)$$

เมื่อ F คือ ค่าการปล่อย CH_4 และ N_2O ($mg/m^{2/}h^1$)

P คือ ความกดอากาศใน chamber (1.01325×10^5 Pa)

T คือ ค่าอุณหภูมิภายใน chamber (°C)

R คือ ค่า universal gas constant (R=8.31441 J/mol/K)

μ คือ gas molecular weight (CH_4=16.123 g/mol, N_2O =44.013 g/mol)

H คือ ความสูงของ chamber (m)

dC/dt คือ อัตราการเพิ่มความเข้มข้นของ CH_4 และ N_2O ต่อช่วงเวลา (ppm/hour)

3.6.6 **วิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างดิน**

เก็บตัวอย่างดินก่อนการเตรียมแปลงนา แต่ละกรรมวิธีทดลอง สุ่มเก็บตัวอย่างดินแบบผสมรวม (composite sampling) ที่ระดับความลึก 0-30 ซม. และ 30-60 ซม. จำนวน 3-5 จุด เรียกว่าเป็นตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง รวม 2 ตัวอย่างต่อพื้นที่ศึกษา จากนั้นนำมาผึ่งลมให้แห้ง ร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มม. และ 500 ไมครอน สำหรับตัวอย่างดิน ขนาด 2 มม. ทำการวิเคราะห์ 1) particle size (mm) และ texture 2) percolation rate (cm/hr.) 3) moisture retention (%) ที่ความดันบรรยากาศ 1/10 1/3 และ 15 bar 4) available moisture (%) ถึง 15 bar 5) pH ดิน 6) CEC NH_4^+ extract (meq/100g) 7) organic matter (%) 8) soil total nitrogen และ 9) soil total carbon สำหรับพารามิเตอร์ ที่ 1 - 7 อ้างอิง ผลการวิจัยของสิโรจน์ และคณะ (2557) ส่วนพารามิเตอร์ที่ 8 – 9 วิเคราะห์โดยวิธี Dry combustion ที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล พญาไท

3.6.7 วิธีศึกษาสัณฐานวิทยาบางประการ อัตราการเจริญเติบโต มวลชีวภาพ และผลผลิต

3.6.7.1 การกำหนดช่วงเวลาการศึกษาการเจริญเติบโต

เก็บข้อมูลสัณฐานวิทยาบางประการ ตามระยะการเจริญเติบ ในระยะ 1) ระยะแตกกอ 10 % เก็บตัวอย่างก่อนแกล้งข้าว 2) ดอกบาน-ผสมเกสร 50 % เก็บตัวอย่างหลังแกล้งข้าว และ 3) ระยะสุกแก่ โดยในระยะแตกกอ 10 % และระยะดอกบาน-ผสมเกสร 50 % สุ่มตัวอย่างในพื้นที่ 0.25 ตร.ม. หรือ ข้าว 4 กอ ต่อกรรมวิธีทดลอง ส่วนระยะสุกแก่ ผลผลิตข้าวและองค์ประกอบผลผลิตข้าว สุ่มตัวอย่างในพื้นที่ 1 ตร.ม. หรือ ข้าว 16 กอ ทำ 3 ซ้ำ ต่อกรรมวิธีทดลอง

3.6.7.2 วิธีการเก็บตัวอย่างและวัดการเจริญเติบโต

1) บันทึกวันที่ เวลา การเก็บตัวอย่าง เลือกต้นข้าวที่สมบูรณ์ มีขนาดเท่ากันในแปลงทดลอง จำนวน 4 กอ ข้าวแต่ละกอให้ดำเนินการต่อไปนี้
2) วัด LAI ด้วยเครื่องมือ Pocket LAI (Confalonieri *et. al*., 2013)
3) วัดความสูงส่วนเหนือดิน ของต้นข้าว และพื้นที่ทรงพุ่มกอข้าว
4) ตัดใบข้าว ชั่งน้ำหนักน้ำหนักมวลชีวภาพส่วนเหนือดินสด นับจำนวนต้นต่อกอ จำนวนใบ ความยาวใบธง ความกว้างใบธง ความยาวรากจากโคนต้นถึงปลายราก
5) สุ่มตัวอย่างใบข้าว จากแต่ละกอ โดยให้ได้น้ำหนัก 30 %
6) นำใบวางเรียงลงบนกระดาษกราฟ ขนาด A3 (หากใบยาวกว่ากระดาษให้ตัดใบข้าวให้พอดีกับกระดาษกราฟ) บันทึกด้วยกล้องดิจิตอล ประมวลผลด้วยวิธี image processing ด้วย software Erdas imagine 8.4 แล้วคำนวณพื้นที่ใบด้วยsoftware Arcview GIS 3.2a เทียบเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักใบสดทั้งหมด จากนั้น คำนวณ LAI จากสมการ พื้นที่ใบ/พื้นที่ทรงพุ่ม และ SLWI จากสมการ น้ำหนักมวล ชีวภาพส่วนเหนือดินแห้ง / พื้นที่ใบ
7) เมื่อวาดเส้นรอบรูปใบเสร็จแล้ว นำตัวอย่างต้นข้าวไปรวมกับต้นข้าวในข้อ 5) อบที่ 60 องศาเซลเซียส เพื่อหาน้ำหนักมวลชีวภาพส่วนเหนือดินแห้ง
8) เก็บตัวอย่างรากข้าว ใช้ soil core ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.35 ซม. สูง 15 ซม. แยก รากสด ออกจากดิน ใน soil core แช่ไว้ในน้ำ

9) สุ่มรากข้าวจากข้าวแต่ละกอ มา 30 % นำใบวางเรียงลงบนกระดาษกราฟ ขนาด A3 (หากใบยาวกว่ากระดาษให้ตัดใบข้าวให้พอดีกับกระดาษกราฟ) บันทึกด้วยกล้องดิจิตอล ประมวลผลด้วยวิธี image processing ด้วย software Erdas imagine 8.4 แล้วคำนวณพื้นที่ใบ ด้วย software Arcview GIS 3.2a เพื่อหาความยาวรากสดทั้งหมด เมื่อนับความยาวรากเสร็จแล้วผึ่งตัวอย่างให้แห้งในที่ร่ม ชั่งน้ำหนักสดของตัวอย่างรากสดของซ้ำนั้น เมื่อวัดความยาวรากสดทั้งหมดของข้าวแต่ละกอ แล้วรวมตัวอย่างทั้งหมด โดยสรงรากขึ้นจากน้ำ ผึ่งรากสดให้แห้งในที่ร่ม ชั่งน้ำหนักสดทั้งหมดของรากแต่ละกอ อบที่ 60 องศาเซลเซียส เพื่อหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักรากแห้ง

10) จากนั้นคำนวณ RWT = น้ำหนักรากแห้งทั้งหมด / ปริมาตรดินจาก soil core บริเวณที่เก็บตัวอย่างรากข้าว RLD = ความยาวรากทั้งหมด / ปริมาตรดินจาก soil core บริเวณที่เก็บตัวอย่างรากข้าว

11) อัตราการเจริญเติบโต = ∆น้ำหนักใบแห้ง/∆ระยะเวลา และ อัตราการสะสมมวลชีวภาพ = ∆น้ำหนักใบแห้ง. ln∆พื้นที่ใบ/∆

12) ชั่งน้ำหนักผลผลิตแห้งจากพื้นที่ 1 ตร.ม. หรือ 16 กอ

13) จำแนกองค์ประกอบผลผลิต นับจำนวนรวง น้ำหนักรวง น้ำหนัก เมล็ดทั้งหมด น้ำหนักเมล็ดดี น้ำหนักเมล็ดลีบ และน้ำหนักของข้าวเปลือก 1,000 เมล็ด

สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) Highland Research and Development Institute (Public Organization)

3.6.8 ประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบระหว่างระบบนาน้ำขังและระบบนาน้ำน้อย

. 3.6.8.1 อัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสะสมตลอดฤดูกาลปลูกข้าว (kg CH_4/haหรือ kg N_2O/ha) (Ly *et al*., 2015)

$$\text{GHG accumulation} = \sum A_{t\,(ab)} \quad (2)$$

เมื่อ $A_{t(ab)} = [(t_b - t_a).(Ft_a - Ft_b)] / 2$

t_b และ t_a คือ วันที่เก็บตัวอย่าง 2 ช่วงเวลาที่ต่อเนื่องกัน

Ft_aและ Ft_b คือ อัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ของ t_b และ t_a

3.6.8.2 ศักยภาพการทำให้โลกร้อน (GWP; kg CO_2eq) (IPCC, 1997)(3)

$$GWP_{CH4} = CH_4 \text{ emission} \times 21$$

$$GWP_{N2O} = N_2O \text{ emission} \times 310$$

$$GWP_{net} = GWP_{CH4} + GWP_{N2O}$$

3.6.8.3 ศักยภาพการทำให้โลกร้อนต่อผลผลิต (yield-scaled global warming potential; kg CO_2eq/kg yield) (Tarlera *et al.*, 2016)

$$\text{Yield-scaled GWP} = \text{GWP} / \text{ผลผลิต} \quad (4)$$

3.6.8.4 ปริมาณการใช้น้ำในการปลูกข้าว (irrigation water requirement for rice cultivation; m^3/ha หรือ m^3/rai) (สิโรจน์ และคณะ 2557)

ปริมาณการใช้น้ำในการปลูกข้าว = น้ำเตรียมแปลง + ระดับน้ำในแปลงนา + การรั่วซึมลงสู่ดินชั้นล่าง + การคายระเหยของพืช) – ฝนใช้การ (5)

3.6.8.5 อัตราผลผลิตน้ำ (water productivity; ลูกบาศก์เมตร/ตันผลผลิต) (Tarlera *et al.*, 2016)

$$\text{อัตราผลผลิตน้ำ} = \text{ปริมาณการใช้น้ำในการปลูกข้าว} / \text{ผลผลิต} \quad (6)$$

3.6.8.6 ค่าการใช้น้ำและวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (consumptive water use and water footprint)

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของกระบวนการปลูกข้าว (m^3/ton) ในแต่ละขั้นตอน (WF_{proc}) คือผลรวมของ green water footprint ($WF_{proc,green}$) blue water footprint ($WF_{proc,blue}$) และ grey water footprint ($WF_{proc,grey}$) ในหน่วย m^3/ha ต่อผลผลิต (Yield; Y) แสดงผลในหน่วย ton/ha (Hoekstra *et al*., 2011)

$$WF_{proc} = (WF_{proc,green} + WF_{proc,blue}) \quad (7)$$

Green water footprint ของกระบวนการปลูกข้าว ($WF_{proc,green}$; m^3/ton) คำนวณจากผลรวมของปริมาณการใช้น้ำของข้าว (consumptive water use; CWU) จากฝนใช้การ (CWU_{green}; m^3/ha) ต่อผลผลิตข้าว (Y; ton/ha) ดังสมการที่ 8

$$WF_{proc,green} = CWU_{green} / Y \quad (8)$$

Blue water footprint ของกระบวนการปลูกข้าว ($WF_{proc,blue}$; m^3/ton) คำนวณจาก ผลรวมการใช้น้ำของข้าว (consumptive water use) จากการให้น้ำชลประทาน (CWU_{blue}; m^3/ha) ต่อผลผลิตข้าว (Y; ton/ha) ดังสมการที่ 9

$$WF_{proc,blue} = CWU_{blue} / Y \quad (9)$$

โดยค่า CWU_{green} (m^3/ha) คือ ผลรวมค่า green water evaporation หรือค่าการคายระเหย ของข้าวที่ใช้น้ำจากฝนใช้การรายวัน (ET_{green}; mm/day) ตลอดฤดูเพาะปลูก และ 10 คือค่าคงที่เพื่อแปลงหน่วยจาก mm ให้เป็น m^3/ha ดังสมการที่ 10

$$CWU_{green} = 10 \times \sum ET_{green} \quad (10)$$

ส่วนค่า CWU_{blue} (m^3/ha) คือ ผลรวมของ blue water evaporation หรือค่าการคายระเหย ของข้าวที่ใช้น้ำจากน้ำชลประทานรายวัน (ET_{blue}; mm/day) ตลอดฤดูเพาะปลูก และ 10 คือค่าคงที่เพื่อแปลงหน่วยจาก mm ให้เป็น m^3/ha ดังสมการที่ 11

$$CWU_{blue} = 10 \times \sum ET_{blue} \quad (11)$$

3.6.8.7 สัดส่วนต้นทุนการผลิตต่อผลตอบแทน

ผลคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ = B / C (12)

เมื่อ ต้นทุนการผลิต ได้แก่ มูลค่าปัจจัยการผลิตและค่าแรงงาน (บาท)

ราคาผลผลิต ได้แก่ ราคาผลผลิตต่อกิโลกรัม (บาท)

3.6.9 วิธีวิเคราะห์ข้อมูลและการทดสอบสถิติ

ใช้สถิติเชิงพรรณนาบรรยายคุณลักษณะข้อมูลเชิงตัวเลข เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สำหรับการทดสอบสมมุติฐานของผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 หรือ 3 กลุ่มตัวอย่าง ระบบนาน้ำน้อยกับระบบนาน้ำขัง และระยะการเจริญเติบโต ใช้สถิติเชิงอนุมาน *t*-test และ *F*-test

สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) Highland Research and Development Institute (Public Organization)