

อภิธาน์นทาการ

สัณญาเลทที่ R2562B035



สำนักหอสมุด

## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การจำลองสถานการณ์โลกร้อนในอนาคตตามฐานข้อมูลภาพถ่ายอนาคต การปล่อยก๊าซเรือน  
กระจกแบบใหม่ (RCP) เพื่อประเมินผลกระทบต่อเนื้อระยะยาวต่อ ผลผลิต สารอาหาร  
สารแอนตี้ออกซิแดนท์ และลักษณะพันธุกรรม ของข้าวขาว และข้าวสี

ที่นิยมปลูกในเขตภาคเหนือตอนล่าง

ร่วมกับการสร้างแนวทางการรับมือในชุมชน

Simulation of Future Global Warming Based on the Representative  
Concentration Pathways Scenarios (RCPs) for Assessment of Long-Term  
Continuous Effects on Yield, Nutrients, Antioxidants and Genetic  
Characteristics of Popular Jasmine Rice and Black Sticky Rice Cultivars in Lower  
Northern Region with Building Guidelines for Community Coping

โดย

รศ.ดร.กณิศา ธนเจริญชนภาส (หัวหน้าโครงการ)

ผศ.ดร.โอรส รักชาติ (ผู้ร่วมโครงการ)

ดร.ภาวิช วิจารัตน์ (ผู้ร่วมโครงการ)

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร

วันลงทะเบียน - 4 ก.พ. 2565

เลขทะเบียน 1048487

เลขเรียกหนังสือ.....

คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยนเรศวร

๑ ๐C

๑๘1

๘.๘56

๗๒๒๖

๒56๒

สนับสนุนโดย

งบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยนเรศวร

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2562

## กิตติกรรมประกาศ

ดิฉันในฐานะหัวหน้าโครงการวิจัย การจำลองสถานการณ์โลกร้อนในอนาคตตามฐานข้อมูลภาพถ่ายอนาคต การปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบใหม่ (RCP) เพื่อประเมินผลกระทบต่อเนื่องระยะยาวต่อ ผลผลิต สารอาหาร สารแอนติออกซิแดนท์ และลักษณะพันธุกรรม ของข้าวขาว และข้าวสี ที่นิยมปลูกในเขตภาคเหนือตอนล่าง ร่วมกับการสร้างแนวทางการรับมือในชุมชน ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยนเรศวร เป็นอย่างยิ่งที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย ภายใต้งบประมาณแผ่นดิน 2562 เป็นจำนวนวงเงิน 748,500.00 บาท (เจ็ดแสนสี่หมื่นแปดพันห้าร้อยบาทถ้วน) ในประเด็นการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จนสามารถดำเนินการวิจัยได้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ทุกประการ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนและความอนุเคราะห์ทั้งเมล็ดพันธุ์ข้าวและองค์ความรู้จากจากศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก ศูนย์วิจัยข้าวชัยนาท และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน รวมทั้งได้รับ การสนับสนุนการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการโดยภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร และขอขอบคุณเป็นพิเศษสำหรับคณาจารย์ผู้ร่วมวิจัยทุกท่าน รวมทั้งของขอบคุณคุณ เป็ญนุช ศรีโสภา ผู้ช่วยวิจัยในโครงการ รวมทั้งนิสิตระดับปริญญาตรี สาขาวิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานทั้งในด้านการดูแลแปลงปฏิบัติการ การเก็บตัวอย่างและเป็นผู้ช่วยในห้องปฏิบัติการ ตั้งแต่เริ่มต้นการปฏิบัติงานจนกระทั่งเสร็จสิ้น ความช่วยเหลือจากทุกท่านและทุกหน่วยงานดังกล่าวนี้ล้วนแต่เป็นส่วนสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับความสำเร็จทุกประการของผลงานวิจัย

คณะผู้วิจัย

2563

## แบบสรุปผู้บริหาร (Executive Summary)

### 1. รายละเอียดเกี่ยวกับแผนงานวิจัย / โครงการวิจัย

#### 1.1 ชื่อเรื่อง

(ภาษาไทย) การจำลองสถานการณ์โลกร้อนในอนาคตตามฐานข้อมูลสภาพฉายอนาคต การปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบใหม่ (RCP) เพื่อประเมินผลกระทบต่อเนื่องระยะยาวต่อ ผลผลิต สารอาหาร สารแอนตี้ออกซิแดนซ์ และลักษณะพันธุกรรม ของข้าวขาว และข้าวสี ที่นิยมปลูกในเขตภาคเหนือตอนล่าง ร่วมกับการสร้างแนวทางการรับมือในชุมชน

(ภาษาอังกฤษ) Simulation of Future Global Warming Based on the Representative Concentration Pathways Scenarios (RCPs) for Assessment of Long-Term Continuous Effects on Yield, Nutrients, Antioxidants and Genetic Characteristics of Popular Jasmine Rice and Black Sticky Rice Cultivars in Lower Northern Region with Building Guidelines for Community Coping.....

#### 1.2 คณะผู้วิจัย

1. หัวหน้าโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร.กณิดา ธนเจริญชนภาส ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000 หมายเลขโทรศัพท์ 055-962751 หมายเลขโทรสาร 055-962750

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โอรส รักชาติ ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000 หมายเลขโทรศัพท์ 055-962745 หมายเลขโทรสาร 055-962750

3. ดร.ภาวช วิจารัตน์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000 หมายเลขโทรศัพท์ 092-5516262 หมายเลขโทรสาร 055-962708

#### 1.3 งบประมาณและระยะเวลาทำวิจัย

ได้รับงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 งบประมาณที่ได้รับ 7480,500 บาท ระยะเวลาทำวิจัย ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2561 ถึง 30 กันยายน 2563

## 2.สรุปโครงการวิจัย

การดำเนินการควบคุมทรีทเมนต์ภายใต้การจำลองสถานการณ์ให้เทียบเท่ากับระดับ RCP 4.5 (ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย  $2.6^{\circ}\text{C}$ ) และ RCP 8.5 (ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย  $4.5^{\circ}\text{C}$ ) และทรีทเมนต์ควบคุม ทั้งหมด 3 สภาวะ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เกือบทุกประเภทในการวิจัย (ยกเว้นอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์) นั่นคือ ระดับแรงควัตถุชนิด คลอโรฟิลล์บี และแคโรทีนอยด์, ผลผลิตรวมต้น/เฮกเตอร์, ขนาดเมล็ดโดยการชั่งเป็น 100 เมล็ด, กรดไขมันทั้ง 3 ชนิด, อะมิโลส, อะมิโลเพคติน, ค่าความหวาน, สารแอนตีออกซิแดนซ์ ทั้งชนิดสารประกอบฟีนอลิก และแอนโทไซยานิน สุดท้ายคือการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางพันธุกรรม ของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ดังนี้

2.1 เมื่อพิจารณาความอ่อนไหวและความทนทานของข้าวทั้ง 2 พันธุ์โดยพิจารณาจากการตอบสนองในเชิงลบของพารามิเตอร์ที่สำคัญ พบว่าข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่มีความอ่อนไหวมากกว่า เนื่องจากพิจารณาจากผลผลิตในภาพรวม (ต้น/เฮกเตอร์) ลดลงถึง 68.7% (ภายใต้ HT8.5) การลดขนาดของเมล็ด (ภายใต้ HT4.5 และ HT8.5) การลดกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวไลโนเลอิก (ภายใต้ HT4.5 และ HT8.5) และการลดสารแอนตีออกซิแดนซ์ทั้งฟีนอลิกและแอนโทไซยานิน (ภายใต้ HT4.5 และ HT8.5) ซึ่งสังเกตพบว่าสีม่วงของเมล็ดข้าวไรซ์เบอร์รี่ลดลงภายใต้สถานการณ์อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลทำให้แอนโทไซยานินที่ตรวจวิเคราะห์ลดลง

ในขณะที่ข้าวพันธุ์ กข29 การลดผลผลิตในภาพรวม (ต้น/เฮกเตอร์) ลดลงเพียง 28.5% (ภายใต้ HT8.5) กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวชนิดไลโนเลอิกเพิ่มขึ้น (ภายใต้ HT8.5) และสารแอนตีออกซิแดนซ์ชนิดสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้น (ภายใต้ HT8.5) บ่งบอกถึงความสามารถในการสร้างกลไกป้องกันตัวเองได้ดีกว่าข้าวไรซ์เบอร์รี่

2.2 พิจารณาสถานการณ์ที่คาดการณ์ในอนาคตภายใต้การจำลองสถานการณ์ให้เทียบเท่ากับระดับ RCP 4.5 (ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย  $2.6^{\circ}\text{C}$ ) และ RCP 8.5 (ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย  $4.5^{\circ}\text{C}$ ) ที่จะส่งผลต่อผลผลิตและคุณภาพของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ คือ กข29 และไรซ์เบอร์รี่ในภาพรวมที่มีต่อพารามิเตอร์สำคัญ พบว่า สถานการณ์ RCP 8.5 ส่งผลกระทบในระดับที่รุนแรงกว่าในด้านการลดผลผลิตรวม ลดขนาดของเมล็ด ลดไขมันชนิดดี(ไม่อิ่มตัว) และสุดท้ายลดสารแอนตีออกซิแดนซ์

2.3 ลักษณะพันธุกรรมภายใต้ 2 สถานการณ์ล้วนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะพันธุกรรมของข้าวทั้ง 2 พันธุ์

เมื่อเสร็จสิ้นโครงการวิจัยได้นำข้อมูลในโครงการไปถ่ายทอดให้แก่ชุมชน ในการศึกษาเลือกกลุ่มตัวอย่างเกษตรกร จำนวน 38 คนในพื้นที่ศึกษา คือ ศูนย์การเรียนรู้ตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ต.รังนก อ.สามง่าม จ.พิจิตร ซึ่งผลที่ได้รับชุมชนได้ร่วมมือกันสร้างแนวทางการลดการเผาผลผลิตและสิ่งเหลือใช้ทางการเกษตรในเบื้องต้นเพื่อรับมือกับสภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ

### 3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 3.1 เพื่อให้ได้ข้อมูลผลกระทบของปัจจัยการเพิ่มระดับอุณหภูมิ ตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนที่มีต่อปริมาณผลผลิตของข้าวขาวและข้าวสีที่นิยมปลูกในเขตภาคเหนือตอนล่าง
- 3.2 เพื่อให้ทราบข้อมูลผลกระทบของปัจจัยการเพิ่มระดับอุณหภูมิ ตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนที่มีต่อสารอาหารสำคัญและสารแอนติออกซิแดนท์ในเมล็ดข้าวขาวและข้าวสีที่นิยมปลูกในเขตภาคเหนือตอนล่าง
- 3.3 เพื่อให้ทราบข้อมูลผลกระทบของปัจจัยการเพิ่มระดับอุณหภูมิ ตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมในข้าวขาวและข้าวสีที่นิยมปลูกในเขตภาคเหนือตอนล่าง
- 3.4 เพื่อสร้างองค์ความรู้ด้านผลกระทบของสภาวะโลกร้อนต่อข้าวและแนวทางการรับมือให้แก่ชุมชนที่ปลูกข้าวในพื้นที่

### 4. ระเบียบวิธีวิจัย

#### 4.1 พื้นที่วิจัย

เลือกพื้นที่วิจัยในพื้นที่นาข้าวจังหวัดพิษณุโลก สำหรับการทดสอบผลกระทบของระดับอุณหภูมิสูงที่เพิ่มขึ้น

#### 4.2 พันธุ์ข้าว

เลือกพันธุ์ข้าว 2 ประเภท คือ ข้าวขาวและข้าวสี รวมทั้งหมด 2 พันธุ์

- ข้าวพันธุ์ กข 29 (ข้าวเจ้าไม่ไวแสง)
- ข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ (ข้าวเจ้าสีม่วงไม่ไวแสง)

#### 4.3 ระดับอุณหภูมิและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ สร้างโรงเรือนทดลองแบบเคลื่อนย้ายได้ จำนวน 21 โรงเรือน แต่ละโรงเรือนมีขนาดโรงเรือน 4 x 3 ตารางเมตร และสูง 3 เมตร (รวมหลังคา) ปิดผนังด้วยพลาสติกคุณภาพสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม ติดตั้งระบบควบคุมไฟฟ้าอัตโนมัติ ซึ่งควบคุมระบบไฟอัตโนมัติ รวมทั้งระดับอุณหภูมิให้แตกต่างกันโดยใช้หลอดไฟอินฟราเรด สีดำ ซึ่งจะแผ่รังสีความร้อนคืออินฟราเรดแต่ไม่แผ่แสงสีสำหรับการสังเคราะห์แสง และใช้แอร์คอนดิชันสำหรับการควบคุมระดับอุณหภูมิในตู้ควบคุม ตามสภาวะแนวคาดการณ์ในอนาคตภายใต้ภาพฉายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบใหม่ Representative Concentration Pathways (RCP) 2 รูปแบบ คือ RCP 4.5 และ RCP 8.5 ซึ่งในการศึกษาจะควบคุมสถานการณ์ 3 สถานการณ์ (3 treatments)

1. CT (control) ระดับธรรมชาติ (ระดับปัจจุบัน) ชุดควบคุม

2.HT4.5 ระดับอุณหภูมิอากาศการณ์ในปี ค.ศ.2100 สูงกว่าระดับค่าเฉลี่ยธรรมชาติ 1.1-2.6°C เป็นแนวโน้มตามภาพฉายอนาคต RCP 4.5

3. 3.HT8.5 ระดับอุณหภูมิอากาศการณ์ในปี ค.ศ.2100 สูงกว่าระดับค่าเฉลี่ยธรรมชาติ 2.6-4.8°C เป็นแนวโน้มตามภาพฉายอนาคต RCP 4.5 แนวโน้มตาม RCP 8.5

#### 4.4 การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองในหน่วยการทดลองเป็นแบบ Random Completed Block Design (RCBD) สำหรับ 3 สิ่งทดลอง ทั้งหมด 3 ซ้ำ (3 replications)

#### 4.5 พารามิเตอร์ในการศึกษา

##### 4.5.1 ระดับอุณหภูมิและคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงเรือน

บันทึกผลระดับอุณหภูมิและระดับความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> ในโรงเรือนในรอบ 1 วัน ช่วงที่มีการเปิดระบบควบคุมระดับอุณหภูมิและ CO<sub>2</sub> ในโรงเรือนทดลอง ตลอดระยะเวลาการปลูกข้าว (ประมาณ 4 เดือน)

##### 4.5.2 ธาตุอาหารในดินก่อนปลูก

วิเคราะห์ธาตุอาหารในดินก่อนปลูกข้าวทุกพันธุ์ ดังนี้  
ไนโตรเจนทั้งหมด ไนเตรท แอมโมเนียม ฟอสฟอรัสทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียม

##### 4.5.3 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์

การวัดอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์นั้น จะต้องวัดการเจริญของใบเปรียบเทียบกัน 2 ระยะการเติบโต ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกเปรียบเทียบ ระหว่างระยะการแตกกอ และระยะเก็บเกี่ยวซึ่งทำให้ได้ผลการบันทึก เพื่อคำนวณอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ดังนี้

- (1) การเจริญของใบในระยะแตกกอ
- (2) การเจริญของใบในระยะเก็บเกี่ยว
- (3) อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์เปรียบเทียบระหว่างช่วงระยะแตกกอและระยะเก็บเกี่ยว
  - อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (หน่วย mg/g/day) ใช้วิธีของ Blackman (1919)

##### 4.5.4 วิเคราะห์องค์ประกอบผลผลิต

ศึกษาองค์ประกอบผลผลิตคือ

- no. of panicles per m<sup>2</sup>
- % filled grains per panicle
- 1000-grain weight (g)

- วิเคราะห์ปริมาณผลผลิตโดย คำนวณผลผลิตหน่วยเป็นตัน/เฮกแตร์ จากสูตร Yoshida (1981)

$$\text{Grain yield (t/ha)} = \text{no. of panicles per m}^2 \times \% \text{ filled grains per panicle} \times 1000\text{-grain weight (g)} \times 10^{-5}$$

#### 4.5.5 การวิเคราะห์รงควัตถุในใบ

#### 4.5.6 สารอาหารสำคัญในเมล็ดข้าว

##### (1) วิเคราะห์คุณสมบัติของแป้ง

วิเคราะห์คาร์โบไฮเดรตในเมล็ดข้าวในรูปของแป้งซึ่งส่งผลต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าว ซึ่งจะวิเคราะห์สารประกอบในแป้ง 2 ชนิดคือ

1.1 อะมิโลส (amylose) และ

1.2 อะมิโลเพคติน (amylopectin)

1.3 อัตราส่วนระหว่างอะมิโลส และ อะมิโลเพคติน (Amylose: Amylopectin Ratio)

##### (2) วิเคราะห์กรดไขมัน

ในการวิจัยเลือกวิเคราะห์กรดไขมันชนิดไม่อิ่มที่สำคัญในเมล็ดข้าวที่สำคัญ คือ

2.1 กรดพาล์มมิติก (palmitic acid )

2.2 กรดโอเลอิก (oleic acid)

2.3 กรดลิโนเลอิก (linoleic acid)

##### (3) ค่าความหวาน

#### 4.5.7 สารแอนตีออกซิแดนซ์

(1) สารแอนโธไซยานิน (anthocyanin)

(2) สารประกอบฟีนอลิก (phenolic)

#### 4.5.8 การวิเคราะห์ลักษณะทางพันธุกรรม

วิเคราะห์ลักษณะทางพันธุกรรม ใช้เทคนิคด้วยวิธี AFLP (Amplified Fragment Length Polymorphism) ใบของข้าวที่มีอายุน้อย ทั้ง 2 พันธุ์ในช่วงระยะแตกกอ

#### 4.5.9 กิจกรรมการถ่ายทอดความรู้สู่ชุมชนเพื่อสร้างแนวทางการรับมือในชุมชน

จัดกิจกรรมอบรมโดยเน้นกลุ่มเกษตรกรในพื้นที่ปลูกข้าว

### 5 ผลการวิจัย

การวิจัยโครงการนี้ได้กำหนดขอบเขตการศึกษาโดยการเลือกข้าว 2 พันธุ์ คือข้าวขาว (กข29) และข้าวสี (ไรซ์เบอร์รี่) และ สร้างสภาวะการเพิ่มระดับอุณหภูมิ 2 สถานการณ์ภายในโรงเรือนปลูกข้าว ตามแนวโน้มสภาพฉายอนาคต RCP 4.5 (ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2.6°C) และ RCP 8.5 (ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 4.5°C) ซึ่งเป็นสภาวะที่มีโอกาสเป็นไปได้ในประเทศไทย ซึ่งผลการศึกษารูปในภาพรวมได้ดังนี้

## 5.1 สรุปผลการวิจัยแยกตามปัจจัยที่ศึกษา

### 5.1.1 ผลการศึกษาในปัจจัยด้านอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์

ผลการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ในระยะเวลา 100 วัน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

### 5.1.2 ผลการศึกษาในปัจจัยด้านรวงควัดฤดูในใบ

#### (1) รวงควัดฤดูชนิดคลอโรฟิลล์เอ

ผลการศึกษาไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลองในข้าวทั้ง 2 พันธุ์

#### (2) รวงควัดฤดูชนิดคลอโรฟิลล์บี

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์บีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT 8.5 ในใบข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่

#### (3) รวงควัดฤดูชนิดแคโรทีนอยด์

ผลการศึกษาในรวงควัดฤดูชนิดแคโรทีนอยด์ พบว่ามีผลที่แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เฉพาะภายใต้สถานการณ์ HT4.5 ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ พบว่าปริมาณแคโรทีนอยด์ลดลงในข้าวพันธุ์ กข29 แต่เพิ่มขึ้นในข้าวไรซ์เบอร์รี่

### 5.1.3 ผลการศึกษาในปัจจัยองค์ประกอบผลผลิต

#### (1) ผลผลิต

ผลการศึกษาพบว่าถึงแม้พบว่าองค์ประกอบผลผลิตเกือบทั้งหมด คือจำนวนรวง/กอ, จำนวนเมล็ดสมบูรณ์/รวง, จำนวนเมล็ดทั้งหมด/รวง ไม่พบผลที่แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) อย่างไรก็ตามพบว่ามี 2 พารามิเตอร์ที่พบว่ามีผลการศึกษาที่แสดงผลกระทบเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) คือผลผลิตรวม ต้น/เฮกแตร์ และน้ำหนัก 100 เมล็ด ซึ่งแสดงออกทั้ง 2 พันธุ์ ผลผลิตรวม ต้น/เฮกแตร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT8.5 เท่ากับ 28.5% และ 68.7% ในข้าวพันธุ์กข29 และไรซ์เบอร์รี่ ตามลำดับ ส่วนน้ำหนัก 100 เมล็ดนั้นพบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญในข้าวพันธุ์ กข29 ภายใต้



สถานการณ์ HT8.5 แต่ในข้าวพันธุ์โรซเบอรี่ลดลงทั้ง 2 สถานการณ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

#### 5.1.4 กรดไขมัน

ผลการศึกษาพบว่ากรดไขมันพาล์มมิติกและโอเลอิกตอบสนองทั้งเชิงบวกและเชิงลบแต่ละสถานการณ์ ผลการศึกษาค่อนข้างแตกต่างกันในแต่ละสภาวะอุณหภูมิและแตกต่างกันในแต่ละพันธุ์ โดยสรุปดังนี้

##### (1) กรดพาล์มมิติก

ปริมาณกรดพาล์มมิติกตอบสนองต่อสถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 รวมทั้งแสดงออกในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ในทางตรงข้ามกัน นั่นคือภายใต้สถานการณ์ HT4.5 เพิ่มขึ้นในข้าวพันธุ์ กข29 แต่ลดลงในข้าวพันธุ์โรซเบอรี่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แต่ภายใต้สถานการณ์ HT8.5 ลดลงในข้าวพันธุ์ กข29 แต่เพิ่มขึ้นในข้าวพันธุ์โรซเบอรี่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

##### (2) กรดโอเลอิก

ปริมาณกรดโอเลอิกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์สอดคล้องกัน

##### (3) กรดไลโนเลอิก

ปริมาณกรดไลโนเลอิกตอบสนองต่อสถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 รวมทั้งแสดงออกในข้าวทั้ง 2 พันธุ์แตกต่างกัน นั่นคือลดลงภายใต้สถานการณ์ HT4.5 ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ แต่ภายใต้สถานการณ์ HT8.5 กลับเพิ่มขึ้นในข้าวพันธุ์ กข29 แต่ลดลงในข้าวพันธุ์โรซเบอรี่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบทั้ง 2 พันธุ์พบว่าผลการตอบสนองของข้าวพันธุ์โรซเบอรี่ภายใต้ HT 8.5 ทำให้กรดไขมันทั้ง 3 ชนิดลดลงชัดเจน แต่พันธุ์ กข29 มีเพียงกรดพาล์มมิติกที่ลดลง แต่กรดไขมันโอเลอิก และไลโนเลอิกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

#### 5.1.5 อะมิโลสและอะมิโลเพคติน

ผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างค่าอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในเมล็ดข้าว 2 พันธุ์ พบว่ามีเพียงข้าวพันธุ์โรซเบอรี่ที่มีการตอบสนองในเชิงบวกโดยการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของอะมิโลสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 และตอบสนองในเชิงลบโดยการลดเปอร์เซ็นต์ของอะมิโลเพคติน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5

#### 5.1.6 ค่าความหวาน

ผลการตอบสนองต่อระดับค่าความหวานของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ที่มีต่อสถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 ตรงข้ามกัน พบว่าค่าความหวานของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข29 เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ต่อทั้ง 2 สถานการณ์ ในขณะที่ค่าความหวานของเมล็ดข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ต่อทั้ง 2 สถานการณ์ และลดลงสูงสุดภายใต้สถานการณ์ HT8.5

### 5.1.7 สารแอนต็อกซิแดนท์

#### (1) สารประกอบฟีนอลิก

ผลการตอบสนองต่อระดับค่าสารประกอบฟีนอลิกของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ที่มีต่อสถานการณ์ HT8.5 ตรงข้ามกัน พบว่าปริมาณฟีนอลิกของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข29 ลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ต่อสถานการณ์ HT8.5 ในขณะที่ปริมาณฟีนอลิกของเมล็ดข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ กลับเพิ่มขึ้น ต่อสถานการณ์ HT8.5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

#### (2) สารแอนโทไซยานิน

เปอร์เซ็นต์การออกฤทธิ์ของสารแอนต็อกซิแดนท์ชนิดแอนโทไซยานินของสารสกัดข้าวที่ความเข้มข้น 12.5 mg/ml ของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข29 ลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ต่อสถานการณ์ HT4.5 และลดลงในเมล็ดข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้ 2 สถานการณ์ คือ HT4.5 และ HT8.5

### 5.1.8 ลักษณะทางพันธุกรรม

ภายใต้การเจริญเติบโตของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ส่งผลทำให้ลักษณะพันธุกรรมแตกต่างกันและแบ่งกลุ่มย่อยตามสถานการณ์ CT, HT4.5 และ HT8.5 ซึ่งบ่งบอกว่าการตอบสนองต่อระดับอุณหภูมิ

### 5.1.9 ร่วมกับการสร้างแนวทางการรับมือในชุมชน

ในการวิจัยครั้งนี้ได้นำผลการศึกษาไปถ่ายทอดให้แก่ชุมชน ในการศึกษาเลือกกลุ่มตัวอย่างเกษตรกร จำนวน 38 คนในพื้นที่ศึกษา คือ ศูนย์การเรียนรู้ตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ต.รังนก อ.สามง่าม จ.พิจิตร ซึ่งผลที่ได้รับชุมชนได้ร่วมมือกันสร้างแนวทางการลดการเผา ผลผลิตและสิ่งเหลือใช้ทางการเกษตรในเบื้องต้นเพื่อรับมือกับสภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ

## 6. ข้อเสนอแนะ

6.1 การศึกษาครั้งต่อไปควรเลือกพันธุ์ที่ค่อนข้างทนทานและพันธุ์ที่อ่อนไหว ปลูกเปรียบเทียบกันเพื่อยืนยันผลการศึกษา และศึกษาในพื้นที่ปลูกข้าวในจังหวัดที่มีการทำการเกษตรโดยการปลูกข้าวเป็นหลักเช่น พิจิตร เป็นต้น

## 7. บทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

## บทคัดย่อ

ข้าวเป็นหนึ่งในธัญพืชที่สำคัญที่สุดของโลก อย่างไรก็ตามข้าวเป็นพืชที่อ่อนไหวต่อความเครียดจากอุณหภูมิ ที่เปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงการเจริญพันธุ์และการสร้างเมล็ด ดังนั้นการวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการเพิ่มระดับอุณหภูมิ ภายใต้แนวโน้มสภาวะโลกร้อนซึ่งเป็นไปตามผลการประเมินโดยภาพฉายอนาคต RCP ที่มีต่อการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ ปริมาณรวงควัตถุ ผลผลิต สารอาหาร กรดไขมัน ปริมาณอมิเลส ปริมาณอมิโเลเพคติน ค่าระดับความหวาน สารแอนตีออกซิแดนซ์ การเปลี่ยนแปลงพันธุกรรม ของข้าว 2 พันธุ์คือ กข 29 และ ไรซ์เบอร์รี่ (ข้าวสีม่วง) ในการศึกษาภาคสนามภายใต้สภาวะอากาศซึ่งมีระดับอุณหภูมิเพิ่มสูง ได้ดำเนินการที่จังหวัดพิษณุโลก ตั้งแต่เดือนธันวาคม ปี พ.ศ.2561 ถึง เดือนตุลาคม พ.ศ.2562 ในการศึกษาครั้งนี้ใช้โรงเรือนทดลองระบบเปิดจำนวน 9 โรงเรือนซึ่งประยุกต์ใช้ระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ควบคุมระดับอุณหภูมิให้เป็นไปตามการประเมินสภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของภาพฉายอนาคต RCP4.5 และ RCP8.5 ในการศึกษาได้นำต้นอ่อนข้าวปลูกในโรงเรือนระบบเปิด 9 หลังจนถึงระยะเก็บเกี่ยวภายใต้ระดับอุณหภูมิ 3 สถานการณ์:  $32.55 \pm 1.48^{\circ}\text{C}$ ,  $35.16 \pm 1.4^{\circ}\text{C}$  and  $37.05 \pm 1.49^{\circ}\text{C}$ , ในสิ่งทดลองชุดควบคุม CT(control), HT4.5 และ HT8.5 ตามลำดับ ระดับอุณหภูมิดังกล่าวในสิ่งทดลอง HT4.5 and HT8.5 สูงกว่าสิ่งทดลองควบคุมเท่ากับ  $2.6^{\circ}\text{C}$  and  $4.5^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ระดับอุณหภูมิทั้ง 3 ระดับดังกล่าวได้ถูกควบคุมไว้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง/วัน ตลอดระยะในช่วงการปลูกข้าว ผลการศึกษาทั้งหมดได้บรรยายไว้ในรายงานฉบับนี้ดังรายละเอียดคือ พบว่าสำหรับผลการศึกษาในการเจริญเติบโตสัมพัทธ์นั้นไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ผู้วิจัยพบผลกระทบในเชิงบวก ( $p < 0.05$ ) ปรากฏในพารามิเตอร์รวงควัตถุชนิด คลอโรฟิลล์บี และ แคโรทีนอยด์ตอบสนองต่อระดับอุณหภูมิภายใต้สิ่งทดลอง HT8.5 และ HT4.5 ตามลำดับในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ในระยะเก็บเกี่ยวพบว่าผลกระทบเชิงลบที่เด่นชัดที่สุดในปริมาณผลผลิตข้าว ต้น/เฮกแตร์ ซึ่งลดลง 28.5% และ 68.7% ภายใต้สถานการณ์ HT8.5 ในผลผลิตข้าวพันธุ์ กข29 และไรซ์เบอร์รี่ตามลำดับ ในขณะที่พบผลกระทบเชิงลบ ( $p < 0.05$ ) ในพารามิเตอร์ น้ำหนัก 100 เมล็ด ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 ซึ่งปรากฏผลในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ เช่นกัน เมื่อพิจารณาผลการศึกษาในสารอาหารของเมล็ดข้าวภายใต้ 3 สถานการณ์สิ่งทดลองผู้วิจัยพบว่าปริมาณกรดไขมันชนิดโอเลอิกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT8.5 และ HT4.5 ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ในขณะที่พบว่ากรดไขมันชนิดไลโนเลนิก ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 เพียงสถานการณ์เดียวในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ในขณะที่กรดไขมันพาล์มมิติกลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT8.5 เพียงสถานการณ์เดียวในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ และยังมีข้อมูลในลักษณะตรงข้ามกันเกิดขึ้นในพารามิเตอร์ระดับอะมิโลสและระดับค่าความหวานของเมล็ดข้าวปรากฏในผลการศึกษาของข้าว ไรซ์เบอร์รี่ เนื่องจากพบว่าระดับอะมิโลสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติ( $p < 0.05$ ) อย่างเด่นชัด ในขณะที่ระดับค่าความหวานลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 ผลการศึกษายังได้บ่งชี้ชัดเจนว่าการสัมผัสต่อระดับอุณหภูมิ ภายใต้สถานการณ์สภาวะโลกร้อนจำลองนั้นยังส่งผลต่อการลดลงต่อการสะสมของสารแอนติออกซิแดนท์ในเมล็ดข้าวไรซ์เบอร์รี่อย่างมีนัยสำคัญ( $p < 0.05$ ) อย่างไรก็ตามภายใต้การสัมผัสต่อระดับอุณหภูมิของสถานการณ์ HT8.5 กลับทำให้ระดับของสารแอนติออกซิแดนท์ชนิดสารประกอบฟีนอลิกในเมล็ดข้าวพันธุ์ กข29 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) แต่ส่งผลให้สารประกอบฟีนอลิกลดลงในเมล็ดข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) สุดท้ายภายใต้การสัมผัสต่อสถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 ยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะพันธุกรรมของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ โดยพบว่าลักษณะทางพันธุกรรมถูกแยกเป็น 3 กลุ่มตามสภาวะอุณหภูมิทั้ง 3 ระดับอย่างชัดเจนในแต่ละพันธุ์ ข้าวข้อมูลในการวิจัยนี้บ่งบอกว่าภายใต้สถานการณ์ระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นได้ยับยั้งพารามิเตอร์หลายประเภทอย่างเด่นชัด คือ กระบวนการการสร้างเมล็ดข้าว ระดับความหวานของข้าว ปริมาณกรดไขมันไลโนเลอิก การสร้างสารแอนติออกซิแดนท์ชนิดแอนโทไซยานิน และนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม ซึ่งข้อมูลจากผลการวิจัยนี้บ่งชี้ว่าภายใต้สถานการณ์ระดับอุณหภูมิที่ได้รับการคาดการณ์ในอนาคตนั้น ข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่จะเป็นข้าวพันธุ์ที่อ่อนไหวต่อระดับอุณหภูมิสูงมากกว่าข้าวพันธุ์ กข29

**คำสำคัญ:** ภาพฉายอนาคต, โลกร้อน, ข้าว, ผลผลิต, กรดไขมัน, สารฟีนอลิก, แอนโทไซยานิน, ค่าความหวาน

## Abstract

Rice is one of the most important cereal crops in the world. However, rice is susceptible to heat stress, particularly during the reproductive stage and grain filling stages. Hence, the aims of this research were to examine the effects of increased air temperature under global warming trend base on RCP scenarios on relative growth rate, pigment contents, yield, nutrients, fatty acids contents, amylose, amylopectin, brix value, concentration of antioxidants and genetic change of 2 rice cultivars; KorKhor29 and Riceberry (colour kernels). The field warming experiment has been conducted at Phitsanulok from December 2018 to October 2019. Nine field-open top chambers (OTCs) with electric systems were applied to simulate expected future global warming situation (elevated temperature) which consistent with RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. Rice seedlings were planted in 9 OTCs under 3 temperature levels:  $32.55 \pm 1.48^{\circ}\text{C}$ ,  $35.16 \pm 1.4^{\circ}\text{C}$  and  $37.05 \pm 1.49^{\circ}\text{C}$ , in CT(control), HT4.5 and HT8.5 treatments, respectively through harvest stage. Temperature levels in HT4.5 and HT8.5 treatments were higher than CT treatment by  $2.6^{\circ}\text{C}$  and  $4.5^{\circ}\text{C}$ , respectively. These constant 3 situations were operated for 10 hr daily through growing season, The overall results were described in this report. There was no significant difference ( $P > 0.05$ ) in relative growth rate (RGR) (100 days). We found that positive significant impacts ( $p < 0.05$ ) were appeared in chlorophyll b and carotenoid pigments in Riceberry under the HT8.5 and HT4.5 treatments, respectively. In harvest stage, the most obvious significant decrease ( $p < 0.05$ ) by 28.5% and 68.7% in total No. of seed (ton/hectare) under HT8.5 situation were shown in KorKhor29 and Riceberry. The reduction of 100 seed weight were also found in both of 2 cultivars under HT4.5 and HT8.5 treatments. However, the reduction in Riceberry were higher than KorKhor29 (40% and 38% in HT4.5 and HT8.5). When considering the results of seed nutrients of 3 treatments, we found that the significant increase of oleic fatty ( $p < 0.05$ ) were shown in both rice cultivars under HT4.5 and HT8.5 situations. While, there were statistically significant decrease ( $p < 0.05$ ) in linoleic fatty acid only under HT4.5 in both rice cultivars. There was the consistent results in palmitic fatty acid, there were also statistically significant decrease ( $p < 0.05$ ) only under HT8.5 in both rice cultivars. In addition, the contrast results between amylose content and brix value were

appeared in Riceberry. The positive effects ( $p < 0.05$ ) on amylose content were obviously found in HT4.5 and HT8.5 but the negative effects ( $p < 0.05$ ) of brix value were shown in both of 2 treatments. The results also showed that exposure to simulated global warming situation in HT4.5 and HT8.5 treatments caused a significant reduction ( $p < 0.05$ ) in anthocyanin (antioxidant) accumulation in Riceberry. However, high temperature (in HT8.5) exposure evidently increased ( $p \leq 0.05$ ) phenolic compound accumulation in KorKhor29, but it decreased ( $p \leq 0.05$ ) phenolic compound accumulation in Riceberry. Finally, these situations under HT4.5 and HT8.5 exposure led to genetic characteristic alterations in both of rice cultivars. We found that, genetic characteristics were obviously separated into 3 groups under 3 temperature levels for each cultivar. This research revealed that under elevated temperature conditions obviously suppressed various parameters i.e. grain filling process, brix value, linolenic fatty acid and anthocyanin accumulations including led to genetic change. These data also indicated that under projected future temperature levels, it seemed that Riceberry was more sensitive cultivar to high temperature than KorKhor29.

**Keywords;** RCP scenario, Rice, Yield, Fatty acid, Amylose, Brix value

## สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	
บทคัดย่อภาษาไทย	X
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	XII
สารบัญเรื่อง	XIV
สารบัญตาราง	XVII
สารบัญภาพ	XVIII
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของการวิจัย	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	10
<b>บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม</b>	<b>12</b>
2.1 สภาพการณ์การเพิ่มระดับอุณหภูมิโลกตามแนวโน้มสถานการณ์ การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก	12
2.2 ผลกระทบของสภาวะการเพิ่มระดับอุณหภูมิต่อสรีรวิทยาของพืช	17
2.3 ผลกระทบของสภาวะการเพิ่มระดับอุณหภูมิและการเพิ่มระดับ CO <sub>2</sub> ในบรรยากาศ ต่อสรีรวิทยาและผลผลิตของข้าว	22
2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิสูงที่มีต่อผลผลิตและสารอาหารข้าว	27
2.5 สถานการณ์ระดับอุณหภูมิของประเทศไทยในปัจจุบันและอนาคตและแนวทางการรับมือกับสถานการณ์	32
<b>บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย</b>	<b>36</b>
3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย	36
3.2 ชนิดพันธุ์ข้าวที่เลือกศึกษาและการจัดการปลูกข้าว	36
3.3 การสร้างสถานการณ์โลกร้อนภาคสนาม	41
3.4 การวางแผนการทดลอง	45

3.5	พารามิเตอร์ในการศึกษา	46
3.5.1	การวัดระดับอุณหภูมิในโรงเรือน	46
3.5.2	การวิเคราะห์ธาตุอาหารในดินก่อนปลูก	47
3.5.3	การวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์	49
3.5.4	การวิเคราะห์รงควัตถุในใบ	50
3.5.5	การวิเคราะห์องค์ประกอบผลผลิต	52
3.5.6	การวิเคราะห์สารอาหารสำคัญในเมล็ดข้าว	52
3.5.6.1	การวิเคราะห์กรดไขมัน	53
3.5.6.2	การวิเคราะห์คุณสมบัติของแป้ง (อะมิโลส และอะมิโลเพคติน)	54
3.5.6.3	การวิเคราะห์ค่าความหวานในเมล็ด	55
3.5.7	การวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระ	56
3.5.7.1	การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิก (phenolic )	56
3.5.7.2	การวิเคราะห์สารแอนโทไซยานิน (anthocyanin)	57
3.5.8	การวิเคราะห์ลักษณะทางพันธุกรรม	58
3.6	กิจกรรมถ่ายทอดความรู้สู่ชุมชนเพื่อการสร้างแนวทางการรับมือในชุมชน	61
3.7	การวิเคราะห์ทางสถิติ	62
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการวิจัย</b>	<b>63</b>
4.1	ระดับอุณหภูมิในโรงเรือนทดลอง	63
4.2	ธาตุอาหารในดินก่อนปลูก	64
4.3	อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์	68
4.3.1	การเจริญของใบในระยะแตกกอ	68
4.3.2	การเจริญของใบในระยะเก็บเกี่ยว	72
4.3.3	อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ช่วงระหว่างระยะแตกกอและระยะเก็บเกี่ยว (Relative Growth Rate: RGR) ของข้าวพันธุ์ กข 29 และไรซ์เบอร์รี่	73
4.4	ปริมาณการผลิตรงควัตถุในใบ	76
4.4.1	คลอโรฟิลล์ทั้งหมด	76
4.4.2	คลอโรฟิลล์เอ	77
4.4.3	คลอโรฟิลล์บี	78
4.4.4	แคโรทีนอยด์	79
4.5	วิเคราะห์องค์ประกอบผลผลิต	80
4.5.1	จำนวนรวงทั้งหมด/กอ	80



4.5.2	จำนวนเมล็ดสมบูรณ์/รวง	82
4.5.3	จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์/รวง	83
4.5.4	จำนวนเมล็ดรวมทั้งหมด/รวง	85
4.5.5	เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์/รวง	86
4.5.6	น้ำหนัก 100 เมล็ด	88
4.5.7	ผลผลิตรวมต้น/เฮกแตร์	90
4.6	สารอาหารสำคัญในเมล็ดข้าว	92
4.6.1	กรดไขมัน	92
4.6.1.1	กรดพาล์มมิติก (palmitic acid )	92
4.6.1.2	กรดโอเลอิก (oleic acid)	93
4.6.1.3	กรดลิโนเลอิก (linoleic acid)	93
4.6.2	คุณสมบัติของแป้ง	95
4.6.2.1	อะมิโลส	95
4.6.2.2	อะมิโลเพคติน	96
4.6.2.3	อัตราส่วน อะมิโลส:อะมิโลเพคติน	97
4.6.3	ค่าความหวานในเมล็ดข้าว	98
4.7	สารแอนตีออกซิแดนซ์	99
4.7.1	สารประกอบฟีนอลิก (phenolic )	99
4.7.2	สารแอนโทไซยานิน (anthocyanin)	99
4.8	ลักษณะทางพันธุกรรม	101
4.9	กิจกรรมถ่ายทอดความรู้สู่ชุมชนเพื่อการสร้างแนวทางการรับมือในชุมชน	104
<b>บทที่ 5</b>	<b>อภิปรายผลและวิจารณ์ผล</b>	<b>108</b>
<b>บทที่ 6</b>	<b>สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>132</b>
	<b>บรรณานุกรม</b>	<b>136</b>
	<b>ภาคผนวก</b>	<b>155</b>

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขอบเขตของระดับอนุภูมิภาค ที่กำหนดในการวิจัยตามแนวโน้มน Representative Concentration Pathways (RCP) 2 รูปแบบ คือ RCP 4.5 และ RCP 8.5	4
ตารางที่ 4.1 ระดับอนุภูมิภาคเฉลี่ยในช่วง 4 เดือน ที่แตกต่างกัน 3 สิ่งทดลอง ซึ่งตรวจวัด 5 ช่วงระยะเวลาในเวลา / วัน	63
ตารางที่ 4.2 ระดับอนุภูมิภาคเฉลี่ยรายวัน ในช่วงระยะเวลา 4 เดือน ใน 3 สิ่งทดลอง	64



## สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 1.1	กรอบแนวคิดงานวิจัย	9
ภาพที่ 2.1	ค่าการแผ่รังสี (Radiative forcing) โดยประมาณในปี ค.ศ.2011 เมื่อเปรียบเทียบกับปีฐาน ค.ศ. 1750 ซึ่งมีปัจจัยที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ในภาพรวมธรรมชาติ และกลุ่มก๊าซเรือนกระจก	13
ภาพที่ 2.2	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิพื้นผิวโลกในระยะศตวรรษที่ผ่านมาจากรายงาน AR5	14
ภาพที่ 2.3	ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยในช่วงระหว่างปี ค.ศ.1981-ค.ศ. 2007	33
ภาพที่ 2.4	ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดที่คาดการณ์ในอนาคตในพื้นที่ภาคเหนือจากการใช้แบบจำลอง ที่ RCP4.5 และ RCP8.5 ในช่วงปี ค.ศ. 1970-2099 (พ.ศ.2531-2643)	34
ภาพที่ 3.1	การเก็บรักษาพันธุ์ข้าว 6 พันธุ์ด้วยการฉีกสุญญากาศ เพื่อรักษาระดับความชื้นและรักษาอัตราการงอกของเมล็ด	39
ภาพที่ 3.2	การเตรียมต้นกล้าข้าวและย้ายปลูกในโรงเรือน ทั้ง 2 สายพันธุ์	41
ภาพที่ 3.3	แปลนโรงเรือนทดลองขนาด 4 x 3 เมตร สูง 3 เมตร	43
ภาพที่ 3.4	ภาพโรงเรือนปลูกในการวิจัย	44
ภาพที่ 3.5	ภาพมุมสูงของโรงเรือนทั้งหมด 21 โรงเรือนสำหรับสิ่งทดลอง 7 สิ่งทดลอง 3 ซ้ำ	44
ภาพที่ 3.6	การใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ และระบบไฟฟ้าควบคุมระดับอุณหภูมิและระดับก๊าซ CO <sub>2</sub> ในโรงเรือน	44
ภาพที่ 3.7	ผังการวางโรงเรือนภาคสนามตามการวางแผนการทดลองแบบ แบบ Random Completed Block Design (RCBD) 3 ซ้ำ (3 blocks)	45
ภาพที่ 3.8	การวัดระดับอุณหภูมิภายในโรงเรือนทดลอง ทั้ง 9 โรงเรือน ในช่วงระยะเวลาการปลูก 4 เดือน	46
ภาพที่ 3.9	การเตรียมตัวอย่างข้าวเพื่อบดละเอียดสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพสารอาหารในเมล็ดข้าว	53
ภาพที่ 3.10	กระบวนการวิเคราะห์ค่าปริมาณความหวานของเมล็ดข้าว (Brix Value)	56
ภาพที่ 4.1	ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน(±SD) ที่บันทึกไว้ทุก 5 ช่วงเวลา/วัน ตั้งแต่เวลา 8.00 น. ถึง 16.00 น. ภายในโรงเรือน 3 สิ่งทดลอง ในช่วงระยะเวลา 4 เดือนของการบันทึกผล	64
ภาพที่ 4.2	ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน (±SD) โดยเฉลี่ยภายในโรงเรือน 3 สิ่งทดลอง ในช่วงระยะเวลา 4 เดือนของการบันทึกผล	65

ภาพที่ 4.3	ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	65
ภาพที่ 4.4	ปริมาณแอมโมเนียมในดินภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	66
ภาพที่ 4.5	ปริมาณไนเตรทในดินภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	66
ภาพที่ 4.6	ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ในดินภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	67
ภาพที่ 4.7	ปริมาณโพแทสเซียม ในดินภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	67
ภาพที่ 4.8	ความยาวใบข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะแตกกอ	69
ภาพที่ 4.9	น้ำหนักใบทั้งหมด/ต้นใบข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะแตกกอ	69
ภาพที่ 4.10	พื้นที่ใบทั้งหมด/ต้นใบข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะแตกกอ	70
ภาพที่ 4.11	สัดส่วนพื้นที่ผิวใบต่อน้ำหนักทั้งหมดของพืช (Leaf Area Ratio) ข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะแตกกอ	71
ภาพที่ 4.12	ความยาวใบข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะเก็บเกี่ยว	72
ภาพที่ 4.13	น้ำหนักใบทั้งหมด/ต้นใบข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะเก็บเกี่ยว	73
ภาพที่ 4.14	พื้นที่ใบทั้งหมด/ต้นใบข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วง	74

	ระยะเก็บเกี่ยว	
ภาพที่ 4.15	สัดส่วนพื้นที่ผิวใบต่อน้ำหนักทั้งหมดของพืช (Leaf Area Ratio) ข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะเก็บเกี่ยว	75
ภาพที่ 4.16	อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	76
ภาพที่ 4.17	ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในใบข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	77
ภาพที่ 4.18	ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ในใบข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	78
ภาพที่ 4.19	ปริมาณคลอโรฟิลล์บี ในใบข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	79
ภาพที่ 4.20	ปริมาณแคโรทีนอยด์ ในใบข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	80
ภาพที่ 4.21	จำนวนรวงทั้งหมดต่อกอของข้าวพันธุ์ กข 29 ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	81
ภาพที่ 4.22	จำนวนรวงทั้งหมดต่อกอของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	81
ภาพที่ 4.23	จำนวนเมล็ดสมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ กข 29 ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	82
ภาพที่ 4.24	จำนวนเมล็ดสมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	83
ภาพที่ 4.25	จำนวนไม่เมล็ดสมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ กข 29 ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมิน	84

	โดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	
ภาพที่ 4.26	จำนวนไม่เมล็ดสมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมิน โดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	84
ภาพที่ 4.27	จำนวนเมล็ดรวมทั้งหมด/รวง ของข้าวพันธุ์ กข 29 ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมิน โดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	85
ภาพที่ 4.28	จำนวนเมล็ดรวมทั้งหมด/รวง ของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	86
ภาพที่ 4.29	เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์/รวงของข้าวพันธุ์ กข 29 ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมิน โดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	87
ภาพที่ 4.30	เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์/รวงของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมิน โดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	88
ภาพที่ 4.31	น้ำหนัก 100 เมล็ดของข้าวพันธุ์ กข 29 ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	89
ภาพที่ 4.32	น้ำหนัก 100 เมล็ดของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	90
ภาพที่ 4.33	ผลผลิตรวมต้น/เฮกเตอร์ของข้าวพันธุ์ กข 29 ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมิน โดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	91
ภาพที่ 4.34	ผลผลิตรวมต้น/เฮกเตอร์ของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมิน โดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	91
ภาพที่ 4.35	ปริมาณกรดพาล์มมิติกเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ในข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมิน โดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	92
ภาพที่ 4.36	ปริมาณกรดโอเลอิกเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ในข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมิน	94

	โดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	
ภาพที่ 4.37	ปริมาณกรดลิโนเลอิกเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ในข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมิน โดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	94
ภาพที่ 4.38	ปริมาณอะมิโลส เฉลี่ย ( $\pm$ SD) ในข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมิน โดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	95
ภาพที่ 4.39	ปริมาณอะมิโลเพคติน เฉลี่ย ( $\pm$ SD) ในข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมิน โดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	96
ภาพที่ 4.40	อัตราส่วน อะมิโลส : อะมิโลเพคติน เฉลี่ย ( $\pm$ SD) ในข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	97
ภาพที่ 4.41	ค่าความหวานเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ในข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	98
ภาพที่ 4.42	สารประกอบฟีนอลิกเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ในข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	99
ภาพที่ 4.43	เปอร์เซ็นต์ DPPH inhibition ของสารแอนโทไซยานินเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ในข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5	100
ภาพที่ 4.44	Phylogenetic Tree ของข้าว 2 สายพันธุ์ 3 สิ่งทดลอง	103
ภาพที่ 4.45	ภาพแสดงการกระจายตัวของข้อมูลข้าว	104
ภาพที่ 4.46	ชุมชนเกษตรกรผู้เข้าร่วม ณ ต.รังนก อ.สามง่าม จ.พิจิตร ซึ่งเข้าร่วมการอบรมการถ่ายทอดความรู้ แลกเปลี่ยนเรียนรู้ และบูรณาการแผนการรับมือสภาวะโลกร้อนเพื่อผลิตผลผลิตในชุมชน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งได้รับการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน 62	106
ภาพที่ 4.47	กิจกรรมการอบรมชุมชนเกษตรกร ในพื้นที่ศูนย์การเรียนรู้ตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ต.รังนก อ.สามง่าม จ.พิจิตร ซึ่งได้รับการอบรมการถ่ายทอดความรู้ แลกเปลี่ยนเรียนรู้ และบูรณาการแผนการรับมือสภาวะโลกร้อนเพื่อผลิตผลผลิตในชุมชน ภายใต้อุณหภูมิ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งได้รับการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน 62	107

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

ประเทศไทยให้ความสำคัญต่อในประเด็นการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก และความมั่นคงทางอาหาร ทั้งในด้านผลกระทบ การรับมือ การปรับตัวต่อสถานการณ์นี้ ซึ่งกำหนดอย่างชัดเจนในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ.2560-2564) โดยแผนดังกล่าวอยู่ภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ.2560-2579) ซึ่งหนึ่งในยุทธศาสตร์นั้นคือ การสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน โดยมีวัตถุประสงค์หนึ่งคือ และเน้นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการรับมือกับปัญหา (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2560) เหตุผลและที่มาของการกำหนดความสำคัญดังกล่าวเนื่องมาจากเป็นที่ทราบกันดีว่าการเพิ่มการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาในพื้นที่ต่างๆทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทย เป็นสาเหตุสำคัญต่อการเกิดสภาวะโลกร้อนรวมทั้งเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก ระบบภูมิอากาศที่ผิดปกตินี้ได้มีการศึกษาและพัฒนาความแม่นยำด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรมอย่างต่อเนื่องจนทำให้ยืนยันอย่างแน่นอนว่าสภาวะอุณหภูมิโลกในหลายพื้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจริง และจะมีสภาวะที่รุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปอีกหลายทศวรรษข้างหน้า (IPCC, 2013) ข้อมูลจากหน่วยงานระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate change) ในรายงานฉบับที่ 5 (The Fifth Assessment Report : AR5) ได้คาดการณ์ระดับอุณหภูมิในอนาคตภายใต้ภาพฉายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบใหม่ Representative Concentration Pathways (RCP) คาดการณ์ว่าอุณหภูมิของพื้นผิวโลก (surface temperature) เมื่อสิ้นสุดศตวรรษที่ 21 จะเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 3.7 °C ภายใต้ภาพฉายอนาคตระดับ RCP8.5 และจะเพิ่มในระดับ 1.8 °C ภายใต้ภาพฉายอนาคตระดับ RCP4.5 ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง และ ขาดนโยบายในด้านต่างๆ อาทิเช่น นโยบายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก นโยบายกระตุ้นเทคโนโลยีสีเขียว นโยบายการใช้พลังงานทดแทนฟอสซิล รวมทั้งการพัฒนาเศรษฐกิจอย่างก้าวกระโดด (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; IPCC, 2014)

ปัจจุบันปัญหาของสภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศกลายเป็นประเด็นที่ทั่วโลกต่างตระหนักและกล่าวถึงมากที่สุด จนนำไปสู่กลไกการรับมือด้วยมาตรการระดับนานาชาติและในระดับประเทศ (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; Keeling and Whorf, 2003; IPCC, 2013) เนื่องจากสภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกมีผลกระทบ หลายมิติ ทั้งมิติในโครงสร้างระบบนิเวศในภาคส่วนต่างๆ มิติด้านเศรษฐกิจและสังคม รวมทั้งมิติด้านการเกษตรและความมั่นคง



ทางอาหารโลก เพราะสภาวะภูมิอากาศที่เหมาะสมเป็นอิทธิพลหลักต่อสรีรวิทยาและคุณภาพผลผลิตของพืชพรรณและธัญพืชต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจัยทางกายภาพของระดับอุณหภูมิบรรยากาศในพื้นที่ปลูก ดังนั้นหากการพื้นที่ปลูกอยู่ภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงหรือสูงขึ้นจนใกล้หรือเกินระดับความทนเชิงนิเวศ ย่อมส่งผลกระทบต่อพืชทางการเกษตร (Aydinalp and Cresser, 2008) ข้อมูลวิจัยของนักวิทยาศาสตร์หลายประเทศยืนยันข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะโลกร้อนและการลดลงของผลผลิตทางการเกษตรของธัญพืชอาหารหลักของโลก เช่น ข้าวสาลี ข้าวเจ้า ข้าวหอมมะลิไทย มาอย่างต่อเนื่อง (Jacobson, 2002; Fuhrer, 2003; Prasad et al., 2006; กณิตา ธนเจริญชนภาส และโอรสรักชาติ, 2551) เนื่องด้วยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในบรรยากาศเกินระดับวิกฤตของพืช ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงในเชิงสรีรวิทยาในพืช เช่นการรบกวนเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสง เพิ่มระดับการหายใจแสง การเกิดสารออกซิแดนซ์ภายใต้ความเครียดจากความร้อน (Heat Stress) การทำลายเซลล์ และเนื้อเยื่อ หรือเปลี่ยนแปลงกลไกการสร้างอาหาร (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; Jones, 1992) ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสารอาหารในเมล็ดรวมทั้งลดผลผลิตรวมลงในที่สุด ประกอบกับข้อมูลการคาดการณ์โดยหน่วยงานระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate change) ภายใต้ภาพฉายอนาคต RCP 8.5 ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสูงอย่างต่อเนื่องระบุว่าระดับอุณหภูมิโลกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นกว่าค่าเฉลี่ยปกติประมาณ 2.6-4.8 °C ในปี ค.ศ.2100 จนทำให้ระดับแรงแผ่รังสี (radiative forcing) ในระดับพื้นผิวโลกเพิ่มขึ้นเป็น 8.5 W.m<sup>-2</sup> (IPCC, 2014; Clarke et al., 2014) ดังนั้นสถานการณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ย่อมส่งผลกระทบต่อสภาวะความมั่นคงทางอาหารของโลกในอนาคตอย่างแน่นอน

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นธัญพืชที่เป็นอาหารหลักของประชากรโลก เนื่องจากเป็นอาหารหลักของประชากรโลกประมาณร้อยละ 50 โดยเฉพาะประชากรในแถบเอเชียบริโภาคข้าวเป็นอาหารหลัก (Liu, 2015) อย่างไรก็ตามข้อมูลการวิจัยที่ระบุว่าเมื่อผลผลิตข้าวจะลดลงภายใต้ระดับอุณหภูมิโลกที่เพิ่มสูงขึ้น หรือแม้แต่อุณหภูมิผันผวนในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงด้านสรีรวิทยาอันซับซ้อนส่งผลต่อฟีลลิกซ์ การเจริญ สรีรวิทยาด้านการสืบพันธุ์ การออกดอก การสังเคราะห์แสง หรือแม้กระทั่งการสร้างสารอาหารต่างๆในเมล็ด (Yang et al., 2006) ดังนั้นประเทศไทยซึ่งเป็นแหล่งผลิตข้าวที่สำคัญของโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวหอมไทย และ ข้าวหอมมะลิซึ่งมีชื่อเสียงระดับ ข้าวเจ้า และข้าวเหนียวซึ่งมีสารอาหารสำคัญมากมาย และเป็นพื้นที่หนึ่งที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสภาวะโลกร้อนเนื่องจากปัจจัยด้านภูมิศาสตร์ที่ตั้งอยู่ในเขตร้อนร่วมกับแนวโน้มการเพิ่มการปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากการใช้พลังงานเพื่อภาคส่วนอุตสาหกรรม และ การคมนาคมขนส่ง ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยยังเน้นการใช้พลังงานจากฟอสซิลเป็นหลักรวมทั้งแนวโน้มการเพิ่มระดับอุณหภูมิ ซึ่งกรมอุตุนิยมวิทยาได้รายงานว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยได้เพิ่มขึ้นแล้วประมาณ 1 °C จากปี ค.ศ.1981-ค.ศ.2007 (Marks, 2011) และข้อมูลการคาดการณ์สำหรับแนวโน้มอุณหภูมิ

สูงสุดเฉลี่ยในประเทศไทยในเขตภาคเหนือภายในศตวรรษที่ 21 (ค.ศ.2091- 2100) คาดการณ์ว่าจะสูงกว่าศตวรรษที่ 2000 (ค.ศ.1991-2000) ประมาณ 4-5 °C (ศูนย์ภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา, 2553) จึงย่อมมีความเสี่ยงต่อความมั่นคงทางอาหารจากผลผลิตข้าวในเขตภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทยในอนาคต

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ประเทศไทยให้ความสำคัญต่อยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติในประเด็นการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก และความมั่นคงทางอาหาร ทั้งในด้านผลกระทบ การรับมือ การปรับตัวต่อสถานการณ์นี้ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงวางแผนดำเนินงานวิจัยผลกระทบของสภาวะอุณหภูมิสูงกว่าระดับปกติตามแนวโน้มของสภาวะโลกร้อนที่ได้รับการคาดการณ์จากภาพฉายอนาคตแบบใหม่จากหน่วยงาน IPCC (ภาพฉาย RCPs) ในช่วงฤดูกาลปลูกจริงของข้าวหอมมะลิไทยและข้าวเหนียวดำ(ซึ่งมีสารอาหารที่มีประโยชน์มากมาย)และเป็นที่ยอมรับในเขตภาคเหนือตอนล่างในระยะเวลายาวนานต่อเนื่อง 5 ปี เพื่อทดสอบสภาพทางด้านผลผลิต สารอาหาร และการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมของรุ่นที่ได้รับผลกระทบอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการรับมือเชิงบูรณาการ ตามนโยบายของแผนยุทธศาสตร์แห่งชาติ 20 ปี และ แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 12 รวมทั้งผลการวิจัยดังกล่าวจะนำไปสู่การสร้างแนวทางการรับมือกับสถานการณ์ที่เกษตรกรสามารถปฏิบัติได้จริงและคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ ประโยชน์ที่เกิดขึ้นย่อมนำไปสู่การรับมือปัญหาความเสี่ยงด้านความมั่นคงของอาหารของประเทศไทยนั่นเอง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อให้ได้ข้อมูลผลกระทบของปัจจัยการเพิ่มระดับอุณหภูมิ ตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนที่มีต่อปริมาณผลผลิตของข้าวขาวและข้าวสีที่นิยมปลูกในเขตภาคเหนือตอนล่าง
- 1.2.2 เพื่อให้ทราบข้อมูลผลกระทบของปัจจัยการเพิ่มระดับอุณหภูมิ ตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนที่มีต่อสารอาหารสำคัญและสารแอนติออกซิแดนท์ในเมล็ดข้าวขาวและข้าวสีที่นิยมปลูกในเขตภาคเหนือตอนล่าง
- 1.2.3 เพื่อให้ทราบข้อมูลผลกระทบของปัจจัยการเพิ่มระดับอุณหภูมิ ตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมในข้าวขาวและข้าวสีที่นิยมปลูกในเขตภาคเหนือตอนล่าง
- 1.2.4 เพื่อสร้างองค์ความรู้ด้านผลกระทบของสภาวะโลกร้อนต่อข้าวและแนวทางการรับมือให้แก่ชุมชนที่ปลูกข้าวในพื้นที่

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

### 1.3.1 พื้นที่วิจัย

เลือกพื้นที่วิจัยในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก สำหรับการทดสอบผลกระทบของระดับอุณหภูมิสูงที่เพิ่มขึ้น

### 1.3.2 พันธุ์ข้าว

เลือกพันธุ์ข้าว 2 ประเภท คือ ข้าวขาวและข้าวสี รวมทั้งหมด 2 พันธุ์

-ข้าวพันธุ์ กข 29 (ข้าวเจ้าไม่ไวแสง)

-ข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ (ข้าวเจ้าสีม่วงไม่ไวแสง)

### 1.3.3 ระดับอุณหภูมิและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ สร้างโรงเรือนทดลองแบบเคลื่อนย้ายได้ จำนวน 21 โรงเรือน แต่ละโรงเรือนมีขนาดโรงเรือน 4 x 3 ตารางเมตร และสูง 3 เมตร (รวมหลังคา) ปิดผนังด้วยพลาสติกคุณภาพสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม ติดตั้งระบบควบคุมไฟฟ้าอัตโนมัติ ซึ่งควบคุมระบบไฟอัตโนมัติ รวมทั้งระดับอุณหภูมิให้แตกต่างกันโดยใช้หลอดไฟอินฟราเรด สีดำ ซึ่งจะแผ่รังสีความร้อนคืออินฟราเรดแต่ไม่แผ่แสงสีสำหรับการสังเคราะห์แสง และใช้แอร์คอนดิชันสำหรับการควบคุมระดับอุณหภูมิในตู้ควบคุม และควบคุมระดับก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยการควบคุมการปล่อยก๊าซจากถังบรรจุก๊าซ CO<sub>2</sub> ซึ่งจะควบคุมระดับอุณหภูมิ ตามสถานะแนวคาดการณ์ในอนาคตภายใต้ภาพฉายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบใหม่ Representative Concentration Pathways (RCP) 2 รูปแบบ คือ RCP 4.5 และ RCP 8.5 ซึ่งในการศึกษาจะควบคุมสถานการณ์ 3 สถานการณ์ (3 treatments) ดังตารางที่ 1.1

ตาราง 1.1 ขอบเขตของระดับอุณหภูมิ ที่กำหนดในการวิจัยตามแนวโน้ม Representative Concentration Pathways (RCP) 2 รูปแบบ คือ RCP 4.5 และ RCP 8.5

ชื่อสิ่งทดลอง	ปัจจัยตัวแปรต้น	หมายเหตุ
	ระดับอุณหภูมิ (°C)	
1.CT (control)	ระดับธรรมชาติ (ระดับปัจจุบัน)	ชุดควบคุม
2.HT4.5	ระดับอุณหภูมิคาดการณ์ในปี ค.ศ.2100 สูงกว่าระดับค่าเฉลี่ยธรรมชาติ 1.1-2.6 °C	แนวโน้มตาม RCP 4.5
3.HT8.5	ระดับอุณหภูมิคาดการณ์ในปี ค.ศ.2100 สูงกว่าระดับค่าเฉลี่ยธรรมชาติ 2.6-4.8 °C	แนวโน้มตาม RCP 8.5

### 1.3.4 การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองในหน่วยการทดลองเป็นแบบ Random Completed Block Design (RCBD) สำหรับ 3 สิ่งทดลอง ทั้งหมด 3 ซ้ำ (3 replications)

### 1.3.5 พารามิเตอร์ในการศึกษา

#### 1.3.5.1 ระดับอุณหภูมิและคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงเรือน

บันทึกผลระดับอุณหภูมิและระดับความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> ในโรงเรือนในรอบ 1 วัน ช่วงที่มีการเปิดระบบควบคุมระดับอุณหภูมิและ CO<sub>2</sub> ในโรงเรือนทดลอง ตลอดระยะเวลาการปลูกข้าว (ประมาณ 4 เดือน)

#### 1.3.5.2 ธาตุอาหารในดินก่อนปลูก

วิเคราะห์ธาตุอาหารในดินก่อนปลูกข้าวทุกพันธุ์ ดังนี้

- ไนโตรเจนทั้งหมด
- ไนเตรท
- แอมโมเนียม
- ฟอสฟอรัสทั้งหมด
- ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์
- โพแทสเซียม

#### 1.3.5.3 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์

การวัดอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์นั้น จะต้องวัดการเจริญของใบเปรียบเทียบกับ 2 ระยะการเติบโต ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกเปรียบเทียบ ระหว่างระยะการแตกกอ และระยะเก็บเกี่ยวซึ่งทำให้ได้ผลการบันทึก เพื่อคำนวณอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ดังนี้

- (1) การเจริญของใบในระยะแตกกอ
- (2) การเจริญของใบในระยะเก็บเกี่ยว
- (3) อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์เปรียบเทียบระหว่างช่วงระยะแตกกอและระยะเก็บเกี่ยว
  - อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (หน่วย mg/g/day) ใช้วิธีของ Blackman (1919)

#### 1.3.5.4 วิเคราะห์องค์ประกอบผลผลิต

ศึกษาองค์ประกอบผลผลิตคือ

- no. of panicles per m<sup>2</sup>
- % filled grains per panicle
- 1000-grain weight (g)
- วิเคราะห์ปริมาณผลผลิตโดย คำนวณผลผลิตหน่วยเป็นตัน/เฮกแตร์ จากสูตร Yoshida (1981)

$$\text{Grain yield (t/ha)} = \text{no. of panicles per m}^2 \times \% \text{ filled grains per panicle} \times 1000\text{-grain weight (g)} \times 10^{-5}$$

### 1.3.5.5 การวิเคราะห์รงควัตถุในใบ

### 1.3.5.6 สารอาหารสำคัญในเมล็ดข้าว

#### (1) วิเคราะห์คุณสมบัติของแป้ง

วิเคราะห์คาร์โบไฮเดรตในเมล็ดข้าวในรูปของแป้งซึ่งส่งผลต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าว ซึ่งจะวิเคราะห์สารประกอบในแป้ง 2 ชนิดคือ

1.1 อะมิโลส (amylose) และ

1.2 อะมิโลเพคติน (amylopectin)

1.3 อัตราส่วนระหว่างอะมิโลส และ อะมิโลเพคติน (Amylose: Amylopectin Ratio)

#### (2) วิเคราะห์กรดไขมัน

ในการวิจัยเลือกวิเคราะห์กรดไขมันชนิดไม่อิ่มที่สำคัญในเมล็ดข้าวที่สำคัญ คือ

2.1 กรดพาล์มมิติก (palmitic acid )

2.2 กรดโอเลอิก (oleic acid)

2.3 กรดลิโนเลอิก (linoleic acid)

#### (3) ค่าความหวาน

### 1.3.5.7 สารแอนโทไซยานิน

(1) สารแอนโทไซยานิน (anthocyanin)

(2) สารประกอบฟีนอลิก (phenolic)

### 1.3.5.8 การวิเคราะห์ลักษณะทางพันธุกรรม

วิเคราะห์ลักษณะทางพันธุกรรม ใช้เทคนิคด้วยวิธี AFLP (Amplified Fragment Length Polymorphism) ใบของข้าวที่มีอายุน้อย ทั้ง 2 พันธุ์ในช่วงระยะแตกกอ

### 1.3.5.9 กิจกรรมการถ่ายทอดความรู้สู่ชุมชนเพื่อสร้างแนวทางการรับมือในชุมชน

จัดกิจกรรมอบรมโดยเน้นกลุ่มเกษตรกรในพื้นที่ปลูกข้าว

#### 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของการวิจัย

IPCC ได้ทำการศึกษาวิจัยและโดยการคำนวณด้วยสมการเชิงเส้นร่วมกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบุว่าอุณหภูมิระดับพื้นผิวโลกเพิ่มขึ้นประมาณ  $0.106^{\circ}\text{C}$  เมื่อเปรียบเทียบระหว่างปี ค.ศ.1951-2012 และคาดการณ์ว่าจะเพิ่มขึ้นอีกอย่างน้อย  $2^{\circ}\text{C}$  ภายในปี ค.ศ.2100 ภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสูงซึ่งจะทำให้ระดับความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{CO}_2$  สูงกว่า 1,000 ppm (IPCC, 2013) ระดับอุณหภูมิวิกฤติทั้งในระดับที่สูงกว่าและต่ำกว่าระดับที่เหมาะสมกับพืชแต่ละชนิดนั้น ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงกระบวนการทางสรีระวิทยาของพืช อาทิเช่น ยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสง เพิ่มกระบวนการหายใจแสง(photorespiration) ลดการงอกของละอองเกสร เปลี่ยนแปลงซีพลักษ์ของการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ เปลี่ยนแปลงอัตราการใช้น้ำ เร่งอัตราการใช้ธาตุอาหาร ลดประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตสารอาหาร ลดการผลิตสารอาหารบางประเภทที่สำคัญต่อมนุษย์ และเพิ่มอนุมูลอิสระในเนื้อเยื่อ เป็นต้น เนื่องจากการอุณหภูมิในภาวะที่สูงเกินจุดเหมาะสมนั้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเอนไซม์หลายชนิดและส่งผลต่อเนื่อง หลายประการ เช่น การสร้างอาหาร การสร้างเมล็ด เป็นต้น (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; Munakata, 1976; Satake and Yoshida, 1978; Hollister and Webber, 2000; Greer and Weston, 2010; Greer and Weedon, 2012) และมีการศึกษาโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ระบุว่าแนวโน้มการเพิ่มของระดับอุณหภูมิจะยิ่งส่งผลต่อการลดผลผลิตทางการเกษตรของโลกในอนาคต (Tan and Shibasaki, 2003) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาที่ยืนยันว่าระดับอุณหภูมิที่สูงเกินไป และระดับอุณหภูมิต่ำเกินไป ล้วนส่งผลกระทบต่อพืชและโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ส่งผลกระทบเชิงลบต่อการเจริญเติบโตของพืชประเภท C3 เนื่องจากพืชประเภท C3 เช่นข้าวเจ้า ซึ่งปลูกในประเทศไทย จะมีความไวต่อการตอบสนองในเชิงลบต่อสภาวะความเครียดจากอุณหภูมิสูงมากกว่าพืช C4 เช่นข้าวสาลี และเกิดกระบวนการหายใจแสงได้ไวเมื่อสัมผัสกับสภาวะอุณหภูมิสูง และกระบวนการตอบสนองของพืชต่อภาวะเครียดของอุณหภูมินั้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการสร้างพลังงานอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงกลไกกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการนำคาร์บอนมาใช้ในกระบวนการสร้างอาหาร เช่น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับเอนไซม์ rubisco ซึ่งเกี่ยวข้องกับกลไกการตรึง  $\text{CO}_2$  ให้จับกับ RuBp ในกระบวนการสังเคราะห์แสงจึงส่งผลทำให้ลดประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แสง และส่งผลอย่างต่อเนื่องจนนำไปสู่การลดผลผลิต (Salvucci and Crafts-Brandner, 2004; Sharkey, 2001) ยิ่งกว่านั้นภายใต้สภาวะความเครียดจากสภาวะอุณหภูมิสูงยังส่งผลต่อการผลิตสารออกซิแดนซ์ประเภท reactive oxygen species (ROS) ระดับ ROS จะเพิ่มขึ้นมากเมื่อเกิดสภาวะเครียด เช่นสภาวะเครียดจากอุณหภูมิรูปแบบ Heat stress (ในช่วงขณะที่เกิดสภาวะความเครียดจากอุณหภูมินั้น ROS จะเพิ่มขึ้นสูงมากซึ่งนำไปสู่การทำลายโครงสร้างเซลล์ หรือนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารอาหารสำคัญของเมล็ดในที่สุด (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; Valletian-bindschedler et al., 1998 ; Hasanuzzaman, 2013) ทำให้พบว่าภายใต้

การเพิ่มระดับอุณหภูมิ  $1^{\circ}\text{C}$  ในช่วงกลางคืนจะทำให้ผลผลิตข้าวลดลง 10% (Peng et al., 2004) พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การงอกของละอองเกสรในอาหารเลี้ยงและบนเกสร เพศเมียรวมทั้งการติดเมล็ดในข้าวไทย ลดลง และถ้าระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $3^{\circ}\text{C}$  หรือเกินระดับขีดความทนต่ออุณหภูมิ อาจรบกวนต่อชีพลักษณะด้านระยะเวลาของการเจริญเติบโต เช่น ลดช่วงระยะเวลาการสร้างเมล็ดแต่เพิ่มการสูญเสียพลังงานจากอัตราการหายใจมากขึ้น ส่งผลต่อเนื่องทำให้ผลผลิตข้าวลดลง รวมทั้งคุณภาพของเมล็ดข้าวลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อทำการศึกษาภาคสนามโดยปลูกข้าวภายใต้สภาวะอุณหภูมิเพิ่มกว่าระดับปกติ  $3.6-7^{\circ}\text{C}$  ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์แสงลดลงในช่วง 12.2-35.6 % (เจษฎา และคณะ, 2553; Oh-e et al., 2007; Wassmann et al., 2009a)

ดังนั้นจากข้อมูลดังกล่าวจึงมีสมมติฐานว่า

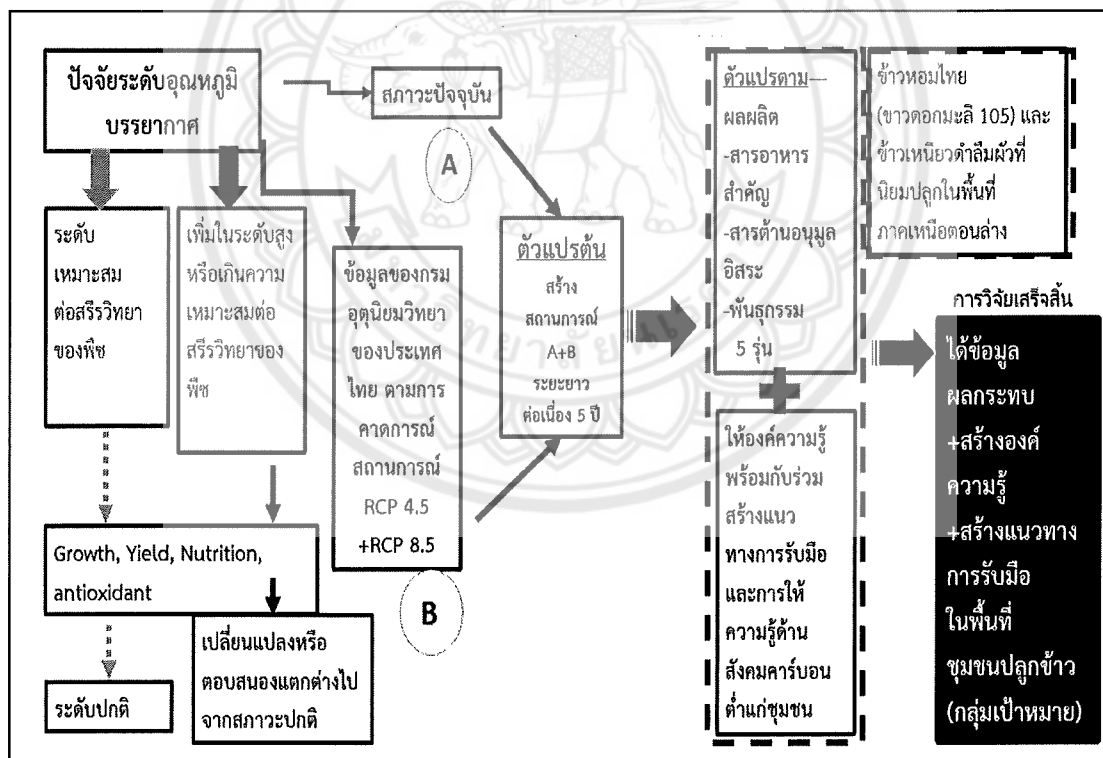
1. การเพิ่มระดับอุณหภูมิ ทำให้ผลผลิตและปริมาณสารอาหารสำคัญในเมล็ดข้าวลดลง (เป็นความสัมพันธ์แบบสหสัมพันธ์เชิงลบ)
2. การปลูกข้าวต่อเนื่องหลายรุ่นภายใต้สภาวะการเพิ่มระดับอุณหภูมิในระยะยาวจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางพันธุกรรมของข้าว

จากปัญหาดังกล่าวจึงนำมาสู่กรอบแนวคิดการวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถ้าปัจจัยตัวแปรต้นคือระดับอุณหภูมิเหมาะสมจะส่งผลต่อตัวแปรตามคือระดับผลผลิตและระดับสารอาหาร มีปริมาณที่เป็นปกติตามสัดส่วนน้ำหนักเมล็ดที่เหมาะสม แต่ถ้ากรณีตัวแปรต้นเปลี่ยนแปลง คือมีระดับที่ไม่เหมาะสมซึ่งในที่นี้คือระดับอุณหภูมิ เพิ่มขึ้น (ซึ่งการเพิ่มระดับนี้ในการศึกษาจะควบคุมให้เป็นระดับที่ได้รับการคาดการณ์จากภาพฉายอนาคต RCP (ภาพฉายอนาคตแบบใหม่ คือ Representative Concentration Pathways: RCPs) จะส่งผลต่อตัวแปรตามในเชิงลบ และข้าวต่างสายพันธุ์กันย่อมมีความทนทานต่อสภาวะโลกร้อนได้ต่างกัน ดังนั้นการศึกษาถึงผลกระทบจะทำให้ได้องค์ความรู้ใหม่ และ ถ่ายทอดสู่ชุมชนในพื้นที่วิจัยร่วมกับการร่วมคิดหาแนวทางการรับมือไม่ให้สภาวะนี้เกิดขึ้นรุนแรงในอนาคตหรือลดความรุนแรงขึ้น เช่นการสร้างสังคมคาร์บอนต่ำ หรือการนำผลผลิตมาใช้ให้คุ้มค่าที่สุดเพื่อลดของเสียให้น้อยที่สุด (เช่นการแปรรูป) จะทำให้ชุมชนเป้าหมายในพื้นที่ได้รับผลประโยชน์จากงานวิจัยอย่างแท้จริง ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการศึกษาวิจัยจะทำให้ได้ข้อมูลที่สำคัญ 3 ประการคือ

1. ได้องค์ความรู้ผลกระทบของระดับอุณหภูมิสูงที่มีต่อสารอาหารสำคัญในข้าวหอมมะลิ และสารอาหารสำคัญรวมทั้งสารต้านอนุมูลอิสระของ ข้าวเหนียวดำลิ้มผั่ว ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการต่อยอดการรับมือภายใต้สภาวะโลกร้อนต่อไป
2. สร้างองค์ความรู้ให้กับชุมชนให้รับทราบข้อมูลการวิจัยและสร้างแนวทางการรับมืออย่างยั่งยืนในชุมชนปลูกข้าวในพื้นที่วิจัย

ได้ข้อมูลที่สามารถเป็นฐานข้อมูลระดับสากล คือการประเมินผลกระทบด้านผลผลิตและสารอาหารของข้าวไทย(เขตภาคเหนือตอนล่าง) ภายใต้แนวโน้มที่ได้รับการคาดการณ์จากภาพถ่ายอนาคตที่เป็น Scenario ล่าสุดจากรายงาน IPCC ฉบับที่ 5 ซึ่งขณะนี้นักวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาวิจัยในด้านผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศโลกที่มีต่อความมั่นคงทางอาหารของโลก ได้ดำเนินการโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ RCPs ในการประมวลผลกันอย่างแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ตามการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นยังมีจุดอ่อนในด้านความแม่นยำและขาดข้อมูลในด้านสรีรวิทยาของพืชและรายละเอียดในด้านสารอาหารของธัญพืช ซึ่งข้อมูลในการวิจัยในโครงการนี้จะได้ข้อมูลภาคสนามที่แม่นยำ และชัดเจนจุดต่อจากการศึกษาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ภายใต้การคาดการณ์แนวโน้มระดับใกล้เคียงกับภาพถ่ายอนาคต RCPs ระดับ 4.5 และ 8.5 ตามข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาของประเทศไทย ผลการศึกษาสามารถนำไปต่อยอดสู่การรับมือกับปัญหาในเขตภาคเหนือตอนล่างที่ทนทานต่อสภาวะโลกร้อนในอนาคต รวมทั้งเป็นข้อมูลนำไปสู่การวางนโยบายและแผนของหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง

### กรอบแนวคิดของการวิจัย (Conceptual Framework)



ภาพที่ 1.1 กรอบแนวคิดงานวิจัย



## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

### 15.1 เป็นองค์ความรู้ในการนำไปสู่การต่อยอดงานวิจัย

: แนวทางปฏิบัติ

ต่อยอดงานวิจัยในการคัดเลือกสายพันธุ์ ปรับปรุงพันธุ์ และสร้างสายพันธุ์ใหม่ที่ทนทานต่อสภาวะความเครียดจากความร้อน

: กลุ่มเป้าหมาย

หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ สถาบันการศึกษาที่มีคณะเกษตรศาสตร์หรือสถาบันวิจัยในประเทศไทยที่มีหน่วยงานด้าน เทคโนโลยีชีวภาพ เทคโนโลยีพันธุวิศวกรรม ศูนย์วิจัยข้าวในประเทศไทย

: ผลกระทบ

ได้ชนิดข้าวสายพันธุ์ทนทานต่อสภาวะความเครียดจากความร้อน

### 15.2 ถ่ายทอดองค์ความรู้เพื่อนำไปสู่การสร้างยุทธศาสตร์ นโยบาย และแผนของหน่วยงาน

: แนวทางปฏิบัติ

เผยแพร่งานวิจัยในลักษณะการตีพิมพ์ผลงานในรูปแบบของรายงานฉบับสมบูรณ์บทความทางวิชาการทั้งในประเทศและระดับนานาชาติ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการอ้างอิงสำหรับการวางนโยบาย มาตรการ และแผนงานสำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

: กลุ่มเป้าหมาย

หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ ศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก ศูนย์วิจัยข้าวชัยนาท ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี และศูนย์วิจัยข้าวในภูมิภาคต่างๆของในประเทศไทย รวมทั้งหน่วยงานภายใต้กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ และสถาบันการศึกษา สามารถนำองค์ความรู้ไปใช้ในการสร้างยุทธศาสตร์ของหน่วยงาน หรือ สร้างแผนการดำเนินงานในปีงบประมาณต่างๆในอนาคต โดยอยู่ภายใต้พันธกิจแผนการจัดการรับมือกับสภาวะโลกร้อนและผลกระทบต่อข้าวต่อไป

: ผลกระทบ

ได้ยุทธศาสตร์นโยบาย มาตรการและแผนการรับมือของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

### 15.3 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมายเมื่อสิ้นสุดการวิจัย

15.3.1 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยี โดยรูปแบบการตีพิมพ์เผยแพร่ในบทความทางวิชาการ

(1) รวบรวมผลงานและสังเคราะห์ในรูปแบบบทความทางวิชาการเผยแพร่ในรูปแบบ

- การนำเสนอในงานประชุมวิชาการในระดับชาติและ/หรือ นานาชาติอย่างน้อย 1 บทความ
- การตีพิมพ์เผยแพร่ในบทความทางวิชาการในระดับชาติและ/หรือนานาชาติ อย่างน้อย 1 บทความ
- กลุ่มเป้าหมาย นักวิชาการและนักวิจัยสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเพื่อทำการต่อยอดงานวิจัยต่อไป

- (2) ทำรายงานฉบับสมบูรณ์ รวมทั้งบทความวิชาการส่งต่อให้แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง
- กลุ่มเป้าหมาย ศูนย์วิจัยข้าวในเขตภาคเหนือตอนล่าง อาทิเช่น
    - \* ศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก ซึ่งแสดงความจำนงในการใช้ประโยชน์จากข้อมูลงานวิจัยนี้
    - \* ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี ซึ่งเป็นหน่วยงานสนับสนุนเมล็ดพันธุ์ในการวิจัยนี้
    - \* ศูนย์วิจัยข้าวชัยนาท ซึ่งเป็นหน่วยงานสนับสนุนเมล็ดพันธุ์ในการวิจัยนี้
    - \* ศูนย์วิจัยข้าวในภูมิภาคเขตภาคเหนือทั้งหมด
    - \* ศูนย์วิจัยข้าวในภูมิภาคอื่นๆในประเทศไทย นอกเหนือจากเขตภาคเหนือ



## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรม

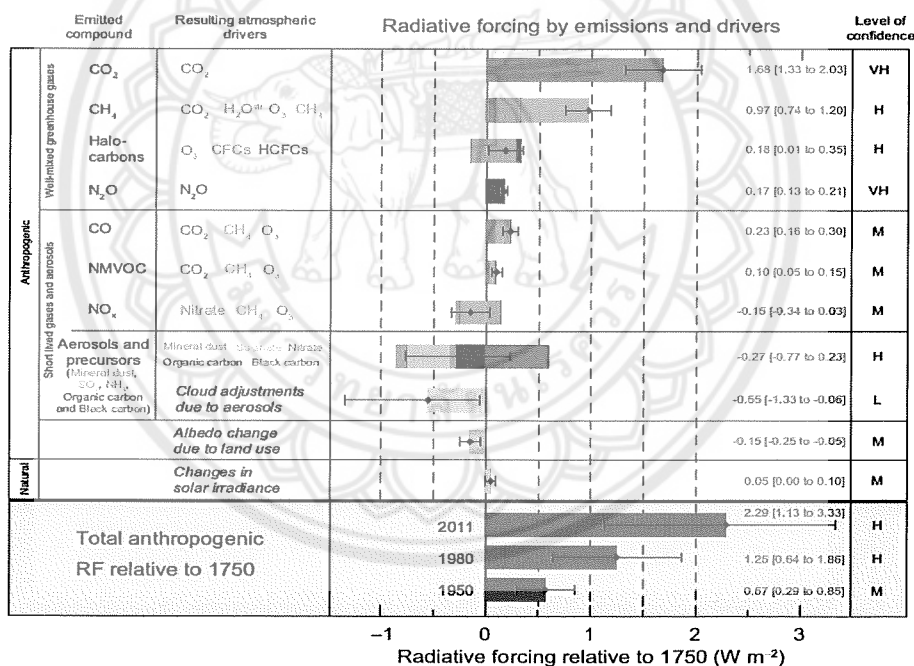
#### 2.1 สภาพการณ์การเพิ่มระดับอุณหภูมิโลกตามแนวโน้มสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก

##### สถานการณ์ทั่วไป

กิจกรรมต่างๆของมนุษย์ในระยะเวลายาวหลายทศวรรษที่ผ่านมาส่งผลต่อการเพิ่มการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกชนิดที่สำคัญ ในการก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน เมื่อพิจารณาจากปริมาณรวมและศักยภาพในการก่อให้เกิดแรงแผ่รังสี ก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญเหล่านั้น เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide: CO<sub>2</sub>) ก๊าซมีเทน (Methane: CH<sub>4</sub>) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Nitrous Oxide: N<sub>2</sub>O) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrofluorocarbons: HFCs) เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (Perfluorocarbons: PFCs) ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulphur Hexafluoride: SF<sub>6</sub>) ก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญเหล่านี้มีศักยภาพในการทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential :GWP) เนื่องจากมีคุณสมบัติในการแผ่รังสี (radiative) ความร้อนให้แก่ภาคส่วนบรรยากาศ ทวีป และมหาสมุทร (IPCC, 2013) เนื่องจากก๊าซเรือนกระจกมีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (infrared) ซึ่งเป็นรังสีคลื่นยาวที่แผ่ความร้อนออกมาได้ทั้งช่วงคลื่น รังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงของรังสีความร้อน (thermal radiation) มีช่วงความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 0.7  $\mu\text{m}$  ถึง 10<sup>2</sup>  $\mu\text{m}$  (หรือ 700 -100,000 นาโนเมตร) รังสีคลื่นยาวนี้ส่วนหนึ่งมาจากการสะท้อนกลับของรังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์เมื่อกระทบกับภาคพื้นดิน (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558) และเมื่อโมเลกุลของก๊าซเรือนกระจกดูดกลืนรังสีอินฟราเรดระยะหนึ่งจนโมเลกุลสั่นไหว จะทำให้สะท้อนคลื่นรังสีอินฟราเรดกลับออกมาสู่บรรยากาศ ทุกทิศทางทั้งในบรรยากาศ ภาคพื้นดิน ภาคพื้นน้ำ รวมทั้งมหาสมุทรอีกครั้ง จนอุณหภูมิในบรรยากาศหรือระดับพื้นผิวโลกมีระดับความร้อนหรือที่เรียกว่าจากการแผ่รังสี (RF :Radiative forcing) สะสมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ในพิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) กำหนดว่าค่า GWP ตั้งอยู่บนพื้นฐานของศักยภาพในการทำให้โลกร้อนจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นระยะในกรอบเวลามากกว่า 100 ปีขึ้นไป และค่า GWP ของก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการแผ่รังสีและปริมาณรวมในบรรยากาศด้วยเช่นกัน พบว่าก๊าซเรือนกระจกชนิด CO<sub>2</sub> มีปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยสูงที่สุดในปัจจุบันและส่งผลต่อการแผ่รังสีความร้อนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซเรือนกระจกชนิดอื่นๆ (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; IPCC, 2013)

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) เป็นหน่วยงานระหว่างรัฐบาลที่ว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก ได้ศึกษาและรายงานว่าค่า Radiative forcing ของโลกมีค่าเพิ่มขึ้นระดับสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับปี ค.ศ.1750 เป็นปีฐานของการศึกษา ซึ่งภาพที่ 2.1

แสดงค่า Radiative forcing ในปี ค.ศ.2011 เมื่อเทียบกับปีฐาน ค.ศ.1750 โดยถ้าพิจารณาจากภาพรวมอันเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ในโลกส่งผลทำให้ค่า Radiative forcing เปลี่ยนไป 2.29 W.m<sup>-2</sup> (พิจารณาจากค่าเฉลี่ยในช่วง 1.13-3.33 W.m<sup>-2</sup>) ซึ่งถ้าพิจารณาระหว่างปี ค.ศ. 1950 กับปีฐาน ค.ศ.1750 พบว่ามีค่าเพียง 0.57 W.m<sup>-2</sup> เท่านั้น และพบว่าค่า Radiative forcing เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วชัดเจนตั้งแต่ ปี ค.ศ.1970 เป็นต้นมา และเมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยที่เกิดจากก๊าซเรือนกระจก ในระหว่างปี ค.ศ.2011 กับปีฐาน ค.ศ.1750 เช่นเดียวกันพบว่ากลุ่มก๊าซเรือนกระจกชนิด CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O และ Halocarbons รวมกันส่งผลทำให้ค่า Radiative forcing เปลี่ยนไป 3.00 W.m<sup>-2</sup> (พิจารณาจากค่าเฉลี่ยในช่วง 2.22-3.78 W.m<sup>-2</sup>) ที่น่าสนใจคือเมื่อพิจารณาค่า Radiative forcing ที่เกิดจากระดับ CO<sub>2</sub> เพียงชนิดเดียว พบว่าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงถึง 1.68 W.m<sup>-2</sup> (พิจารณาในช่วงค่า 1.33-2.03 W.m<sup>-2</sup>) (ภาพที่ 2) (IPCC, 2013) ซึ่งบ่งชี้ว่าการสะสมพลังงานความร้อนในบรรยากาศเพิ่มขึ้นนั้นส่วนใหญ่เกิดจากก๊าซเรือนกระจก และก๊าซเรือนกระจกชนิด CO<sub>2</sub> มีอิทธิพลสูงมากต่อการแผ่รังสีความร้อนให้แก่พื้นผิวโลก (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; IPCC, 2013)



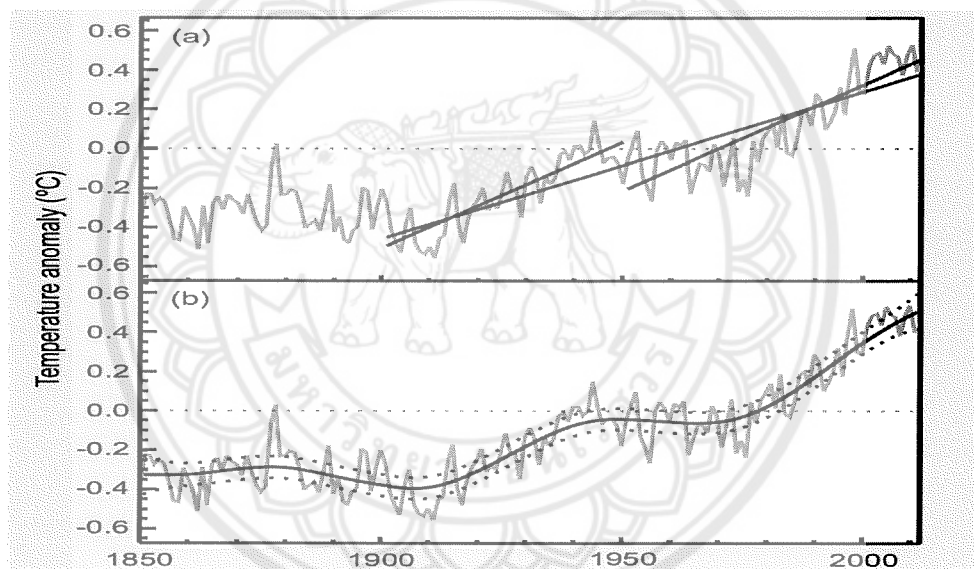
ภาพที่ 2.1 ค่าการแผ่รังสี (Radiative forcing) โดยประมาณในปี ค.ศ.๒๐๑๑ เมื่อเปรียบเทียบกับปีฐานค.ศ.๑๗๕๐ ซึ่งมีปัจจัยที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ในภาพรวม ธรรมชาติ และ กลุ่มก๊าซเรือนกระจก

หมายเหตุ \* อักษรในภาพหมายถึงดังนี้ VH – very high, H – high, M – medium, L – low, VL – very low

ที่มา : IPCC (2013)

สาเหตุจากการปลดปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> ในระดับสูงดังกล่าว ดังนั้นระดับอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโลกจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากอดีตถึงปัจจุบันและกลายเป็นตัวชี้วัดการเปลี่ยนแปลงสภาวะ

ภูมิอากาศของโลกที่สำคัญมาก รายงานฉบับล่าสุดของ IPCC ฉบับที่ 5 (The Fifth Assessment Report : AR5) ได้รายงานว่า ในช่วงต่อจากปี ค.ศ. 1950 อุณหภูมิ ภาคส่วนบรรยากาศและภาคส่วนมหาสมุทร ยังคงมีระดับสูงขึ้นต่อเนื่อง ข้อมูลช่วงปี ค.ศ. 1983-2012 ชี้โลกเหนือมีแนวโน้มอุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้น (IPCC, 2013; IPCC, 2014a) นอกจากนั้นข้อมูลจากรายงานฉบับเดียวกันนี้ ระบุว่าเมื่อประเมินจากค่าเฉลี่ยของพื้นผิวโลก (โดยใช้ข้อมูลเฉลี่ยร่วมกันระหว่างระดับอุณหภูมิภาคพื้นทวีปและภาคพื้นสมุทร) ด้วยสมการแนวโน้มเชิงเส้น พบว่าอุณหภูมิโลกจะมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณ  $0.85^{\circ}\text{C}$  (เฉลี่ยจากช่วงข้อมูล  $0.65\text{-}1.06^{\circ}\text{C}$ ) ในช่วงระหว่าง ปี ค.ศ. 1880 - ค.ศ. 2012 เปรียบเทียบกับข้อมูลเฉลี่ยรวมในช่วง ค.ศ. 1850-ค.ศ. 1900 และสุดท้าย ช่วง ค.ศ. 2003-ค.ศ. 2012 พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวโลกเพิ่มขึ้น  $0.78^{\circ}\text{C}$  (เฉลี่ยจากช่วงข้อมูล  $0.72\text{-}0.85^{\circ}\text{C}$ ) (กนิตา ธนเจริญชนภาส, 2558: IPCC, 2013) เมื่อประเมินการเพิ่มระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุก 10 ปี ตามรายงาน AR5 ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิพื้นผิวโลกในระยะศตวรรษที่ผ่านมาจากรายงาน AR5

(a) ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิพื้นผิวโลก (Global mean surface temperature (GMST)) โดยใช้แบบจำลอง HadCRUT4 จากฐานข้อมูลระหว่างปี ค.ศ.191-ค.ศ.1990.ค่าที่แสดงด้วยเส้นตรงที่คำนวณจากสมการเส้นตรงวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square) แสดงค่าแนวโน้มของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิพื้นผิวโลกในช่วงปี ค.ศ.1901-ค.ศ.2012, ค.ศ.1901-ค.ศ.1950 และ ค.ศ.1991-ค.ศ.2012

(b) จากข้อมูลเดียวกับภาพ (a) แต่คำนวณด้วยสมการถดถอยแบบสไปน์/ (smoothing spline) และ เส้นประ เป็นค่าความเชื่อมั่นที่ระดับ 90% ของข้อมูลจากภาพ (a)

ที่มา : Hartmann et al. (2013) อ้างใน กนิตา ธนเจริญชนภาส (2558)

โดยการคำนวณแนวโน้มด้วยสมการเชิงเส้นพบว่าระดับ อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น ประมาณ  $0.075^{\circ}\text{C}$  ทุก 10 ปี เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง ปี ค.ศ.1901.- ค.ศ.2012 และเพิ่มขึ้นประมาณ  $0.107^{\circ}\text{C}$  ทุกระยะ 10 ปีเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปี ค.ศ.1901 - ค.ศ.1950 และเพิ่มขึ้นประมาณ  $0.106^{\circ}\text{C}$  เมื่อเปรียบเทียบระหว่างปี ค.ศ.1951 - ค.ศ.2012 และที่สำคัญคือการคาดการณ์ระดับ อุณหภูมิ ที่อาจสูงชันกว่า  $2^{\circ}\text{C}$  ณ ปี ค.ศ. 2100 ตัวเลขระดับอุณหภูมิที่ได้รับการคาดการณ์นี้อาจจะเป็นตัวเลขที่ไม่สูงมากนักแต่ระดับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลต่อระบบนิเวศอย่างมีนัยสำคัญมากมายในหลายองค์ประกอบโดยเฉพาะองค์ประกอบด้านชีวภาพ และองค์ประกอบที่เปราะบางต่อการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิ ซึ่งทำให้เกิดแนวทางเปลี่ยนแนวความคิดการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคมของโลกไปในทิศทางที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น (Hartmann et al., 2013) เนื่องจากแนวโน้มการเพิ่มระดับอุณหภูมิเกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงดังนั้น IPCC จึงได้รายงานภาพฉายอนาคตแบบใหม่ (New Scenario) คือ RCPs (Representative Concentration Pathways) ซึ่งจะสะท้อนการปล่อยก๊าซ  $\text{CO}_2$  และก๊าซเรือนกระจกชนิดอื่นๆ รวมทั้งกลุ่มแอโรซอล (เช่น sulfate และ soot) ภายใต้การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินรวมทั้งการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และการใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับที่ต่างกัน และส่งผลต่อค่าการแผ่รังสี ในแต่ละพื้นที่ที่ต่างกันไปซึ่ง RCPs ได้ถูกแบ่งตามระดับการแผ่รังสีซึ่งมีหน่วยเป็น  $\text{W.m}^2$  ภายในปี ค.ศ.2100 (ปลายศตวรรษที่ 21) ซึ่งส่งผลต่อระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทั้งหมด 4 รูปแบบ ซึ่งเป็นเหตุการณ์อยู่ในช่วงระหว่างปี ค.ศ.1850-2100 (Jubb et al., 2016) รายละเอียดมีดังนี้

- ภาพฉายอนาคตที่บ่งบอกระดับการแผ่รังสีต่ำมากเนื่องจากมีแผนการบรรเทาเหตุการณ์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก คือ RCP 2.6 ภาพฉายอนาคตนี้พัฒนามากจากที่วิจัย IMAGE modeling องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมประเทศเนเธอร์แลนด์ ถูกเรียกว่า peak scenario เนื่องจากเป็นภาพฉายที่แสดง ค่า radiative forcing เพิ่มขึ้นครั้งแรกและแตะที่ระดับสูงสุดที่  $3.1 \text{ W.m}^2$  ภายในปีศตวรรษ จากนั้นจะลดลงกลับมาที่ระดับ  $2.6 \text{ W.m}^2$  ภายในปี ค.ศ.2100 ซึ่งเกิดจากการร่วมมือกันหลายภาคส่วนในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่ง IPCC ระบุว่า RCP 2.6 นี้จะเป็นสภาวะที่ระดับความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{CO}_2$  ที่ระดับ 430 - 480 ppm และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย  $1.0^{\circ}\text{C}$  ในช่วงพิสัย  $0.3^{\circ}\text{C} - 1.7^{\circ}\text{C}$  (Vuuren et al., 2007; IPCC, 2013; Jubb et al., 2016)
- ภาพฉายอนาคตระดับกลางซึ่งเป็นภาพฉายเสถียร (stabilization scenario) คือ RCP 4.5 และ RCP 6.0 ทั้ง 2 รูปแบบนี้มีความคล้ายคลึงกันเนื่องจากค่า radiative forcing จะเสถียรหลังปี ค.ศ. 2100 เช่นเดียวกันแต่มีความแตกต่างกันดังนี้

RCP 4.5 ถูกพัฒนาโดย the MiniCAM modeling team at the Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute (JGCRI) เป็น

สถานการณ์ที่รักษาระดับค่า radiative forcing มีความเสถียรหลังปี ค.ศ.2100 โดยไม่เกิน ที่ระดับ 4.5 (ที่ระดับ 3.9 - 4.5  $W.m^{-2}$  / 4.5 - 5.1  $W.m^{-2}$ ) และค่าความเข้มข้นของก๊าซ  $CO_2$  อยู่ที่ระดับ 580 - 650 ppm / 650 - 720 ppm เกิดจากการร่วมมือกันเพื่อกิจกรรม / นโยบาย / และเทคโนโลยีที่นำไปสู่การลดการปลดปล่อยก๊าซ เรือนกระจก และอุณหภูมิ เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.8  $^{\circ}C$  ในช่วงพีสัย 1.1 - 2.6 RCP4.5 มีลักษณะคล้ายกับ scenario (B1) ซึ่ง ถูกรายงานในรายงานฉบับที่ 4 ของ IPCC (The Fourth Assessment Report :AR4) (Smith and Wigley, 2006; Clarke et al., 2007; Wise et al., 2009; IPCC, 2013; Jubb et al., 2016)

RCP 6.0 ถูกพัฒนามาจาก AIM modeling team at the National Institute for Environmental Studies (NIES) ประเทศญี่ปุ่นเป็นภาพฉายอนาคตที่เรียกว่า stabilization scenario) สภาวะระดับ radiative forcing จะเสถียรในช่วงสั้นๆหลังจากปี ค.ศ. 2100 โดยอยู่ที่ระดับไม่เกิน 6.0  $W.m^{-2}$  (5.1 - 6.8  $W.m^{-2}$ ) และ ค่าความเข้มข้น ของก๊าซ  $CO_2$  อยู่ที่ระดับ 750 -1,000 ppm สะท้อนการร่วมมือกันในด้านเทคโนโลยี และ ยุทธศาสตร์ เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2.2  $^{\circ}C$  ในช่วงพีสัย 1.4  $^{\circ}C$  - 3.1  $^{\circ}C$  (Fujino et al., 2006; Hijoka et al., 2008; IPCC, 2013; Jubb et al., 2016)

ภาพฉายอนาคตที่บ่งบอกการแผ่รังสีในระดับสูงมาก คือ RCP 8.5 เนื่องจากขาดการร่วมมือใน การลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และความล้มเหลวในการควบคุมสภาวะโลกร้อนภายใน ช่วงศตวรรษที่ 21 (ใกล้เคียงกับภาพฉายอนาคต A1F1 ในรายงานฉบับที่ 4 โดย IPCC (AR4) ซึ่งเป็นสภาวะที่มีการใช้พลังงานการฟอสซิลในระดับสูง RCP 8.5 ถูกพัฒนาโดย the MESSAGE modeling team and the IIASA Integrated Assessment Framework at the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria เป็น ภาพฉายในรูปแบบสภาวะที่มีการเพิ่มระดับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระยะยาว อย่างต่อเนื่องซึ่งทำให้มีระดับก๊าซเรือนกระจกอยู่ในระดับสูง เป็นภาพสะท้อนการพัฒนา ประเทศและการพัฒนาเศรษฐกิจในระดับสูงมาก จนทำให้ค่าแรงแผ่รังสี RF เพิ่มเป็น 8.5  $Wm^{-2}$  หรือมากกว่า 6.8  $Wm^{-2}$  ขึ้นไป และค่าความเข้มข้นของก๊าซ  $CO_2$  อยู่ที่ระดับ มากกว่า 1,000 ppm และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 3.7  $^{\circ}C$  ในช่วงพีสัย 2.6 - 4.8 (Riahi et al., 2007; IPCC, 2013; Jubb et al., 2016)

ปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยในหลายประเทศโดยอาศัยภาพฉายอนาคต RCP ดังกล่าวเพื่อ คาดการณ์ระดับอุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน หรือ ข้อมูลผลกระทบในประเด็นต่างๆ หนึ่งในการศึกษาที่ สำคัญเพื่อประเมินผลกระทบนั้นคือการประเมินในด้านความมั่นคงทางอาหารของมนุษย์ ในประเทศ ไทยหน่วยงาน นักวิจัย รวมทั้งกรมอุตุนิยมวิทยา ใช้ประเมินสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ

โดยใช้ฐานจาก RCP 4.5 และ RCP8.5 เป็นช่วงที่คาดการณ์ระดับอุณหภูมิและปริมาณน้ำฝนของประเทศไทยในพื้นที่ต่างๆในอนาคต ดังนั้นการใช้ระดับอุณหภูมิที่ RCP 4.5 และ 8.5 เพื่อคาดการณ์สภาวะความเครียดจากระดับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงที่ส่งผลกระทบต่อสรีรวิทยาของพืช และส่งผลกระทบต่อเนื่องในการลดผลผลิตในภาพรวม จึงมีความจำเป็นเพื่อนำไปสู่การค้นคว้าในระดับที่ต่อเนื่องต่อไป

## 2.2 ผลกระทบของสภาวะการเพิ่มระดับอุณหภูมิต่อสรีรวิทยาของพืช

ปัญหาผลกระทบของสภาวะโลกร้อนที่สำคัญประการหนึ่งคือ การเปลี่ยนแปลงกลไกเชิงสรีรวิทยาของพืชโดยทั่วไป เนื่องจากสภาวะเครียดจากความร้อน (Heat Stress) อาทิเช่น การหายใจแสงที่เกิดขึ้นได้ดีในสภาวะความเครียดจากความร้อน รวมทั้งเกิดความเครียดออกซิเดชันในพืช เป็นต้น อย่างไรก็ตามพบว่าความทนทานต่อความร้อนของพืชสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการทำลายสารออกซิแดนซ์ในพืช (Reactive Oxygen Species: ROS) ที่เกี่ยวข้องกับกลไกของเมตาบอลิซึมในพืชสปีชีส์นั้น (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; Sairam and Saxena, 2000)

### ผลกระทบจากสภาวะอุณหภูมิสูงที่มีต่อการหายใจแสง

พืชโดยทั่วไปสังเคราะห์อาหารโดยอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์ในช่วงคลื่น visible light พบว่าช่วงคลื่นที่ทรงคุณค่าในใบพืช สามารถดูดกลืนแสงได้มากเป็นพิเศษ แสงช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 400-500 นาโนเมตร ซึ่งประกอบด้วยแสงสีม่วง สีน้ำเงิน และสีเขียว กับแสงสีแดงที่มีความยาวช่วงคลื่นระหว่าง 600- 800 นาโนเมตร โดยแสงสีแดงเป็นแสงที่พืชสามารถดูดกลืนไว้ได้มากที่สุด และมีอิทธิพลต่อการออกดอก ของพืชด้วย ทั้งนี้พืชแต่ละชนิดตอบสนองต่อคลื่นแสงที่ช่วงความยาวต่างกัน (Wallace and Hobbs, 2006) ในสภาวะอุณหภูมิอยู่ในระดับเหมาะสมต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชชนิดนั้นๆ เอนไซม์ Rubisco (ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase) จะมีอิทธิพลทำให้  $\text{CO}_2$  จะรวมตัวกับ RuBP (Ribulose-1, 5-bisphosphate) (Bowes et al., 1971) ทำให้เกิดสารประกอบที่มีคาร์บอน 3 อะตอม คือ 3-Phosphoglyceric acid (3-PGA) (ในกรณีพืช C3) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปไปเป็นน้ำตาลในกระบวนการสังเคราะห์แสงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยปกติแล้วเอนไซม์ Rubisco จะตอบสนองต่อ  $\text{CO}_2$  (รวมกับ RuBP) มากกว่า  $\text{O}_2$  (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558) อย่างไรก็ตามในบรรยากาศโดยปกติแล้วความเข้มข้นของ  $\text{O}_2$  จะสูงกว่า  $\text{CO}_2$  เสมอ ซึ่งทำให้  $\text{O}_2$  จำนวน 1 โมเลกุลจะถูกรวมตัวกับ RuBP โดยเอนไซม์ Rubisco ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการตรึง  $\text{O}_2$  เช่นกัน พบว่าในสภาวะปกติการตรึง  $\text{CO}_2$  และ  $\text{O}_2$  มีสัดส่วน  $\text{CO}_2$  3 อะตอม:  $\text{O}_2$  1 อะตอม ( $\text{CO}_2$  ได้รับการตรึงสูงกว่า  $\text{O}_2$ ) (Sharkey, 2001)

พบว่าพืชที่สัมผัสกับระดับอุณหภูมิสูงกว่าระดับเหมาะสมจะเกิดผลกระทบโดยตรงต่อการยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสง เนื่องจากภายใต้ระดับอุณหภูมิสูงจะส่งผลทำให้เอนไซม์ Rubisco



ทำปฏิกิริยาในการตรึง  $O_2$  ได้ดีกว่า  $CO_2$  จนเกิดสภาวะการหายใจแสง (photorespiration) ทำให้พืชไม่สามารถเกิดวัฏจักรคัลวินในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ส่งที่ได้มากคือ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคาร์บอน 2 อะตอม ซึ่งเป็นสารพิษ คือ phosphoglycolate (PG) (Sharkey, 2001) ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อเนื้อคือพืชจะต้องนำพลังงานในเนื้อเยื่อมาใช้เพื่อกำจัดสารพิษ phosphoglycolate (PG) และสุดท้ายของกระบวนการกำจัดสารพิษนี้ทำให้สูญเสีย  $CO_2$  ผ่านทางปากใบ ทำให้พืชสูญเสียพลังงาน (ATP) ในกระบวนการนี้ในระดับสูงเพื่อลดความเป็นพิษและลดการสูญเสีย  $CO_2$  ซึ่งกระบวนการกำจัด PG ดังที่ได้กล่าวถึงไปนี้เกิดขึ้นใน 3 organelles คือ Chloroplast Peroxisome และ mitochondria ดังนี้

กระบวนการเริ่มต้นที่ Chloroplast เมื่อเกิดสาร PG โดยมีการตรึง  $O_2$  (oxygenation) โดย ribulose biphosphate ดังที่กล่าวไปแล้ว กระบวนการที่เกิดขึ้นใน Chloroplast คือ dephosphorylated (เป็นกระบวนการที่ไม่มีการเติม Phosphate พลังงานสูงให้แก่ ADP ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ ATP) จนผลิต glycolate ผ่านเข้าสู่ organelle Peroxisome ใน peroxisome นี้มี เอนไซม์ catalase จำนวนมากจนทำให้เกิดกระบวนการ oxidation ของ glycolate กลายเป็นสาร glyoxylate และทำให้เกิดสาร hydrogenperoxide ( $H_2O_2$ ) (ซึ่งเป็นสารที่เป็นพิษในพืชเช่นกัน) ในกระบวนการนี้ จากนั้นสาร glyoxylate จะถูกเปลี่ยนรูปจนกลายเป็น glycine ผ่านเข้าสู่ mitochondria ซึ่งเป็นพื้นที่สุดท้ายทำให้มีการเปลี่ยนรูปสาร glycine ณ บริเวณนี้ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลส่วนหนึ่งถูกเปลี่ยนรูปกลายเป็น  $CO_2$  ammonia และ ส่วนหนึ่งของสารประกอบคาร์บอนใน tetrahydrofolate (Sharkey, 2001) และเกิดกระบวนการต่อเนื่องจนสุดท้ายปลดปล่อย  $CO_2$  ผ่านทางปากใบทำให้พืชสูญเสีย  $CO_2$  แทนที่พืชจะกักเก็บ  $CO_2$  ไว้ในใบ ซึ่งพบว่ากระบวนการนี้ทำให้พืชสูญเสีย  $CO_2$  สูงถึง 30-50% ของปริมาณที่ตรึงได้ส่งผลต่อการลดประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสง และนอกจากนั้นยังพบว่าในการสร้าง  $H_2O_2$  (Hydrogenperoxide) ใน peroxisome นั้นซึ่งเป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ glycolate เป็นพิษต่อพืชรวมทั้งเป็นสารตั้งต้นในการสร้างสารอนุมูลอิสระชนิด OH ในพืชซึ่งจัดเป็นสารออกซิแดนท์ที่มีฤทธิ์รุนแรงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบทางชีวเคมีอย่างต่อเนื่องและเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารอาหารของพืช (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; Sharkey, 2001; Bonan, 2002)

โดยสรุปกระบวนการหายใจแสงส่งผลต่อการยับยั้งการสังเคราะห์แสงโดย 3 กลไก ดังนี้ ประการแรกคือการรบกวนในการตรึง  $CO_2$  โดย Rubisco จะตรึง  $O_2$  ได้ดีกว่า ประการที่สองทำให้พืชสูญเสียพลังงานในเนื้อเยื่อในการกำจัด PG สุดท้ายพืชสูญเสีย  $CO_2$  ผ่านทางปากใบ (ในกระบวนการสุดท้ายในการกำจัด PG) (Sharkey, 1988) ดังนั้นเมื่อพืชอยู่ภายใต้สภาวะเครียดจะระดับอนุมูลอิสระสูงย่อมส่งผลกระทบต่อเนื้อที่ได้อธิบาย พืชหลายสปีชีส์ล้วนได้รับผลกระทบดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มธัญพืช (crops) (Sharkey, 1988)

พบว่าพืช C3 เช่นข้าว ที่ขึ้นอยู่ในเขตร้อนแห้งแล้ง หรือมีผลกระทบมาจากสภาวะอุณหภูมิสูง หรือ ความแล้ง จะมีความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> ในคลอโรพลาสต์ลดลง เนื่องจากปากใบปิด อันเป็นผลมาจากพืชมีปฏิกิริยาปกป้องตนเอง (defense mechanisms) โดยการทำให้เย็นลง (plant cool themselves) ผ่านการคายน้ำ ดังนั้นพืชจะมีปฏิกิริยาคายน้ำมากขึ้นจนขาดความสมดุล พืชจะมีปฏิกิริยาปกป้องตนเองอีกครั้งโดยการปิดปากใบเพื่อลดการคายน้ำโดยพบว่าถ้า CO<sub>2</sub> ในคลอโรพลาสต์ ต่ำกว่า 50 ppm เอนไซม์รูบิสโก (RubisCO) จะเร่งปฏิกิริยา photorespiration ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง 25 % และเนื่องจากน้ำเป็นแหล่งของอิเล็กตรอนที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง เมื่อพืชลดการคายน้ำส่งผลต่อการยับยั้งการดูดน้ำขึ้นมาสู่ยอดทางไซเลมด้วย (ค่า water potential ในลำต้น ราก และในดิน ใกล้เคียงกัน) ทำให้การแพร่ของน้ำเข้าสู่ราก และดึงขึ้นสู่ลำต้นรวมทั้งใบลดลง ผนวกกับการเกิดกระบวนการหายใจแสง (photorespiration) ในพืช C3 ซึ่งทำให้พืชต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งในการเปลี่ยนรูป Phosphoglycolate จนทำให้เสียสมดุลพลังงานในเนื้อเยื่อส่งผลต่อเนื่องในการยับยั้งการเจริญเติบโต หรือสูญเสียพลังงานในกระบวนการสร้างเมล็ดรวมทั้งกระบวนการทางชีวเคมีของสรีรวิทยาอื่นๆ (กนิดา ธนเจริญชฌภาส, 2558; Hollister and Webber, 2000) สำหรับพืช C4 นั้นพบว่าในกรณีที่ใบพืชสัมผัสกับระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้นนั้นกลับยิ่งทำให้พืชตรึง CO<sub>2</sub> เข้าทางปากใบมากขึ้น ซึ่งอัตราการตรึง CO<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้นนั้นจะเกิดขึ้นถึงระดับอุณหภูมิที่ 45 °C และส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง (Bjorkman et al., 1975)

#### ผลกระทบจากสภาวะอุณหภูมิสูงที่มีต่อการสังเคราะห์แสง

ผลกระทบของสภาวะอุณหภูมิสูงส่งผลต่อการลดประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ในพืชประเภท C3เนื่องจากเกิดกระบวนการหายใจแสงดังที่ได้กล่าวถึงในเนื้อหาเบื้องต้นไปแล้ว อย่างไรก็ตามยังมีสาเหตุจากกระบวนการทางสรีรวิทยาอีกหลายประการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสงภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง หนึ่งในกระบวนการสำคัญคือ การรบกวนกิจกรรมของระบบแสง 1(PS-I) และ ระบบแสง 2(PS-II) PS-I เป็นตัวรับแสงที่ประกอบด้วยสารสีที่สำคัญ คือ คลอโรฟิลล์ เอ ชนิดดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 683 นาโนเมตร และคลอโรฟิลล์ เอ ชนิดพิเศษที่เป็นศูนย์กลางปฏิกิริยา ซึ่งดูดกลืนแสงได้ดีที่สุดที่มีความยาวคลื่น 700 PS-II เป็นตัวรับแสงที่ประกอบด้วยสารสีที่สำคัญคือ คลอโรฟิลล์ เอ ซึ่งดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร (P680) อยู่รวมกับคลอโรฟิลล์ บี เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังมีสารสีอื่น ๆ อีก เช่น แคโรทีนอยด์และไฟโคบิลิน การศึกษาโดย Bukhov et al. (1999) แสดงให้เห็นว่ากิจกรรมของระบบ PS-II ลดลงอย่างมากเมื่อพืชอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงกว่าระดับความทนทาน เนื่องจากสภาวะความเครียดจากความร้อนส่งผลต่อการสลายตัวของ oxygen evolving complex (OEC) ซึ่งเป็นเอนไซม์เร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำเกี่ยวข้องในกระบวนการทำงานของ PS-II ทำให้เสียสมดุลในการส่งผ่านอิเล็กตรอนจาก

OEC ศูนย์รับของกระบวนการ PS-II จึงทำให้กิจกรรมของ PS-II ลดลงอย่างมาก ส่งผลทำให้ลดประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของพืช

### ความเครียดออกซิเดชันของพืชจากสภาวะความเครียดอุณหภูมิ

ROS (reactive oxygen species) เป็นสารก่อปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยอะตอมออกซิเจนที่เป็นสารอนุมูลอิสระ และมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ในวงนอกของอะตอมหรือโมเลกุล เป็นโมเลกุลที่ไม่เสถียรและว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือหมายถึงชนิดของโมเลกุลออกซิเจนที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน เช่น singlet oxygen ( $^1O_2$ ) superoxide ( $O_2^{\bullet-}$ ) hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) และ hydroxyl radical ( $OH^{\bullet}$ ) ซึ่งสารเหล่านี้จะส่งผลต่อการส่งผ่านอิเล็กตรอนในเซลล์ และปฏิกิริยาชีวเคมีต่างๆ (Potters, 2007) ในสภาวะปัจจัยสิ่งแวดล้อมปกติ ROS มีการสังเคราะห์ในเซลล์โดยธรรมชาติอยู่แล้วโดย เกิดขึ้นภายใต้กระบวนการสังเคราะห์แสง เช่น กระบวนการ electron transport ในคลอโรพลาสต์ และไมโทคอนเดรีย และเกิดจากกระบวนการหายใจแสง (photorespiration) ในเพอรอกซิโซม (peroxisome) การเกิดขึ้นในลักษณะนี้ระดับ ROS จะอยู่ในระดับต่ำไม่เป็นอันตรายต่อพืช แต่ระดับ ROS จะเพิ่มขึ้นมากเมื่อเกิดสภาวะเครียด เช่น สภาวะเครียดจากอุณหภูมิต่ำ chilling stress หรือ freezing injury (Hasanuzzaman, 2013) ในช่วงเวลาที่เกิดสภาวะความเครียดจากอุณหภูมิต่ำนั้น ROS จะเพิ่มขึ้นสูงมากซึ่งนำไปสู่การทำลายโครงสร้างเซลล์ในที่สุด ซึ่งพบว่าแม้แต่ในกรณีที่พืชสัมผัสกับระดับความเครียดอุณหภูมิต่ำแบบ Heat stress ในระยะเวลาสั้นๆ พืชก็ยังสามารถสร้าง ROS ชนิด  $O_2^{\bullet-}$  และหรือ  $H_2O_2$  ได้ (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558: Vallelian-bindschedler et al., 1998)

เมื่อพืชเกิดสภาวะ heat stress ทำให้เกิดกระบวนการสร้าง ROS ในเซลล์ซึ่งอาจรบกวนสภาวะสมดุลของเซลล์ และสร้าง lipid peroxidation เพิ่มขึ้นนำไปสู่การทำลายลิพิดในเซลล์เมมเบรนอย่างต่อเนื่อง ทำให้เซลล์เมมเบรนถูกทำลาย เกิดการรั่วไหลของไอออนและเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ระหว่างในเซลล์ออกนอกเซลล์ ในขณะที่การออกซิไดซ์ DNA ทำให้เกิดกลายพันธุ์ของพันธุกรรม มีผลให้ไม่สามารถสร้าง RNA, DNA หรือทำการแบ่งเซลล์ ทำให้เซลล์ตาย พบว่าเมื่อเกิดสภาวะความเครียดออกซิเดชันนี้จะลดความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (Radical scavenging) ในเซลล์ (Bowler et al., 1992) และมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประเด็นนี้ที่บ่งบอกว่าภายใต้สภาวะ heat stress ระดับ malondialdehyde (MDA) จะเพิ่มมากขึ้น สารตัวนี้สร้างขึ้นจากกระบวนการ lipid peroxidation ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยากับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acids) ซึ่ง MDA นี้ได้กลายเป็นตัวชี้วัดที่ดีสำหรับการตรวจสอบการเกิดอนุมูลอิสระ

มีงานวิจัยที่ยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างการเกิด ROS และ malondialdehyde (MDA) ตัวอย่าง เช่น การศึกษาในต้นกล้าข้าวสาลี (อายุ 8 วัน) โดยให้สัมผัสกับระดับอุณหภูมิ 4 ระดับคือ 22, 30, 35 และ 40°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่ามีระดับ ROS ชนิด  $H_2O_2$  เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดย

แปรตามระดับอนุมูลอิสระ คือ 0.5, 0.58, 0.78 และ 1.1  $\mu\text{mol g}^{-1}$  FW (Kumar et al., 2012) และเมื่อศึกษาในข้าวสาลีเช่นเดียวกัน แต่ศึกษาภายใต้สภาวะ heat stress 42°C นานขึ้น (24 ชั่วโมง) พบ ROS ชนิด  $\text{O}_2^{\bullet-}$  และระดับ malondialdehyde (MDA) เพิ่มขึ้นทั้งคู่ (Savicka and Skute, 2010) การศึกษาในประเด็นเดียวกันนี้ได้เกิดขึ้นอย่างแพร่หลาย โดยทดลองที่อายุข้าวสาลีต่างอายุกัน เช่นผลกระทบของ heat stress ที่มีต่อต้นกล้าข้าวสาลีอายุน้อย เช่น 4 วัน 7 วัน พบว่าระดับ  $\text{O}_2^{\bullet-}$  เพิ่มขึ้นที่ใบแรกของทุกระยะของการเจริญเติบโต ซึ่งพบว่าทำให้ระดับ MDA เพิ่มขึ้นตามมา

Hasanuzzaman (2013) ซึ่งได้ศึกษาในประเด็น heat stress ที่มีต่อพืชได้รวบรวมประเด็นการศึกษาในเรื่องนี้ไว้จำนวนหนึ่ง และพบว่าผลการศึกษามากมายสอดคล้องกัน ดังกลไกเชิงสรีรวิทยาที่ได้อธิบายในเบื้องต้น อาทิเช่นการศึกษาความเครียดออกซิเดชันโดยวัดที่ระดับของ  $\text{O}_2^{\bullet-}$  ของพืชในช่วงอายุต่างกัน พบว่าในเซลล์เนื้อเยื่อหุ้มยอดแรกเกิด (coleoptile cells) มีระดับของ  $\text{O}_2^{\bullet-}$  เพิ่มขึ้นภายหลังจากสัมผัสกับสภาวะความเครียดจากอนุมูลอิสระในระยะปลายของระยะต้นกล้า และต่อมามีการศึกษาในระดับ  $\text{O}_2^{\bullet-}$  ในรากของต้นกล้าข้าวสาลีที่ปลูกใต้สภาวะเครียดจากอนุมูลอิสระเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และมีการศึกษาพบว่าเมื่อระดับ  $\text{O}_2^{\bullet-}$  ในเซลล์รากเพิ่มขึ้น 68 % จะยับยั้งการเจริญของรากในช่วงต้นของระยะต้นกล้า เมื่อศึกษาเปรียบเทียบการสร้าง  $\text{O}_2^{\bullet-}$  ภายใต้อุณหภูมิ heat stress ในเซลล์พืชที่อายุต่างกัน พบว่าช่วงปลายของระยะต้นกล้ามีการสร้าง  $\text{O}_2^{\bullet-}$  79% (เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม) ซึ่งเป็นระดับที่สูงกว่าในระยะต้นของระยะต้นกล้า (ซึ่งเพิ่มเพียง 22 %) และเมื่อศึกษาเปรียบเทียบระยะเวลาของการสร้าง  $\text{O}_2^{\bullet-}$  พบว่าในสภาวะความเครียดเฉียบพลัน (วัดทันทีหลังจากสัมผัส) ระดับ  $\text{O}_2^{\bullet-}$  เท่ากับ 65% (เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม) สูงกว่าการวัดหลังจากนั้น 2 วัน ซึ่งมีระดับ  $\text{O}_2^{\bullet-}$  เพียง 34%

ความเครียดออกซิเดชัน ที่เกิดขึ้นในพืชจะทำให้ลายไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และ ดีเอ็นเอ ในพืช ซึ่งส่งผลต่อเนื่องต่อการเปลี่ยนแปลงกลไกการทำงานของเอนไซม์ ที่เกี่ยวข้องในลำดับต่อไป ในการศึกษาพบว่า ROS ที่เกิดขึ้นจะทำให้ลายโครงสร้างในส่วนที่เป็นลิพิดเมมเบรน ชนิดฟอสโฟไลปิด และโปรตีนเมมเบรน (Mittler, 2004) สอดคล้องกับการส่งผลให้เกิดไลปิดเพอรอกซิเดชัน เพิ่มขึ้น (lipidperoxidation) และปริมาณไขมันอิ่มตัวเพิ่มมากขึ้น (Mo et al., 2010; Sato, 2011; Chen and Arora, 2011) ส่งผลกระทบต่อการทำงานที่ผิดปกติในโครงสร้างของเมมเบรน ทำให้การทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย และสุดท้ายทำให้ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพแสงโดยเฉพาะในระบบแสง 2 (PSII)

ความเครียดออกซิเดชันยังเกี่ยวข้องกับการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte-leakage) ในพืชด้วยเช่นกัน อาทิเช่น เมื่อมีการศึกษาในใบผักปวยเล้ง ภายใต้อุณหภูมิ Freezing injury พบว่าส่งผลกระทบต่ออัตราการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte-leakage) ลดประสิทธิภาพของระบบแสง 2 (PSII; Fv/Fm) ใบมีอาการบาดเจ็บโดยเกิดแผลจุดโปร่งแสงมีลักษณะ

กลมใส ๆ และชุ่มน้ำ (water-soaking) สมมติฐานว่าเนื้อเยื่อที่ได้รับสภาวะนี้จะลดความสามารถในการฟื้นฟูตัวเองแม้ว่าจะผ่านระยะที่น้ำแข็งในเนื้อเยื่อละลายแล้วก็ตาม (Hasanuzzaman, 2013)

## 2.3 ผลกระทบของสภาวะการเพิ่มระดับอุณหภูมิและการเพิ่มระดับ CO<sub>2</sub> ในบรรยากาศ ต่อ สรีรวิทยาและผลผลิตของข้าว

### ข้อมูลทั่วไปของข้าว

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้าที่กินเมล็ดได้ ถูกจัดอยู่ในสกุลออไรซา (Genus *Oryza*) ของวงศ์เกรมินี (Family Gramineae) ถือเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวเช่นเดียวกับหญ้า สามารถเจริญเติบโตได้ดีทั้งในเขตร้อน และเขตอบอุ่นของโลก (บุญหงษ์ จงคิด, 2553) ต้นข้าวมีลักษณะ ภายนอกบางอย่าง เช่น ใบ กาบใบ ลำต้น และรากคล้ายต้นหญ้า

ข้าวเอเชีย เป็นข้าวลูกผสม เกิดจาก *Oryza sativa* กับข้าวป่า สันนิษฐานว่า พืชสกุล *Oryza* มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนชื้นของทวีป บริเวณประเทศอินเดีย บังคลาเทศ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จากนั้นกระจายจากเขตร้อนชื้นมายังพื้นที่อื่นๆของแอฟริกา เอเชียตะวันออกเฉียงเหนือ ออสเตรเลีย อเมริกากลางและใต้ ปัจจุบัน ปลูกกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อินเดีย ตอนเหนือของบังคลาเทศ อินเดียบริเวณดินแดนสามเหลี่ยมระหว่างพม่า ไทย ลาว เวียดนาม ฟิลิปปินส์ ญี่ปุ่น อินโดนีเซียและจีนตอนใต้ รวมทั้งประเทศไทย เป็นต้น (มูลนิธิข้าวไทย, 2560)

พันธุ์ของข้าวที่นิยมบริโภคมีอยู่ 2 สปีชีส์ใหญ่ๆ คือ

*Oryza glaberrima* ปลูกเฉพาะในเขตร้อนของแอฟริกาเท่านั้น

*Oryza sativa* ปลูกทั่วไปทุกประเทศ 'ข้าวเอเชียแบ่งออกเป็น 3 สายพันธุ์

ข้าวสายพันธุ์แรก เรียกว่าสายพันธุ์ Senica หรือ Japonica ปลูกบริเวณแม่น้ำเหลืองของจีน แพร่ไปยังเกาหลีและญี่ปุ่น เมื่อประมาณ 300 ปีก่อนคริสต์ศตวรรษ เป็นข้าวเมล็ดป้อม

ข้าวสายพันธุ์ที่สอง เรียกว่า Indica เป็นข้าวเมล็ดยาวปลูกในเขตร้อนแพร่สุดตอนใต้ของอินเดีย ศรีลังกา แหลมมลายู หมู่เกาะต่าง ๆ และลุ่มแม่น้ำแยงซีของจีนประมาณคริสต์ศักราช 200

ข้าวสายพันธุ์ที่สาม คือ ข้าวชวา (Javanica) ปลูกในอินโดนีเซีย ประมาณ 1,084 ปีก่อนคริสต์ศักราช จากนั้นแพร่ไปยังฟิลิปปินส์และญี่ปุ่น ในข้าวเอเชียแพร่เข้าไปในยุโรปและแอฟริกา สู่อเมริกาใต้ อเมริกากลาง เข้าสู่สหรัฐอเมริกาครั้งแรกประมาณคริสต์ศตวรรษที่ 17 โดยนำเมล็ดพันธุ์ไปจากหมู่เกาะมาดากัสกา (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2560)

ข้าวที่ปลูกในประเทศไทยเป็นพวก Indica ซึ่งแบ่งออกเป็นข้าวเจ้าและข้าวเหนียว นอกจากนี้ข้าวยังได้ถูกมนุษย์คัดสรรและปรับปรุงพันธุ์มาโดยตลอดตั้งแต่มีประวัติศาสตร์การเพาะปลูก ข้าวในปัจจุบัน จึงมีหลายหลายพันธุ์ทั่วโลกที่ให้รสชาติและประโยชน์ใช้สอยต่างกันไปในประเทศไทย ข้าวหอมมะลิมีสายพันธุ์ในประเทศและเป็นที่ยอมรับไปทั่วโลก ส่วนข้าวเหนียวดำในอดีตเป็นข้าวไร่ที่เป็นพันธุ์พื้นเมืองของไทยที่มีสีของเมล็ดสีม่วงเข้มมีคุณค่าทางอาหารสูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สารแอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นรงควัตถุที่ให้สีแดงไปจนถึงสีม่วงดำมีคุณสมบัติสำคัญในการเป็นสารแอนติออกซิ

แดนท์ ลดการเกิดมะเร็ง ชะลอความเสื่อมของเซลล์ โรคหลอดเลือดอุดตัน ลดคอเลสเตอรอลและ ไตรกลีเซอไรด์ในเลือด ช่วยบำรุงสมอง ป้องกันการเสื่อมของสมองเป็นต้น (กรมการข้าว, 2555; Pedro et al., 2016)

เมล็ดข้าวเจ้าประกอบด้วยแป้งอะไมโลส (Amylose) ประมาณร้อยละ 15-30

เมล็ดข้าวเหนียวประกอบด้วยแป้งอะไมโลเพคติน (Amylopectin) เป็นส่วนใหญ่และมี แป้งอะไมโลส (Amylose) ประมาณร้อยละ 5-7

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นธัญพืชที่สำคัญมากต่อประชากรทั่วโลก เมื่อพิจารณากลุ่มธัญพืชทั้งหมดซึ่งเป็นแหล่งอาหารหลักของประชากรโลกนั้น พบว่าข้าวเป็นแหล่งอาหารหลักสำหรับประชากรมากกว่า 2.7 พันล้านคน หรือเกือบ 50 % ของประชากรโลก ประชากรในจำนวนที่กล่าวถึงนี้บริโภคข้าวเป็นอาหารหลักโดยเฉพาะประชากรในแถบเอเชีย ปัจจุบันนี้ประเทศที่เป็นแหล่งผลิตข้าวที่สำคัญคือ จีน อินเดีย ปากีสถาน อินโดนีเซีย บังคลาเทศ เวียดนาม พม่า ฟิลิปปินส์ ญี่ปุ่น รวมทั้งประเทศไทย ได้มีการประเมินว่าชาวนาในกลุ่มประเทศทางเอเชียผลิตข้าวรวมกันแล้วมีปริมาณถึง 92% ของผลผลิตข้าวรวมทั้งโลก (Kondamudi et al., 2012; Liu, 2015) รวมทั้งได้มีการคาดการณ์ว่าโลกมีความต้องการผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นถึง 38% ภายในปี ค.ศ. 2025 และ 57% ภายในปี ค.ศ. 2050 อย่างไรก็ตามเนื่องจากปัญหาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก และ สภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้นมาอย่างต่อเนื่องยาวนาน กลายเป็นภาวะและอุปสรรคที่สำคัญประการหนึ่งในการไปถึงจุดหมายที่ตั้งเป้าไว้ ดังนั้นประเทศต่างๆที่เป็นแหล่งสำคัญในการผลิตข้าวต้องหาทางรับมือเพื่อป้องกันและแก้ไขผลกระทบที่จะเกิดขึ้น (Naheed et al., 2007) ภาวะที่สำคัญหนึ่งในนั้นคือการค้นคว้าวิจัยผลกระทบของสภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก และ ปัญหาสภาวะโลกร้อนที่มีต่อข้าวนั่นเอง

ภาคเหนือตอนล่าง เป็นหนึ่งในแหล่งผลิตข้าวที่สำคัญของประเทศ มีพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปี ฤดูกาลผลิต ปี 2559/2560 ประมาณ 4.82 ล้านไร่ และคาดว่าจะมีผลผลิตประมาณ 3.18 ล้านตันข้าวเปลือก ถือว่าเป็นผลผลิตมากเป็นอันดับ 1 ของประเทศ และยังเป็นศูนย์กลางธุรกิจข้าวที่สำคัญของประเทศอีกด้วย เช่น ข้าวขาว ข้าวหอมมะลิ และข้าวหอมชน (ข้าวไรซ์เบอร์รี่ ข้าวหอมนิล ข้าวเหนียวดำ) (ข้อมูลจากฐานเศรษฐกิจ, 2560)

### ผลกระทบของสภาวะระดับอุณหภูมิ และ CO<sub>2</sub> สูง ที่มีต่อสัณฐานและซีพลักษณ์ของข้าว

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซ CO<sub>2</sub> ส่งผลทำให้ระดับอุณหภูมิสูงพื้นผิวโลกสูงขึ้นจริง พบว่าถ้าระดับ CO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้นเกินระดับ 600  $\mu\text{l. l}^{-1}$  ภายในศตวรรษที่ 21 จะทำให้ระดับอุณหภูมิพื้นผิวโลกเพิ่มขึ้น 0-8°C (Kondamudi et al., 2012) มีการวิจัยคาดการณ์ว่า

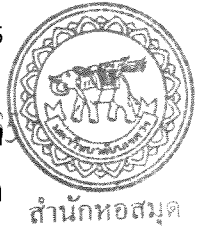
การเพิ่มระดับความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> ในบรรยากาศจะกระตุ้นให้ RuBisCO มีกิจกรรมเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อการลดกระบวนการหายใจแสง ดังนั้นถ้าพิจารณาการเพิ่ม CO<sub>2</sub> เพียงปัจจัย

เดี่ยวจะส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสง และในกรณีการเพิ่มระดับอุณหภูมิ (แต่ไม่เกินจุดความทนทาน) จะกระตุ้นการสร้างคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นสารอาหารที่สำคัญในการสร้างเมล็ดของข้าว เช่น ข้าวสาลี อย่างไรก็ตามมีการศึกษาพบว่า ในกรณีที่เกิดปัจจัยร่วมระหว่างการเพิ่มระดับอุณหภูมิพร้อมกับการเพิ่มระดับ CO<sub>2</sub> กลับส่งผลทำให้เกิดสภาวะความเครียดและลดผลผลิตของข้าว เนื่องจากสภาวะเครียดจากปัจจัยร่วมดังกล่าวส่งผลต่อการลดการดูดซับคาร์บอนเก็บสะสมเนื้อเยื่อลำต้นในช่วงชีพลัษณ์ที่มีการเจริญเติบโตทางลำต้น ส่งผลต่อการลดการสร้างคาร์โบไฮเดรตในรังไข่ (ซึ่งจะเจริญไปเป็นเมล็ด) (Kondamudi et al., 2012)

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสูง ระดับ CO<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้นต่อปฏิสัมพันธ์ของข้าวระหว่างสรีรวิทยาต่างๆ กระบวนการชีวโมเลกุล หรือช่วงความทนทานของข้าวที่มีสภาวะเครียดจากสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป จึงเป็นประเด็นที่จำเป็นต่อการรับมือกับสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไปดังกล่าว ดังนั้นจึงมีผลการศึกษาวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับประเด็นปัญหานี้

ด้วยสรีรวิทยาของข้าว และ องค์ประกอบภายในเซลล์รวมทั้งกระบวนการทางชีวโมเลกุลจึงเป็นสาเหตุที่พืชประเภทข้าวมีความอ่อนไหวในระดับหนึ่งเมื่อสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะปัจจัยอุณหภูมิสูงขึ้น อาทิเช่น เนื่องจากข้าวเป็นพืชประเภท C<sub>3</sub> ซึ่งเป็นพืชที่สังเคราะห์สารประกอบคาร์บอนชนิดแรกจากการตรึง CO<sub>2</sub> โดยใช้เอนไซม์ เอนไซม์รูบิสโก (Rubisco) ได้เป็นสารประกอบที่มีคาร์บอน 3 อะตอม (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; Karki et al., 2013) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับพืช C<sub>4</sub> ในธรรมชาติพบว่าพืช C<sub>4</sub> มีการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะร้อนหรือแล้งได้ดีกว่าพืช C<sub>3</sub> โดยการปรับกระบวนการเมตาบอลิซึมของการตรึง CO<sub>2</sub> ซึ่งมีกลไกเพิ่มความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> ภายในเซลล์ที่มีกระบวนการในวัฏจักรคัลวิน ซึ่งจะทำให้มีโอกาสเกิด photorespiration น้อยมากหรือไม่เกิดเลย (กระบวนการ photorespiration คือการหายใจแสงซึ่งทำให้พืชต้องเสียโอกาสในการสังเคราะห์แสง และทำให้เสียพลังงานในการกำจัดสารที่เป็นผลผลิตจากการหายใจแสงรวมทั้งการสูญเสีย CO<sub>2</sub> ผ่านออกไปทางปากใบ) (Berg, 2008) ซึ่งหมายความว่าพืชกลุ่มนี้ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับพืช C<sub>3</sub> ที่สามารถเกิดสภาวะ photorespiration ได้ง่ายกว่าเช่นในสภาวะที่อุณหภูมิสูงเกินช่วงความทนตัวอย่าง ในกรณีที่พืชมีความทนเหมาะสมที่ระดับสูงสุดอยู่ในช่วงระดับอุณหภูมิ 25°C – 28°C เมื่อสภาวะอุณหภูมิสูงกว่า 28°C จะเกิดสภาวะ photorespiration ขึ้นหรือเมื่อเกิดสภาวะแห้งแล้งรวมทั้งสภาวะที่ระดับ CO<sub>2</sub> ในคลอโรพลาสต์น้อยกว่า 50 ppm จะนำไปสู่การลดประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แสง (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558)

สภาวะความเครียดจากความร้อนเป็นหนึ่งในความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพที่จำกัดการสร้างมวลชีวภาพและผลผลิตของข้าวโดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่เขตร้อน (tropical zone) และประเทศในพื้นที่กึ่งเขตร้อน (Boyer, 1982) เมื่อพิจารณาถึงข้าวซึ่งเป็นพืช C<sub>3</sub> ดังที่กล่าวมาแล้วจึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ข้าวจะได้รับผลกระทบภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง พบว่าข้าวมีโอกาสเปิดรับ (exposure) ต่อสภาวะอุณหภูมิสูงและส่งผลกระทบได้ทั้งในช่วงระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น



(Vegetative stage) และระยะสืบพันธุ์ (reproductive stage) (Pareek et al., 1995) และยังมีพบว่าสภาวะ มีเหตุผลเชิงกลไกสรีรวิทยาอีกหลายประการที่เกี่ยวข้องกับสภาวะอุณหภูมิสูงและส่งผลต่อการลดผลผลิตของข้าว

การศึกษาช่วงระดับอุณหภูมิที่พืชสามารถทนทานได้ (threshold temperature) และ ณ จุดที่ระดับอุณหภูมิมียุคภาพเพียงพอที่จะส่งผลทำให้ผลผลิตพืชเริ่มลดลงนั้นเรียกว่า heat stress threshold ซึ่งในการศึกษาในข้าวโดยทั่วไปพบว่าระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมนั้นอยู่ที่ระดับ 33 °C ดังนั้นสภาวะอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศนั้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลผลิตของข้าวอย่างแน่นอนพบว่าถ้าระดับอุณหภูมิในพื้นที่ปลูกสูงเกินกว่าระดับเหมาะสมอย่างน้อยที่สุด 5 °C จะส่งผลต่อทั้งการยับยั้งการทำงานของระบบเซลล์บางประการ ร่วมกับการการตอบสนองเชิงเมตาบอลิซึม เพื่อปรับตัวให้อยู่รอดภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงนั่นเอง (Kondamudi et al., 2012)

ปัจจัยสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมจะส่งผลอย่างมากต่อซีพลักษณะของพืชต่างๆรวมทั้งธัญพืช ซึ่งจะส่งผลต่อการสืบพันธุ์และการสร้างผลผลิตที่เหมาะสม ดังนั้นจึงพบว่าภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงนั้นจะส่งผลต่อการรบกวนสรีรวิทยาของพืชทำให้ซีพลักษณะและกระบวนการต่างๆเปลี่ยนแปลงไป ตั้งแต่ในระดับต่ำจนถึงระดับที่สามารถทำลายเนื้อเยื่อหรือเปลี่ยนแปลงสรีรวิทยาของพืชประเภทต่างๆ หรือ ธัญพืชรวมทั้งข้าว (*Oryza sativa* L.) ได้ทั้งช่วงอายุก่อนเก็บเกี่ยวและอายุช่วงเก็บเกี่ยว ทั้งยังส่งผลต่อการเกิดสภาวะการบาดเจ็บที่มองเห็นด้วยตา คือลักษณะไหม้เกรียม (scorching) บริเวณ ใบ กิ่งก้าน และ ลำต้น หรือ กระตุ้นการแก่ของใบจนเกิดความเสื่อมสลาย (leaf senescence) และยังยับยั้งการเจริญเติบโตของรากและลำต้น ลดมวลชีวภาพรวม และสุดท้ายลดการสร้างเมล็ดในรวง ซึ่งโดยภาพรวมแล้วสภาวะอุณหภูมิสูงสามารถยับยั้งทั้งการเจริญเติบโตและ พัฒนาการในด้านต่างๆของพืชในระยะนี้ยังมีการเจริญเติบโต (Yoshida, 1978; Porter and Moot, 1998) ผลกระทบในเชิงสรีรวิทยาที่สำคัญประการหนึ่งคือในขณะที่พืชเกิดสภาวะเครียดจากความ ร้อน (heat stress) พืชจะเปิดปากใบเพื่อคายน้ำออกทางปากใบเพื่อเป็นการทำให้ใบมีความเย็นขึ้น อย่างไรก็ตามสภาวะนี้จะเกิดขึ้นได้ดีในกรณีที่พืชไม่ขาดน้ำในดิน แต่หากสภาวะโลกร้อนเกิดขึ้นพร้อมกับความแห้งแล้ง การปกป้องตนเองของพืชโดยการคายน้ำจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Rizhsky et al., 2002) เมื่อพิจารณาความทนทานและความอ่อนไหวของพืช โดยทั่วไปและธัญพืชต่างๆที่มีต่อสภาวะความเครียดจากอุณหภูมิ พบว่าพืชมีการตอบสนองต่อสภาวะ อุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าสภาวะความทนแตกต่างกันไปซึ่งขึ้นอยู่กับ สายพันธุ์ และช่วงอายุต่างๆของซีพ ลักษณะ อาทิเช่น พบว่าธัญพืชโดยทั่วไปในช่วงระยะการสืบพันธุ์ (reproductive stage) มีการตอบสนองหรือได้รับผลกระทบในเชิงลบค่อนข้างไวและชัดเจนกว่าช่วงเจริญเติบโตทางลำต้น



(vegetative stage) ซึ่งผลกระทบในช่วงนี้จะนำไปสู่การลดผลผลิต (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; Kondamudi et al., 2012)

การศึกษาผลกระทบของสภาวะอุณหภูมิสูงที่มีต่อข้าวนั้นเป็นงานวิจัยที่ได้มีการศึกษากันมาอย่างยาวนานหลายปีในประเทศต่างๆ โดยพบผลการศึกษาที่คล้ายคลึงกันประการหนึ่งคือ ซีพลักษณะของข้าวในช่วง ระยะการสืบพันธุ์ (reproductive stage) มีความอ่อนไหวต่อสภาวะอุณหภูมิสูงค่อนข้างชัดเจน (Kondamudi et al., 2012) ได้มีการศึกษาและคาดการณ์ว่าผลผลิตข้าวพันธุ์ดั้งเดิมทางตอนใต้ของประเทศญี่ปุ่นจะลดลง 40 % เนื่องจากสภาวะโลกร้อนที่จะเกิดขึ้น (ปริศนา รัตนเมตตา, 2557) และเมื่อเปรียบเทียบช่วงซีพลักษณะที่ได้รับผลกระทบอย่างชัดเจนพบว่า ในช่วงระยะการสืบพันธุ์ ซึ่งมีการผสมเกสร การปฏิสนธิ การสร้างเมล็ดเป็นระยะวิกฤติต่อสภาวะอุณหภูมิสูงและในที่สุดจะส่งผลเชิงลบต่อการสร้างผลผลิตข้าว และเมื่อ Satake and Yoshida (1978) ศึกษาเพื่อหาสาเหตุพบว่าในระยะการผสมเกสรนั้นสภาวะอุณหภูมิสูงเกินกว่า 35 °C ในระยะเวลา 5 วัน จะยับยั้งการโปรยละอองเรณูและทำให้ละอองเรณูเป็นหมัน ส่งผลต่อเนื่องทำให้เมล็ดลีบและเป็นหมันในอัตราที่สูง และส่งผลต่อการทำให้ผลผลิตของเมล็ดโดยรวมลดลง และ Peng et al. (2004) รายงานว่าผลผลิตของเมล็ดข้าวพันธุ์ IR72 ลดลง 10 % เมื่ออุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยในช่วงกลางวันเพิ่มขึ้นทุก 1 °C (Peng et al., 2004) เช่นเดียวกับการ ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความมีชีวิตของละอองเกสร และการปฏิสนธิในข้าวไทย พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การงอกของละอองเกสรในอาหารเลี้ยงและบนเกสร เพศเมียรวมทั้งการติดเมล็ดลดลง (เจษฎา และคณะ, 2553) และถ้าระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 3 °C หรือเกินระดับขีดความทนต่ออุณหภูมิอาจรบกวนต่อซีพลักษณะด้านระยะเวลาของการเจริญเติบโต เช่น ลดช่วงระยะเวลาการสร้างเมล็ดแต่เพิ่มการสูญเสียพลังงานจากอัตราการหายใจมากขึ้น ส่งผลต่อเนื่องทำให้ผลผลิตข้าวลดลง รวมทั้งคุณภาพของเมล็ดข้าวลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อทำการศึกษากาศสนามโดยปลูกข้าวภายใต้สภาวะอุณหภูมิเพิ่มกว่าระดับปกติ 3.6-7°C ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์แสงลดลงในช่วง 12.2-35.6 % (Oh-e et al., 2007; Wassmann et al., 2009a)

สาเหตุที่ช่วงระยะการสืบพันธุ์มีความอ่อนไหวต่อระดับอุณหภูมิสูง หรือความเครียดจากอุณหภูมินั้นเนื่องจากภายใต้สภาวะอุณหภูมินั้นทำให้พืชลดการสร้างอับละอองเรณูของเกสรตัวผู้ ดังนั้นย่อมส่งผลต่อการลดการงอกของละอองเกสรตัวผู้บนยอดเกสรตัวเมียซึ่งทำให้การสืบพันธุ์ลดลงโดยตรง ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะยิ่งเกิดได้สูงแปรผันตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่าเมื่อทดสอบด้วยปัจจัยร่วมระหว่างสภาวะอุณหภูมิสูงร่วมกับสภาวะระดับ CO<sub>2</sub> สูง ก็ยังส่งผลต่อการลดการสืบพันธุ์และส่งผลต่อการลดจำนวนเมล็ดข้าวที่สมบูรณ์ได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามสภาวะความรุนแรงของการตอบสนองจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะของยีนในแต่ละสายพันธุ์ของข้าว ซึ่งหมายความว่า

ความรุนแรงของการตอบสนองหรือความทนทานต่อสภาวะอุณหภูมิสูงของข้าวนั้นจะแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ข้าว (Satake and Yoshida, 1978; Matsui et al., 2000; Prasad et al., 2006)

ภูมิอากาศจึงส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาของข้าว ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเนื่องต่อการเจริญเติบโต การพัฒนาและการสร้างเมล็ดของต้นข้าว พบว่าในกรณีที่พืชประสบกับสภาวะเครียดจากอุณหภูมิสูงในระยะออกดอก ในระยะที่มีกระบวนการผสมเกสรและการสะสมน้ำหนักเมล็ดจะเป็นช่วงที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด (Osada et al., 1973; Satake and Yoshida, 1978) และพบว่ากลุ่มพันธุ์ข้าวต่างทวีปกันมีความทนทานต่อระดับอุณหภูมิต่างกัน โดยพบว่ากลุ่มพันธุ์ข้าว Indica จากอินเดียทนทานต่อสภาวะอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าพันธุ์ข้าวกลุ่ม Japonica จากสหรัฐอเมริกา เป็นต้น (Prasad et al., 2006) ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่บ่งบอกได้ว่า ข้าวต่างสายพันธุ์พันธุ์จะมีความทนทานและอ่อนไหวต่อสภาวะอุณหภูมิสูงได้แตกต่างกัน อาทิเช่น การศึกษาในข้าวหอมนิลพันธุ์กลายข้าวพันธุ์ สุพรรณบุรี 1 และ พันธุ์สินเหล็ก พบว่า สภาวะความเครียดต่ออุณหภูมิสูงที่ระดับ 40-45°C ส่งผลต่อการมีชีวิตและการงอกของละอองเกสร และ อัตราการติดเมล็ด พบว่าข้าวพันธุ์สินเหล็กมีค่าการติดเมล็ดลดลงและต่ำที่สุดซึ่งสอดคล้องกับค่าความมีชีวิตและการงอกของละอองเกสรต่ำที่สุดเช่นกัน และเมื่อเปรียบเทียบในระหว่างสายพันธุ์หอมนิล 48 สายพันธุ์ พบว่าข้าวหอมนิลสายพันธุ์ M776 มีค่าเฉลี่ยในการติดเมล็ดต่ำสุดเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะความเครียดจากความร้อน แต่ไม่ส่งผลต่อความมีชีวิตและการงอกของละอองเกสร (ปริศนา รัตนเมตตา, 2557)

## 2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิสูงที่มีต่อผลผลิตและสารอาหารข้าว

สภาพอากาศหรือปัจจัยในบรรยากาศเป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่อผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีบทบาทพื้นฐานต่อเกษตรกรรมของมนุษย์ การเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศหรือสภาวะโลกร้อนจึงมีผลกระทบอย่างมากต่อเกษตรกรรมของโลก (Aydinalp and Cresser, 2008) ซึ่งแน่นอนว่าปัญหาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก ปัญหาสภาวะโลกร้อน การเสื่อมของทรัพยากรดิน น้ำ หรือ การเปลี่ยนแปลงที่ดินนั้นย่อมส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบของความมั่นคงทางอาหารที่สำคัญ คือ เสถียรภาพ (Stability) ทางอาหาร อันเนื่องมาจากการทำให้เกิดสภาวะความเสี่ยงต่อความมั่นคงทางอาหารตามฤดูกาลอันเนื่องมาจากฤดูกาลแปรปรวน สภาวะโลกร้อน หรือการลดลงของอาหารตามศักยภาพเดิมที่เคยผลิตได้ในพื้นที่หนึ่งๆ มีหลักฐานที่เกิดขึ้นแล้ว อาทิเช่น ข้าวในทวีปเอเชียมีผลผลิตลดลง 10% เมื่ออุณหภูมิโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นทุกๆ 1°C ของอุณหภูมิต่ำสุดของวัน (Peng et al., 2004) และเมื่อประเมินผลกระทบของสภาวะโลกร้อน ต่อผลผลิต ฝ้าย ข้าวโพด และถั่วเหลืองที่สหรัฐอเมริกา โดยใช้แบบจำลอง Hadley III Warming Scenario ผลการประเมินบ่งชี้ว่าผลผลิตโดยรวมจะลดลง 30-46% ภายใต้ภาวะที่โลกร้อนที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ภายใต้ภาพฉายอนาคต B1 และลดลง 63-82% หากโลกร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วภายใต้ภาพฉายอนาคต A1F1 เป็นต้น (Schlenker and Roberts, 2008)

ข้าวสาลีเป็นหนึ่งในธัญพืชที่สำคัญมากของโลก ในปัจจุบันมีการปลูกข้าวสาลีทั่วโลกเป็นพื้นที่มากกว่า 220 ล้านเอเคอร์/ ปี แต่ข้าวสาลีก็ประสบปัญหาเกี่ยวกับความเสี่ยงด้านความมั่นคงด้านอาหารเช่นกัน เนื่องจากการเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก (IPCC, 2007) ผลสรุปดังกล่าวได้มาจากการประเมินด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อาทิเช่น ประเทศออสเตรเลียได้ประเมินผลกระทบของโลกร้อนที่มีต่อผลผลิตของข้าวสาลีโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ CSIRO's Global.atmosphere.model.. ทำนายสภาวะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิรวมกับการเพิ่มระดับ.CO<sub>2</sub> ในบรรยากาศพบว่า ผลผลิตข้าวสาลีจะลดลง 29% ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นในอนาคตและเงื่อนไขระดับ.CO<sub>2</sub> คงที่ แต่ภายใต้สภาวะการเพิ่มระดับอุณหภูมิรวมกับการเพิ่มระดับก๊าซ.CO<sub>2</sub> ผลผลิตข้าวสาลีจะลดลง 25% (Anwar et al., 2007) เช่น จากการศึกษาในประเมินผลผลิตข้าวสาลีในอังกฤษและเวลส์โดย Richter and Semenov (2005) โดยใช้แบบจำลอง HadCM2-Sirius พบว่าผลผลิตจะเพิ่มขึ้น แต่มีโอกาสประสบกับสภาวะขาดน้ำมากขึ้นซึ่งก็หมายความว่ายังเป็นสถานการณ์ที่น่ากังวลในอนาคตต่อไป

ได้มีการศึกษา ณ ที่ราบลุ่มแม่น้ำคงคาโดย Mishra et al. (2013) ซึ่งเป็นพื้นที่ปลูกข้าวที่สำคัญของประเทศอินเดีย พบว่าผลผลิตข้าวเจ้าลดลงจาก 120 กิโลกรัม/เฮกตาร์ จากปี ค.ศ.1985 เหลือเพียง 50 กิโลกรัม/เฮกตาร์ ในช่วงปี ค.ศ.2000 การลดลงของผลผลิตในพื้นที่นาข้าวแถบนี้จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของความมั่นคงทางอาหารในภูมิภาคนี้ ข้าเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยร่วมอื่นๆ เช่นการเพิ่มจำนวนประชากรซึ่งคาดการณ์ว่าจะเพิ่มเป็น 1.6 พันล้านภายใน ค.ศ.2050 ปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรน้ำ ระดับอุณหภูมิสูงขึ้น ระดับ.CO<sub>2</sub> ในบรรยากาศสูงขึ้น และความแปรปรวนของปัจจัยภูมิอากาศต่างๆ ปัจจัยเหล่านี้จะยิ่งทำให้ปัญหาการขาดแคลนอาหารรุนแรงขึ้นในแถบที่ราบลุ่มแม่น้ำคงคาทั้งในปัจจุบันและอนาคต

ประเทศจีนมีพื้นที่ปลูกข้าวกินเนื้อที่ประมาณ 27% ของพื้นที่เกษตรกรรมทั้งหมดมีผลผลิตประมาณ 37% ของธัญพืชทุกประเภทในประเทศ อย่างไรก็ตามพบว่าจีนประสบกับปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในประเทศจีนเกิดขึ้นมาระยะหนึ่งเช่นเดียวกับหลายพื้นที่ของโลก ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศจีนเพิ่มขึ้นประมาณ 0.5-0.8°C ถ้าเปรียบเทียบกับ 100 ปีก่อน แต่พบว่าในช่วงระยะเวลา 50 ปี คือระหว่างปี ค.ศ.1951-ค.ศ.2001 ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเร็วมากคือระดับ 1.1°C.โดยพบว่าเพิ่มอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่ปีค.ศ. 1980 ด้านปัจจัยปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยพบว่าบางพื้นที่เพิ่มขึ้นประมาณ 10-15% ต่อทศวรรษ และการศึกษาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในระหว่าง ปี ค.ศ.1961-ค.ศ.2010 นั้นส่งผลทำให้ข้าวซึ่งปลูกรอบเดียวใน 1 ปี ในพื้นที่เขตตะวันออกเฉียงเหนือของจีนเพิ่มขึ้นแต่ส่งผลทำให้พื้นที่ปลูกข้าวตอนกลางและตะวันออกเฉียงใต้ลดลง ขณะเดียวกันพื้นที่ซึ่งปลูกข้าว 2 ครั้งต่อปี ได้รับผลกระทบในเชิงลบเป็นส่วนใหญ่ ประเมินการสูญเสียผลผลิตข้าวในระบบการปลูกลักษณะนี้สูงกว่า 1.9 % ขณะเดียวกันพบว่าถ้าระดับอุณหภูมิลดลงกว่าค่าเฉลี่ยปกติทำให้ผลผลิตข้าวในพื้นที่ซึ่งปลูกรอบเดียวใน 1 ปี ลดลงมากกว่า 3%

และลดลง 2% ในพื้นที่ซึ่งปลูกข้าว 2 ครั้งต่อปี ซึ่งแสดงว่าข้าวในพื้นที่ปลูกในประเทศจีนมีการตอบสนองในเชิงลบทั้ง 2 สภาวะคือ อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำกว่าสภาวะปกติ (Chao et al., 2014)

มีการตั้งสมมติฐานว่าการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศจากฐานเดิมจากสภาวะที่เป็นลักษณะประจำถิ่นเพียงประมาณ 1% แต่จะส่งผลทำให้ผลผลิตทางการเกษตรลดลงไปประมาณอย่างน้อย 1%. จากปริมาณเดิม (You et al., 2009) พบกรณีศึกษาในประเทศจีนเมื่อเกิดสภาวะอุณหภูมิเฉลี่ยของฤดูกาลปลูกข้าวสาลี ระหว่างปีค.ศ.1980 ถึงปี ค.ศ.2008 ในเมืองसानซืออยู่ที่ระดับต่ำ  $6^{\circ}\text{C}$  แต่ในมณฑลกวางตุ้งระดับอุณหภูมิก่อนข้างสูงถึง  $18^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่อุณหภูมิเฉลี่ยประเทศในช่วงนั้นอยู่ที่ค่าเฉลี่ยประมาณ  $12^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสภาวะนี้ทำให้ผลผลิตลดลงทั้งสองพื้นที่ (Wei et al., 2014)

การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศอันเนื่องมาจากสภาวะโลกร้อนในประเทศไทยนั้นจะส่งผลกระทบต่อผลผลิตธัญพืชในประเทศไทยมากขึ้นในอนาคต และในระยะยาวจะผลกระทบต่อผลผลิตข้าวในประเทศไทยมากยิ่งขึ้น เหตุผลหนึ่งเนื่องจากส่งผลกระทบต่อพัฒนาการของข้าวและซีพีลักษณะของการออกดอกเปลี่ยนแปลงไป มีการประเมินว่าผลผลิตข้าวไทยจะเปลี่ยนแปลงอย่างมาก โดยเฉพาะการปลูกข้าวในเขตชลประทาน ผลผลิตข้าวจะลดลงประมาณ 20 % ของแต่ละพื้นที่ หรือแต่ละพื้นที่ โดยระดับผลกระทบจะมากหรือน้อยแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น ปริมาณน้ำฝน ระดับสภาวะทางอุตุนิยมวิทยาในแต่ละพื้นที่ด้วย (ปิยะพันธ์ ศรีคุ้ม และ นิตยา รื่นสุข, 2555) ได้มีการศึกษาผลกระทบของสภาวะอุณหภูมิสูงในอนาคตที่มีต่อผลผลิตและปัจจัยต่างๆของข้าวในประเทศไทยอาทิเช่น

ปิยะพันธ์ ศรีคุ้ม และ นิตยา รื่นสุข (2555) ได้ทดลองปลูกข้าวในฤดูกาลที่แตกต่างกันเพื่อทดสอบว่าระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงของปีนั้นจะส่งผลอย่างไรต่อข้าว 2 พันธุ์คือ สุพรรณบุรี 1 และ สุพรรณบุรี 2 ปลูกโดยวิธีหว่านน้ำตม ณ ศูนย์วิจัยข้าวเชียงราย ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิต่ำกว่า  $20^{\circ}\text{C}$  มีผลต่อการเจริญเติบโต และอุณหภูมิต่ำกว่า  $15^{\circ}\text{C}$  มีผลต่อการติดเมล็ดของข้าว ทำให้ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ต่ำ ในข้าวสุพรรณบุรี 1 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 2 โดยปลูกในช่วงเดือนที่มีอุณหภูมิสูง และ เดือนที่มีระดับอุณหภูมิต่ำกว่า ผลการศึกษาพบว่าช่วงเดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคม ไม่เหมาะสมกับการปลูกข้าวในเขตภาคเหนือตอนบนเนื่องจากได้ผลผลิตต่ำสุด แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ผลการศึกษาไม่ได้ชี้ชัดหรือระบุอย่างชัดเจนว่า การปลูกในช่วงอุณหภูมิต่ำจะส่งผลดีกว่าในการปลูกช่วงอุณหภูมิสูงกว่าแต่อย่างใด

การศึกษาภาคสนามโดยการจำลองสถานการณ์โลกร้อนในพื้นที่นาข้าวได้ดำเนินการเช่นเดียวกันโดย กณิตา ธนเจริญชนภาส และโอรส รักษาติ (2551) ซึ่งได้ศึกษาภาคสนามโดยการสร้างสถานการณ์อุณหภูมิสูงกว่าระดับปกติในฤดูกาลปลูกในพื้นที่นาข้าว เพื่อศึกษาผลกระทบและ

การตอบสนองของข้าวหอมมะลิ 105 (*Oryza sativa* L.) ในฤดูกาลปลูกจริงในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก โดยประยุกต์ใช้ Open Top Chamber ลักษณะโปร่งใสเพื่อควบคุมระดับอุณหภูมิ 3 ระดับ คือ ระดับปกติในฤดูกาลปลูก  $29.70 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$  (T1) และเพิ่มขึ้นอีก 2 ระดับคือ  $34.06 \pm 2.4^{\circ}\text{C}$  (T2) และ  $39.30 \pm 2.6^{\circ}\text{C}$  (T3) ในการวิจัยใช้ตู้ทดลองระบบเปิดด้านบนครอบนาข้าวตั้งแต่ระยะต้นกล้า จนถึงระยะเก็บเกี่ยว ควบคุมอุณหภูมิทั้ง 3 ระดับเป็นเวลา 7 ชั่วโมง/วัน ตลอดระยะฤดูกาลปลูก วิเคราะห์ผลการทดลองตั้งแต่ระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์ และอีกระยะหนึ่งคือ ระยะเก็บเกี่ยว ผลการศึกษาพบว่าผลกระทบของระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในระดับสูงส่งผลกระทบต่อรวงควัดฤดูในใบ ผลผลิต ปริมาณโปรตีน รูปร่างอนุภาคของเมล็ดแป้ง และลักษณะทางพันธุกรรมของข้าวหอมมะลิ 105 โดยมีรายละเอียดคือ ผลการศึกษาในชุดทดลอง  $39.30 \pm 2.6^{\circ}\text{C}$  (T3) ไม่มีผลกระทบต่อรวงควัดฤดูในใบแต่ส่งผลกระทบต่อผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญสถิติ ( $P < 0.05$ ) ต่อผลผลิต และปริมาณโปรตีนในเมล็ด เนื่องจากเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์/รวง ลดลงที่ระดับ 9.7%) นอกจากนี้ผลการศึกษาในระดับพันธุกรรมด้วยเทคนิค Random Amplified Polymorphic DNA (RAPD) พบว่าผลของอุณหภูมิที่แตกต่าง 3 ระดับ จากการทดลองทำให้เกิดความแตกต่างในระดับสายพันธุ์ของข้าวหอมมะลิ 105 เมื่อพิจารณาตามค่าดัชนีความคล้ายคลึงกัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มอย่างชัดเจน

งานวิจัยจากศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลกปี 2543 พบว่าอุณหภูมิในช่วงเดือนมีนาคมที่สูงกว่าปกติ  $1-3^{\circ}\text{C}$  ในช่วงผสมเกสรของข้าวนาปรังทำให้ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 เกิดเมล็ดลีบมากกว่า 40 % ในขณะที่พันธุ์สุพรรณบุรี 1 ไม่ได้ได้รับความเสียหาย เนื่องจากความผันผวนของอุณหภูมิเพียงไม่กี่นาทีจะส่งผลต่อซีพลักษณะบางประการที่สำคัญ เช่น ข้าว ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปในช่วง ดอกบาน แม้ในเวลาสั้นๆ ภายใน 10 นาที ทำให้การผสมเกสรล้มเหลว และถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปในระหว่างฤดูปลูก โดยเฉพาะอุณหภูมิกลางวัน ทำให้ระบบสังเคราะห์แสงรวน มีรวงน้อย จำนวนดอก/รวงต่ำ และข้าวลีบ และถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปในช่วงสร้างเมล็ด 30 วันก่อนเก็บเกี่ยวจะมีผลต่อคุณภาพของเมล็ดนั่นเอง ดังนั้นอุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่ว่าจะเป็นกลางวัน หรือกลางวัน ล้วนมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช อุณหภูมิสูงในเวลากลางวันมีผลต่อการผสมเกสร ทำให้ผสมเกสรไม่ติด อุณหภูมิสูงในเวลากลางวันมีผลต่อจำนวนดอกจำนวนเมล็ดที่ลีบหลังผสมเกสรเนื่องจากผสมแล้วแห้งผล ในข้าวพันธุ์ IR72 หากอุณหภูมิกลางวัน (วัดจากอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย) เพิ่มขึ้นทุก  $1^{\circ}\text{C}$  (จาก  $22^{\circ}\text{C}$ ) จะทำให้ผลผลิตข้าว ลดลง 10% (สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2560)

การศึกษาเพื่อคาดการณ์แนวโน้มภูมิอากาศและผลกระทบที่มีต่อข้าวไทยโดยใช้แบบจำลอง GCM-HadGEM2-ES คาดการณ์ร่วมกับภาพฉายอนาคต RCP 6.0 พบว่า ระดับอุณหภูมิของประเทศ ไทยจะเพิ่มขึ้น  $0.37^{\circ}\text{C}$  ภายในปี ค.ศ. 2030 เพิ่มขึ้น  $0.7^{\circ}\text{C}$  ภายในปี ค.ศ. 2050 และเพิ่มขึ้น  $1.5^{\circ}\text{C}$  ภายในปี ค.ศ. 2080 เมื่อแยกการประเมินระหว่างช่วงกลางวันและกลางคืนพบว่าอุณหภูมิช่วงกลางวันของประเทศไทยจะเพิ่มขึ้น  $0.15^{\circ}\text{C}$  ภายในปี ค.ศ. 2030 เพิ่มขึ้น  $0.97^{\circ}\text{C}$  ภายในปี

ค.ศ. 2060 และเมื่อประเมินภายใต้ภาพฉายอนาคต RCP 6.0 (Teng et al., 2016) และเมื่อใช้แบบจำลองนี้คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงของผลผลิตข้าวไทยในอนาคต พบว่าข้าวในประเทศไทยเป็นกลุ่มเปราะบางต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศจริง Reda et al. (2015) ได้ทำการศึกษาและพบว่าในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงของภาคเหนือที่ปัจจุบันสูญเสียพื้นที่นาข้าวไปประมาณ 55% และสูญเสียผลผลิตไปประมาณ 32% และผลการศึกษาประเมินเพื่อคาดการณ์อนาคต ในช่วงปี ค.ศ.2050/2080 พบว่าผลผลิตข้าวไทยในภาพรวมอาจลดลงถึง 20% สอดคล้องกับข้อมูลการประเมินจากธนาคารพัฒนาเอเชียที่ระบุว่าประเทศไทยจะประสบกับปัญหาการลดลงของผลผลิตข้าวถึง 40-45% ภายในปี ค.ศ.2080 ข้อมูลการประเมินในช่วง ค.ศ. 2020/2030 ให้ผลการศึกษาที่สอดคล้องกัน โดยผลการศึกษาระบุว่าภายในปี 2030 พื้นที่บางส่วนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือรวมทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำโขงของประเทศไทย (เช่น จังหวัดร้อยเอ็ด และ สุรินทร์) จะประโยชน์กับผลดีและผลเสียจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศ บางพื้นที่พบว่าผลผลิตข้าวจะเพิ่มขึ้นสูงกว่า 49% ขณะที่บางพื้นที่ผลผลิตข้าวลดลงถึง 17.8% (Teng et al., 2016)

#### แนวทางการบรรเทาปัญหาในพื้นที่เกษตรกรรม

การวิจัยเพื่อหาแนวทางการบรรเทาผลกระทบได้มีมีการศึกษามากมายต่อเนื่อง โดยมากการบรรเทาสถานการณ์จะดำเนินการโดยการใช้ปุ๋ยหรือสารอาหารที่จำเป็นเพื่อชดเชยการสูญเสียธาตุอาหารในดินจากการรบกวนการดูดซับธาตุอาหารอื่นเนื่องมาจากสภาวะการเพิ่มของอุณหภูมิและระดับ CO<sub>2</sub> ซึ่งการศึกษาวิจัยจำนวนมากพบว่าข้าวมีการตอบสนองในเชิงลบต่อ CO<sub>2</sub> ในบรรยากาศระดับสูงโดยทำให้ผลผลิตของเมล็ดข้าวลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระดับปุ๋ยไนโตรเจนในดินร่วมกับการสัมผัสระดับ CO<sub>2</sub> ในระดับเดิมพบว่าลดความรุนแรงของผลกระทบได้อย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือลดเปอร์เซ็นต์การสูญเสียผลผลิตลงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากสารไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารสำคัญมากต่อข้าว เป็นธาตุอาหารในดินที่อยู่ในรูปที่พืช (ข้าว) สามารถดูดซับได้อย่างดี ยังเป็นธาตุสำคัญต่อการเจริญเติบโต และการสร้างผลผลิตอีกเช่นกัน (Perez et al., 1996) และส่งผลต่อการตอบสนองในเชิงบวกต่อการสัมผัส CO<sub>2</sub> ในระดับสูงหรือแม้กระทั่งการสัมผัสกับอุณหภูมิระดับสูง อีกเช่นกัน โดยพบว่าทำให้การตอบสนองในเชิงลบในระดับที่รุนแรงนั้นจะลดลงมาอยู่ในขั้นระดับปานกลางเท่านั้น (Yang et al., 2007)

Yang et al. (2007) ทำการวิจัยปัจจัยร่วมระหว่างการเพิ่มระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่มีต่อผลผลิตของข้าวญี่ปุ่น (rice Japonica *Oryza sativa* L.) พันธุ์ Wuxiangging 14 โดยการปลูกข้าวภายใต้ระบบ free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) ที่เมือง Wuxi, Jiangsu ประเทศจีนในปี ค.ศ. 2001-2003) ในการศึกษาคณะวิจัยได้เพิ่มระดับ CO<sub>2</sub> สูงกว่าระดับบรรยากาศทั่วไป 200  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  ภายใต้ระดับการให้ปุ๋ยไนโตรเจน 3 ระดับคือ ระดับต่ำ (LN, 15 g N m<sup>2</sup>) ระดับกลาง (MN, 25 g N m<sup>2</sup>) เทียบเท่ากับระดับที่เกษตรกรใช้ในนาข้าวในสถานการณ์ปกติ และสุดท้ายคือระดับสูง (HN, 35 g N m<sup>2</sup>) ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยการปลูกข้าวภายใต้ FACE

ส่งผลต่อการลดปริมาณโปรตีน และ ในเมล็ดข้าวที่ผ่านการขัดสีเท่ากับ 6% 20% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ก็ตามทำให้ข้าวมีรสชาตินุ่มขึ้นเนื่องจากทำให้ปริมาณอไมโลสในเมล็ดข้าวขัดสีลดลง 3.8% เพิ่มยางข้าว 4.5% เมื่อวิเคราะห์ปัจจัยเดี่ยวของระดับปุ๋ยไนโตรเจนพบว่า ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นตามลำดับของปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อทดสอบกับปัจจัยร่วมระหว่างระดับ CO<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนทั้ง 3 ระดับ กลับพบว่า ปุ๋ยไนโตรเจนในระดับสูงกลับไม่ได้ทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด แต่พบว่าการเพิ่มระดับไนโตรเจนในระดับต่ำและระดับกลาง ส่งผลต่อการลดผลกระทบในเชิงลบได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

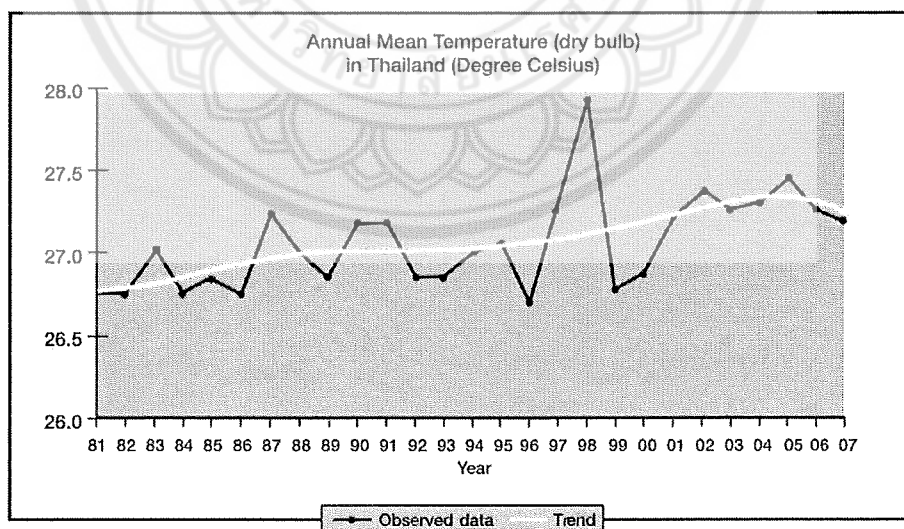
## 2.5 สถานการณ์ระดับอุณหภูมิของประเทศไทยในปัจจุบันและอนาคต และแนวทางการรับมือกับสถานการณ์

### สถานการณ์ปัญหาสภาวะโลกร้อนในประเทศไทย

ประเทศไทยซึ่งเป็นแหล่งผลิตข้าวที่สำคัญของโลก เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการส่งออกข้าวมากเป็นอันดับที่ 6 ของโลก และเป็นอันดับที่ 2 ในประชาคมอาเซียน(ASEAN) ซึ่งในปี 2559 ที่ผ่านมาประเทศไทยส่งออกได้ 9.88 ล้านตัน มูลค่า 154,434 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560) แสดงให้เห็นว่าข้าวเป็นทั้งพืชอาหารและเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อประเทศไทยเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามประเทศไทยเป็นพื้นที่หนึ่งที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสภาวะโลกร้อนเนื่องจากปัจจัยด้านภูมิศาสตร์ที่ตั้งอยู่ในเขตร้อนร่วมกับปัจจัยด้านการใช้พลังงานจากฟอสซิลเป็นหลักรวมทั้งแนวโน้มการเพิ่มการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้นประเทศไทยมีแนวโน้มที่อุณหภูมิเฉลี่ยจะสูงขึ้นเล็กน้อยทั้งกลางวันและกลางคืน วันที่ร้อนที่สุดในรอบปีจะร้อนมากขึ้น ฤดูร้อนจะยาวนาน ฤดูหนาวจะสั้นลง พื้นที่ที่มีอากาศร้อนจัดจะมีเพิ่มขึ้น (อานนท์ สนิทวงศ์ ณ อยุธยา, 2554) ซึ่งกรมอุตุนิยมวิทยาได้รายงานว่าการระดับอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยได้เพิ่มขึ้นประมาณ 1°C จากปี ค.ศ.1981-ค.ศ.2007 (ภาพที่ 2.3) (Marks, 2011) และคาดการณ์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าระดับอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยรายวัน ของประเทศไทยจะเพิ่มขึ้น 1.2-1.96 °C ในปี ค.ศ.2050 ว่ารวมทั้งการคาดการณ์ปริมาณน้ำฝนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าระดับปริมาณน้ำฝนและจำนวนวันฝนตกของประเทศไทยมีแนวโน้มลดลงในช่วงระยะประมาณเวลา 50 ปี (Marks, 2011) และข้อมูลยืนยันจากรายงานของอานนท์ สนิทวงศ์ ณ อยุธยา(2554) ว่าในรอบ 55 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2498-2552) อุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศเพิ่มขึ้น 0.96°C ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ มีอัตราที่สูงกว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลก 0.69°C ฤดูฝนจะมีระยะเวลาเท่าเดิมแต่จะมีปริมาณน้ำฝนมากขึ้น มีน้ำมากในฤดูฝนและมีฤดูแล้งยาวนาน อาจมีการขยับเลื่อนของฤดูกาล และความผันผวนระหว่างฤดูกาลและระหว่างปีต่อปีจะเพิ่มสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลซึ่งอาจเกิดจากการขยายตัวของมวลน้ำในมหาสมุทรกับความแรงของลมมรสุมจะทำให้ระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้น ปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งจะรุนแรงขึ้น และจะเห็นชัดเจนในช่วง 30-50 ปี ข้างหน้า

การศึกษาโดยเจียมใจ เครือสุวรรณ (2553) เพื่อประเมินระดับอุณหภูมิของประเทศไทยใน อนาคตโดยการใช้แบบจำลองภูมิอากาศ MM5 (MM5-RCM) ซึ่งเป็นแบบจำลองภูมิอากาศระดับ ภูมิภาคสำหรับประเทศไทยในช่วงปีฐาน 30 ปี ค.ศ.1970-1999 และในอนาคต 30 ปี ในช่วง ค.ศ. 2010-2039 ข้อมูลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิสูงสุดในช่วง ค.ศ.2010-2019 เกือบทั่วประเทศไทยในฤดู หนาว ฤดูร้อน และ ฤดูฝนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น  $0.4-0.8^{\circ}\text{C}$ ,  $0.2-0.6^{\circ}\text{C}$  และ  $0.4-1.0^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ

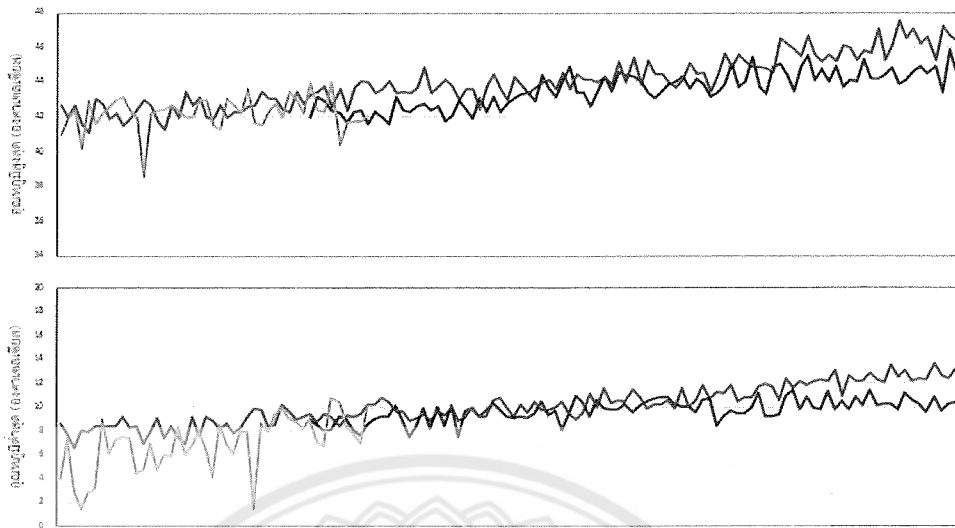
ข้อมูลการศึกษาในปัจจุบันซึ่งกรมอุตุนิยมวิทยาได้ใช้ฐานการอ้างอิงจากภาพฉายอนาคต RCP (Representative Concentrations Pathways) ซึ่งเป็นภาพฉายที่ได้รับการเสนอในรายงาน ของ IPCC ฉบับที่ 5 (กนิตา ธนเจริญชนภาส, 2558) เพื่อทำการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุดและปริมาณฝนรายปีในประเทศไทยในช่วง พ.ศ.2513-2643 โดยใช้แบบจำลอง 2 รูปแบบที่เป็นไปได้ในประเทศไทยคือ RCP4.5 และ RCP8.5 โดยเปรียบเทียบกับการตรวจวัดจริง สถานีต่างๆของประเทศไทย พบว่าการเปลี่ยนแปลงในอนาคตของอุณหภูมิมรายปีบริเวณภาคเหนือ จาก RCP8.5 และ RCP4.5 พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเพิ่มทั้งระดับอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุด แต่ RCP8.5 จะมีอุณหภูมิสูงกว่า RCP4.5 ประมาณ  $1-2^{\circ}\text{C}$  เกือบตลอดช่วงถึง ค.ศ. 2099 (พ.ศ.2642) โดยเฉพาะช่วงตั้งแต่ปี ค.ศ.2075 (พ.ศ.2618) เป็นต้นไปมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน พบว่าที่ RCP8.5 มีค่าระดับอุณหภูมิสูงสุดระหว่าง  $46-47^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่ RCP4.5 มีค่าระดับอุณหภูมิสูงสุด ระหว่าง  $43-44^{\circ}\text{C}$  สำหรับค่าปริมาณน้ำฝนรายปีของภาคเหนือ มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน นัก และพบว่าจากการคาดการณ์จาก RCP8.5 และ RCP4.5 มีค่าใกล้เคียงกัน (ศูนย์ภูมิอากาศ สำนัก พัฒนาอุตุนิยมวิทยา, 2559) (ภาพที่ 2.4)



ภาพที่ 2.3 ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยในช่วงระหว่างปี ค.ศ.1981-ค.ศ.2007

ที่มา : Marks (2011)





ภาพที่ 2.4 ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดที่คาดการณ์ในอนาคตในพื้นที่ภาคเหนือจากการใช้แบบจำลองที่ RCP4.5 และ RCP8.5 ในช่วงปี ค.ศ. 1970-2099 (พ.ศ.2531-2643)

ที่มา : กรมอุตุนิยมวิทยา (2559)

ดังนั้นการประยุกต์แนวทางการแก้ปัญหาตามแนวทางดังกล่าว จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจศึกษาเพื่อรับมือกับสถานการณ์นี้ในประเทศไทยเช่นเดียวกัน

### สรุป

ด้วยข้อมูลที่ยืนยันถึงปัญหาดังกล่าวและข้อมูลการศึกษาเพื่อลดผลกระทบดังนั้น ประเทศไทยและภาคเหนือตอนล่างจึงอยู่ภายใต้ความเสี่ยงต่อการเปิดรับสภาวะอุณหภูมิสูงและมีความเสี่ยงต่อผลกระทบในมิติต่างๆ หนึ่งในนั้นคือมิติภาคการเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย หนึ่งในนั้นคือข้าวไทยในพื้นที่ภาคเหนือและภาคเหนือตอนล่าง ซึ่งจะนำไปสู่ปัญหาการลดลงของผลผลิตข้าวในอนาคต รวมทั้งเมื่อตระหนักว่าประเทศไทยได้ให้ความสำคัญดังกล่าวตั้งเห็นได้จากการกำหนดเป็นหนึ่งในยุทธศาสตร์สำคัญภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ.2560-2579) คือยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศในด้านการเติบโตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน โดยหนึ่งในแผนการดำเนินงานคือการพัฒนาขีดความสามารถในการลดก๊าซเรือนกระจกและการปรับตัวเพื่อลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการรับมือโดยมีการขับเคลื่อนให้เกิดผลอย่างเป็นรูปธรรมหนึ่งในนั้นคือการสนับสนุนการวิจัยเพื่อประเมินและรับมือกับปัญหาดังกล่าว รวมทั้งการงานแผนงานด้านการปรับตัวเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกในประเทศไทย อย่างไรก็ตามประเทศไทยยังขาดข้อมูลด้านผลกระทบของสภาวะโลกร้อนที่มีต่อคุณภาพด้านสารอาหารสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งสาร

ด้านอนุมูลิสรระ ในเมล็ดข้าวทั้งข้าวหอมมะลิซึ่งมีชื่อเสียงไปทั่วโลก และโดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าว  
ท้องถิ่นเช่น ข้าวเหนียวดำพันธุ์ลิ้มผิว (ซึ่งมีส่วนประกอบของสารต้านอนุมูลิสรระที่สำคัญในปริมาณ  
มาก) ซึ่งจะเป็นตัวแทนพันธุ์ข้าว 2 รูปแบบที่จะทำการศึกษาในครั้งนี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่  
จะต้องทำการศึกษาเพื่อประเมินสถานการณ์ และการรับมือที่แม่นยำในภาคสนาม และการสร้างแนว  
ทางการบรรเทาเหตุการณ์เพื่อเตรียมพร้อมรับมือกับผลกระทบอย่างเต็มรูปแบบในชุมชนเป้าหมาย  
ผลการวิจัยจะนำไปสู่การสร้างต้นแบบของทางเลือกในการรับมือต่อสภาวะโลกร้อน และเกษตรกร  
สามารถเลือกนำไปปฏิบัติได้จริงในอนาคต เพื่อลดความเสี่ยงต่อความมั่นคงทางอาหารของประเทศ  
ไทยจากสถานการณ์ดังกล่าว



## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ดำเนินการตามขอบเขตของการใช้พื้นที่ อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการดังนี้

#### 3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย

กำหนดพื้นที่วิจัย เพื่อปลูกข้าว ณ พื้นที่ตำบลท่าทอง อ.เมือง จ.พิษณุโลก

#### 3.2 ชนิดพันธุ์ข้าวที่เลือกศึกษา และการจัดการปลูกข้าว

##### 3.2.1 การคัดเลือกพันธุ์ข้าวสำคัญทางการค้า

ในการศึกษาครั้งนี้ เลือกพันธุ์ข้าว 2 ประเภทคือ ข้าวขาว และข้าวสี รวมทั้งหมด 2 พันธุ์ข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์นี้ มีทั้งข้าวเจ้าไม่ไวแสง และ ข้าวเจ้าสีไม่ไวแสง แต่เป็นพันธุ์ข้าวสำคัญทางการค้า และนิยมปลูกในภาคเหนือตอนล่าง (สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว, 2560)

1. ข้าวพันธุ์ กข 29 (ข้าวเจ้าไม่ไวแสง)
2. ข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ (ข้าวเจ้าสีม่วงไม่ไวแสง)

รายละเอียดของพันธุ์ข้าวแต่ละสายพันธุ์ที่คัดเลือกจาก ข้อมูลจากสำนักวิจัยและพัฒนาข้าว (2560) มีดังนี้

- ข้าว กข 29 (ชัณษาท80) (RD29)

ได้จากการผสมสามทางระหว่างลูกผสมชั่วที่ 1 ของพันธุ์สุพรรณบุรี 60 และสายพันธุ์ IR29692-99-3-2-1 กับสายพันธุ์ IR11418-19-2-3 ที่ศูนย์วิจัยข้าวชัณษาท เมื่อ พ.ศ. 2532 คัดเลือกจนได้สายพันธุ์ CNT89098-281-2-1-2-1 ศึกษาพันธุ์ และเปรียบเทียบผลผลิตภายในสถานีที่ศูนย์วิจัยข้าวชัณษาทระหว่าง พ.ศ. 2533-2541 จากนั้นนำเข้าเปรียบเทียบผลผลิตระหว่างสถานีที่ศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก ศูนย์วิจัยข้าวลพบุรี และศูนย์วิจัยข้าวชัณษาทในฤดูนาปี พ.ศ. 2541 ถึงฤดูนาปี พ.ศ. 2547 วิเคราะห์คุณภาพเมล็ดทางเคมีและกายภาพ ทดสอบความต้านทานแมลงและศัตรูข้าวที่สำคัญ นำเข้าเปรียบเทียบผลผลิตในนาราชภัฏ จังหวัดพิษณุโลก ลพบุรี สิงห์บุรี และชัณษาทในฤดูนาปี พ.ศ. 2542 ถึง ฤดูนาปี พ.ศ. 2547 นำเข้าทดสอบเสถียรภาพผลผลิต ที่ศูนย์วิจัยข้าว

พิษณุโลกแพร่ อุบลราชธานี สกลนคร สุรินทร์ ปทุมธานี สุพรรณบุรี พัทลุง คลองหลวง ราชบุรี ชัยนาท ลพบุรี และฉะเชิงเทรา คัดเลือกเข้าทดสอบผลผลิตในนาเกษตรกร ในจังหวัดพิษณุโลก อุดรดิตถ์ พิจิตร สุโขทัย ชัยนาท และสิงห์บุรี ในฤดูนาปรัง พ.ศ. 2544 ถึง ฤดูนาปรัง พ.ศ. 2548 คณะกรรมการพิจารณาพันธุ์ กรมการข้าว มีมติให้เป็นพันธุ์รับรอง ชื่อ กข29(ชัยนาท 80) เพื่อแนะนำ ให้เกษตรกรปลูก เมื่อวันที่ 6 มีนาคม 2550

- ✓ ข้าวเจ้าไม่ไวต่อช่วงแสง อายุเก็บเกี่ยว 99 วันในฤดูนาปรัง และ 103 วัน ในฤดูนาปี
- ✓ ลักษณะประจำพันธุ์
  - ทรงกอตั้ง ต้นแข็งแรงไม่ล้มง่าย ใบสีเขียวเข้ม ใบธงตั้งตรง รวงแน่นปานกลาง คอรวงยาว
  - เมล็ดข้าวเปลือกสีฟาง ขนสั้น
  - ระยะพักตัวของเมล็ดพันธุ์ประมาณ 4-6 สัปดาห์
  - ข้าวกล้องสีขาว เป็นท้องไข่น้อย รูปร่างเรียวยาว
  - เมล็ดข้าวเปลือก ยาว x กว้าง x หนา =  $9.5 \times 2.6 \times 2.1$  มิลลิเมตร
  - เมล็ดข้าวกล้อง ยาว x กว้าง x หนา =  $7.3 \times 2.2 \times 1.8$  มิลลิเมตร
  - ปริมาณอะมิโลสสูง (26.6-29.4%)
- ✓ ผลผลิตประมาณ 876 กิโลกรัมต่อไร่
- ✓ มีปริมาณธาตุเหล็กในข้าวกล้อง 15.7 มิลลิกรัม ต่อ 1 กิโลกรัม ในข้าวสาร 6.7 มิลลิกรัม ต่อ 1 กิโลกรัม
- ✓ ลักษณะเด่น อายุสั้น มีอายุวันเก็บเกี่ยว 99 วัน ในฤดูนาปรัง และ 103 วันในฤดูนาปี เมื่อปลูกโดยวิธีหว่านน้ำตาม ค่อนข้างต้านทานต่อเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาลในภาคเหนือตอนล่าง และโรคขอบใบแห้ง
- ✓ ข้อควรระวังไม่ทนต่ออากาศหนาวเย็นในช่วงข้าวตั้งท้อง และออกดอก ไม่ควรปลูกข้าวพันธุ์นี้ ในช่วง กลางเดือนกันยายน ถึงเดือนพฤศจิกายน

#### ■ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ (Riceberry)

ข้าว ไรซ์เบอร์รี่ เป็นข้าวพันธุ์ที่ได้รับการคัดเลือกและพัฒนา โดยการผสมข้ามพันธุ์ ระหว่างข้าวเจ้าหอมนิล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พันธุ์พ่อ) กับข้าวพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 จากสถาบันวิจัยข้าว (พันธุ์แม่) โดยเริ่มผสมพันธุ์เมื่อปี พ.ศ. 2545 ณ ศูนย์วิจัยข้าว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ได้ข้าวเจ้าสีม่วงเข้ม เมล็ดเรียวยาว

ที่มีสารต้านอนุมูลอิสระสูงและมีคุณค่าทางโภชนาการโดยรวมดีเด่น 1 สายพันธุ์ ในปี พ.ศ. 2548 โดยใช้ชื่อพันธุ์ว่า “ไรซ์เบอร์รี่”

- ✓ ข้าวไม่ไวแสง ความสูง 105-110 เซนติ เมตร อายุเก็บเกี่ยว 130 วัน
- ✓ ลักษณะประจำพันธุ์
  - ลักษณะเป็นข้าวเจ้า สีม่วงเข้ม
  - รูปร่างเมล็ดเรียวยาว
  - ความยาวของเมล็ดข้าวเปลือก 11 มิลลิเมตร ข้าวกล้อง 7.5 มิลลิเมตร ข้าวขัด 7.0 มิลลิเมตร
- ✓ ลักษณะเด่น
 

ปลูกได้ตลอดทั้งปี ให้ผลผลิตต่อไร่ปานกลาง 300-500 กิโลกรัมต่อไร่ เเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้อง (brown rice) 76% ต้นข้าวหรือข้าวเต็มเมล็ด (head rice) 50% ต้านทานโรคไหม้ ข้าวกล้องมีความนุ่มนวลมาก ต้านทานต่อโรคไหม้ แต่ไม่ต้านทานโรคหาลว จึงควรเปลี่ยนเมล็ดพันธุ์ทุกรอบการปลูก
- ✓ คุณสมบัติเด่นทางด้านโภชนาการ คือมีสารต้านอนุมูลอิสระสูง ได้แก่ เบต้าแคโรทีน แกมมาโอไรซานอล วิตามินอี แแทนนิน สังกะสี และฟิเลตสูง มีดัชนีน้ำตาลต่ำ-ปานกลาง ปริมาณอะมิโลส 15.6%
  - อุณหภูมิแป้งสุก (GT) ระดับ 7 (น้อยกว่า 70 องศาเซลเซียส)
  - ปริมาณธาตุเหล็กสูง 1.5-1.8 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม
  - ปริมาณสารเบต้าแคโรทีน 60 ไมโครกรัม ต่อ 100 กรัม
  - ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระชนิดที่ละลายน้ำ 4,755 mmol ascorbic acid eq./g.
  - ปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระชนิดละลายในน้ำมัน 3,344 nmol Trolox eq./g.
- ✓ ผลผลิต 750-850 กิโลกรัม ต่อไร่
- ✓ ข้อควรระวัง เป็นข้าวที่ต้องการเอาใจใส่เป็นพิเศษ ต้องมีสภาพอากาศเย็น เพื่อสร้างสีเมล็ด

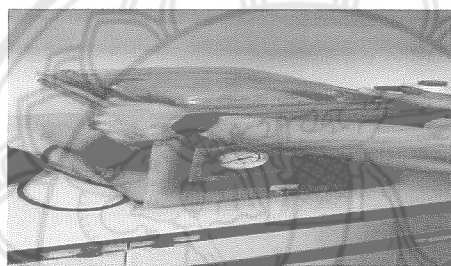
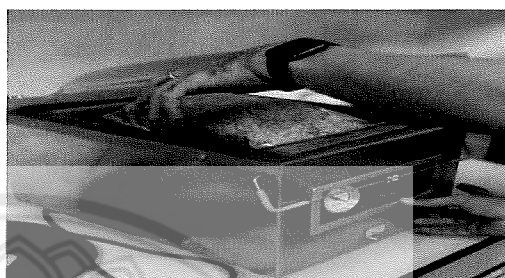
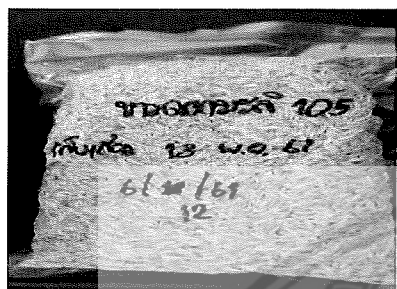
### 3.2.2 การจัดการปลูกข้าว

#### 1) จัดการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าว

นำข้าวเปลือกทั้ง 2 พันธุ์ จาก ศูนย์วิจัยข้าวชัยนาท และ ข้าวไรซ์เบอร์รี่จาก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน เก็บโดยการฉีกสุญญากาศเพื่อให้คงอัตราการงอก

ได้ดี โดยการใช้ถุงพลาสติกเคลือบไนลอนซึ่งปิดผนึกสุญญากาศด้วยเครื่องซีลสุญญากาศแบบตั้งโต๊ะ (ภาพที่ 3.1)

เมื่อผนึกสุญญากาศแล้ว เก็บถุงข้าวสุญญากาศภายใต้ระดับอุณหภูมิ 20-25°C เพื่อรักษา ระดับความชื้นไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาของการเก็บรักษาพันธุ์จนถึงช่วงการปลูก และ เพื่อรักษาอัตราการงอกของเมล็ดข้าวทั้ง 2 พันธุ์



ภาพที่ 3.1 เก็บรักษาพันธุ์ข้าว 2 พันธุ์ด้วยการผนึกสุญญากาศ เพื่อรักษา ระดับความชื้นและ รักษาอัตราการงอกของเมล็ด

### 3.2.2) การจัดการการปลูกข้าว

กำหนดการปลูกเดือน พฤษภาคม ในโรงเรือนปลูกซึ่งควบคุมระดับอุณหภูมิให้แตกต่างกัน ตามการคาดการณ์ของภาพฉายอนาคต IPCC 2 รูปแบบคือ RCP 4.5 และ RCP8.5

การจัดการการปลูกข้าวครั้งนี้ใช้วิธีการทำนาแบบนาดำ

การทำนาดำ เป็นวิธีการทำนามีการนำเมล็ดข้าวไปเพาะในถาดเพาะเมล็ดที่เตรียมไว้ (ภาพ 3.2) ให้ งามเป็นต้นกล้า แล้วถอนต้นกล้าไปปักดำในกระถางที่เตรียมไว้ (ภาพ 3.2)

1. การเตรียมดินในกระถาง จะใช้ดินที่ขุดมาจากนาจริง โดยจะใส่ดินในกระถางประมาณ  $\frac{3}{4}$  ของ กระถาง

2. การตกล้ำหรือการเพาะกล้า (เริ่มเพาะกล้า 17-20 พฤษภาคม 2562)

เพาะกล้า โดยทำการแช่ข้าวเปลือกก่อน เนื่องจากการแช่ข้าวเปลือกก่อนหว่านจะช่วยให้ได้เมล็ดข้าว ที่มีเปอร์เซ็นต์การงอกสูงกว่า โดยมีวิธีการดังนี้

- นำเมล็ดข้าวเปลือกทั้ง 2 สายพันธุ์ ห่อใส่ผ้าขาวบาง 2 ชั้น มัดให้แน่น แล้วนำแช่น้ำไว้ 1 คืน รุ่งเช้านำห่อข้าวเปลือกขึ้นจากน้ำทิ้งไว้ 2-3 วัน (17 พฤษภาคม 2562)
- เมื่อข้าวเปลือกเริ่มแตกตา แหงยอดอ่อน ก็นำข้าวเปลือกหยอดใส่ถาดเพาะกล้าเพื่อให้ข้าวมีอัตราการสูงขึ้น
- นำต้นกล้าอ่อนที่เพาะในถาดปลูกลงถึงปลูกที่สามารถขังน้ำได้ (20 พฤษภาคม 2562)

### 3. การเตรียมปุ๋ย

#### 3.1 การคำนวณจากพื้นที่ของถังปลูก โดยใช้สูตรพื้นที่วงกลม

สูตรพื้นที่วงกลม =  $\pi r^2$  โดยพื้นที่รัศมีของกระถางเท่ากับ 18.5 ซม.

$$\text{จะได้} = 3.14 \times 18.5 \text{ ซม.} \times 18.5 \text{ ซม.}$$

$$= 1,074.67 \text{ ตร.ซม.}$$

เปลี่ยนหน่วยจาก ตร.ซม. เป็น ตร.ม.

$$\text{จะได้} 10,000 \text{ ตร.ซม. เท่ากับ } 1 \text{ ตร.ม.}$$

$$\text{ถ้า } 1,074.67 \text{ ตร.ซม. จะได้ } (1,074.67 \text{ ตร.ซม.} \times 1 \text{ ตร.ม.}) / 10,000 \text{ ตร.ซม.} = 0.1074 \text{ ตร.ม.}$$

เปลี่ยนหน่วยจาก ตร.ม. เป็น ไร่

$$\text{จะได้} 1,600 \text{ ตร.ม. เท่ากับ } 1 \text{ ไร่}$$

$$\text{ถ้า } 0.1074 \text{ ตร.ม. จะได้ } (0.1074 \text{ ตร.ม.} \times 1 \text{ ไร่}) / 1,600 \text{ ตร.ม.} = 0.000067 \text{ ไร่}$$

ดังนั้น พื้นที่ของกระถางที่ใช้ปลูกข้าวมีพื้นที่ เท่ากับ 0.000067 ไร่/กระถาง

#### 3.2 การใส่ปุ๋ย

3.2.1 การปุ๋ยรองพื้นก่อนปลูกต้นกล้าข้าวลงกระถาง ใช้ปุ๋ยสูตร 16-16-16 ในอัตรา 25 kg/rai (ใส่ปุ๋ยรองพื้น 28 พฤษภาคม 2562 ก่อนนำต้นกล้าลงกระถาง 1 วัน)

วิธีคำนวณ กำหนดพื้นที่ของกระถางเท่ากับ 0.000067 ไร่

$$\text{จะได้} 1 \text{ ไร่ ใช้ปุ๋ย } 25,000 \text{ g.}$$

$$\text{ถ้า } 0.000067 \text{ ไร่ จะใช้ปุ๋ย } (0.000067 \text{ ไร่} \times 25,000 \text{ g.}) / 1 \text{ ไร่} = 1.675 \text{ g.}$$

ดังนั้น จะใช้ปุ๋ยรองพื้น สูตร 16-16-16 เท่ากับ 1.675 g./กระถาง

3.2.2 การใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1 ใช้ปุ๋ยสูตร 46-0-0 ในอัตรา 25 kg/rai

(ใส่ปุ๋ย 17 มิถุนายน 2562 อายุข้าว 28 วัน)

วิธีคำนวณ กำหนดพื้นที่ของกระถางเท่ากับ 0.000067 ไร่

$$\text{จะได้} 1 \text{ ไร่ ใช้ปุ๋ย } 25,000 \text{ g.}$$

$$\text{ถ้า } 0.000067 \text{ ไร่ จะใช้ปุ๋ย } (0.000067 \text{ ไร่} \times 25,000 \text{ g.}) / 1 \text{ ไร่} = 1.675 \text{ g.}$$

ดังนั้น จะใช้ปุ๋ยรองพื้น สูตร 46-0-0 เท่ากับ 1.675 g./กระถาง

3.2.3 การใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 ใช้ปุ๋ยสูตร 46-0-0 ในอัตรา 10 kg/rai (ใส่ปุ๋ย 12 กรกฎาคม 2562 อายุข้าว 53 วัน)

วิธีคำนวณ กำหนดพื้นที่ของกระถางเท่ากับ 0.000067 ไร่

จะได้ 1 ไร่ ใช้ปุ๋ย 10,000 g.

ถ้า 0.000067 ไร่ จะใช้ปุ๋ย  $(0.000067 \text{ ไร่} \times 10,000 \text{ g.}) / 1 \text{ ไร่} = 0.67 \text{ g.}$

ดังนั้น จะใช้ปุ๋ยรองพื้น สูตร 46-0-0 เท่ากับ 1.67 g./กระถาง

3.3 จุดบันทึกการเจริญเติบโตเมื่อเริ่มเห็นการรอด (emergence) ตั้งแต่วันที่ 7 ของการเพาะเมล็ด โดยข้าวโผล่ต้นกล้าอ่อนพ้นจากดิน (ประมาณวันที่ 27 พฤษภาคม 2562)

4. ย้ายปลูกลงกระถางวันที่ 29-30 พฤษภาคม 2562 เมื่อข้าวอายุ 9-10 วัน

5. การให้น้ำ จะให้น้ำตลอดระยะเวลาการปลูกข้าว

1.ระยะข้าวเป็นต้นกล้า : ต้นข้าวจะสูงประมาณ 7-10 เซนติเมตร ให้น้ำอยู่บริเวณโคนต้นกล้า 3-5 เซนติเมตรแล้วค่อยๆเพิ่มระดับน้ำ

2.ระดับน้ำช่วงข้าวแตกกอ : ระดับที่เหมาะสมประมาณ 5-10 เซนติเมตร ข้าวสามารถเจริญเติบโตได้ดี

3.ระดับน้ำช่วงข้าวสร้างรวงอ่อน (กำเนิดช่อดอก) ถึง ข้าวออกดอก: ระดับน้ำประมาณ 10-20 เซนติเมตร

4.ระดับน้ำหลังข้าวออกดอก คงรักษาระดับน้ำไปจนหลังข้าวออกดอกแล้ว 15-20 วัน จึงปล่อยให้แห้งในกระถางลดระดับลงจนแห้งก่อนเก็บเกี่ยว



ภาพที่ 3.2 เตรียมต้นกล้าข้าวและย้ายปลูกในโรงเรือน ทั้ง 2 สายพันธุ์



### 3.3 การสร้างสถานการณ์โลกร้อนภาคสนาม

การสร้างสถานการณ์โลกร้อนภาคสนามดำเนินการโดยการใช้โรงเรือนทดลองแบบประกอบและเคลื่อนย้ายได้ภาคสนามและเปิดด้านบนเพื่อให้อากาศระบายได้ (Field- Open Top Chamber System) ร่วมกับการควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมระดับอุณหภูมิ ให้แตกต่างกันที่ได้รับการคาดการณ์ในอนาคตภายใน ปี พ.ศ. 2643 (ค.ศ.2100) ร่วมกับซึ่งการกำหนดระดับอุณหภูมิ ตามที่ได้อ้างอิงจากการคาดการณ์ระดับอุณหภูมิในเขตภาคเหนือภายในปี ค.ศ. 2100 โดยการใช้แบบจำลองทางภูมิอากาศโดย ศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา (2559) และ การคาดการณ์ค่าเฉลี่ย CO<sub>2</sub> จาก IPCC ในช่วงปี ค.ศ. 2100 (2013) (ตารางที่ 3.1)

#### (1) Field-Open Top Chamber System

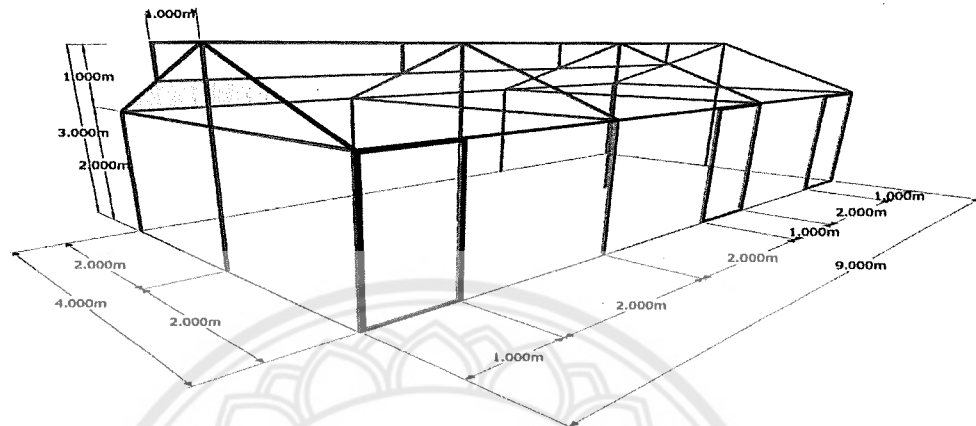
ใช้ตู้ทดลองแบบเปิดด้านบน (Open Top Chamber; OTC) สำหรับการทดลองภาคสนาม ขนาด 4 x 3 ตารางเมตร สูง 3 เมตร (ภาพแปลนโรงเรือน แสดงในภาพที่ 3.3) โดยจะประยุกต์มาจาก งานวิจัยในงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยนเรศวร 2556-2558 (กณิตา ธนเจริญชนภาส และโอรัส รักชาติ, 2552) โดยปรับปรุงและขยายขนาดให้เหมาะสมกับงานวิจัยในครั้งนี้ จำนวน 9 โรงเรือน ลักษณะของ Open Top Chamber คลุมด้วยพลาสติกใสรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เปิดหลังคาด้านบน และมีหลังคาหุ้มด้วยพลาสติกใสเพื่อกันน้ำฝน (เพื่อการควบคุมการได้รับน้ำฝน ความชื้น และ ป้องกันเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ภายในโรงเรือน) (ภาพ 3.4 และภาพ 3.5)

#### (2) การควบคุมสถานการณ์ตามภาพฉายอนาคต RCP

ควบคุมสถานการณ์ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยศึกษาปัจจัยร่วมเพื่อให้ได้สถานการณ์หลัก 2 สถานการณ์ ร่วมกับปัจจัยควบคุมที่มีสถานการณ์เทียบเท่ากับสภาวะปัจจุบัน เป็นสิ่งทดลองควบคุม 1 สถานการณ์ รวมทั้งหมดมี 3 สถานการณ์ (3 สิ่งทดลอง) ดังตารางที่ 1 และการควบคุมระดับอุณหภูมิ ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือที่สำคัญคือ

- ✓ การควบคุมระดับอุณหภูมิจะจัดการโดยการหลอดไฟแผ่นอินฟราเรด (หลอดไฟสีดำซึ่งแผ่รังสีอินฟราเรด แต่ไม่ปล่อยแสง visible light) ติดตั้งด้านบนของเพดานโรงเรือน จำนวนแผงอินฟราเรดจะเป็นตัวกำหนดระดับอุณหภูมิ เพื่อจำลองการแผ่รังสีอินฟราเรดสะท้อนกลับสู่พื้นโลกโดยก๊าซเรือนกระจก
- ✓ สิ่งทดลองชุดควบคุมคือสถานการณ์เทียบเท่ากับสภาวะปัจจุบันคือ สิ่งทดลองที่คุมระดับอุณหภูมิและให้เทียบเท่ากับระดับปัจจุบัน คือประมาณ 30-33°C ซึ่งคุมโดยการใช้แอร์คอนดิชันควบคุมระดับอุณหภูมิ

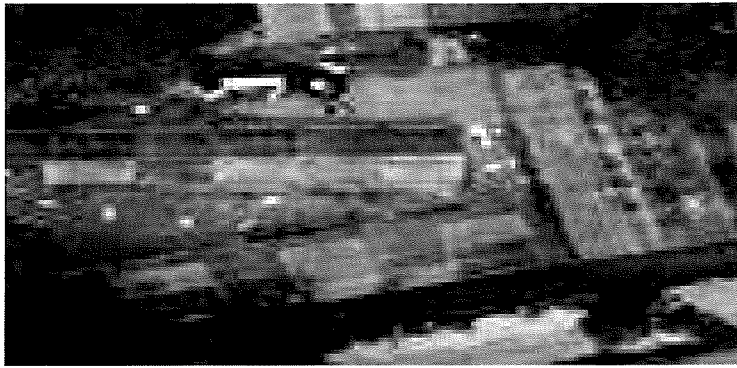
ระยะเวลาของการควบคุมระดับอุณหภูมิ ให้สถานการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นในเวลากลางวัน คือ ช่วงที่พืชมีการสังเคราะห์แสง ตั้งแต่ เวลา 7.00-17.00 น. โดยติดตั้งเครื่องควบคุมเวลาอัตโนมัติระบบการควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าว แสดงในภาพที่ 3.6



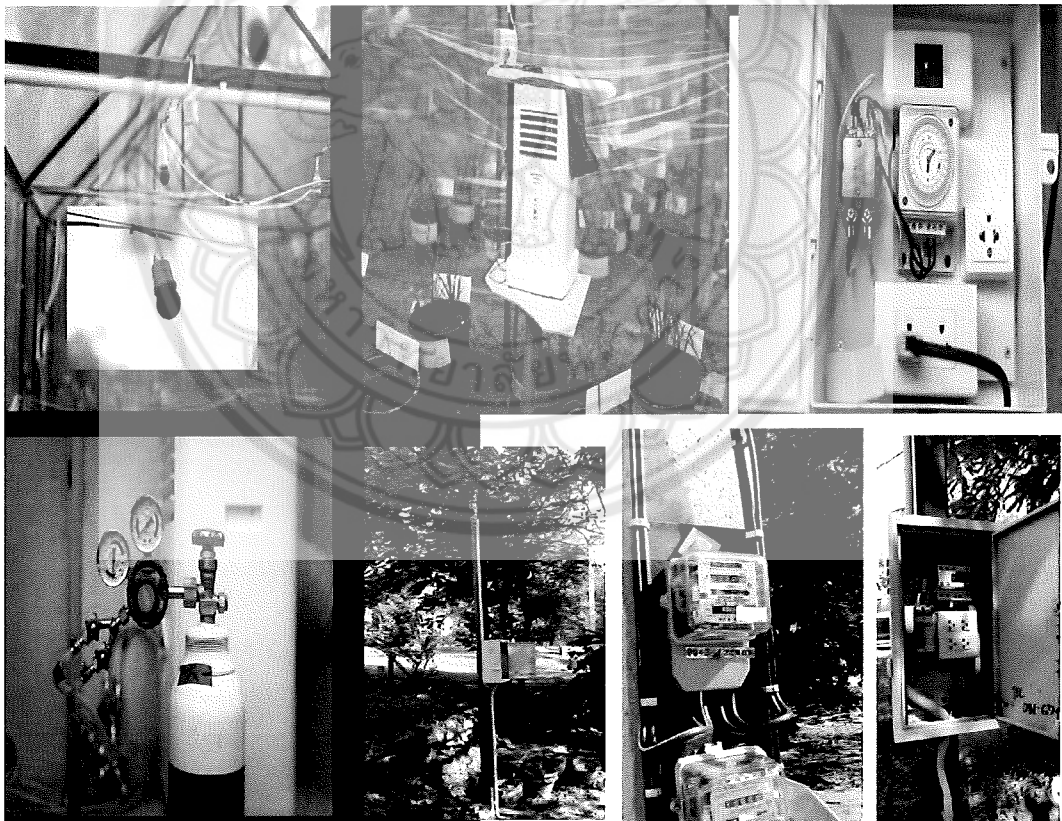
ภาพที่ 3.3 แพลนโรงเรือนทดลองขนาด 4 x 3 เมตร สูง 3 เมตร



ภาพที่ 3.4 ภาพโรงเรือนปลูกในการวิจัย



ภาพที่ 3.5 ภาพมุมสูงของโรงเรียนทั้งหมด 9 โรงเรียนสำหรับสิ่งทดลอง 3 สิ่งทดลอง 3 ชั้น



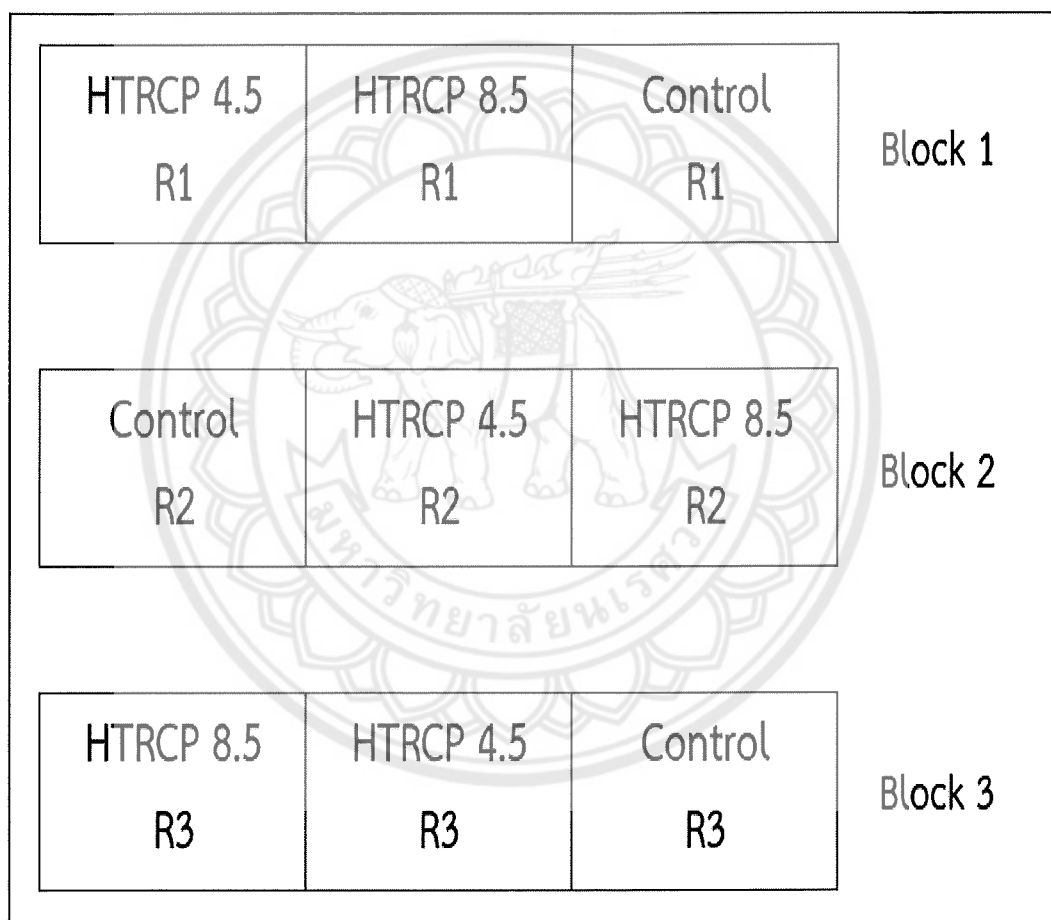
ภาพ 3.6 การใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ และระบบไฟฟ้าควบคุมระดับอุณหภูมิและระดับก๊าซ  $\text{CO}_2$  ในโรงเรียน

### 3.4 การวางแผนการทดลอง

กำหนดการปลูกในโรงเรือนโปร่งแสงกลางแจ้ง ดังนั้นอาจได้รับสิ่งแวดล้อมบางประการที่แตกต่างกัน (นอกเหนือจากปัจจัยคุมในเรื่องดิน น้ำ พื้นที่ปลูก) เช่น มุมรับแสง หรือ ทิศที่รับแสงในระหว่างช่วงกลางวัน ดังนั้นจึงวางแผนการทดลองในหน่วยการทดลองเป็นแบบ Random Completed Block Design (RCBD) สำหรับ 3 สิ่งทดลอง ทั้งหมด 3 ซ้ำ (3 replications)

กำหนดจำนวนสิ่งทดลอง ทั้งหมด 3 สิ่งทดลอง และมี 3 ซ้ำ ซึ่งการควบคุมระดับอุณหภูมิ 1 โรงเรือน = 1 สิ่งทดลอง ดังนั้น 1 สิ่งทดลองมี 3 ซ้ำ = 3 โรงเรือน

ในการทดลองทั้งหมด มี 3 สิ่งทดลอง ดังนั้นมีจำนวนโรงเรือนทั้งหมด = 9 โรงเรือน ซึ่ง



ผังของโรงเรือนจะกระจายไปตามพื้นที่ซึ่งมี 3 บล็อก ดังภาพที่ 3.7

ภาพที่ 3.7 ผังการวางโรงเรือนภาคสนามตามการวางแผนการทดลองแบบ แบบ Random Completed Block Design (RCBD) 3 ซ้ำ (3 blocks)

### 3.5 พารามิเตอร์ในการศึกษา

#### 3.5.1 การวัดระดับอุณหภูมิในโรงเรือน

ในการศึกษาวัดระดับอุณหภูมิและบันทึกผลระดับอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท ซึ่งแขวนภายในโรงเรือนทดลองทุกโรงเรือน (ภาพที่ 3.8) โดยบันทึกผลทุกกระยะ 2 ชั่วโมง ในช่วงกลางวัน ที่ได้ติดตั้งระบบอิเล็กทรอนิกส์ ตั้งแต่เวลา 7.00 น. ถึง 17.00 น. ในช่วงระยะเวลาการปลูก



ภาพที่ 3.8 การวัดระดับอุณหภูมิภายในโรงเรือนทดลอง ทั้ง 9 โรงเรือน ในช่วงระยะเวลาการปลูก 4 เดือน

#### 3.5.2 ธาตุอาหารในดินก่อนปลูก

ปริมาณธาตุอาหารในดินก่อนปลูก

การวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) โดย semi-micro Kjeldahl Method

การวิเคราะห์ไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ ( $\text{NO}_3^-$  และ  $\text{NH}_4^+$ ) โดย Steam distillation Method

การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (P) โดย วิธี Bray II ( $0.1\text{N}/\text{HCl} + 0.03 \text{NH}_4\text{F}$ )

การวิเคราะห์โพแทสเซียม (K) โดย วิธีแอมโมเนียอะซิเตท (การสกัดดิน)

- การวิเคราะห์ไนโตรเจนในดิน
- ✓ การวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมด (total N)

การวิเคราะห์ Total N โดยใช้วิธีการ semi-micro Kjeldahl method

1. การย่อยสลายดินตัวอย่าง มีขั้นตอนดังนี้

- (1) ชั่งตัวอย่างดินจำนวน 1.000 กรัม ใส่ใน kjeldahl flask
- (2) เติมสารเร่งปฏิกิริยา 1 กรัม เติมกรดกำมะถันเข้มข้นจำนวน 5 มิลลิลิตร
- (3) เขย่าเบาๆแล้วนำไปวางบนเตา digest ในระยะแรกให้ใช้ไฟอ่อน
- (4) Digest จนสีของเหลวเริ่มใสเคียวต่อไปอีก 20-30 นาที จึงยกออกจากเตา
- (5) รินน้ำกลั่นปริมาณ 10 มิลลิลิตร ลงไปรอบ ๆ ก้านหลอด kjeldahl flask ปลดอวจนเย็นอีกครั้งหนึ่ง แล้วเทใส่ volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร เมื่อเย็นลงแล้วให้ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร แล้วปล่อยให้จมนตกตะกอน

2. การกลั่น

- (1) รินน้ำยา boric acid indicater ประมาณ 5 มิลลิลิตร ใส่ Erlenmeyer flask ขนาด 50 มิลลิลิตร นำไปวางไว้ที่ก้าน condenser ของเครื่องกลั่น
- (2) ดูดสารละลาย 10 มิลลิลิตร ใส่ใน distillation flask
- (3) เติมสารละลาย NaOH 40% จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงใน distillation flask

3. การไทเทรต

นำสารละลายใน Erlenmeyer flask ของแต่ละตัวอย่างที่กลั่นได้ไปไทเทรตด้วย standard  $H_2SO_4$  0.02N จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วงแดง และจดบันทึกเพื่อคำนวณหาปริมาณ N ซึ่งคิดคำนวณได้จากสูตรดังนี้

วิธีการคำนวณ

$$\%T - N = \frac{(A - B) \times C \times 14 \times 100ml. \times 100}{1000 \times aliquot (ml.) \times sample wt. (g)}$$

✓ การวิเคราะห์ไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์

การวิเคราะห์ไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ โดยใช้วิธีการ Steam distillation method

1. การสกัดดิน

- (1) นำตัวอย่างดินจำนวน 10 กรัม ใส่ใน Erlenmeyer flask ขนาด 250 มิลลิลิตร
- (2) เติมน้ำยาสกัด 2N KCL จำนวน 100 มิลลิลิตร ปิดปาก Erlenmeyer flask ด้วยจุกยางให้แน่น
- (3) เขย่า 60 นาที กรองใส่ขวดพลาสติก
- (4) เตรียม blank

2. การกลั่น

2.1 การกลั่นหา  $NH_4$

(1) รินน้ำยา boric acid indicater ประมาณ 5 มิลลิลิตร ใส่ Erlenmeyer flask ขนาด 50 มิลลิลิตร นำไปวางไว้ที่ก้าน condenser ของเครื่องกลั่น

(2) ตูดสารละลาย 20 มิลลิลิตร ใส่ใน distillation flask

(3) เติม MgO ประมาณ 0.2 กรัม

## 2.2 การกลั่นหา NO<sub>3</sub>

(1) รินน้ำยา boric acid indicater ประมาณ 5 มิลลิลิตร ใส่ Erlenmeyer flask ขนาด 50 มิลลิลิตร นำไปวางไว้ที่ก้าน condenser ของเครื่องกลั่น

(2) เติม devarda alloy ประมาณ 0.2 กรัม ลงใน flask เติมที่กลั่นหา NH<sub>4</sub>

## 3. การไทเทรต

นำสารละลายใน Erlenmeyer flask ของแต่ละตัวอย่างที่กลั่นได้ไทเทรตด้วย standard H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.005N จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วงแดง และจดบันทึก เพื่อนำไปคำนวณจากสูตรได้ดังนี้

## วิธีการคำนวณ

$$\text{NH}_4 \text{ หรือ } \text{NO}_3 \text{ (มก./ดิน 1 กก.)} = \frac{(A - B) \times C \times 14 \times 1000}{\text{aliquot (ml.)} \times \text{oven soil (g.)}}$$

## ➤ การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน

การวิเคราะห์โดยใช้วิธี Bray II (0.1N HCL+0.03 NH<sub>4</sub>F)

### 1. วิธีการสกัดดิน

ชั่งดิน 2 กรัม ใส่ใน Erlenmeyer flask ขนาด 50 มล. เติมน้ำยาสกัด Bray II 20 มล. เขย่าด้วยมือ 40 วินาที แล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5

### 2. วิธีวิเคราะห์

เตรียมสารละลายมาตรฐานจาก Standard P solution 5 µg/ml โดยตูดสารละลาย 1,2,3,4 และ 5 มล. ใส่ใน volumetric flask ขนาด 25 มล. เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 15 มล. แล้วเติมน้ำยา ascorbic acid 5 มล. ปรับให้ได้ 25 มล. ปิดจุกแล้วเขย่าทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที จะได้สารละลายคงที่สีน้ำเงิน แล้วนำไปวัดความเข้มข้นของสีโดยเทียบกับสารละลายมาตรฐานด้วยเครื่อง spectrophotometer ช่วงคลื่นที่ 882 nm. แล้วจดบันทึกค่า

### วิธีคำนวณ

$$\mu\text{g P/g} = \mu\text{g P/ml from standard curve} \times \frac{\text{total volume}}{\text{aliquot}} \times \frac{\text{ml. of extractant}}{\text{wt. of sample}}$$

### ➤ การวิเคราะห์โพแทสเซียมในดิน

การวิเคราะห์โดยวิธีการแอมโมเนียมอะซิเตท (Ammonium Acetate Method)

1. ชั่งดินจำนวน 5 กรัม ใส่ใน Erlenmeyer flask ขนาด 125 มล.
2. ใส่น้ำยาสกัด 1N NH<sub>4</sub>OAc (pH 7.0) 50 มล. ปิดจุกยาง
3. เขย่าด้วยเครื่องนาน 30 นาที แล้วกรองใส่กระดาษเบอร์ 5
4. นำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นโดยใช้ atomic absorption spectrophotometer ที่ช่วงคลื่น 285.2 nm.

### วิธีการคำนวณ

$$c \text{ mole } \frac{M}{kg} \text{ soil} = \frac{\text{ปริมาตรสกัด (มล.)}}{\text{นน. ดิน (กรัม)}} \times \frac{1}{10} \times \text{meq } M \text{ ต่อลิตร}$$

### 3.5.3 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์

#### 1) การวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์

1.1 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (หน่วย mg/g/day) เปรียบเทียบใน 2 ระยะการเจริญเติบโตคือ ช่วงแตกกอ และ ช่วงระยะเก็บเกี่ยว ซึ่งทำให้ต้องมีการวางแผนบันทึกผลการเจริญเติบโตของใบในทั้ง 2 ระยะเพื่อเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ที่อย่างแม่นยำ

1.2 การบันทึกผลของการเจริญเติบโตของใบ มีดังนี้

- 1.2.1 ความยาวใบเฉลี่ยในแต่ละช่วงอายุ
- 1.2.2 พื้นที่ใบทั้งหมด/ต้นในแต่ละช่วงอายุ
- 1.2.3 น้ำหนักใบทั้งหมด /ต้นในแต่ละช่วงอายุ
- 1.2.4 พื้นที่ใบทั้งหมด/น้ำหนักใบทั้งหมด (LAR)

1.3 นำผลการบันทึก ในข้อ 1.2 มาคำนวณเพื่อหาค่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate: RGR) ใช้วิธีของ Blackman (1919) โดยมีสูตรการคำนวณดังนี้



### อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate: RGR)

$$RGR = NAR \cdot LAR$$

เมื่อ;

$$NAR = \frac{(W_2 - W_1)}{(T_2 - T_1)} \times \frac{(\ln LA_2 - \ln LA_1)}{(LA_2 - LA_1)}$$

เมื่อ RGR (Relative Growth Rate) = อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์

NAR (Net Assimilation Rate) = อัตราการสร้างน้ำหนักต่อพื้นที่ผิวใบต่อเวลา

LAR (Leaf Area Ratio) = สัดส่วนพื้นที่ผิวใบต่อน้ำหนักทั้งหมดของพืช

W = น้ำหนักใบ (weight)

LA = พื้นที่ใบ (leaf area)

T = จำนวนวันที่ใช้คำนวณอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์,  
ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดไว้ที่ 100 วัน (time)

#### 3.5.4 การวิเคราะห์รงควัตถุในใบ

เก็บตัวอย่างใบพืชที่ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น (Vegetative Stage) ในระยะแตกกอ ระยะแตกกอ (tillering stage) (อายุข้าว 40 วัน) ของข้าวทั้ง 6 พันธุ์ เป็นระยะการได้รับสัมผัสกับสภาวะอุณหภูมิและระดับ CO<sub>2</sub> ที่ควบคุมได้ 30 วัน ซึ่งการวิเคราะห์หาปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์ทั้งหมด และแคโรทีนอยด์ ใช้วิธีของ Lichtenthaler and Wellbern (1983) ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณรงควัตถุในใบ

1. เก็บตัวอย่างใบที่มีความยาวสูงสุด และเด็ดใบให้แห้งสนิท รวมทั้งเป่าให้แห้ง
2. นำใบที่แห้งสนิท ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อความสะดวกในการบดในขั้นตอนต่อไป
3. ชั่งตัวอย่างใบสดของแต่ละซ้ำ ให้ได้ 1 กรัม/ซ้ำ
4. เตรียมอะซิโตน 80%
5. นำตัวอย่างใบที่เตรียมไว้ มาบดในโถรงบดให้ใบพืชละเอียด โดยเท 80% acetone ในโถรงบดประมาณ 20 มิลลิลิตร เพื่อสกัดรงควัตถุ แล้วทำการบดต่อ เมื่อสังเกตใบเริ่มละเอียดแล้ว จากนั้นเติม 80% acetone เพิ่ม 20 มิลลิลิตร และบดซ้ำอีกครั้ง

6. ให้เทส่วนที่เป็นสารละลายจากในโกร่งบด ผ่านกระดาษกรอง Whatman No.1 ลงใน Bucher funnel ซึ่งรองรับด้วยขวดรูปชมพู่สำหรับกรองด้วยความดัน (suction flask) เพื่อทำการกรองสุญญากาศ (suction filtration) ซึ่งขณะที่เทสารละลายก็ค่อยๆ เติม 80% acetone ที่เหลือประมาณ 30 มิลลิลิตร จนไม่มีสีเขียวบนกระดาษกรอง รินสารละลายที่เตรียม เทลงในขวด Flask ขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วย 80% acetone

7. นำสารละลายที่สกัดตรงควัตถุ มาวัดค่าดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่มีความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร 645 นาโนเมตร (Chlorophyll b) และ 470 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง spectrophotometer เปรียบเทียบกับสารละลายแบงค์ (Blank) ซึ่งใช้ 80% acetone ทำการวัดซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง

8. จดบันทึกและคำนวณปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์ทั้งหมด และแคโรทีนอยด์ดังต่อไปนี้

สูตรการคำนวณ โดย Lichtenthaler and Wellburn (1983) and Barnes et al., (1992) ดังนี้

$$\text{Chl total} = (20.2 \times A_{645}) + (8.02 \times A_{663})$$

$$\text{Chl}_a = (12.7 \times A_{663}) - (2.69 \times A_{645})$$

$$\text{Chl}_b = (22.9 \times A_{645}) - (4.68 \times A_{663})$$

$$\text{Carotenoid} = [(1000 \times A_{470}) - (3.27\text{Chl}_a) - (104\text{Chl}_b)]/229,$$

เมื่อ  $A_{470}$  = absorbance at 470 nm.

$A_{645}$  = absorbance at 645 nm.

$A_{663}$  = absorbance at 663 nm.

$\text{Chl}_a$  = concentration of chlorophyll a (mg/g of fresh leaf)

$\text{Chl}_b$  = concentration of chlorophyll b (mg/g of fresh leaf)

Carotenoids = concentration of carotenoids (mg/g of fresh leaf)

### 3.5.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบผลผลิต

#### การวิเคราะห์องค์ประกอบผลผลิต

เมื่อข้าวมีอายุในช่วงการเก็บเกี่ยว ทำการเก็บข้าวทั้งรวงโดยห่อพลาสติกบริเวณรวงทุกรวงเพื่อป้องกันการร่วงของเมล็ดข้าวและนำการวิเคราะห์ผลผลิต ซึ่งวิจัยครั้งนี้เลือกการวิเคราะห์องค์ประกอบผลผลิตบางประการที่สำคัญดังนี้

(1) จำนวนรวงทั้งหมดต่อกอ (no. of panicles per hill)

นับจำนวนรวงทั้งหมดซึ่งเป็นรวงที่มีเมล็ดข้าวออกต่อกอ

(2) เปอร์เซ็นต์ของการเมล็ดสมบูรณ์ต่อรวง (% filled grains per panicle)

นับแยกเมล็ดสมบูรณ์คือเมล็ดที่มีการเจริญของข้าวเต็มเมล็ด และเมล็ดลีบหรือเมล็ดที่มีการเจริญของข้าวไม่สมบูรณ์อย่างชัดเจน และคำนวณเปอร์เซ็นต์ของเมล็ดสมบูรณ์ต่อรวง

(3) ชั่งน้ำหนัก 100 เมล็ด

นำเมล็ดข้าวที่เป็นเมล็ดสมบูรณ์และตากไล่ความชื้นไม่เกิน 10 % มาชั่งน้ำหนัก 100 เมล็ด

(4) คำนวณผลผลิตรวมหน่วยตัน/เฮกแตร์

วิเคราะห์ปริมาณผลผลิตโดยคำนวณผลผลิตหน่วยเป็นตัน/เฮกแตร์ จากสูตร Yoshida (1981) ดังสูตร

$$\text{Grain yield (t/ha)} = \text{no. of panicles per m}^2 \times \% \text{ filled grains per panicle} \times 1000\text{-grain weight (g)} \times 10^{-5}$$

เมื่อ; no. of panicles per m<sup>2</sup> คือ จำนวนรวงทั้งหมดต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร (no. of panicles per m<sup>2</sup>)

% filled grains per panicle คือ เปอร์เซ็นต์ของการติดเมล็ดต่อรวง (% filled grains per panicle)

1000-grain weight (g) คือ น้ำหนัก 1000 เมล็ด (g) (1000-grain weight (g))

### 3.5.6 การวิเคราะห์สารอาหารสำคัญในข้าว

การวิเคราะห์สารอาหารสำคัญในข้าวสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ เลือกวิเคราะห์สารอาหารและคุณสมบัติที่เป็นตัวชี้วัดสำคัญในการบอกคุณลักษณะและคุณภาพของผลผลิตสำหรับโภชนาการของผู้บริโภค คือ อะมิโลส อะมิโลเพคติน กรดไขมันชนิดสำคัญ 3 ชนิด คือ กรดพาล์มมิติก กรดโอเลอิก และกรดไลโนเลนิก รวมทั้งค่าความหวานของข้าว ซึ่งมีวิธีการดังนี้

#### วิธีการเตรียมตัวอย่างข้าวเพื่อทำการวิเคราะห์

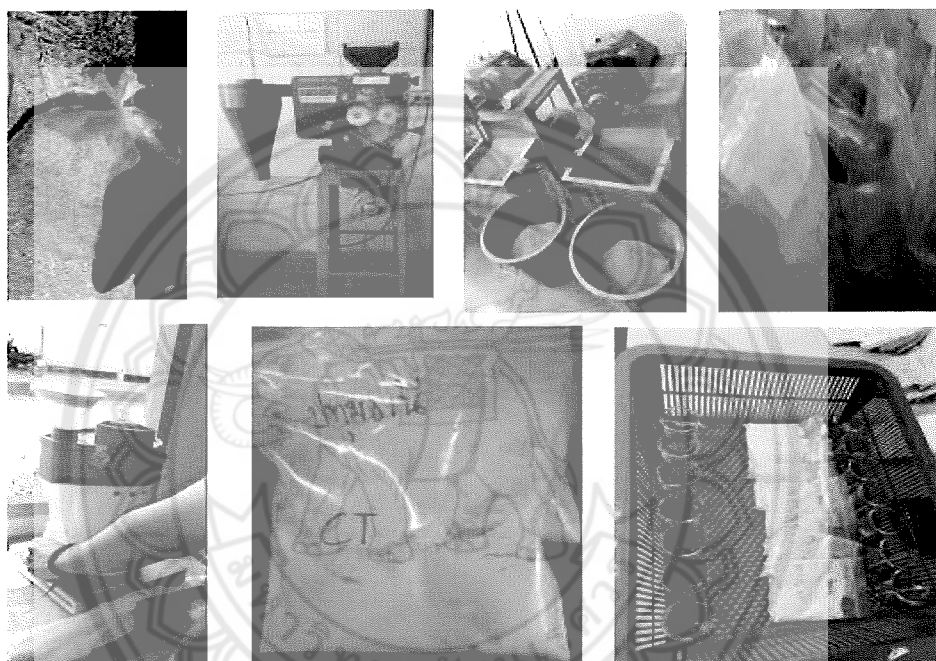
ในการวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจากเมล็ดข้าว ซึ่งก่อนที่จะนำไปทำการศึกษาวเคราะห์สารอาหารที่สำคัญนั้นจะต้องเตรียมบดเมล็ดข้าวให้มีความละเอียดสูงสุดก่อนโดยมีวิธีการดำเนินการดังนี้

(1) นำข้าวที่ได้ผลผลิตของทุกพันธุ์มาคัดเมล็ดลีบ และเมล็ดเสียออก

(2) ตากข้าวกลางแจ้งให้มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่ำที่สุด

(3) นำข้าวมาสีให้เป็นข้าวขัดขาวโดยเครื่องกระเทาะเปลือกข้าว และนำไปบดให้ละเอียดโดยเครื่องบดอาหารแห้ง

(ในการศึกษาครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์เครื่องกระเทาะเปลือกข้าวและบดละเอียด โดยศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก) รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 การเตรียมตัวอย่างข้าวเพื่อบดละเอียดสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพสารอาหารในเมล็ดข้าว

การวิเคราะห์สารอาหารสำคัญในเมล็ดข้าวตามพารามิเตอร์ที่กำหนดในขอบเขตการศึกษา มีรายละเอียดดังนี้

#### 2.5.6.1 การวิเคราะห์กรดไขมัน

ปริมาณกรดไขมันเป็นองค์ประกอบที่พบมากในคัพภะ เป็นสารอาหารสำคัญที่ใช้ในการสกัดน้ำมันรำข้าว ในการวิจัยเลือกวิเคราะห์กรดไขมันที่มีอยู่ในปริมาณสูงในเมล็ดข้าว

ส่งวิเคราะห์ผล โดยวิธีการ GC-MS ณ ศูนย์วิทยาศาสตร์ฮาลาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1) กรดพาล์มมิติก (palmitic acid )

2) กรดโอเลอิก (oleic acid)

3) กรดลิโนเลอิก (linoleic acid)

วิเคราะห์โดยวิธีการ Extraction and GLC

### 3.5.6.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของแป้ง

วิเคราะห์คาร์โบไฮเดรตในเมล็ดข้าวในรูปของแป้งซึ่งส่งผลต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าว ซึ่งจะวิเคราะห์สารประกอบในแป้ง 2 ชนิดคือ อะมิโลส (amylose) และ อะมิโลเพคติน (amylopectin)

ศึกษาปริมาณอะมิโลส และ อะมิโลเพคติน โดยวิธีการทำให้เกิดสี ดัดแปลงจากวิธีการของ Knutson (1986) ทำการวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่ปรากฏโดยเตรียมตัวอย่างแป้งจำนวน 0.02-0.025 กรัม ละลายใน 1.5 mL DMSO ในสารละลายไอโอดีน ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เก็บไว้ในที่มืด 24 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 620 nm โดยใช้สารอะมิโลสมาตรฐาน type ( III ) สำหรับทำกราฟมาตรฐาน

### การวิเคราะห์หาปริมาณอะมิโลส

#### สารเคมี

1. สารละลาย Iodine ชั่ง Potassium Iodine 40 กรัม ( โดยเตรียม Iodine 4 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 2,000 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เก็บไว้ในขวดทึบแสง)
2. NaOH 1 N (โดยเตรียม NaOH 80 กรัม ละลายในน้ำต้มเดือดที่ทิ้งไว้ให้เย็น 2,000 มิลลิลิตร)
3. Acetic acid เจือจาง (โดยเตรียม Acetic acid 115 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น 2,000 มิลลิลิตร)

#### วิธีการ

1. ชั่งแป้ง 0.1000 กรัม ใส่ลง Flask ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. บีบอัดเฮกซ์แอลกอฮอล์ 1 มิลลิลิตร ลงในขวด Flask จากนั้นเขย่าเบาๆ (ระวังอย่าให้แป้งติดที่ขอบขวด)
3. เติม 1 N NaOH 9 มิลลิลิตรลงในขวด และทิ้งไว้รอให้แป้งละลาย
4. เมื่อแป้งละลายได้ที่ นำสารละลายที่ได้ต้มให้สารละลายคงตัว 10 นาที และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
5. จากนั้นปิดจุกเขย่า และตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
6. นำ Flask ขนาด 100 มิลลิลิตร (ขวดใหม่) เติมน้ำกลั่นประมาณ 50 มิลลิลิตร และเติมกรด Acetic acid 1 มิลลิลิตร
7. จากนั้นบีบอัดสารละลายแป้งที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 1-5 บีบอัด 5 มิลลิลิตร และสารละลาย Iodine 2 มิลลิลิตร ใส่ลงใน Flask ที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 6
8. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
9. นำไปทดสอบปริมาณอะมิโลส ด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 620 nm.

10. การหาค่าอะมิโลเพคตินทำโดยการนำปริมาณอะมิโลสมาลบออกจาก 100 (สุนีย์ สหส์โพธิ์, 2558)

### 3.5.6.3 การวิเคราะห์ค่าความหวานในเมล็ด (Brix Value)

วิเคราะห์หาค่าความหวานของข้าวในแต่ละ treatment โดยเครื่องมือและวิธีการดังนี้ (ภาพที่ 3.10)

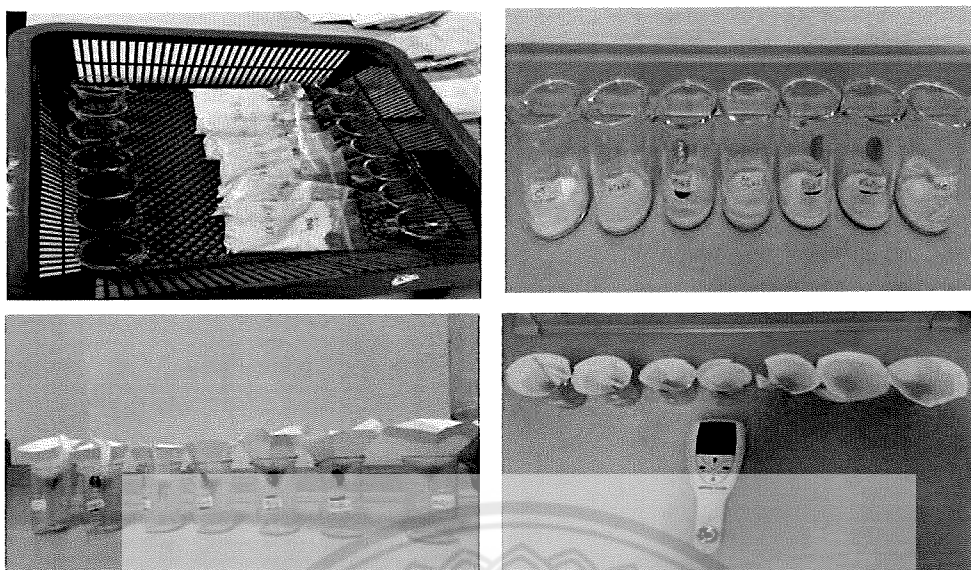
เครื่องมือ

1. เครื่อง Refractometer ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น Refracto 30PX
2. ตู้อบลมร้อน
3. เครื่องชั่งละเอียด
4. กรดซัลฟูริกเข้มข้น
5. น้ำกลั่น

วิธีการ

วิเคราะห์ความหวานโดยการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก

1. ชั่งตัวอย่างแบ่งข้าว ตัวอย่างละ 1 กรัม และเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 30% 1.5 มิลลิลิตร เพื่อได้สัดส่วน 1:1.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร)
2. คนผสมตัวอย่างให้เข้ากัน เป็นเวลา 15 นาที แล้วเติมน้ำ 3 มิลลิลิตร
3. นำตัวอย่างที่ได้ไปไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
4. กรองตัวอย่างที่ไฮโดรไลซ์แล้วด้วยกระดาษกรอง
5. วัดเปอร์เซ็นต์ความหวาน(%Brix) ด้วยเครื่อง Refractometer



ภาพที่ 3.10 กระบวนการวิเคราะห์ค่าปริมาณความหวานของเมล็ดข้าว (Brix Value)

### 3.5.7 การวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระ

#### 3.5.7.1 การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอล (phenolic compound)

การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอล มีรายละเอียดดังนี้

(1) ขั้นตอนแรกคือการเตรียมสารสกัดข้าวโดยดัดแปลงแปลงวิธีของ Loypimai และคณะ (2010) โดยชั่งตัวอย่างข้าว 20 กรัม เติมสารละลายเมทานอลเข้มข้น 80% (v/v) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นด้วย Magnetic stirrer ที่อุณหภูมิห้อง นาน 20 นาที จากนั้นสกัดครั้งที่ 2 ด้วยเมทานอล 80% (v/v) ที่ประกอบด้วยสารละลายกรดไฮดรอกลอริกเข้มข้น 0.15% v/v ปริมาตร 50 มิลลิลิตร สกัดในสภาวะเดียวกัน สารสกัดที่สกัดได้กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 จากนั้นนำสารที่สกัดได้ ไประเหยแห้งด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศ (Rotary evaporator) ที่อุณหภูมิ 45°C จากนั้นนำไปแช่แข็งที่ -70°C แล้วนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่อง Vacuum dry ที่อุณหภูมิ 60°C จนแห้ง แล้วเก็บในขวดฝาเกลียวสีขาวที่อุณหภูมิ -25°C เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ในขั้นต่อไป

(2) ขั้นที่สอง เป็นการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด (Total phenolic compounds) ทำตามตามวิธีของ Loypimai และคณะ (2010) โดยดูดสารตัวอย่างสารสกัดข้าว 1 มิลลิลิตร เติมสารละลาย Folin-Ciocalteu ความเข้มข้น 10% ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 7.5% ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องนาน 25 นาที จนปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ หลังจากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 750 นาโนเมตร โดยเครื่อง spectrophotometer (Labomed, Inc., USA) นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้เปรียบเทียบกับกรดแกลลิก มาตรฐาน

### 3.5.7.2 การวิเคราะห์สารแอนโทไซยานิน (anthocyanin)

การวิเคราะห์สารแอนโทไซยานิน มีรายละเอียดดังนี้

วิธีการวิเคราะห์สารแอนโทไซยานิน ด้วยวิธี DPPH (ดีพี พีเอช (1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl) (DPPH) radical scavenging assay)

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้สารสกัดจากข้าวทั้ง 2 พันธุ์ดังนี้

1. การวิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ โดยการหาประสิทธิภาพของการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH free radical scavenging activity) (Butsat and Siriamornpun, 2010)

นำสารสกัดจากข้าว ปริมาตร 3 มิลลิลิตร เติมหเอทานอล 95% ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ปิเปต สารสกัดจากข้าว ปริมาตร 3 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง แล้วปิเปตสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตรเขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 nm คำนวณหาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

#### ตั้งสมการ

$$\% \text{ inhibition} = (\text{Acontrol} - \text{Asample}) / (\text{Acontrol}) * 100$$

Acontrol = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวควบคุม (สารละลาย DPPH กับเอทานอล)

Asample = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง

2. การหาปริมาณแอนโทไซยานินรวม โดยใช้วิธี pH differential method (Giusti and Wrolstad, 2001)

นำสารสกัดจากข้าว 100 ไมโครลิตร เติมตัวทำละลายโปตัสเซียมคลอไรด์ (0.025 M, pH 1.0) 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที นำสารสกัดจากข้าว 100 ไมโครลิตร เติมตัวทำละลายในสารละลายโซเดียมอะซิเตต (0.4M, pH 4.5) 5 มิลลิลิตร ลงไปตั้งทิ้งไว้ 5 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ช่วงคลื่น 510 nm และ 700 nm

#### คำนวณหาปริมาณแอนโทไซยานินรวม ตามสมการ

$$A = (A_{510} - A_{700})_{\text{pH } 1.0} - (A_{510} - A_{700})_{\text{pH } 4.5}$$

$$\text{TA content} = (A \times M_w \times \text{dilution factor} \times 100) / (\epsilon)$$

โดยที่ ;  $M_w = 449.2 \text{ g mol}^{-1}$ ,  $\epsilon = 26900 \text{ M cm}$ , dilution factor = 1



### 3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2553)

นำสารสกัดข้าว ชนิด และสารสกัดข้าวตามท้องตลาด ไปวัดค่า pH โดยใช้เครื่อง pH meter ทำการวัดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และ นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าเฉลี่ย

### 3.5.8 การวิเคราะห์ลักษณะทางพันธุกรรม

#### การตรวจวัดการแสดงคุณลักษณะทางพันธุกรรม

ตรวจวัดลักษณะการแสดงออกทางพันธุกรรม สัมพันธวิทยา (Phenotype) โดยใช้เทคนิค AFLPs (Amplified Fragment Length Polymorphism) สำหรับข้าวทั้ง 2 พันธุ์ โดยใช้ใบในช่วงระยะ R1-R3 ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างในระดับดีเอ็นเอซึ่งใช้ในการบ่งชี้และจัดจำแนกความแตกต่างที่เกิดขึ้นกับสายพันธุ์ในแต่ละสภาวะความแปรปรวน

วิธีการตรวจวัดการแสดงออกทางพันธุกรรมโดยใช้เทคนิค AFLP (Amplified Fragment Length Polymorphism) มีรายละเอียดดังนี้

#### วิธีการสกัดดีเอ็นเอจากตัวอย่างใบข้าว

1. ตัดตัวอย่างใบแล้วหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ลงในโถงสำหรับบดตัวอย่าง เติมนิโตรเจนเหลวให้ท่วมตัวอย่างและบดให้ละเอียด แล้วตักใส่หลอด 1.5 ml ประมาณครึ่งหลอด
2. เติม Extraction buffer (100 mM Tris-Cl, 1.4 M NaCl, 20 mM EDTA, 2% CTAB, 0.625% 2-Mercaptoethanol, 3% PVPP) 700  $\mu$ l ลงในหลอดตัวอย่าง ผสมให้เข้ากันดี incubate ที่ 65 °C นานประมาณ 1-2 ชั่วโมง
3. เมื่อครบเวลา นำหลอดออกจากตู้ incubator เติม Chloroform : Isoamyl alcohol (24:1) ปริมาตร 700  $\mu$ l ผสมเบาๆ นาน 20 นาที
4. Centrifuge 14,000 rpm นาน 20 นาที ย้ายส่วนใสใส่หลอดใหม่
5. เติม Chloroform : Isoamyl alcohol (24:1) ปริมาตร 700  $\mu$ l ผสมเบาๆ นาน 20 นาที
6. Centrifuge 14,000 rpm นาน 20 นาที ย้ายส่วนใสใส่หลอดใหม่
7. เติม 95% EtOH ที่เย็น ปริมาตร 2 เท่าของปริมาตรส่วนใส ผสมเบาๆ ให้เข้ากัน
8. Centrifuge 14,000 rpm นาน 10 นาที เทส่วนใสทิ้ง

9. เติม 70% EtOH ปริมาตร 500 ul กลับหลอดขึ้นลงอย่างเบาๆ และ Centrifuge 14,000 rpm นาน 10 นาที เทส่วนใสทิ้ง (ทำ 2 ซ้ำ) ลงอย่างเบาๆ และ Centrifuge 14,000 rpm นาน 10 นาที เทส่วนใสทิ้ง (ทำ 2 ซ้ำ)
10. ตากตะกอนให้แห้ง ที่ 65 °C แล้วเติม 1X TE buffer ปริมาตร 100 ul นำไป incubate ที่ 65 °C นาน 1 ชั่วโมง หรือจะกว่าตะกอนจะละลายหมด
11. เก็บตัวอย่างดีเอ็นเอที่อุณหภูมิ -20 °C จนถึงเวลาใช้งาน

### การตรวจสอบคุณภาพและปริมาณดีเอ็นเอของตัวอย่างข้าว

ตรวจสอบคุณภาพและปริมาณของดีเอ็นเอ โดยการเปรียบเทียบกับดีเอ็นเอมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น โดยใช้ 1% Agarose Gel Electrophoresis และย้อมแผ่นเจลด้วยสารละลาย ethidium bromide ตรวจสอบแถบดีเอ็นเอบนแผ่น agarose gel โดยส่องด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต บันทึกผลด้วยการถ่ายภาพ

### การเตรียม ดีเอ็นเอต้นแบบ

**Digestion & Ligation :** ทำการตัดสายดีเอ็นเอและต่อ adaptor ในขั้นตอนเดียว

ในปริมาตรทั้งหมด 30 ul ประกอบด้วย genomic DNA ของตัวอย่างข้าวเหลือง ประมาณ 100 ng, 1X T4 ligase buffer, 50 mM NaCl, 0.05 mg/ml BSA, 10U EcoRI (10U/ul, Fermentus), 5U MseI (10U/ul, BioLab), 2.6U T4 DNA Ligase (3U/ul, Promega), 10 pmol EcoRI-adaptor, 100 pmol MseI-adaptor นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C ซ้ำมคืน แบ่ง DNA ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาแล้ว จำนวน 10 ul ไปตรวจดูว่ามีการตัดที่สมบูรณ์หรือไม่โดยใช้ 1% agarose gel electrophoresis เมื่อพบว่า DNA มีการตัดที่สมบูรณ์ ให้นำ DNA ดังกล่าวมาเจือจางด้วย dH<sub>2</sub>O ประมาณ 10 เท่า เพื่อใช้เป็น ดีเอ็นเอต้นแบบ (DNA template) ในการเพิ่มปริมาณชิ้นส่วนดีเอ็นเอที่ต้องการโดยใช้ คู่ primer ต่างๆ หากยังไม่ได้ใช้งาน ให้เก็บ DNA ดังกล่าวไว้ที่อุณหภูมิ -20 °C

### การเพิ่มปริมาณชิ้นส่วน DNA ที่ต้องการ

1. Preselective : ทำการคัดเลือกชิ้นส่วน DNA โดยใช้ primer ที่มีเบสคัดเลือกรจำนวน 1-1 base

นำ DNA template มาทำการเพิ่มปริมาณ โดยมี PCR condition ดังนี้ : ในปฏิกิริยาการเพิ่มปริมาณชิ้นส่วนดีเอ็นเอที่ต้องการนั้น จะประกอบไปด้วย DNA ที่เจือจางแล้ว 3 ul, primer (ER-primer & MS-primer) สายละ 0.25 uM, 1X Taq buffer, 1.5 mM MgCl<sub>2</sub>, 200 uM dNTPs, และเอนไซม์ Taq DNA polymerase 0.3 unit ในปริมาตรทั้งหมด 10 ul

เมื่อผสมองค์ประกอบต่างๆเข้าด้วยกันแล้ว จึงนำไปใส่ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (GeneAmp<sup>R</sup> PCR System 9700 (Applied Biosystem)) ซึ่งมีอุณหภูมิต่างๆดังนี้คือ

50 °C	5 นาที	} 24 รอบ
94 °C	3 นาที	
94 °C	30 วินาที	
56 °C	1 นาที	
72 °C	1 นาที	
72 °C	5 นาที	

เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยา PCR ให้นำ PCR product ที่ได้มาเจือจางด้วย dH<sub>2</sub>O 10 เท่า แล้วจึงเก็บไว้เป็น DNA template สำหรับขั้นตอนต่อไป

2. Selective : ทำการคัดเลือกชิ้นส่วน DNA โดยใช้ primer ที่มีเบสคัดเลือกรจำนวน 3-3 base โดยใช้จำนวน primer ทั้งหมด 6 คู่

ในปฏิกิริยาการเพิ่มปริมาณชิ้นส่วนดีเอ็นเอที่ต้องการนั้นจะประกอบไปด้วย DNA ที่เจือจางแล้ว(จากขั้นตอนที่ 1) ปริมาตร 2 ul, primer (ER-primer & MS-primer) สายละ 0.25 uM, 1X Taq buffer, 1.5 mM MgCl<sub>2</sub>, 200 uM dNTPs, และเอนไซม์ Taq DNA polymerase 0.3 unit ในปริมาตรทั้งหมด 10 ul เมื่อผสมองค์ประกอบต่างๆเข้าด้วยกันแล้ว จึงนำไปใส่ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (GeneAmp<sup>R</sup> PCR System 9700 (Applied Biosystem)) ซึ่งมีอุณหภูมิต่างๆดังนี้คือ

94 °C	30 วินาที	} 9 รอบ โดยลด Annealing Temperature ลง 1 °C ทุกรอบ
65 °C**	30 วินาที	
72 °C	1 นาที	
94 °C	30 วินาที	} 30 รอบ
56 °C	30 วินาที	
72 °C	1 นาที	
4 °C	hold	

หลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยา หยุดปฏิกิริยาด้วย 5 ul Loading buffer (10 mM EDTA (pH 8.0), 98% formamide, Bromophenol Blue & Xylenecyanol)

ตรวจสอบผลการทำ PCR โดยใช้ 4.5 % Polyacrylamide Gel Electrophoresis : silver staining

### การวิเคราะห์ผล

ทำการให้คะแนนแถบดีเอ็นเอที่ปรากฏในแผ่นเจล เปรียบเทียบกันระหว่างตัวอย่างใบข้าว จำนวน 14 ตัวอย่าง ในตำแหน่งเดียวกัน ถ้าปรากฏแถบดีเอ็นเอ ให้คะแนน 1 ถ้าไม่ปรากฏแถบดีเอ็นเอ ให้คะแนน 0 โดยจะเลือกให้คะแนนเฉพาะแถบดีเอ็นเอที่เห็นชัดเจน

นำผลการให้คะแนนแถบดีเอ็นเอดังกล่าวไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างด้วยเครื่องโดยใช้ program NTSYSpc for Windows Version 2.02j รายงานผลเป็น Phylogenetic tree

### 3.6 กิจกรรมถ่ายทอดความรู้สู่ชุมชนเพื่อการสร้างแนวทางการรับมือในชุมชน

การถ่ายทอดความรู้สู่ชุมชนเพื่อการสร้างแนวทางการรับมือกับสภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ในชุมชน ซึ่งกำหนดพื้นที่ศึกษา คือ พื้นที่ศึกษา คือ ศูนย์การเรียนรู้ตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ต.รังนก อ.สามง่าม จ.พิจิตร

รูปแบบการดำเนินการของกิจกรรม โดยภาพรวมมีดังนี้

#### 1. ขั้นตอนการเตรียมการ

- 1.1 ประชุมร่วมกันของคณะที่มวิจัยและผู้ช่วยวิจัยเพื่อกำหนดกิจกรรม การประชุม และกำหนดตารางการดำเนินงาน
- 1.2 กำหนดวัน เวลา ในการประชุมของคณะผู้รับผิดชอบโครงการ
- 1.3 กำหนดกลุ่มเป้าหมายของการดำเนินงาน คือ

พื้นที่ศึกษา คือ ศูนย์การเรียนรู้ตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ต.รังนก

อ.สามง่าม จ.พิจิตร ซึ่งเป็นกลุ่มชุมชนเกษตรกรปลูกข้าวในพื้นที่

- 1.4 กำหนดวิทยากรและหัวข้อในการอบรมถ่ายทอดความรู้สู่ชุมชน โดยกำหนดหัวข้อดังนี้

- ความรู้พื้นฐานด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก
- ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศที่มีต่อ ผลผลิตทางการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบต่อผลผลิตข้าว
- การสร้างแนวทางการรับมือของภาคการเกษตร ที่มีต่อปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศโลก
- กิจกรรมการสร้างแนวทางให้ชุมชนระดมความคิดเห็นในการสร้างแนวทางการรับมือร่วมกัน

#### 1.5 ติดต่อวิทยากร

1.6 ประชาสัมพันธ์เพื่อรับผู้เข้าร่วมโครงการ

1.7 จัดเตรียมเอกสารและสื่อประชาสัมพันธ์ต่างๆ

เช่น ประสานจัดเตรียมสถานที่ รวมทั้งการจัดเตรียมป้ายประชาสัมพันธ์โครงการและสื่อสำหรับบรรยาย จัดเตรียมเอกสารในประเด็นการรับมือกับสภาวะโลกร้อนเพื่อผลผลิตข้าวในชุมชน

1.8 จัดเตรียมอาหารว่างและอาหารกลางวัน

1.9 สรุปขั้นตอนในการดำเนินงานในวันประชุม

(1) ลงทะเบียนและแจกเอกสาร

(2) พิธีเปิดโครงการอบรม

(3) บรรยายในหัวข้อ “การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและสภาวะโลกร้อนในภาพรวมของโลก และประเทศไทย”

(4) พักรับประทานอาหารว่าง

(5) บรรยายในหัวข้อ “การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและผลกระทบต่อคุณภาพและปริมาณของผลผลิตของข้าวไทย”

(6) พักรับประทานอาหารกลางวัน

(7) กิจกรรมแลกเปลี่ยนเรียนรู้ด้านการรับมือในภาคเกษตรกรรมที่มีต่อสภาวะโลกร้อน

(8) กิจกรรมร่วมกำหนดแผนการรับมือสภาวะโลกร้อนในภาคเกษตร

(9) ตอบข้อ-ซักถาม

(10) สรุปผลการศึกษา เพื่อส่งผล การสรุปให้แก่ชุมชนในพื้นที่ ต่อไป

### 3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดดัชนีในด้านต่าง ๆ มาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยเลือกใช้สถิติเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลระหว่าง 3 สิ่งทดลอง (3 treatments) และระหว่างพันธุ์ แบบ One Way ANOVA สำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยของสิ่งทดลอง และเลือกวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ทดสอบเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันกับผลกระทบต่อพารามิเตอร์ของทุกกลุ่มทดลอง เพื่อระบุความอ่อนไหว และ ความทนทานของทุกสายพันธุ์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในการวิจัย

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ผลการวิจัยสภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 2 ระดับ ภายใต้แนวโน้มของภาพฉายอนาคตที่รูปแบบ RCP 4.5 และ RCP 8.5 โดยการสร้างสภาวะเสมือนจริงให้เกิดขึ้นภายในโรงเรือนวิจัย ที่มีต่อปัจจัยต่างๆ ของข้าวจำนวน 2 พันธุ์ ที่นิยมปลูกในเขตภาคเหนือตอนล่าง ที่มีต่อปัจจัยในด้านต่างๆ คือ ปัจจัยชี้วัดการเจริญเติบโต รงควัสดุในใบ องค์กรประกอบผลผลิต สารอาหารสำคัญในเมล็ด สารแอนติออกซิแดนซ์ ลักษณะทางพันธุกรรม และ การสร้างแนวทางการมีส่วนร่วมชุมชนในพื้นที่มีรายละเอียดดังข้อมูลต่อไปนี้

#### 4.1 ระดับอุณหภูมิ ในชุดทดลอง

ผลการควบคุมระดับอุณหภูมิในระยะเวลาทำการวิจัย 4 เดือนช่วงที่ทำการปลูกข้าว พบว่าสามารถควบคุมระดับอุณหภูมิ ใน 3 สิ่งทดลองให้แตกต่างกันตามขอบเขตงานที่ได้กำหนดไว้ภายใต้ภาพฉายอนาคต RCP 4.5 และ 8.5 ดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

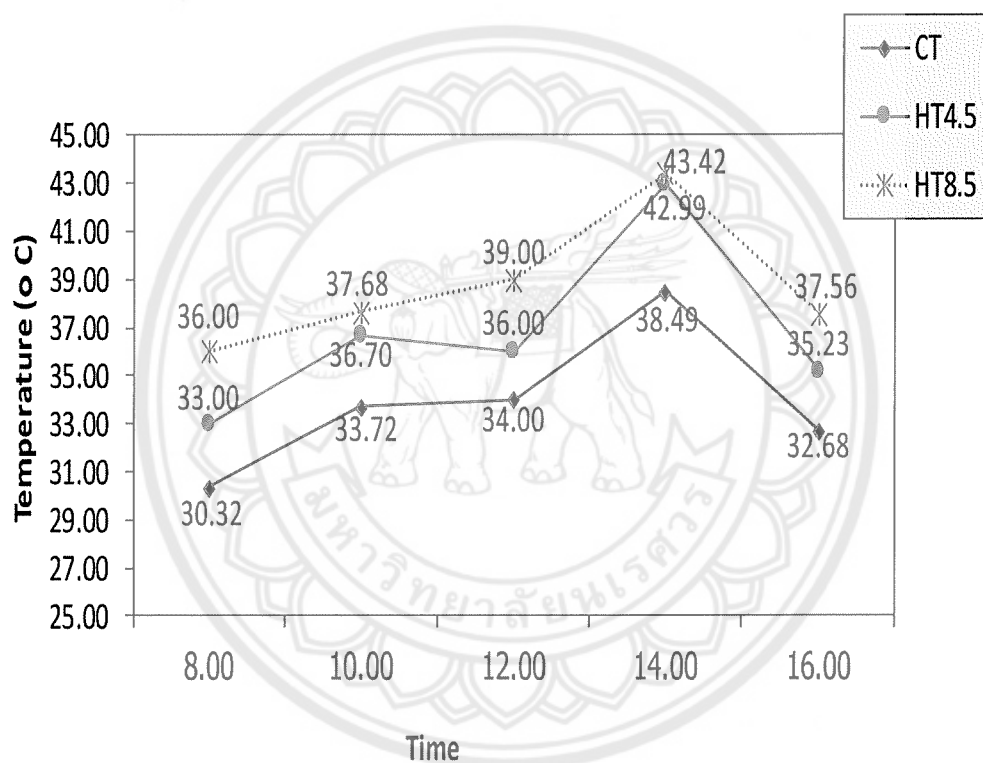
ตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันในระยะเวลาของแต่ละวัน ซึ่งพบว่าระดับอุณหภูมิในช่วงเวลา เช้า คือ 8.00 -10.00 น. ค่อนข้างมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่ระยะตั้งแต่ช่วงเวลา 12.00 เป็นต้นไป จนถึงเวลา 16.00 น. ระดับอุณหภูมิที่ระดับ RCP4.5 และ RCP 8.5 ยิ่งเพิ่มระดับความแตกต่างกับระดับที่ควบคุมอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามระดับอุณหภูมิในสิ่งทดลองควบคุม (CT) พบว่าค่อนข้างสูงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเช่นกัน ซึ่งแสดงอย่างชัดเจนในภาพที่ 4.1 อย่างไรก็ตาม เมื่อนำผลการศึกษามาคำนวณค่าเฉลี่ยทั้งวัน (ของระยะเวลา 4 เดือน) พบว่าสามารถควบคุมระดับอุณหภูมิให้เป็นไปตามที่กำหนด ซึ่งจะเห็นว่าระดับอุณหภูมิ ในสิ่งทดลอง HT 4.5 และ HT 8.5 มีระดับอุณหภูมิสูงกว่าระดับควบคุม (CT) ในระดับ  $2.61^{\circ}\text{C}$  และ  $4.5^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตาม RCP 4.5 และ 8.5 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2 ภาพที่ 4.1 และ ภาพที่ 4.2)

ตาราง 4.1 ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วง 4 เดือน ที่แตกต่างกัน 3 สิ่งทดลอง ซึ่งตรวจวัด 5 ช่วงระยะเวลาในเวลา / วัน

	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00
CT	30.32±0.56	33.72±1.24	34.00±1.00	32.02±0.44	32.68±0.16
HT4.5	33.00±1.01	36.70±2.13	36.00±0.51	34.85±0.43	35.23±0.14
HT8.5	35.00±0.06	37.68±0.10	39.00±0.31	36.34±0.50	37.23±0.98

ตารางที่ 4.2 ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน ในช่วงระยะเวลา 4 เดือน ใน 3 สิ่งทดลอง

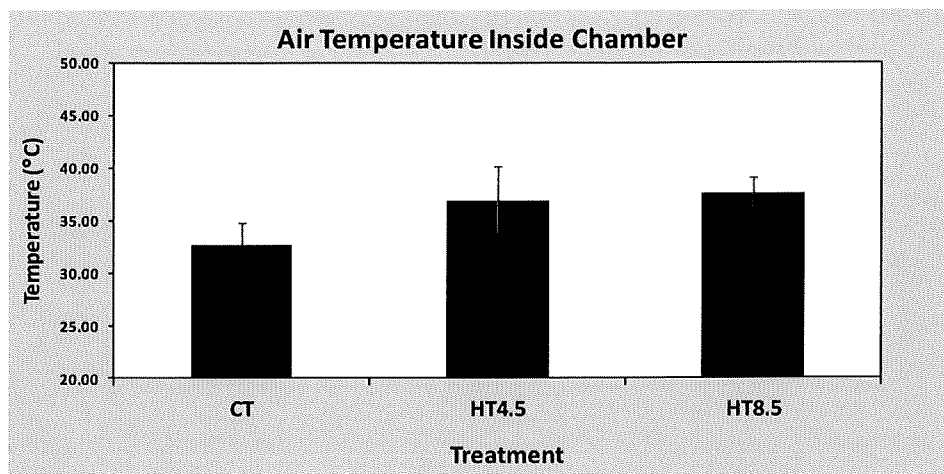
สิ่งทดลอง	ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งวัน ± SD (°C)	ระดับอุณหภูมิ ที่สูงกว่าสิ่งทดลอง CT (เฉลี่ย) (°C)
CT	32.55 ± 1.48	-
HT4.5	35.16 ± 1.4	2.61
HT8.5	37.05 ± 1.49	4.50



ภาพที่ 4.1 ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน(±SD) ที่บันทึกไว้ทุก 5 ช่วงเวลา/วัน ตั้งแต่เวลา 8.00 น. ถึง 16.00 น. ภายในโรงเรือน 3 สิ่งทดลอง ในช่วงระยะเวลา 4 เดือนของการบันทึกผล

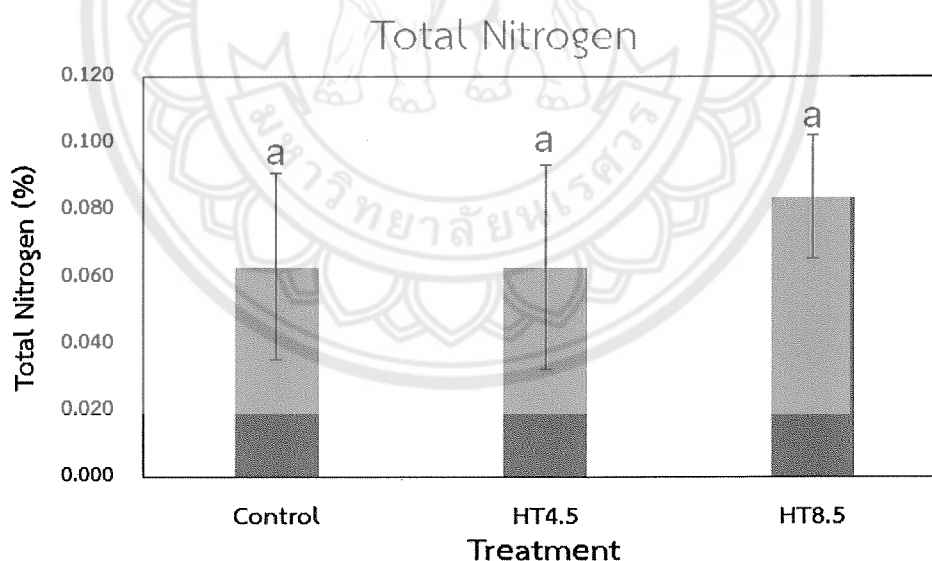
#### 4.2 ธาตุอาหารในดินก่อนปลูก

ในการวิจัย จำเป็นต้องวิเคราะห์ข้อมูลธาตุอาหารในดินซึ่งพืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ ก่อนทำการปลูกข้าวทั้ง 2 พันธุ์ เนื่องจากดินเป็นปัจจัยควบคุมที่ต้องจัดการไม่ให้ความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์ธาตุอาหารสำคัญคือ ไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) แอมโมเนียม (ammonium) ไนเตรท (nitrate) ฟอสฟอรัส (phosphorous) และโพแทสเซียม (potassium) ผลการศึกษาแสดงในภาพที่ 4.3-4.7



ภาพที่ 4.2 ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน ( $\pm$ SD) โดยเฉลี่ยภายในโรงเรือน 3 สิ่งทดลอง ในช่วงระยะเวลา 4 เดือนของการบันทึกผล

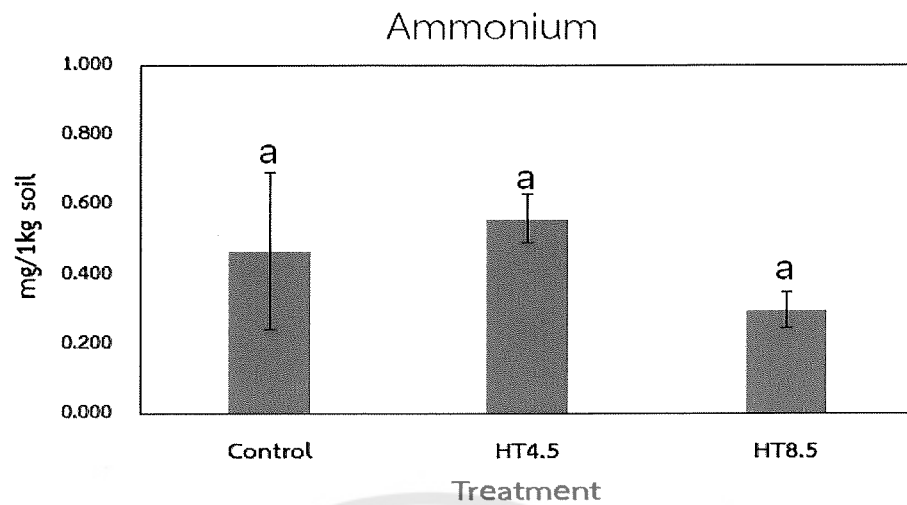
ผลการศึกษาปริมาณทั้งหมดของไนโตรเจน พบว่าดินที่เตรียมสำหรับปลูกข้าว 2 พันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ซึ่งผลการศึกษาในพารามิเตอร์อื่นๆ ก็มีลักษณะเช่นเดียวกันคือไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ )



ภาพที่ 4.3 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

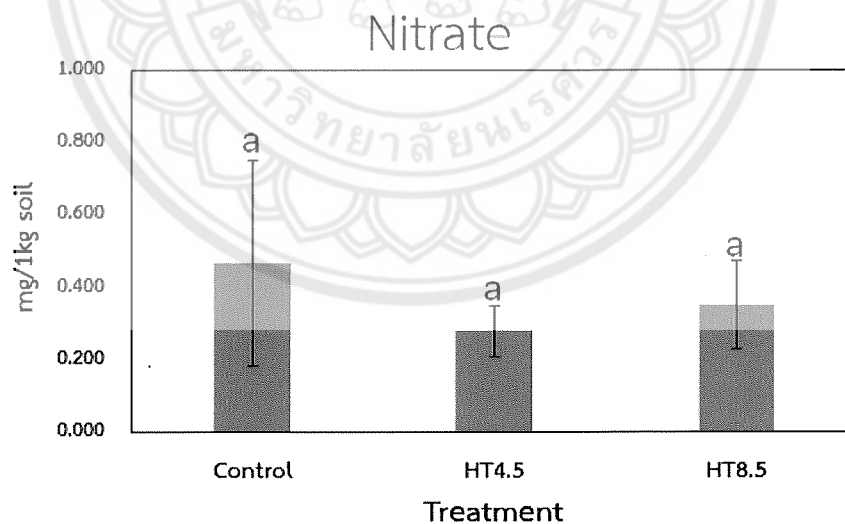
หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง





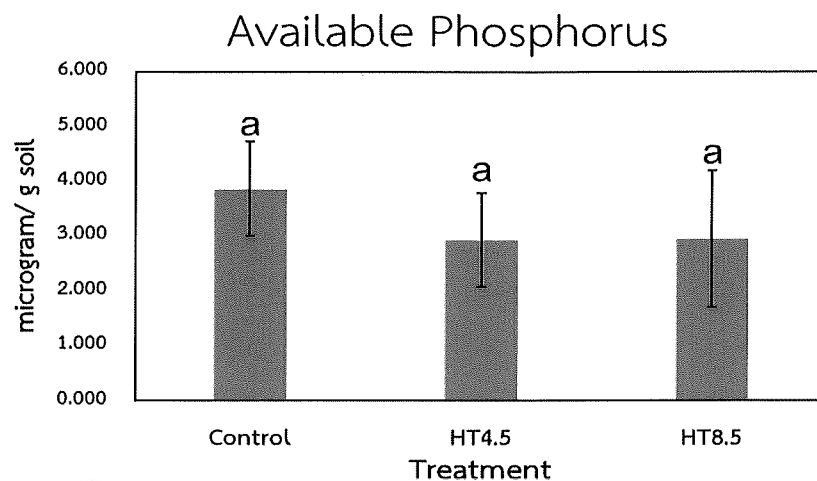
ภาพที่ 4.4 ปริมาณแอมโมเนียมในดินภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง



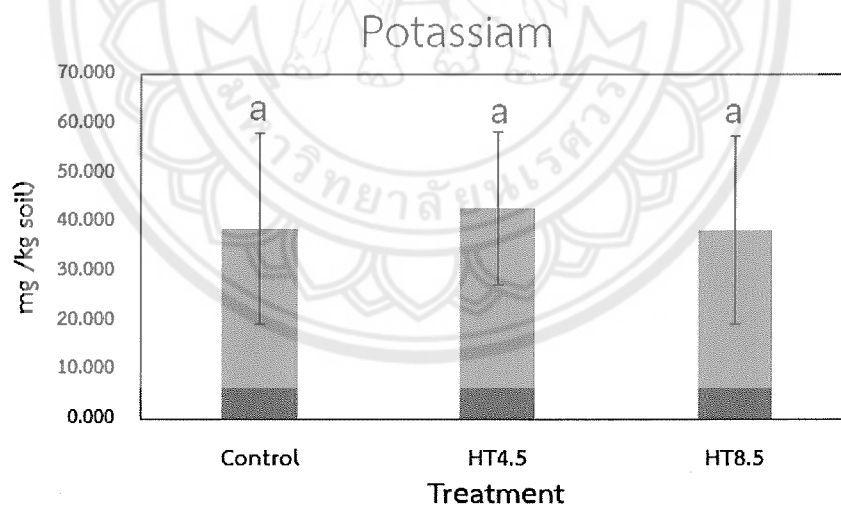
ภาพที่ 4.5 ปริมาณไนเตรทในดินภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง



ภาพที่ 4.6 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ในดินภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง



ภาพที่ 4.7 ปริมาณโพแทสเซียม ในดินภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

### 4.3 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์

#### 4.3.1 การเจริญของใบในระยะแตกกอ

##### 4.3.1.1 ความยาวใบในระยะแตกกอ

จากการศึกษาปัจจัยด้านอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์โดยการเปรียบเทียบระหว่างช่วงข้าวแตกกอ และ ช่วงออกดอกนั้น ในระยะแรกที่มีผู้วิจัยได้เก็บตัวอย่างในช่วงระยะแตกกอ ทำให้ได้ศึกษาองค์ประกอบอื่นๆที่สำคัญ คือความยาวใบ พื้นที่ใบ ซึ่งจัดว่าเป็นองค์ประกอบสำคัญของพืชเนื่องจากความยาวใบมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ใบและเป็นปัจจัยบ่งชี้ศักยภาพในการรับแสงและประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงด้วยเช่นกัน

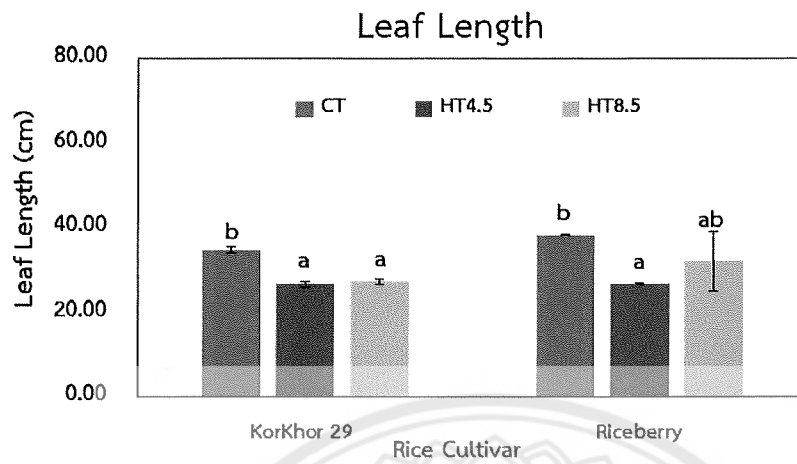
ผลการศึกษความยาวใบของข้าวทั้ง 2 พันธุ์คือพันธุ์ กข 29 และ ข้าวสีโรซ์เบอร์รี่ที่ปลูกในโรงเรือนทดลองภายใต้การควบคุมระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกันทำให้ทำให้มีลักษณะสถานการณ์ระดับอุณหภูมิ 3 รูปแบบ (3 สิ่งทดลอง) ซึ่งควบคุมให้มีระดับเทียบเท่ากับการประเมินสถานการณ์โดยภาพอนาคต RCP Scenario RCP 4.5 และ RCP8.5 ผลการศึกษาแสดงในภาพที่ 4.8 ดังรายละเอียด

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาในแต่ละพันธุ์ พบว่าการตอบสนองของความยาวใบของข้าวพันธุ์ กข 29 นั้นมีลักษณะในเชิงลบทั้งในสถานการณ์ RCP 4.5 และ RCP8.5 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (CT) พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เท่ากับ 23.44% และ 21.54% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับพันธุ์ข้าวสีโรซ์เบอร์รี่ มีลักษณะการตอบสนองเช่นเดียวกันคือลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ในสิ่งทดลองสถานการณ์ RCP4.5 เท่ากับ 30% เมื่อเปรียบเทียบกับ CT เมื่อพิจารณาระหว่าง 2 พันธุ์พบว่าข้าวพันธุ์ กข 29 มีเปอร์เซ็นต์การลดลงสูงกว่าข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่ (พิจารณาการตอบสนองภายใต้สภาวะ HT 8.5) (ภาพที่ 4.8 และตารางภาคผนวกที่ 2 และ 31)

##### 4.3.1.2 น้ำหนักใบทั้งหมด/ต้น ในระยะแตกกอ

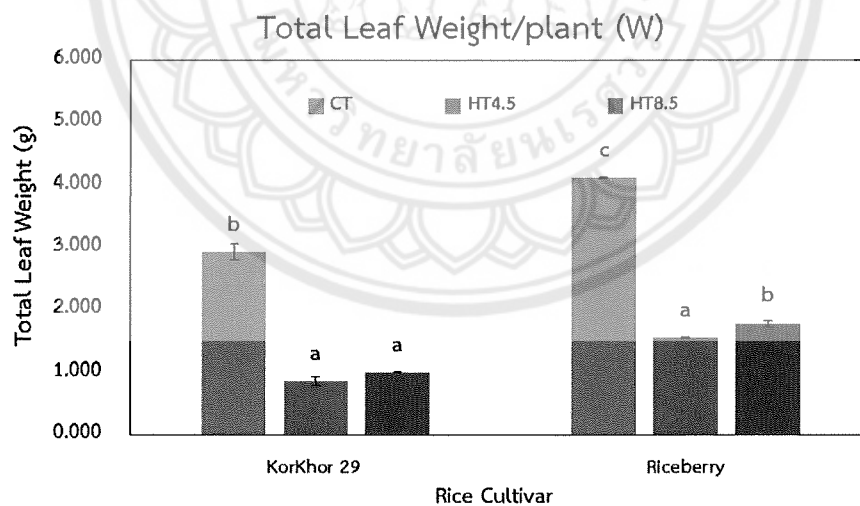
พารามิเตอร์น้ำหนักใบทั้งหมด /ต้น เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการนำไปสู่การวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้ได้แสดงในภาพที่ 4.9 พิจารณาผลการศึกษาในรายพันธุ์ พบว่าภายใต้สถานการณ์อุณหภูมิสูงขึ้นทั้งสถานการณ์ RCP4.5 และ RCP8.5 ส่งผลทำให้ข้าวพันธุ์ กข29 มีน้ำหนักใบข้าวทั้งหมดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ( $p < 0.05$ ) โดยลดลงเท่ากับ 70.4% และ 65.8% ในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 ตามลำดับ และผลการศึกษาที่สอดคล้องกันในข้าวสีโรซ์เบอร์รี่ พบว่าทั้ง 2 สถานการณ์ส่งผลให้น้ำหนักใบทั้งหมดลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ( $p < 0.05$ ) เช่นเดียวกันโดยลดลง 62.03% และ 56.75% ในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 ตามลำดับ (ภาพที่ 4.9 และตารางภาคผนวกที่3 และ 32)

เปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่าง 2 พันธุ์พบว่าผลกระทบมีระดับใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงระหว่างการลดลงของพื้นที่ใบในช่วงระหว่าง 56-70% (เมื่อเปรียบเทียบกับ CT)



ภาพที่ 4.8 ความยาวใบข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะแตกกอ

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง



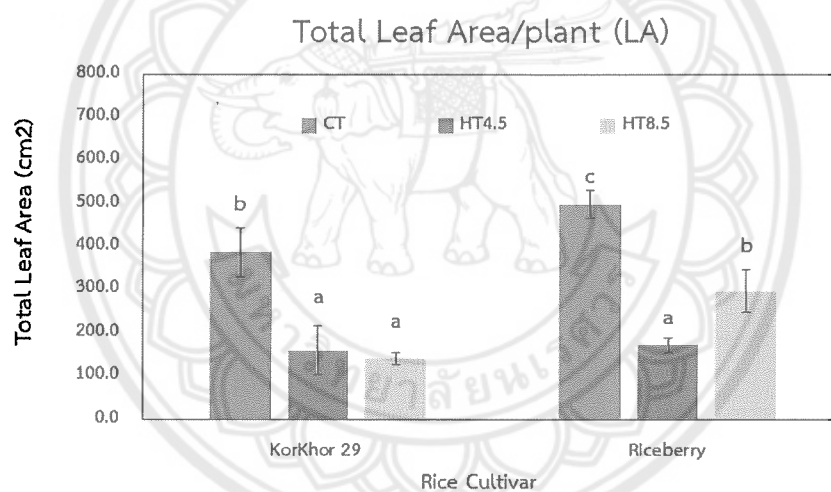
ภาพที่ 4.9 น้ำหนักใบทั้งหมด/ต้นใบข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะแตกกอ

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.3.1.3 พื้นที่ใบทั้งหมด/ต้น

ผลการศึกษาในพื้นที่ใบทั้งหมด/ต้น นั้น มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาในด้านปัจจัยน้ำหนักใบทั้งหมด/ต้น ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลอง CT แล้ว พบว่าพื้นที่ใบทั้งหมดของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้การเพิ่มระดับอุณหภูมิทั้ง 2 สถานการณ์

พิจารณาผลการศึกษาในข้าวพันธุ์ กข29 พบว่าสอดคล้องกับผลการศึกษาในพารามิเตอร์น้ำหนักใบทั้งหมด / ต้น เนื่องจากเป็นพันธุ์ที่มีการตอบสนองในเชิงลบอย่างชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อปลูกภายใต้การเพิ่มระดับอุณหภูมิ ทั้งในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 โดยพบว่าลดลงเท่ากับ 58.9% และ 63.7% ในขณะที่ผลการศึกษาในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่มีรูปแบบเช่นเดียวกันคือลดลงเท่ากับ 65.6% และ 40.3% ภายใต้สภาวะสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการตอบสนองของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ พบว่ามีผลกระทบที่ใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วงระหว่าง 40.3-65.6% (ภาพที่ 4.10 รวมทั้ง ตารางภาคผนวกที่ 4 และ 33)



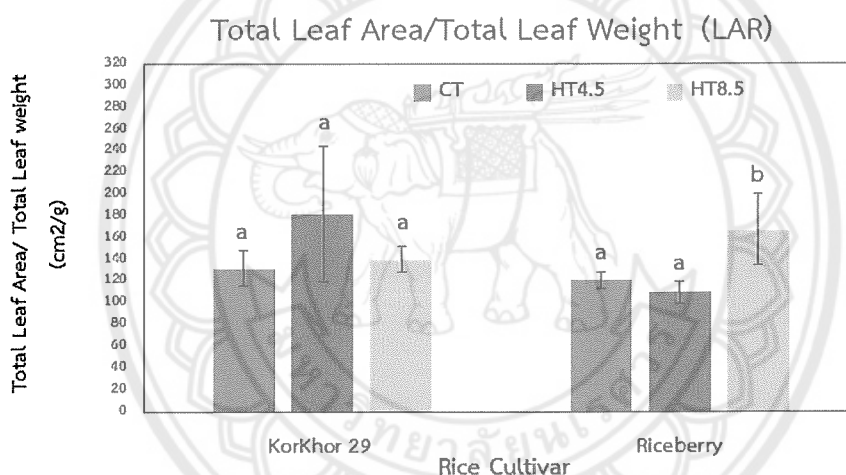
ภาพที่ 4.10 พื้นที่ใบทั้งหมด/ต้นใบข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะแตกกอ

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.3.1.4 สัดส่วนพื้นที่ผิวใบต่อน้ำหนักทั้งหมดของพืช (Leaf Area Ratio)

พารามิเตอร์แสดงสัดส่วนพื้นที่ผิวใบต่อน้ำหนักทั้งหมดของพืช หรือเรียกว่า LAR (Leaf Area Ratio) หน่วยเป็น  $\text{cm}^2/\text{g}$  เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญเนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้วัดประสิทธิภาพของใบในการสังเคราะห์แสง ผลการศึกษาแสดงรายละเอียดในภาพที่ 4.11 และตารางภาคผนวกที่ 5 และ 34 มีรายละเอียดดังนี้

ผลการศึกษาในข้าวพันธุ์ กข 29 ไม่พบการตอบสนองในระดับที่ส่งผลต่อความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่างสิ่งทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับ CT ในขณะที่ผลการศึกษาในพันธุ์ข้าวไรซ์เบอร์รี่พบว่าภายใต้สถานการณ์ RCP 8.5 (HT8.5) กระตุ้นให้ข้าวไรซ์เบอร์รี่มีค่า LAR เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยเพิ่มขึ้นในระดับสูงถึง 38.4% เมื่อเปรียบเทียบกับ CT



ภาพที่ 4.11 สัดส่วนพื้นที่ผิวใบต่อน้ำหนักทั้งหมดของพืช (Leaf Area Ratio) ข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะแตกกอ

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

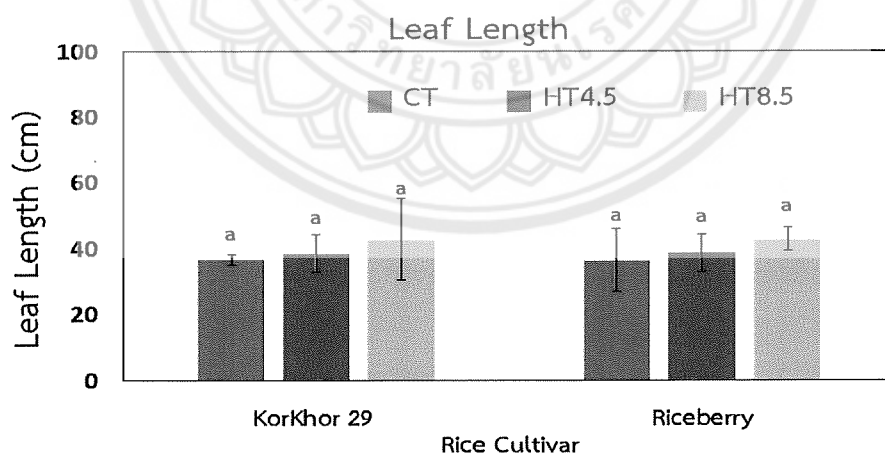
#### 4.3.2 การเจริญของใบในระยะเก็บเกี่ยว

##### 4.3.2.1 ความยาวใบ

ผลการศึกษาความยาวใบของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ของข้าวที่ปลูกในโรงเรือน ภายใต้การควบคุมระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันทำให้ทำให้มีลักษณะสถานการณ์ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario RCP 4.5 และ RCP8.5 ได้แสดงผลการศึกษา ดังนี้ (ภาพที่ 4.8)

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาความยาวใบของทั้ง 2 พันธุ์พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเทียบกับ CT แต่มีแนวโน้มการตอบสนองในเชิงบวกภายใต้สถานการณ์ RCP 4.5 และ RCP8.5

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาในแต่ละพันธุ์ พบว่าการตอบสนองของความยาวใบของข้าวพันธุ์ กข 29 นั้นมีลักษณะในเชิงบวกทั้งในสถานการณ์ RCP 4.5 และ RCP8.5 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (CT) พบว่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เท่ากับ 5.16% และ 16.74% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับพันธุ์ข้าวสีโรสเบอร์รี่ มีลักษณะการตอบสนองเช่นเดียวกันคือเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ในสิ่งทดลองสถานการณ์ RCP4.5 และ RCP8.5 เท่ากับ 6.39% และ 17.81% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT เมื่อพิจารณาระหว่าง 2 พันธุ์พบว่าข้าวพันธุ์ โรสเบอร์รี่ มีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นสูงกว่าข้าวพันธุ์ กข 29 (พิจารณาการตอบสนองภายใต้สภาวะ HT 8.5) (ภาพที่ 4.12 และตารางภาคผนวกที่ 6 และ 35)

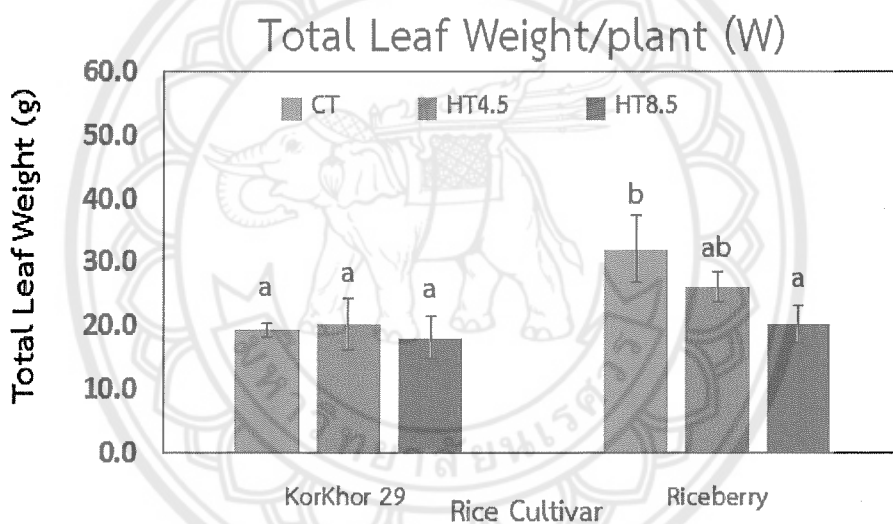


ภาพที่ 4.12 ความยาวใบข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะเก็บเกี่ยว

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.3.2.2 น้ำหนักใบทั้งหมด/ต้น

ผลการศึกษาน้ำหนักใบทั้งหมด /ต้น พิจารณาผลการศึกษาในข้าวพันธุ์ กข29 พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเทียบกับ CT ภายใต้สถานการณ์อุณหภูมิสูงขึ้น แต่มีแนวโน้มว่าสถานการณ์ RCP4.5 จะส่งผลให้น้ำหนักใบข้าวทั้งหมดโดยเพิ่มขึ้น 4.92% ในสิ่งทดลอง HT4.5 ซึ่งแตกต่างกับสถานการณ์ RCP8.5 ที่ส่งผลให้น้ำหนักทั้งหมดลดลง 6.46% ในสิ่งทดลอง HT8.5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) และผลการศึกษาในข้าวสีโรซ์เบอร์รี่ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) HT8.5 เมื่อเทียบกับ CT ทั้ง 2 สถานการณ์ ส่งผลให้น้ำหนักใบทั้งหมดลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยลดลง 18.92% และ 37.18% ในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 ตามลำดับ (ภาพที่ 4.13 และตารางภาคผนวกที่ 7 และ 36)



ภาพที่ 4.13 น้ำหนักใบทั้งหมด/ต้นใบข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะเก็บเกี่ยว

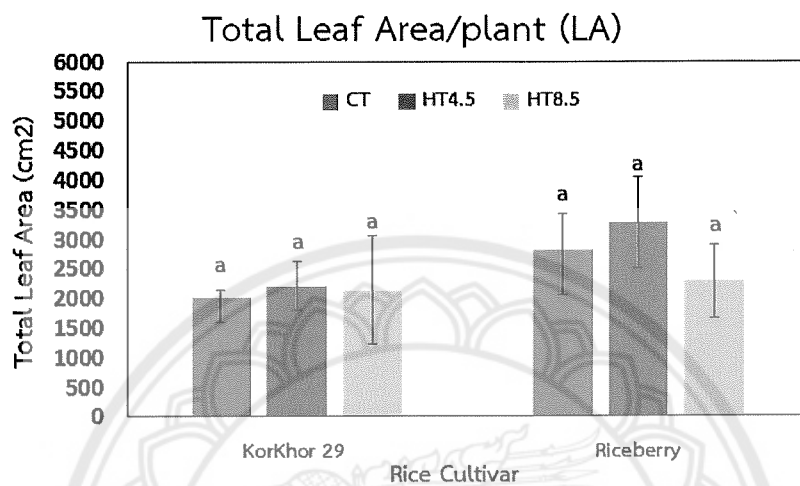
หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.3.2.3 พื้นที่ใบทั้งหมด/ต้น

ผลการศึกษาในพื้นที่ใบทั้งหมด/ต้น ภายใต้การเพิ่มระดับอุณหภูมิทั้ง 2 สถานการณ์ ทั้ง 2 พันธุ์พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) พิจารณาผลการศึกษาในข้าวพันธุ์ กข



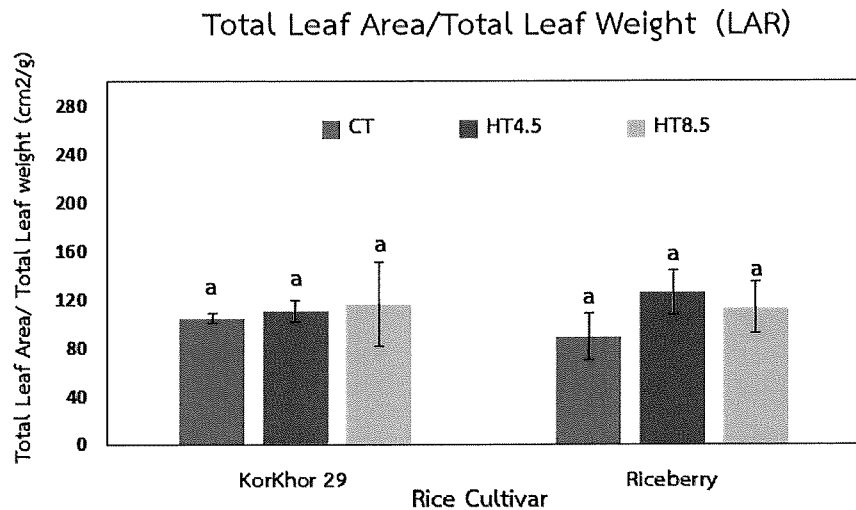
29 พบว่ามีแนวโน้มการตอบสนองในเชิงบวก ในสถานการณ์ RCP 4.5 และ RCP 8.5 เท่ากับ 9.82% และ 6.63% ตามลำดับ ขณะที่ในข้าวพันธุ์ ไรซ์เบอร์รี่ มีการตอบสนองที่แตกต่างกันกล่าวคือในสถานการณ์ RCP4.5 มีการตอบสนองในเชิงบวก 16.16% ขณะที่ในสถานการณ์ RCP 8.5 พบว่ามี การตอบสนองในเชิงลบเท่ากับ 19.15% (ภาพที่ 4.14 รวมทั้ง ตารางภาคผนวกที่ 8 และ 37)



ภาพที่ 4.14 พื้นที่ใบทั้งหมด/ต้นใบข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะเก็บเกี่ยว  
หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.3.2.4 สัดส่วนพื้นที่ผิวใบต่อน้ำหนักทั้งหมดของพืช (Leaf Area Ratio)

ผลการศึกษาในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ กข 29 และไรซ์เบอร์รี่ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับ CT ภายใต้สถานการณ์ RCP4.5 และ RCP8.5 ทั้ง 2 สายพันธุ์ แต่มีแนวโน้มการตอบสนองในเชิงบวกในข้าวพันธุ์ กข 29 เท่ากับ 4.89% และ 11.27% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในพันธุ์ข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่พบว่าภายใต้สถานการณ์ RCP4.5 และ RCP8.5 กระตุ้นให้ข้าวไรซ์เบอร์รี่มีค่า LAR เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยเพิ่มขึ้น 41.01% และ 26.93% เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (ภาพที่ 4.15 รวมทั้ง ตารางภาคผนวกที่ 9 และ 38)

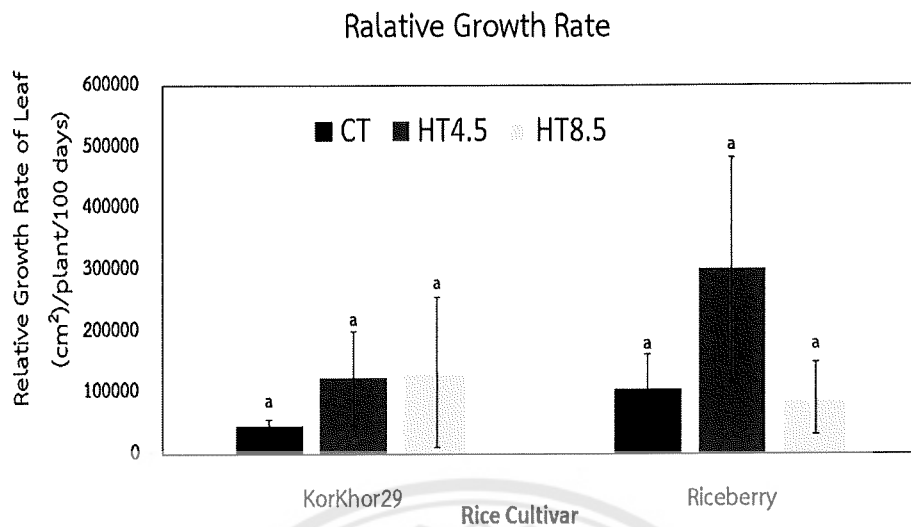


ภาพที่ 4.15 สัดส่วนพื้นที่ผิวใบต่อน้ำหนักทั้งหมดของพืช (Leaf Area Ratio) ข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 ในช่วงระยะเก็บเกี่ยว

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.3.3 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ช่วงระหว่างระยะแตกกอและระยะเก็บเกี่ยว (Relative Growth Rate: RGR) ของข้าวพันธุ์ กข 29 และไรซ์เบอร์รี่

ผลการศึกษาระดับ RGR ในข้าวพันธุ์ทั้ง 2 พันธุ์พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แต่มีแนวโน้มการตอบสนองเชิงบวกเพิ่มขึ้น ในข้าวพันธุ์ กข29 ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 โดยพบว่า RGR เพิ่มขึ้นเท่ากับ 171.99% และ 190.27% ตามลำดับเมื่อเทียบกับสิ่งทดลอง CT ขณะที่ผลการศึกษาในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ในสิ่งทดลอง HT4.5 มีแนวโน้มการตอบสนองในเชิงบวก เท่ากับ 185.99% ซึ่งแตกต่างกับผลการศึกษาในสิ่งทดลอง HT8.5 มีการตอบสนองในเชิงลบ เท่ากับ 14.35% เมื่อเทียบกับสิ่งทดลอง CT (ภาพที่ 4.16 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 10 และ 39)



ภาพที่ 4.16 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.4 ปริมาณการผลิตรงควัตถุในใบ

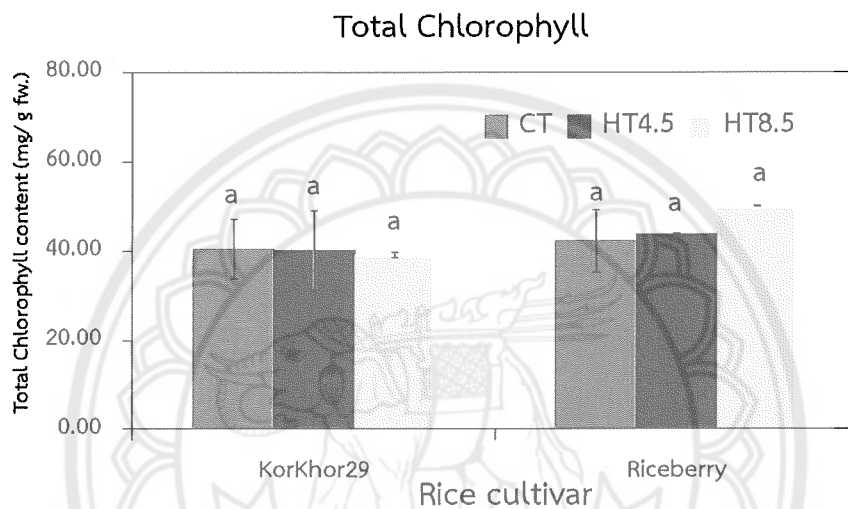
จากการศึกษาปัจจัยด้านการเจริญเติบโตของใบ พบผลการศึกษาน่าสนใจดังที่ได้แสดงผลในหัวข้อ 4.3 นอกจากนั้นยังได้ทำการศึกษาระดับที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับใบพืชอีกหนึ่งพารามิเตอร์คือปริมาณรงควัตถุในใบ 3 องค์ประกอบ คือ คลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll a) คลอโรฟิลล์ บี (Chlorophyll b) และแคโรทีนอยด์ (Carotenoid) ซึ่งเป็นรงควัตถุที่สำคัญสำหรับกระบวนการสังเคราะห์แสงอันนำไปสู่กระบวนการสร้างผลผลิตของข้าว ผลการศึกษาจะเป็นปัจจัยที่บ่งชี้ถึงศักยภาพในเบื้องต้นของการสังเคราะห์แสงของข้าวในแต่ละพันธุ์

ผลการศึกษาปริมาณ รงควัตถุทั้ง 3 ชนิด ของข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ใน 3 สิ่งทดลอง มีผลการศึกษา ดังนี้

##### 4.4.1 คลอโรฟิลล์รวมทั้งหมด

ผลการศึกษาคลอโรฟิลล์รวมทั้งหมดในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ภายใต้การปลูกในโรงเรือนที่ควบคุมสถานการณ์ 3 สถานการณ์ (3 สิ่งทดลอง) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระหว่าง 3 สิ่งทดลอง ของทั้ง 2 พันธุ์ ( $p > 0.05$ )

อย่างไรก็ตามเมื่อคำนวณเปรียบเทียบระหว่าง CT กับสิ่งทดลองต่างๆเพื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่ม หรือลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด พบว่า พันธุ์ กข29 มีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์ลดลง โดยพบว่าระดับปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 ลดลงในระดับ 0.30% และ 2.95% เมื่อเปรียบเทียบกับ CT ขณะที่ในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ มีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น โดยพบว่าระดับปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 เพิ่มขึ้นในระดับ 3.36% และ 18.62% เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (ภาพที่ 4.17 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 11 และ 40)

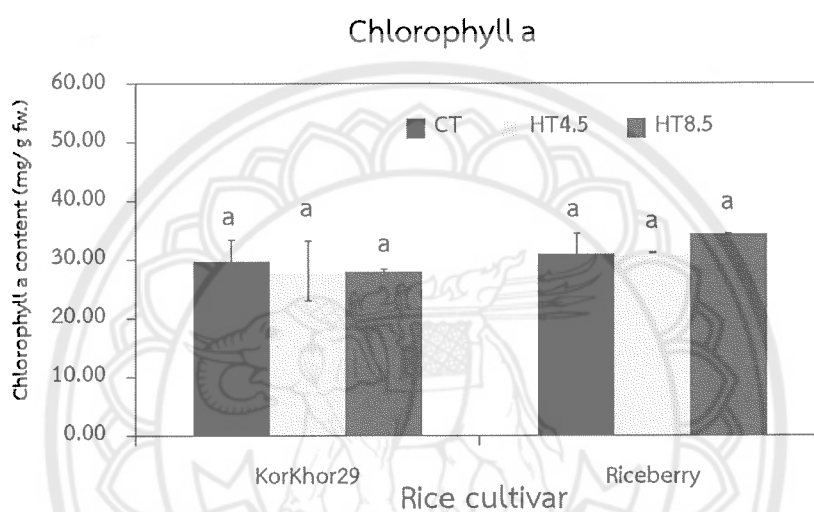


ภาพที่ 4.17 ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในใบข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5  
หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.4.2 ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (Chlorophyll a )

จากการศึกษาปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ที่มีการตอบสนองต่อระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 ระดับภายใต้ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งเมื่อทดสอบความแตกต่างทางสถิติในระหว่างชุดทดลอง พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P > 0.05$ )

อย่างไรก็ตามเมื่อดำเนินการเปรียบเทียบระหว่าง CT กับสิ่งทดลองต่างๆเพื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่ม หรือลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์เอมีความสอดคล้องเช่นเดียวกับค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดของปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด โดยพบว่าในข้าวพันธุ์ กข29 มีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์ลดลงเช่นกัน โดยพบว่าระดับปริมาณคลอโรฟิลล์เอในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5ลดลงในระดับ 5.14% และ 6.12% เมื่อเปรียบเทียบกับ CT ขณะที่ในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ มีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น โดยพบว่าระดับปริมาณคลอโรฟิลล์เอในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 เพิ่มขึ้นในระดับ 0.66% และ 11.12% เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (ภาพที่ 4.18 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 12 และ 41)



ภาพที่ 4.18 ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ในใบข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิระดับเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

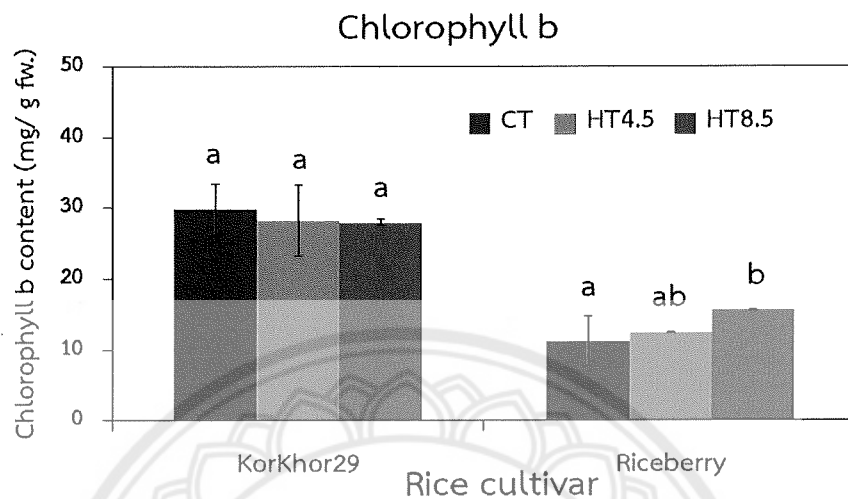
หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.4.3 ปริมาณคลอโรฟิลล์บี (Chlorophyll b)

จากการศึกษาปริมาณคลอโรฟิลล์บี ของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ที่มีการตอบสนองต่อระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันทั้ง 3 สิ่งทดลอง ซึ่งเมื่อทดสอบความแตกต่างทางสถิติในระหว่างชุดทดลองพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) ในข้าวพันธุ์ กข 29 แต่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ( $P > 0.05$ ) ในสิ่งทดลอง HT8.5 เมื่อเทียบกับ CT

อย่างไรก็ตามเป็นที่สังเกตว่า ปริมาณรงควัตถุคลอโรฟิลล์บีมีแนวโน้มลดลงในใบข้าวพันธุ์ กข 29 พบว่าลดลง 5.14% และ 6.12% ในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 ตามลำดับ แต่กลับพบ

แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของในข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT นั้นคือพบว่าเพิ่มขึ้น 10.81% และ 39.39% ในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 ตามลำดับ (ภาพที่ 4.19 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 13 และ 42)



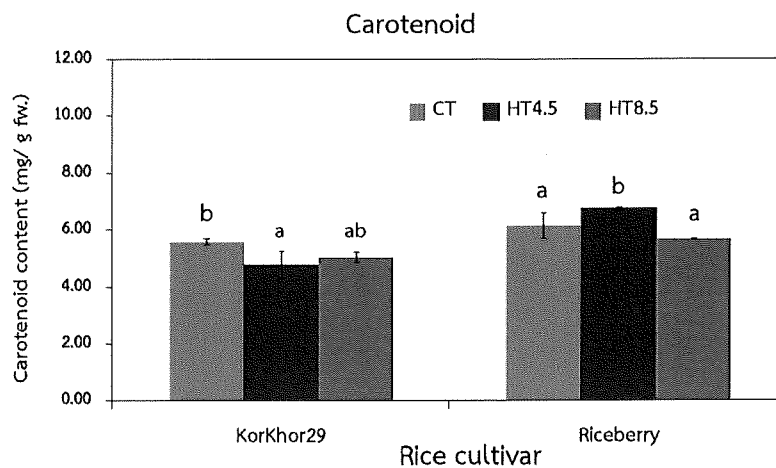
ภาพที่ 4.19 ปริมาณคลอโรฟิลล์บี ในใบข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.4.4 ปริมาณแคโรทีนอยด์ (Carotenoid)

จากการศึกษาปริมาณรงควัตถุแคโรทีนอยด์ที่มีการตอบสนองต่อระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันทั้ง 3 สิ่งทดลอง ของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ พบว่าผลการศึกษาแตกต่างกับผลการศึกษาในรวงควัตถุชนิดคลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์บี เนื่องจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ในข้าวพันธุ์กช29 และโรซ์เบอร์รี่ ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4.20 และมีรายละเอียดดังนี้

เมื่อพิจารณารายพันธุ์ระหว่างข้าวทั้ง 2 พันธุ์ พบว่าเปอร์เซ็นต์แคโรทีนอยด์ลดลงในสิ่งทดลอง HT4.5 ในข้าวพันธุ์กช 29 เท่ากับ 14.39% เมื่อเปรียบเทียบกับ CT ขณะที่ในข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่ เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น/ลดลงของ แคโรทีนอยด์ พบผลการศึกษาที่ตรงข้ามกัน โดยพบว่าในสิ่งทดลอง HT4.5 มีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นเท่ากับ 9.96% ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาในสิ่งทดลอง HT8.5 พบว่ามีแนวโน้มลดลงเท่ากับ 7.56% เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (ภาพที่ 4.20 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 14 และ 43)



ภาพที่ 4.20 ปริมาณแคโรทีนอยด์ ในใบข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิและเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.5 วิเคราะห์องค์ประกอบผลผลิต

ผลการศึกษาค่าผลผลิตของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ คือ กข29 และไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งผลการศึกษานี้ องค์ประกอบผลผลิตได้ผลดังนี้

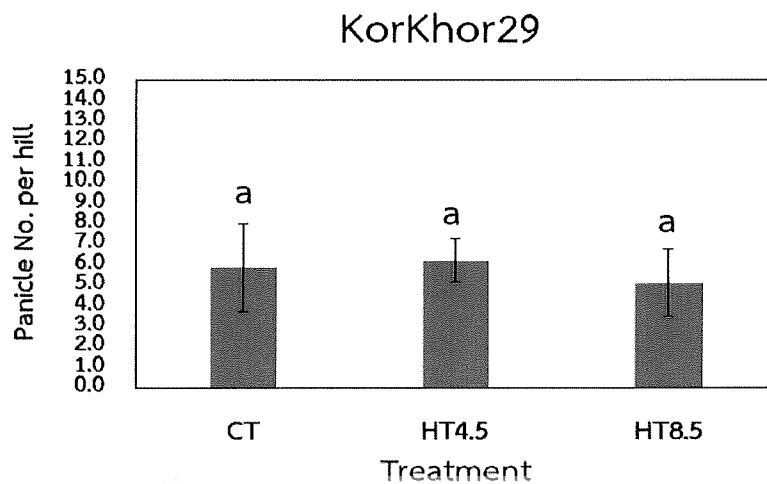
##### 4.5.1 จำนวนรวงทั้งหมดต่อกอ

###### 4.5.1.1 จำนวนรวงทั้งหมดต่อกอของข้าวพันธุ์กข 29

ผลการศึกษาพบว่า จำนวนรวงของข้าวพันธุ์กข29 ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง อย่างไรก็ตามมีแนวโน้มที่แสดงการเพิ่มขึ้นของจำนวนรวงต่อกอภายใต้สภาวะ HT4.5 เท่ากับ 5.29% และแสดงการลดลงของจำนวนรวงต่อกอภายใต้สภาวะ HT8.5 เท่ากับ 13.21% (เปรียบเทียบกับ CT) (ภาพที่ 4.21 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 15 และ 44)

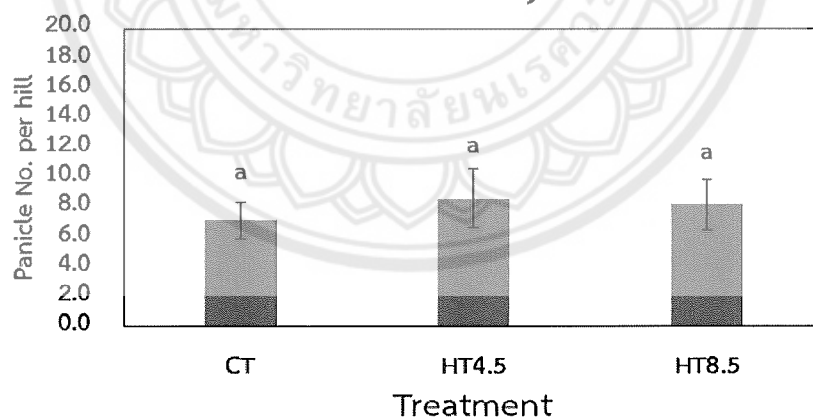
###### 4.5.1.2 จำนวนรวงทั้งหมดต่อกอของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่

ผลการศึกษาพบว่า จำนวนรวงของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง อย่างไรก็ตามมีแนวโน้มที่แสดงการเพิ่มขึ้นของจำนวนรวงต่อกอภายใต้สภาวะ HT4.5 และ HT8.5 เท่ากับ 21.12% และ 14.63% ตามลำดับเปรียบเทียบกับ CT (ภาพที่ 4.22 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 15 และ 44)



ภาพที่ 4.21 จำนวนรวงทั้งหมดต่อกอของข้าวพันธุ์ก 29 ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง



ภาพที่ 4.22 จำนวนรวงทั้งหมดต่อกอของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

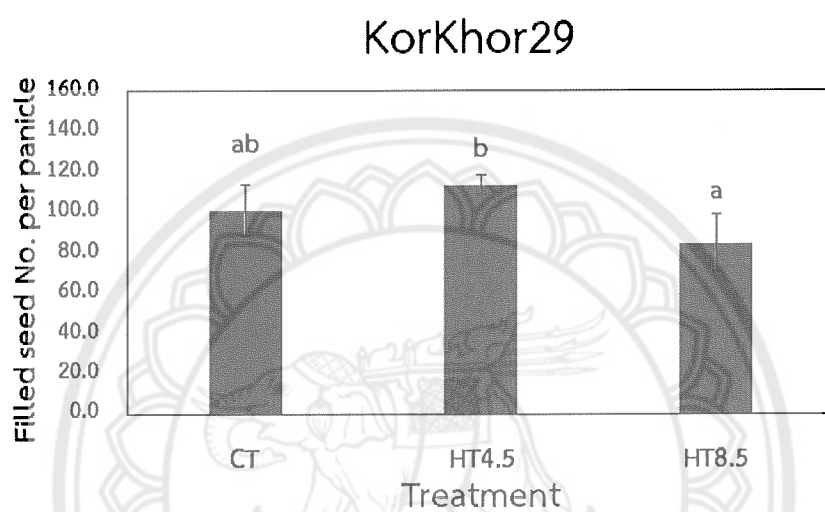
หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง



#### 4.5.2 จำนวนเมล็ดสมบูรณ์/รวง

##### 4.5.2.1 จำนวนเมล็ดสมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ กข 29

ผลการศึกษาพบว่า จำนวนเมล็ดสมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ กข29 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับ CT อย่างไรก็ตามผลการศึกษาคล้ายกับผลการศึกษาในจำนวนรวงทั้งหมดต่อกอ เนื่องจากพบแนวโน้มจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ของข้าวพันธุ์ กข 29 เพิ่มขึ้น เท่ากับ 12.42% และลดลงในสิ่งทดลอง HT 8.5 เท่ากับ 16.36% เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (ภาพที่ 4.23 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 16 และ 45)

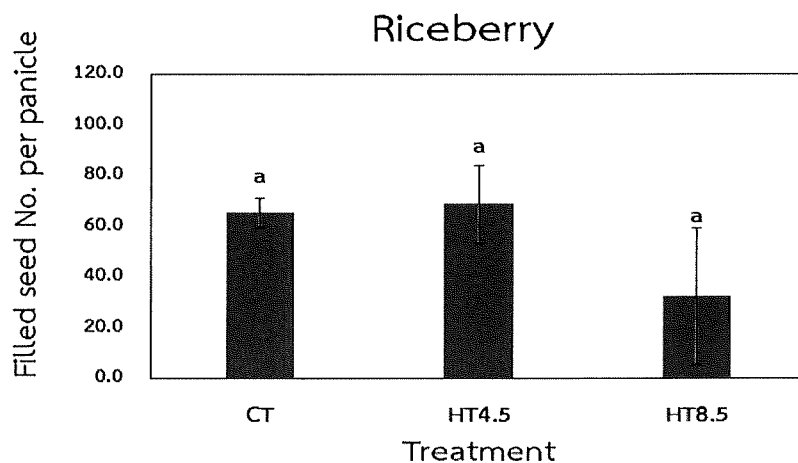


ภาพที่ 4.23 จำนวนเมล็ดสมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ กข 29 ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

##### 4.5.2.2 จำนวนเมล็ดสมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่

ผลการศึกษาพบว่า จำนวนเมล็ดสมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ไม่แสดงผลความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ในระหว่าง 3 สิ่งทดลอง อย่างไรก็ตามมีแนวโน้มที่แสดงการเพิ่มขึ้นของจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ต่อรวงภายใต้สภาวะ HT4.5 เท่ากับ 4.98% และลดลงในสิ่งทดลอง HT8.5 เท่ากับ 50.30% เปรียบเทียบกับ CT (ภาพที่ 4.24 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 16 และ 45)



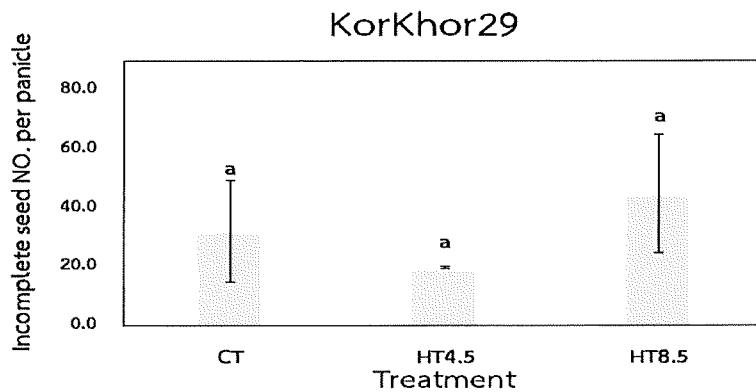
ภาพที่ 4.24 จำนวนเมล็ดสมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.5.3 จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์/รวง

##### 4.5.3.1 จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ กข 29

ผลการศึกษาพบว่า จำนวนไม่เมล็ดสมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ กข 29 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น/ลดลงของจำนวนไม่เมล็ดสมบูรณ์พบว่า ในสิ่งทดลอง HT4.5 มีแนวโน้มจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ลดลง เท่ากับ 38.47% ขณะที่ในสิ่งทดลอง HT8.5 มีแนวโน้มจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น เท่ากับ 39.93% เมื่อเทียบกับสิ่งทดลอง CT (ภาพที่ 4.25 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 17 และ 46)

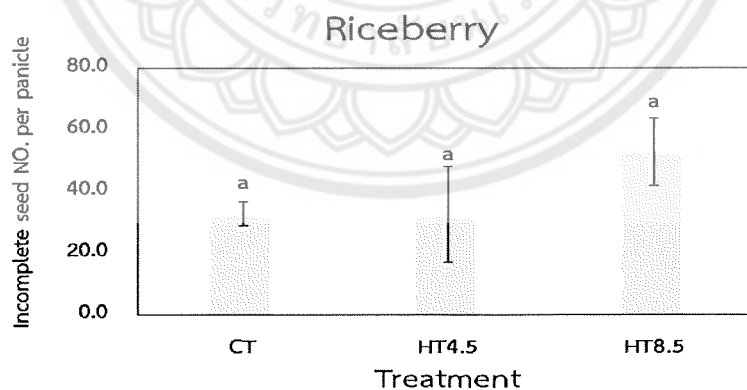


ภาพที่ 4.25 จำนวนไม่เมล็ดสมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ กข 29 ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.5.3.2 จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่

ผลการศึกษาพบว่า จำนวนไม่เมล็ดสมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ใดๆก็ตามเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น/ลดลง ในสิ่งทดลอง HT4.5 มีแนวโน้มลดลง 0.49% ขณะที่ในสิ่งทดลอง HT8.5 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 61.40% เมื่อเทียบกับสิ่งทดลอง CT (ภาพที่ 4.26 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 17 และ 46)



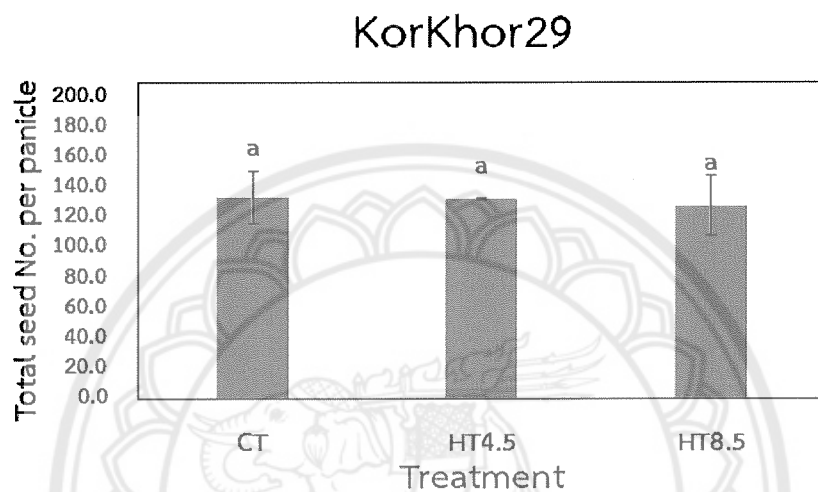
ภาพที่ 4.26 จำนวนไม่เมล็ดสมบูรณ์/รวง ของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.5.4 จำนวนเมล็ดรวมทั้งหมด/รวง

##### 4.5.4.1 จำนวนเมล็ดรวมทั้งหมดของข้าวพันธุ์ กข 29

ผลการศึกษาพบว่า จำนวนเมล็ดรวมทั้งหมดของข้าวพันธุ์ กข 29 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับ CT อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น/ลดลง พบว่ามีแนวโน้มลดลง ในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 เท่ากับ 0.34% และ 3.95% ตามลำดับ (ภาพที่ 4.27 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 18 และ 47)

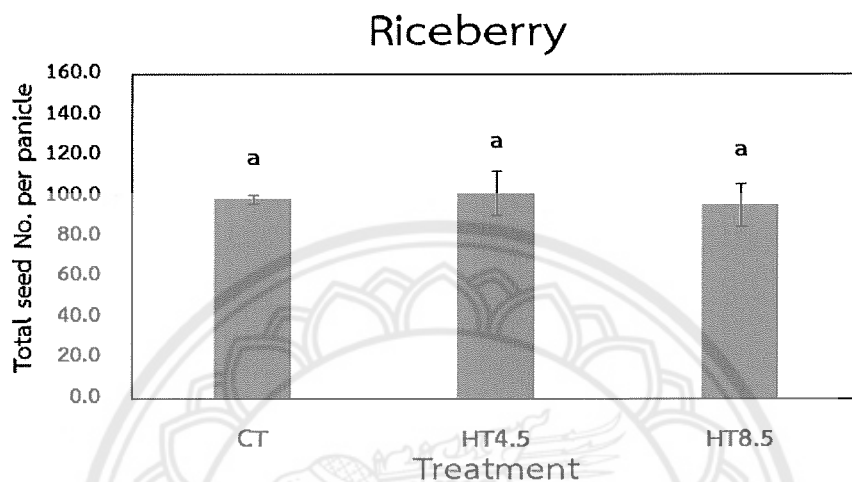


ภาพที่ 4.27 จำนวนเมล็ดรวมทั้งหมด/รวง ของข้าวพันธุ์ กข 29 ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.5.4.2 จำนวนเมล็ดรวมทั้งหมด/รวง ของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่

ผลการศึกษพบว่า จำนวนเมล็ดทั้งหมดของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับ CT อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น/ลดลง พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในสิ่งทดลอง HT4.5 เพิ่มขึ้น 3.05% แต่พบว่ามีแนวโน้มลดลง ในสิ่งทดลอง HT8.5 เท่ากับ 2.90% (ภาพที่ 4.28 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 18 และ 47)



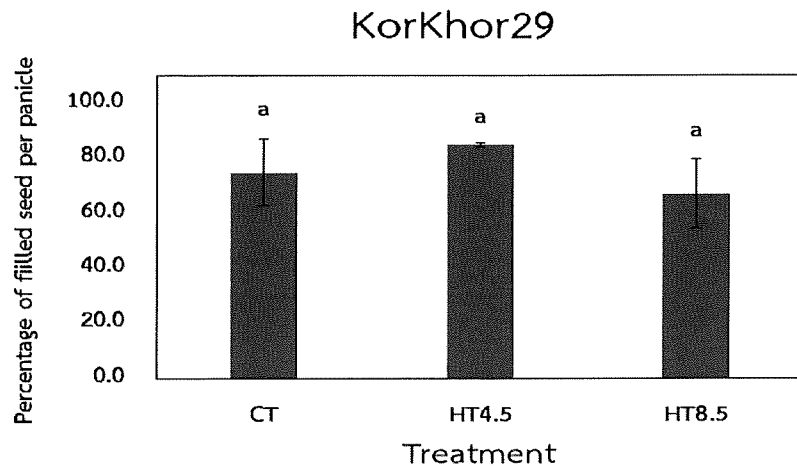
ภาพที่ 4.28 จำนวนเมล็ดรวมทั้งหมด/รวง ของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่เหมือนกันบ่งชี้ถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.5.5 เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์/รวง

##### 4.5.5.1 เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์/รวงของข้าวพันธุ์ กข 29

ผลการศึกษพบว่า เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์/รวงของข้าวพันธุ์ กข29 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับ CT อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น/ลดลง พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในสิ่งทดลอง HT4.5 เพิ่มขึ้น 13.36% และพบว่ามีแนวโน้มลดลง ในสิ่งทดลอง HT8.5 เท่ากับ 10.55% (ภาพที่ 4.29 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 19 และ 48)

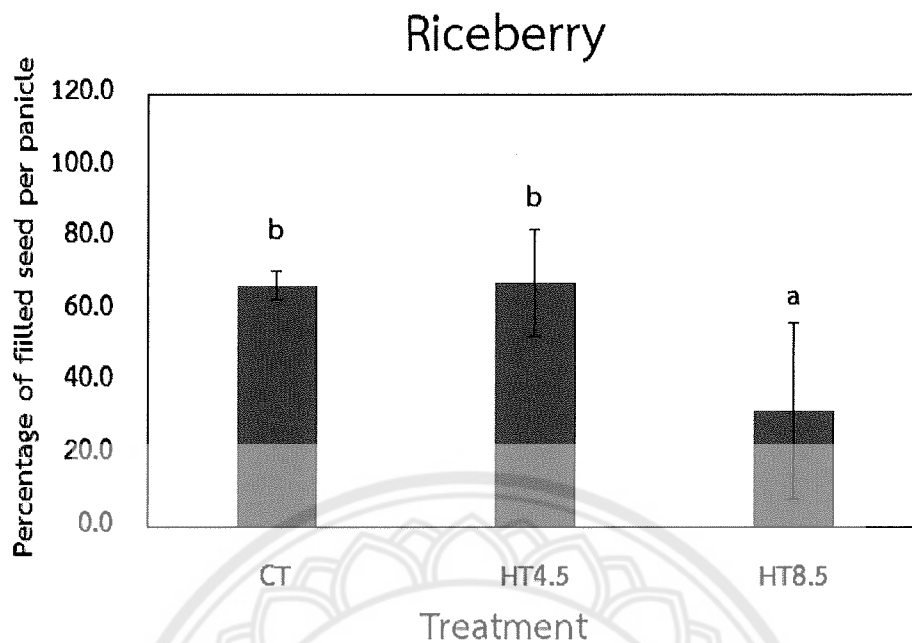


ภาพที่ 4.29 เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์/รวงของข้าวพันธุ์ กข 29 ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.5.5.2 เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์/รวงของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่

อย่างไรก็ตามพบผลการศึกษาก็แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ระหว่างทรีทเมนต์ในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์ของการเมล็ดสมบูรณ์ต่อรวงของข้าวไรซ์เบอร์รี่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ที่รุนแรงในระดับอุณหภูมิที่สูงกว่า CT ประมาณ  $4.5^{\circ}\text{C}$  (HT8.5) เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงพบว่า เปอร์เซ็นต์ของการเมล็ดสมบูรณ์ต่อรวงของข้าวไรซ์เบอร์รี่ลดลงถึง 51.97% เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (ภาพที่ 4.30 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 19 และ 48)



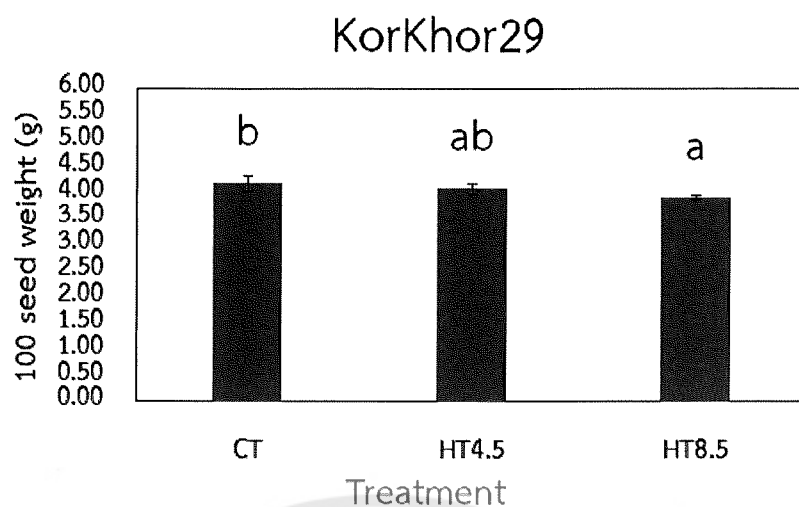
ภาพที่ 4.30 เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์/รวงของข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือนภายใต้ 3 สิ่งทดลองซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.5.6 น้ำหนัก 100 เมล็ด

##### 4.5.6.1 น้ำหนัก 100 เมล็ดของข้าวพันธุ์ กข 29

ผลการศึกษาพบว่า น้ำหนัก 100 เมล็ดของข้าวพันธุ์ กข 29 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับ CT โดยพบว่าน้ำหนัก 100 เมล็ดในสิ่งทดลอง HT8.5 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เท่ากับ 5.49% และเมื่อพิจารณาในสิ่งทดลอง HT4.5 พบว่ามีแนวโน้มลดลง เท่ากับ 2.44% (ภาพที่ 4.31 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 20 และ 49)



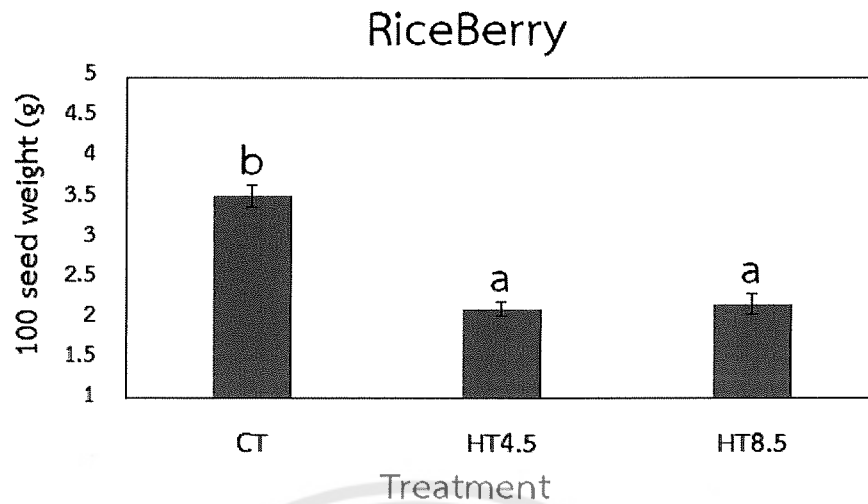
ภาพที่ 4.31 น้ำหนัก 100 เมล็ดของข้าวพันธุ์ กข 29 ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.5.6.2 น้ำหนัก 100 เมล็ดของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่

ผลการศึกษาพบว่า น้ำหนัก 100 เมล็ดของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) โดยลดลงอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 2 สถานการณ์ (HT4.5 และ HT8.5) เมื่อเปรียบเทียบกับ CT พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 เท่ากับ 40.06% และ 38.59% ตามลำดับ (ภาพที่ 4.32 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 20 และ 49)





ภาพที่ 4.32 น้ำหนัก 100 เมล็ดของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

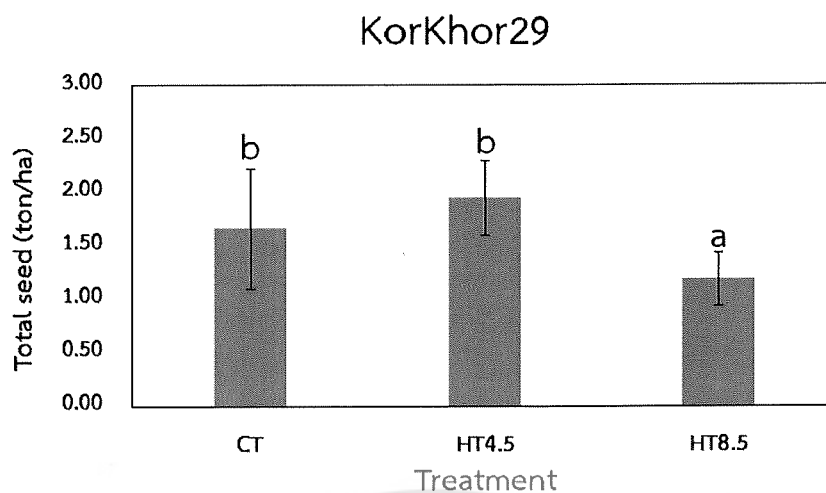
#### 4.5.7 ผลผลิตรวมต้น/เฮกแตร์

##### 4.5.7.1 ผลผลิตรวมต้น/เฮกแตร์ของข้าวพันธุ์ กข 29

ผลการศึกษาพบว่า ผลผลิตรวมของข้าวพันธุ์ กข 29 พบว่ามีผลผลิตรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT8.5 เมื่อเปรียบเทียบกับ CT โดยพบว่าลดลงเท่ากับ 28.49% อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นในสิ่งทดลอง HT4.5 พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เท่ากับ 17.58% (ภาพที่ 4.33 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 21 และ 50)

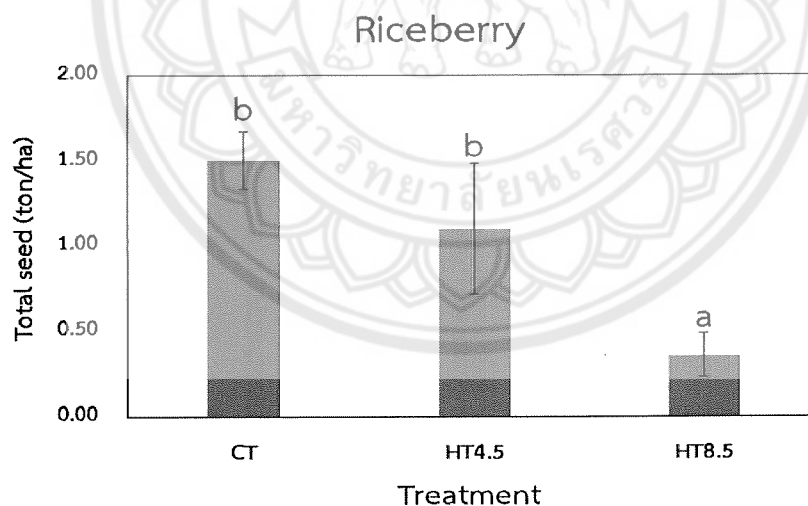
##### 4.5.7.2 ผลผลิตรวมต้น/เฮกแตร์ของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่

ผลการศึกษาพบว่า ผลผลิตรวมของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ในสิ่งทดลอง HT8.5 เมื่อเปรียบเทียบกับ CT โดยลดลงสูงถึงระดับ 68.67% อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการศึกษาในสิ่งทดลอง HT4.5 พบว่ามีแนวโน้มลดลงเท่ากับ 26.67% (ภาพที่ 4.34 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 21 และ 50)



ภาพที่ 4.33 ผลผลิตรวมต้น/เฮกแตร์ของข้าวพันธุ์ กข 29 ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง



ภาพที่ 4.34 ผลผลิตรวมต้น/เฮกแตร์ของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.6.1.2 กรดโอเลอิก (oleic acid)

ผลการศึกษาในกรดไขมันสำคัญชนิดกรดโอเลอิก ในข้าว 2 พันธุ์ พบผลการศึกษาที่น่าสนใจที่เกิดขึ้นในแต่ละพันธุ์ดังนี้ และ แสดงรายละเอียดในภาพที่ 4.36

ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการสร้างกรดโอเลอิก ของข้าวพันธุ์ กข 29 และไรซ์เบอร์รี่ มีการตอบสนองในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ต่อสถานการณ์การเพิ่มระดับอุณหภูมิ ทั้ง 2 สถานการณ์ คือ HT4.5 และ HT8.5 เมื่อเปรียบเทียบกับ CT

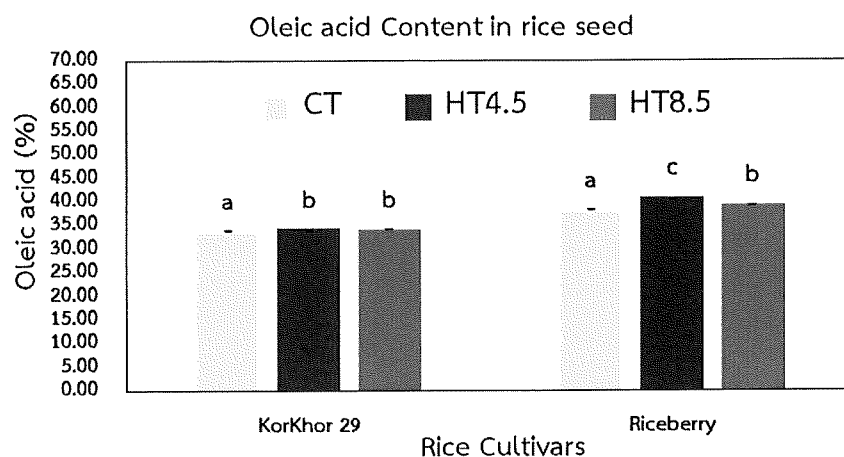
เมื่อพิจารณาในข้าวพันธุ์ กข 29 พบว่าปริมาณกรดโอเลอิก เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 เท่ากับ 1.40% และ 1.29% ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลการศึกษาปริมาณกรดโอเลอิกในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ พบว่าเพิ่มขึ้นเช่นกันในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 เท่ากับ 6.45% และ 2.33% ตามลำดับ (ภาพที่ 4.36 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 23 และ 52)

#### 4.6.1.3 กรดลิโนเลอิก (linoleic acid)

ผลการศึกษาในระดับกรดไขมันสำคัญชนิดลิโนเลอิกในข้าว 2 พันธุ์ พบผลการศึกษาที่แตกต่างกันในแต่ละพันธุ์ดังนี้ (แสดงรายละเอียดในภาพที่ 4.37) (ดูเพิ่มเติมในภาคผนวก)

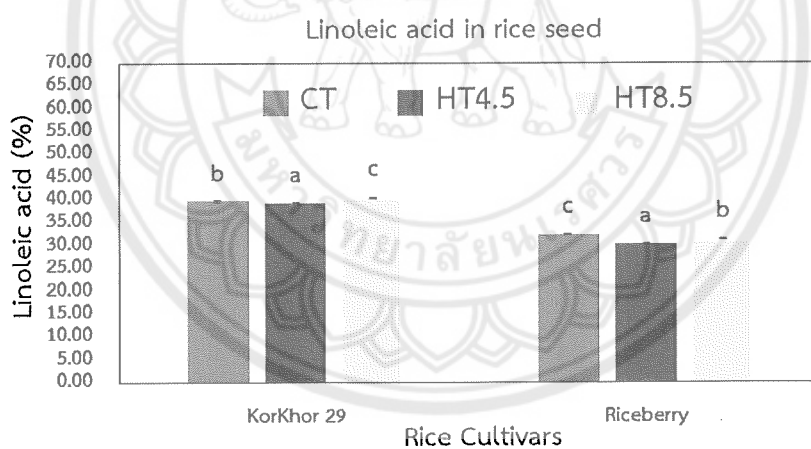
ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการสร้างกรดลิโนเลอิกของข้าวพันธุ์ กข 29 มีการตอบสนองในเชิงลบภายใต้สถานการณ์ HT4.5 แต่ตอบสนองในเชิงบวกภายใต้สถานการณ์ HT8.5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับ CT โดยพบว่า ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 ระดับกรดลิโนเลอิกลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในสิ่งทดลอง HT4.5 เท่ากับ 1.12% ในขณะที่เพิ่มขึ้นในสิ่งทดลอง HT8.5 มีแนวโน้มปริมาณกรดลิโนเลอิกเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.14%

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ พบว่าปริมาณกรดลิโนเลอิกลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ทั้งในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 พบว่าลดลงเท่ากับ 6.49% และ 3.15% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (ภาพที่ 4.37 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 24 และ 53)



ภาพที่ 4.36 ปริมาณกรดโอเลอิกเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ในข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 7 สิ่งทดลอง



ภาพที่ 4.37 ปริมาณกรดลินอเลอิกเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ในข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

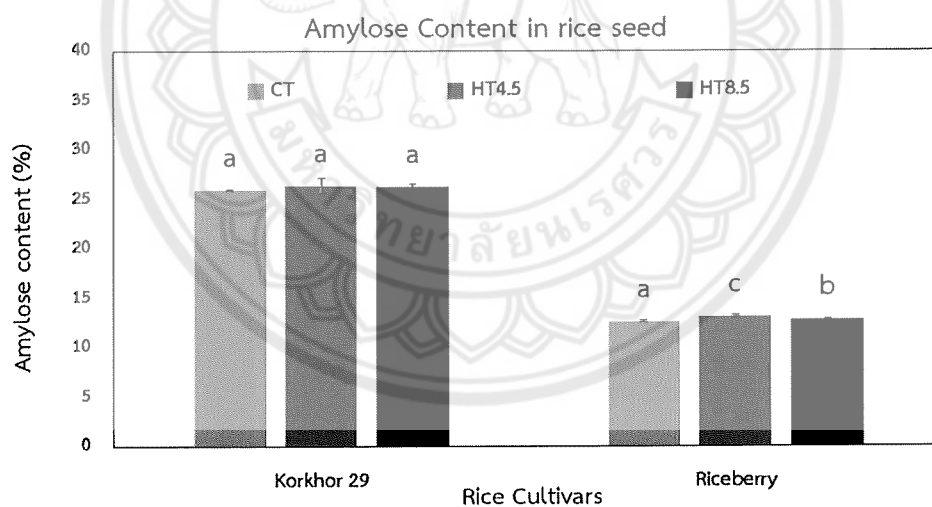
หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

## 4.6.2 คุณสมบัติของแป้งในเมล็ดข้าว (สตาร์ช)

### 4.6.2.1 อะมิโลส

การวิจัยเพื่อศึกษาผลกระทบของสถานการณ์การเพิ่มระดับอุณหภูมิ 2 ระดับภายใต้ภาพถ่ายอนาคต RCP 4.5 และ RCP8.5 ที่มีต่อองค์ประกอบแป้งข้าวในรูปแบบอะมิโลสที่มีต่อข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ผลการศึกษาระบุว่าไม่พบการตอบสนองในเชิงบวกหรือลบของสถานการณ์ทั้ง 2 รูปแบบที่มีต่อข้าวพันธุ์ กข29 เนื่องจากไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P>0.05$ ) อย่างไรก็ตามพบว่า มีแนวโน้มพบว่าระดับเปอร์เซ็นต์อะมิโลสเพิ่มขึ้น เท่ากับ 1.77% และ 1.31% ในทรีทเมนต์ HT 4.5 และ HT8.5 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (CT) (ภาพที่ 4.38 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 25 และ 54)

ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์อะมิโลสในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ พบว่าการศึกษาที่น่าสนใจนั้นคือพบว่าในสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 มีระดับเปอร์เซ็นต์อะมิโลสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P<0.05$ ) เท่ากับ 4.27% และ 1.74% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (CT) (Figure 6) ซึ่งบ่งบอกว่าภายใต้การคาดการณ์สถานการณ์การเพิ่มระดับอุณหภูมิในอนาคตนั้นจะส่งผลทำให้ระดับอะมิโลสในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.38 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 25 และ 54)



ภาพที่ 4.38 ปริมาณอะมิโลส เฉลี่ย ( $\pm$ SD) ในข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

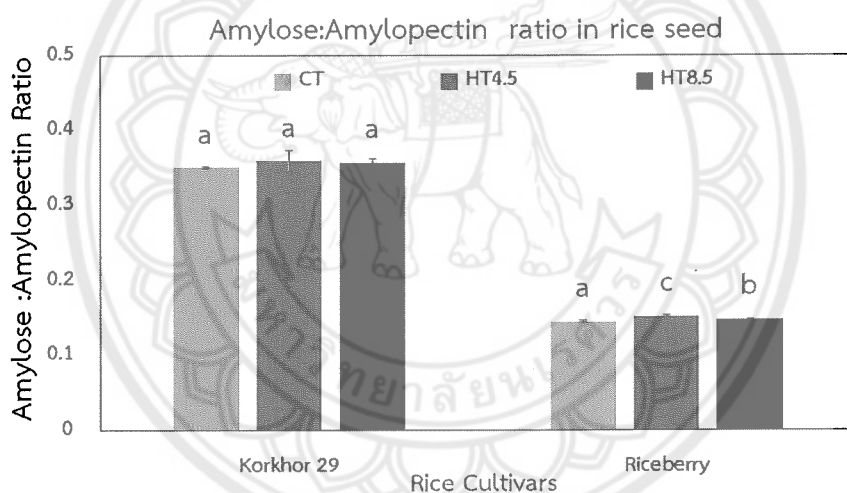
หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

#### 4.6.2.3 อัตราส่วนระหว่าง อะมิโลส : อะมิโลเพคติน

อัตราส่วนระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพคติน เป็นค่าชี้วัดหนึ่งที่บ่งบอกถึงความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์ระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพคติน ซึ่งถ้าค่าอัตราส่วนค่อนข้างสูง แสดงว่ามีปริมาณอะมิโลสสูงมากเช่นในข้าวเจ้า ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ได้พบว่าการปลูกข้าวภายใต้ 3 สภาวะ (3 สิ่งทดลอง) ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง อะมิโลส:อะมิโลเพคติน ที่แตกต่างกันในแต่ละพันธุ์ ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 4.40 (ดูเพิ่มเติมในภาคผนวก)

ผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพคติน ในข้าวพันธุ์ กข29 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับ CT

ในขณะที่ผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพคติน ในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ พบว่าการศึกษาที่น่าสนใจนั้นคือพบว่าสิ่งทดลอง HT4.5 และ HT8.5 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เท่ากับ 4.90% และ 1.86% เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (CT) (ภาพที่ 4.40 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 27 และ 56)



ภาพที่ 4.40 อัตราส่วน อะมิโลส : อะมิโลเพคติน เฉลี่ย ( $\pm$ SD) ในข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือนภายใต้ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

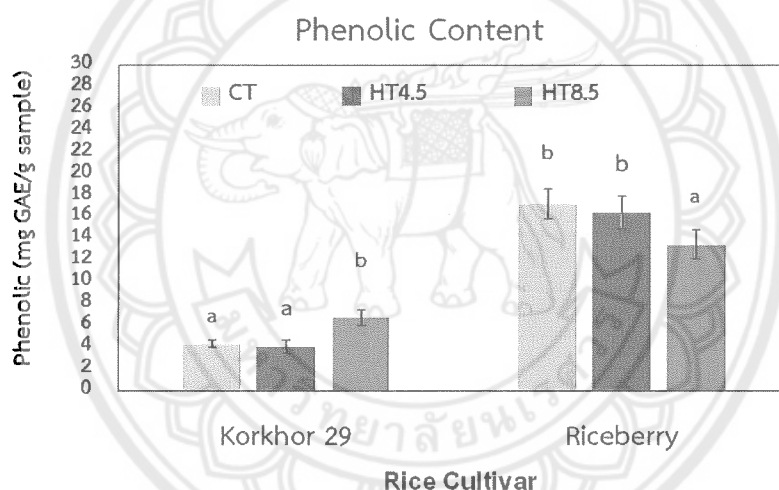
หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

## 4.7 สารแอนตี้ออกซิแดนซ์

### 4.7.1 สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Content)

ผลการศึกษาค่าฟีนอลิกซึ่งเป็นสารแอนตี้ออกซิแดนซ์ ในข้าวพันธุ์ กข29 พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) พบว่าค่าฟีนอลิกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญภายใต้สภาวะ HT8.5 เท่ากับ 57.01% เมื่อเปรียบเทียบกับ CT ผลการศึกษาบ่งบอกว่าข้าวพันธุ์ กข29 เพิ่มการสร้างสารแอนตี้ออกซิแดนซ์ภายใต้สภาวะความเครียดจากระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

พบผลการศึกษาฟีนอลิกที่ตรงข้ามกัน ในข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่ เนื่องจากพบว่าภายใต้สภาวะ HT8.5 ทำให้ค่าฟีนอลิกลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เท่ากับ 21.63% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (CT) ซึ่งบ่งบอกว่าข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่ไม่สามารถหลั่งสารแอนตี้ออกซิแดนซ์ประเภทฟีนอลิกออกมาได้มากขึ้นภายใต้สภาวะความเครียดจากอุณหภูมิ (ภาพที่ 4.42 รวมทั้งตารางภาคผนวกที่ 29 และ 58)



ภาพที่ 4.42 สารประกอบฟีนอลิกเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ในข้าว 2 พันธุ์ ซึ่งปลูกภายในโรงเรือน ภายใต้ 3 สิ่งทดลอง ซึ่งควบคุมให้มีระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5

หมายเหตุ \*อักษรบนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

### 4.7.2 สารแอนโทไซยานิน

ผลการศึกษาสารแอนตี้ออกซิแดนซ์ประเภทแอนโทไซยานินซึ่งเป็นสารแอนตี้ออกซิแดนซ์ที่สำคัญอีกประเภทหนึ่งในข้าว ด้วยจากการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของแอนโทไซยานินในหลอดทดลองเมื่อทดสอบความสามารถในการจับอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging assay (ดี

#### 4.8 ลักษณะทางพันธุกรรม

ในการศึกษาครั้งนี้ส่วนหนึ่งต้องการทราบผลการเปลี่ยนแปลงทางด้านพันธุกรรม เมื่อนำข้าวจำนวน 3 พันธุ์ คือ กข 29 ขาวดอกมะลิ105 และไรซ์เบอร์รี่ที่ได้รับการสัมผัสกับระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ในการศึกษาเลือกใช้วิธีเอเอฟแอลพี (amplified fragment length polymorphism, AFLP) ซึ่งเป็นวิธีการที่พัฒนาขึ้นโดย Vos (1995) การตรวจสอบลายพิมพ์ดีเอ็นเอโดยวิธีการนี้เป็นการรวมเอาเทคนิคอาร์เอฟแอลพีและอาร์เอฟดี เข้าด้วยกัน ซึ่งมีการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอที่ได้จากการตัดด้วยเอนไซม์โดยใช้เทคนิคพีซีอาร์ โดยการตัด 20 ดีเอ็นเอด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะ 2 ชนิด คือ เอนไซม์ที่มีตำแหน่งจดจำ 6 คู่เบส (EcoRI) ร่วมกับเอนไซม์ที่มีตำแหน่งจดจำ 4 คู่เบส (MseI) แล้วเชื่อมต่อ adapter เข้าที่ปลายของชิ้นดีเอ็นเอต่อจากตำแหน่งตัดจำเพาะของเอนไซม์ adapter เป็นดีเอ็นเอสายคู่สั้นสั้น ๆ ที่มีปลายเหนียว โดยปลายหนึ่งมีลำดับเบสที่สามารถเชื่อมกับดีเอ็นเอที่ถูกตัดด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะ การต่อ adapter เข้าที่ปลายทั้งสองข้างของชิ้นดีเอ็นเอเพื่อเป็นตำแหน่งที่จับของไพรเมอร์ในการทำพีซีอาร์เพื่อเพิ่มปริมาณชิ้นดีเอ็นเอไพรเมอร์ที่จำเพาะกับ adapter นั้น ๆ คุณสมบัติที่สำคัญคือ สามารถตรวจสอบความแตกต่างได้สูง อีกทั้งเป็นได้ทั้ง codominant และ dominant marker

การทำพีซีอาร์มี 2 ขั้นตอนได้แก่ขั้นตอน preselective amplification โดยไพรเมอร์ที่ใช้ด้านปลาย 5' มีลำดับเบสตรงกับส่วนของ adapter รวมกับส่วนของเบสที่ตำแหน่งตัดจำเพาะของเอนไซม์ มีการเพิ่มเบสเพื่อคัดเลือกเข้าที่ปลาย 3' 1 เบส เพื่อทำให้เกิดการเพิ่มปริมาณชิ้นดีเอ็นเอบางส่วนที่มีลำดับเบสที่ปลายทั้งสองข้างมีเบสคู่สมกับไพรเมอร์ เป็นการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอต้นแบบให้มากขึ้น และช่วยให้เกิดการคัดเลือกเพิ่มปริมาณชิ้นดีเอ็นเอที่ต้องการ การทำพีซีอาร์ขั้นตอนที่สองเรียกว่า selective amplification ไพรเมอร์ที่ใช้เป็นไพรเมอร์ที่เพิ่มเบส (selective nucleotide) 2-3 เบสที่ด้านปลาย 3' เพื่อคัดเลือกชิ้นดีเอ็นเอบางส่วนเท่านั้น การทำพีซีอาร์ทั้งสองได้ปรับอุณหภูมิในช่วง annealing ที่มีอุณหภูมิสูงในรอบแรก แล้วลดอุณหภูมิลงในรอบต่อ ๆ ไป เพื่อเลือกเพิ่มปริมาณเฉพาะดีเอ็นเอที่มีลำดับเบสคู่สมกับ ไพรเมอร์ ถ้าต้องการเพิ่มเบสเพื่อคัดเลือกตั้งแต่ 3 เบสขึ้นไปต้องใช้วิธีการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ 2 ครั้งโดยครั้งแรกใช้ไพรเมอร์ที่เพิ่มเบสเพื่อคัดเลือกตั้งแต่ 1-2 เบส และครั้งที่สองจึงใช้ไพรเมอร์ที่เพิ่มเบสคัดเลือกต่อจากไพรเมอร์ที่ใช้เพิ่มปริมาณดีเอ็นเอในครั้งแรกอีก 1-2 เบส รวมเบสที่เพิ่มเพื่อการคัดเลือก 3-4 เบส ตามที่ต้องการ ขั้นตอนสุดท้ายนำดีเอ็นเอที่เพิ่มปริมาณได้มาแยกขนาด โดยการใช้วิธีการอิเล็กโตรโฟรีซิสบน denaturing polyacrylamide gel และตรวจสอบดีเอ็นเอจากการติดฉลากไพรเมอร์ด้วยสารกัมมันตรังสี แล้วนำมาทำออโตเรดิโอกราฟ หรือติดฉลากไพรเมอร์ด้วยสารเรืองแสง (fluorescent dye) แล้วติดตามโดยเครื่องหาลำดับเบสแบบอัตโนมัติ (automate sequencer) หรือไฮบริดเซชัน โดยใช้โพรบที่ติดฉลากด้วยสารปล่อยรังสีและทำ chemiluminescence หรือติดตามแถบดีเอ็นเอด้วยการย้อมเจลด้วยซิลเวอร์ไนเตรทแถบดีเอ็นเอที่เกิดขึ้นเป็นแถบดีเอ็นเอที่เกิดขึ้นจากการทำพีซีอาร์โดยใช้ไพรเมอร์คู่หนึ่งๆ สามารถใช้แยกความแตกต่างของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิด หรือแต่ละตัวอย่างได้โดย



พิจารณาจากขนาด และจำนวนชิ้นดีเอ็นเอที่แตกต่างกัน จำนวนชิ้นดีเอ็นเอที่เกิดขึ้นมีจำนวนมากน้อย ขึ้นกับขนาดของจีโนม ความถี่ในการตัดของเอนไซม์ตัดจำเพาะ และจำนวนเบสที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย 3' ของไพรเมอร์

จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าแนวโน้มของระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันคือสูงกว่าระดับปกติในธรรมชาติซึ่งได้รับการคาดการณ์ว่าจะเกิดขึ้นในอนาคตภายใต้ ภายฉายอนาคตตั้งที่ได้กล่าวมาแล้ว ที่ใช้ในการทดลองนั้นส่งผลให้เกิดความแตกต่างกันในระดับโมเลกุลของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ทางด้านพันธุกรรมจากภาพ Phylogenetic tree (ภาพที่ 4.4) และ ค่า Similarity Index (ตารางที่ 4.3) ดังรายละเอียด

ผลการศึกษาจากการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการ ต่อการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ด้วยเทคนิคการทำ AFLP (Amplified Fragment Length Polymorphism) โดยแบ่งสภาวะอุณหภูมิในช่วงการเพาะปลูกเป็น 3 กลุ่มคือ

CT : สภาวะอุณหภูมิปกติ

HT4.5: สภาวะอุณหภูมิเพิ่มขึ้นภายใต้สถานการณ์ RCP4.5

HT8.5: สภาวะอุณหภูมิเพิ่มขึ้นภายใต้สถานการณ์ RCP8.5

จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าแนวโน้มของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดลองนั้นส่งผลให้เกิดความแตกต่างกันในระดับโมเลกุลของข้าวที่ใช้ในการทดลองโดยพิจารณาความสัมพันธ์ทางด้านพันธุกรรมจากภาพ Phylogenetic tree (ภาพ 4.44) และ ค่า Similarity Index (ตารางที่ 4.3) จะเห็นได้ว่าทุกตัวอย่างมีการกระจายตัวกันค่อนข้างเด่นชัด 2 กลุ่มใหญ่ตามพันธุ์ข้าว และ 3 กลุ่มย่อยแยกกันชัดเจนตามกลุ่มข้าวตามสิ่งทดลอง กลุ่มหลักๆได้ดังนี้

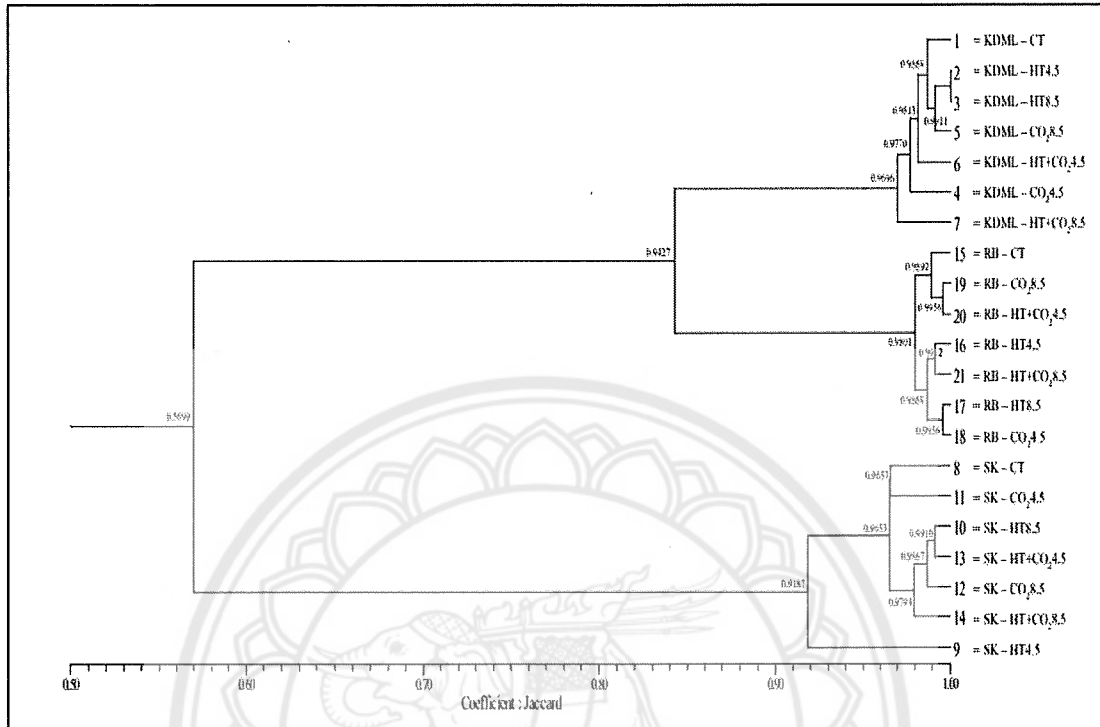
**ลักษณะทางพันธุกรรมจากผลการปลูกข้าว**

พิจารณาเฉพาะพันธุ์ข้าวที่ศึกษาในการวิจัยนี้และแยกเฉพาะปัจจัยระดับอุณหภูมิ ทั้ง 2 ระดับ คือ HT4.5 และ HT8.5 พบว่า สามารถแยกลักษณะทางพันธุกรรมออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ กลุ่มข้าวพันธุ์ ไرش์เบอร์รี่ (RB) กลุ่มข้าวพันธุ์ กข29 (KH29)

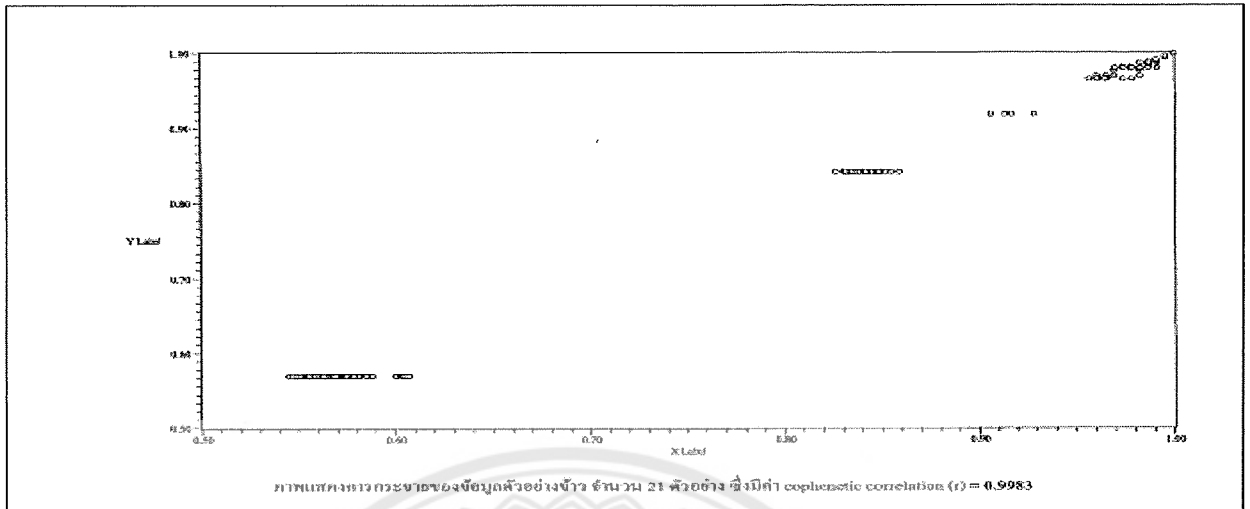
ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อยตามสิ่งทดลอง ดังนั้นจากการวิเคราะห์ลักษณะทางพันธุกรรมจึงแยกออกมาชัดเจน 6 กลุ่มดังนี้ (ภาพที่ 4.4)

1. กลุ่ม CT-RB
2. กลุ่ม HT4.5-RB
3. กลุ่ม HT8.5-RB
4. กลุ่ม CT-KH29
5. กลุ่ม HT4.5-KH29
6. กลุ่ม HT8.5-KH29

ซึ่งผลการศึกษานี้ชี้ว่า ภายใต้สถานการณ์ระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ทั้งสถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 ส่งผลทำให้ลักษณะพันธุกรรมแตกต่างแยกกลุ่มออกจากกันอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4.44 Phylogenetic Tree ของข้าว 3 สายพันธุ์ระยะแตกกอ



ภาพที่ 4.45 ภาพแสดงการกระจายตัวของข้อมูลข้าว

#### 4.9 กิจกรรมการถ่ายทอดความรู้สู่ชุมชนเพื่อการสร้างแนวทางการรับมือในชุมชน

กิจกรรมการถ่ายทอดความรู้สู่ชุมชน ภายใต้โครงการวิจัยนี้ ได้ดำเนินการภายหลังจากได้ผลการศึกษาเสร็จสิ้นแล้ว โดยดำเนินการในวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2563 (รายละเอียดแสดงในภาพที่ 4.46 และ 4.57)

รายละเอียดการดำเนินงาน มีดังนี้

##### 1) พื้นที่ศึกษา

ในการศึกษานี้เลือกกลุ่มตัวอย่างเกษตรกร จำนวน 38 คนในพื้นที่ศึกษา คือ ศูนย์การเรียนรู้ตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ต.รังนก อ.สามง่าม จ.พิจิตร

##### 2) รายละเอียดการทำงานเพื่อสร้างแนวทางการรับมือกับสภาวะโลกร้อน

###### 1.1 สรุปเนื้อหาเพื่อการนำเสนอของวิทยากร

1. สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและสภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน
2. สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและผลกระทบที่มีต่อปริมาณผลผลิตของข้าว

3. ผลการวิจัยที่ได้จากการทดลองการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและผลกระทบที่มีต่อปริมาณผลผลิตของข้าวทั้งเชิงปริมาณคุณภาพที่ได้จากการทำโครงการวิจัย

4. แนวทางการปรับตัวและแนวทางการรับมือต่อสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน

### 3) ผลการดำเนินงานในการจัดโครงการ

3.1 วิทยากรได้ดำเนินการให้รายละเอียดและความรู้ดังที่กำหนด

3.2 เมื่อเสร็จสิ้นการให้ความรู้ได้มีการ การซักถาม ถามตอบ

1. การถาม-ตอบเกี่ยวกับพันธุ์ข้าวในอดีตและปัจจุบันที่มีความทนทานต่อสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นและผลกระทบต่อผลผลิตข้าวที่ชุมชนเคยประสบมา
2. การถาม-ตอบเกี่ยวกับการปรับตัวและแนวทางการทำเกษตรกรรมในช่วงที่ชุมชนเคยประสบมา
3. การถาม-ตอบเกี่ยวกับปัญหาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและสภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้นในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อการทำงานเกษตรและผลผลิตของข้าวอย่างไร
4. การถาม-ตอบเกี่ยวกับผลกระทบของผลผลิตทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพของข้าว

3.3 วิทยากรได้จัดกิจกรรมการแบ่งกลุ่มระดมความคิดเพื่อ การร่วมสรุปแนวทาง การรับมือกับสภาวะโลกร้อนในพื้นที่การเกษตร และ เกษตรกรจะปรับตัวอย่างไรภายใต้สถานการณ์นี้

ชุมชนได้รับแนวทางในการรับมือกับสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศที่มีต่อผลผลิตข้าวทั้งเชิงปริมาณ คุณภาพ และแนวทางการแก้ไขปัญหา และสรุปให้แก่วิทยากรดังนี้

4.3.1 การลด/เลิก การเผาเศษซากทางการเกษตร

4.3.2 จัดอบรมเพิ่มเติมเพื่อให้กลุ่มเกษตรกรมีความรู้มากขึ้น

### 4) ผลลัพธ์ของการดำเนินงานมีดังนี้

4.1 เกษตรกรได้รับทราบข้อมูลและตระหนักถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อผลผลิตข้าวไทย และผลกระทบโดยตรงต่อชุมชน

4.2 เกษตรกรได้แนวทางการรับมือในเบื้องต้น ซึ่งแม้ว่าจะเริ่มเป็นเพียงแนวความคิด และในระยะยาวสามารถที่จะสานต่อเป็น นโยบายสาธารณะในพื้นที่ได้



ภาพที่ 4.46 ชุมชนเกษตรกรผู้เข้าร่วม ณ ต.รังนก อ.สามง่าม จ.พิจิตร ซึ่งเข้าร่วมการอบรมการถ่ายทอดความรู้ แลกเปลี่ยนเรียนรู้ และบูรณาการแผนการรับมือสภาวะโลกร้อนเพื่อผลผลิตในชุมชน ภายใต้โครงการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน 62



ภาพที่ 4.47 กิจกรรมการอบรมชุมชนเกษตรกร ในพื้นที่ศูนย์การเรียนรู้ตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงต.รังนก อ.สามง่าม จ.พิจิตร ซึ่งได้รับการอบรมการถ่ายทอดความรู้ แลกเปลี่ยนเรียนรู้ และบูรณาการแผนการรับมือสภาวะโลกร้อนเพื่อผลิตผลผลิตในชุมชน ภายใต้โครงการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน 62

## บทที่ 5

### อภิปรายผลและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อสร้างการตระหนักรู้และรับรู้ด้านผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโดยเน้นด้านการเพิ่มระดับอุณหภูมิที่มีต่อภาคเกษตรกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งผลผลิตข้าว เนื่องจากข้าวเป็นอาหารหลักของไทยทั้งในแง่การบริโภคและเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญอันดับหนึ่งของประเทศ ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลผลกระทบในพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆภายใต้การเพิ่มระดับอุณหภูมิที่ได้รับการคาดการณ์ว่าจะเกิดขึ้นในอนาคต อันจะนำไปสู่การวางนโยบายและแผนการรับมือในภาคส่วนที่เกี่ยวข้องต่อไป ในการศึกษานี้ได้ควบคุมระดับอุณหภูมิในระดับที่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นนี้ได้รับการคาดการณ์ภายใต้ภาพฉายอนาคต RCPs Scenario ตามที่ได้รายงานจาก IPCC ฉบับที่ 5 (IPCC, AR 5) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกภาพฉายอนาคตที่ระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และส่งผลต่อค่า Radiative forcing ที่มีความเป็นไปได้ในประเทศไทยคือ RCP 4.5 และ RCP 8.5 และศึกษาผลกระทบที่มีต่อข้าวจำนวน 2 พันธุ์ ( กข 29 และ ไรซ์เบอร์รี่) ในด้าน การเจริญเติบโต คุณภาพผลผลิต สารอาหารสำคัญต่อโภชนาการสำหรับผู้บริโภค สารแอนติออกซิแดนซ์ และลักษณะทางพันธุกรรม ผลการศึกษาทั้งหมดพบประเด็นที่น่าสนใจและควรนำไปศึกษาต่ออย่างต่อเนื่องเพื่อประโยชน์ในการวางนโยบายและแผนของประเทศไทยต่อไปดังนี้

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการควบคุมระดับอุณหภูมิ ภายในโรงเรือนปลูกข้าวจำนวน 2 พันธุ์ ขนาด 3x4 ตารางเมตร และมีความสูง 2.5 เมตร จำนวน 9 โรงเรือน (ภายใต้ 3 สิ่งทดลอง 3 ซ้ำ) โดยจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศที่กำหนดโดยตัวชี้วัดที่สำคัญ 2 พารามิเตอร์คือ ระดับอุณหภูมิ ที่เพิ่มขึ้นตาม RCP Scenario ที่ระดับ radiative forcing 4.5 และ 8.5 ทั้งปัจจัยเดี่ยวและปัจจัยร่วม 3 สถานการณ์ ผลการควบคุมพบว่าสามารถควบคุมระดับอุณหภูมิ ได้สำเร็จตามที่กำหนด และตั้งเป้าหมายไว้ตามแนวโน้มการประเมินโดย RCP Scenario 4.5 และ 8.5 โดยสามารถควบคุมให้ระดับอุณหภูมิในสิ่งทดลอง HT 4.5 และ HT 8.5 มีระดับอุณหภูมิสูงกว่าระดับควบคุม (สิ่งทดลอง CT) เท่ากับ  $2.61^{\circ}\text{C}$  และ  $4.5^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตาม RCP 4.5 และ 8.5 ที่คาดการณ์ไว้ว่าระดับอุณหภูมิจะสูงกว่าระดับธรรมชาติ (หรือสภาวะปัจจุบัน) มากกว่า  $1.1-2.6^{\circ}\text{C}$  และ  $2.6-4.8^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ

เพื่อกำหนดให้ดินเป็นปัจจัยควบคุม ดังนั้นดินที่ใช้ปลูกจึงเป็นดินจากแหล่งเดียวกันและนำมาผสมในอ่างใหญ่คลุกเคล้าให้เท่ากัน และ กระจายไปยังโรงเรือนทั้ง 9 โรงเรือน และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารสำคัญก่อนการปลูกข้าวทั้ง 2 พันธุ์ เพื่อให้ความเชื่อมั่นได้ว่าผลที่เกิดขึ้นนั้นเกิด

จากปัจจัยอุณหภูมิ เพียง ปัจจัยเดียวเท่านั้นเนื่องจากได้ควบคุมปัจจัยธาตุอาหารในดินให้เท่าเทียมกันทุกประการทั้งชนิดดินและปริมาณปุ๋ยที่ใช้ ซึ่งผลการศึกษาในธาตุอาหารในดินยืนยันว่าสามารถควบคุมปัจจัยดินให้เท่าเทียมกันได้ตามที่ได้กำหนดให้เนื่องจากไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่าง 3 สิ่งทดลอง และทั้ง 2 พันธุ์ ( $p > 0.05$ ) ของธาตุอาหารชนิดไนโตรเจนทั้งหมด ไนเตรท แอมโมเนียม ฟอสฟอรัสทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียม ปัจจัยของดินเป็นปัจจัยควบคุม ดังนั้นผลการศึกษาในพารามิเตอร์ต่างๆในการวิจัยครั้งนี้เป็นผลมาจากระดับอุณหภูมิและตามที่ได้กำหนดไว้ในกรอบงานวิจัย ดังนั้นผลการศึกษาในระยะต่อมาทั้งในด้านการเจริญเติบโตทางใบ อัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์ รงควัสดุ องค์ประกอบผลผลิต สารอาหารสำคัญ กรดไขมันสำคัญ และความหวานของข้าว สารแอนติออกซิแดนซ์ และลักษณะทางพันธุกรรม จึงเป็นผลการศึกษาที่เกิดจากสภาวะที่ได้จำลองตามสภาวะ RCP 4.5 และ RCP 8.5 อย่างแท้จริง ดังนี้

ผลการศึกษาในความยาวใบในช่วงระยะแตกกอและระยะเก็บเกี่ยว ในข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ ผลการศึกษาในภาพรวมพบแนวโน้มที่น่าสนใจ (ตารางภาคผนวก ที่ 2 และ 31) ในระยะแตกกอในภาพรวมพบว่าข้าวตบสองในเชิงลบเป็นส่วนมาก สำหรับข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 (ความยาวใบลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ CT) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) สำหรับข้าวพันธุ์ กข29 ตบสองในเชิงลบทั้ง 2 สถานการณ์คือ HT4.5 และ HT8.5 เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าความยาวใบข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ลดลงสูงสุดถึง 30 % ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

ผลการศึกษาในพารามิเตอร์ความยาวใบ สอดคล้องกับผลการศึกษาในน้ำหนักใบและพื้นที่ใบทั้งหมดของข้าวในระยะแตกกอ เนื่องจากพบว่า ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 ส่งผลทำให้น้ำหนักใบของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ดูเพิ่มเติมในตารางภาคผนวกที่ 3 และ 32) โดยพบว่าลดลงสูงมาก (ในระดับตั้งแต่ 57-70%) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในพารามิเตอร์ความยาวใบ โดยพบว่าข้าวพันธุ์ กข 29 มีน้ำหนักใบรวมลดลงมากกว่า ผลการศึกษานี้บ่งชี้ว่าความยาวใบ สอดคล้องกับน้ำหนักใบทั้งหมดของต้นข้าวอย่างชัดเจน เช่นเดียวกับผลการศึกษาในพื้นที่ใบทั้งหมด มีลักษณะเช่นเดียวกัน คือลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$  ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 ในช่วงตั้งแต่ 40-65% ทั้ง 2 พันธุ์ (ดูเพิ่มเติมในตารางภาคผนวกที่ 4 และ 33) ดังนั้นภาพรวมของผลการศึกษาในระยะแตกกอพบว่าส่งผลทำให้มีการตอบสนองในเชิงลบในภาพรวม ทั้งความยาวใบ พื้นที่ใบ และน้ำหนักใบรวม มีเพียงผลการศึกษาในพารามิเตอร์ Leaf Area Ratio (LAR) ที่ได้ผลแตกต่างจากพารามิเตอร์อื่นๆ โดยไม่พบความ



แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ในข้าวพันธุ์ กข 29 แต่พบว่าทำให้ LAR เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ภายใต้สถานการณ์ HT8.5 โดยเพิ่มขึ้นในระดับ 38 % (ตารางภาคผนวกที่ 34)

ผลการศึกษารามิเตอร์ความยาวใบ น้ำหนักใบ และพื้นที่ใบทั้งหมดในระยะเก็บเกี่ยวพบผลการศึกษที่แตกต่างกับระยะแตกกอ เนื่องจากพบว่าความยาวใบ และพื้นที่ใบทั้งหมด/ต้น ของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ไม่ตอบสนองในเชิงบวกหรือลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ตารางภาคผนวก 35 และ 37) ซึ่งตรงข้ามกับผลการศึกษาในระยะแตกกอ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการศึกษาในน้ำหนักใบทั้งหมด/ต้น พบว่าข้าวพันธุ์ กข 29 ไม่มีการตอบสนองที่แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แต่พบว่าน้ำหนักใบข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ตอบสนองในเชิงลบภายใต้สถานการณ์ HT8.5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยลดลงเท่ากับ 37.178% (ตารางภาคผนวก 36) สุดท้ายผลการศึกษาใน Leaf Area Ratio (LAR) ก็ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ดังนั้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่าง 2 ระยะเวลาในปลูกพบว่าช่วงแรกคือระยะแตกกอ ใบมีการตอบสนองในเชิงลบมากกว่า แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปข้าวมีการปรับตัวได้ดีขึ้นดังนั้นการตอบสนองในเชิงลบเกิดขึ้นน้อยกว่าในระยะเก็บเกี่ยว (ตารางภาคผนวกที่ 37-38)

อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ซึ่งเปรียบเทียบในช่วงระยะเวลา 100 วัน ระหว่างระยะแตกกอ และระยะการเก็บเกี่ยวโดยคำนวณจากข้อมูลพื้นที่ใบ น้ำหนักใบของแต่ละช่วงระยะเวลา ผลการศึกษาบ่งบอกว่าภาพรวมของสิ่งทดลองทั้ง 3 สภาวะ (รวมสิ่งทดลองควบคุม) (ตารางภาคผนวกที่ 10 และ 39) ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์แต่อย่างใด เมื่อพิจารณาแล้ว ผลการศึกษาในอัตราการเจริญสัมพัทธ์ในช่วง 100 วันที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ มีผลต่อเนื่องมาจากผลการศึกษาในระยะเก็บเกี่ยวที่แสดงว่าการเจริญของใบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติใดๆ ( $p < 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าในระยะหลังจากแตกกอข้าวอาจจะมีการปกป้องตนเองจากสภาวะไม่ปกติโดยการรักษาสภาวะการเจริญเติบโตทางใบของใบให้คงที่เพื่อให้มีพื้นที่ในการสังเคราะห์แสงอย่างเพียงพอ อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในการเจริญเติบโตสัมพัทธ์โดยเน้นการเจริญทางใบนั้นยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าสภาวะโลกร้อนไม่ส่งผลกระทบต่อข้าวในภาพรวม เนื่องจากเมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆนอกเหนือจากการเจริญของใบ พบว่าข้าวมีการตอบสนองที่น่าสนใจดังนี้

ผลการศึกษาในเบื้องต้นสังเกตซึ่งเน้นผลการเจริญของใบเป็นลำดับแรก เนื่องจากพื้นที่ใบ บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงได้ทางตรงและทางอ้อม จึงทำให้มีงานวิจัยที่ใช้ข้อมูลพื้นที่ใบสร้างเป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินการเจริญเติบโต รวมทั้งมวลชีวภาพเหนือดินหรือแม้กระทั่งความแปรปรวนทางพันธุกรรมของพืช (Weraduwage et al., 2015) เนื่องจากในใบพืชประเภท C3 เช่นข้าวมี เอนไซม์ที่สำคัญในการสังเคราะห์แสงคือ Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (Rubisco) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำให้ สาร ribulose-1,5-bisphosphate (RuBP) เข้าไปจับกับก๊าซ CO<sub>2</sub> ในการสังเคราะห์แสงเพื่อผลิตสารประกอบที่มีคาร์บอน3 อะตอมคือ 3-phosphoglyceric acid (PGA) ในใบพืชจะมีสัดส่วนของ Rubisco ประมาณ 50% ของปริมาณโปรตีนทั้งหมด หรือประมาณ 25% ของไนโตรเจนในใบ (Parry et al., 2013) ดังนั้นการลดลงของพื้นที่ใบ หรือ เพิ่มพื้นที่ใบล้วนแต่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงของพืช อย่างไรก็ตามพบว่าถึงแม้ว่าจะมีพื้นที่ใบมากแต่หากพืชมีความเครียดจากความร้อน (heat stress) ประสิทธิภาพในการทำให้การจับตัวระหว่าง RuBP กับ CO<sub>2</sub> ลดลงเช่นกัน เนื่องจากปัจจัยอุณหภูมิสูงจะส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการทำปฏิกิริยาระหว่าง RuBP กับ O<sub>2</sub> เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ O<sub>2</sub> มีอิทธิพลต่อการยับยั้งการจับ CO<sub>2</sub> และนอกจากนั้นยังขึ้นกับปริมาณรังควัตถุชนิดหลักที่จะดูดกลืนช่วงแสง visible light มาใช้สำหรับการสังเคราะห์แสงด้วยเช่นกัน (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558) ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จะได้ทำการศึกษารังควัตถุชนิดหลักด้วยเช่นกัน

การศึกษาในรังควัตถุ มีความสำคัญมากเนื่องจาก คลอโรฟิลล์ชนิด a และ b จัดว่าเป็นรงควัตถุหลักในการสังเคราะห์แสง โดยเฉพาะในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนระบบแสง II ซึ่งคลอโรฟิลล์จะดับพลังงานที่ได้รับที่ศูนย์เกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II จะทำให้อิเล็กตรอนของคลอโรฟิลล์ มีพลังงานจนสามารถหลุดออกจากโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้มีศักยภาพทางรีดักชันสูงมาก จนเคลื่อนที่ ไปยังโมเลกุลที่มีศักย์รีดักชันต่ำกว่าตามลูกโซ่ของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (electron transport chain) (Lobato et al., 2010) ส่วนรงควัตถุประเภทแคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุรองจากคลอโรฟิลล์ เป็นสารประกอบที่ป้องกันอันตรายจากแสง (photoprotection) ให้แก่พืช และ ทำให้ปริมาณโปรตีนคงที่ในระบบการสังเคราะห์แสง (Lobato et al., 2010) ปริมาณรงควัตถุในการวิจัยครั้งนี้ได้เก็บตัวอย่างใบข้าวทั้ง 2 พันธุ์ช่วงระหว่างระยะแตกกอเนื่องจากเป็นระยะที่พืชมีอัตราการสังเคราะห์แสงในระดับสูงเพราะใบพืชยังอยู่ในช่วงอายุกำลังเจริญเติบโตเต็มที่ และคลอโรฟิลล์ยังไม่สลายตัว (Bielczynski et al., 2017) อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในรงควัตถุชนิดคลอโรฟิลล์คลอโรฟิลล์เอ ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ระหว่างสิ่งทดลองทั้งหมด (ตารางภาคผนวกที่ 11-13) อย่างไรก็ตาม ในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่กลับพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์บี เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ภายใต้ HT

8.5 ประมาณ 39 % ซึ่งสมมติฐานว่าน่าจะเป็นกลไกป้องกันตัวเองของข้าวสีที่พยายามเพิ่มปริมาณรงควัตถุขดเขยผลกระทบจากสภาวะเครียดจากอุณหภูมิสูง และในข้าวพันธุ์โรซเบอรี่เช่นเดียวกันพบผลการศึกษที่สอดคล้องกันเมื่อวิเคราะห์แคโรทีนอยด์โดยพบว่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ภายใต้ HT 4.5 เท่ากับ 11% (ตารางภาคผนวก 41-43) ผลการศึกษาตรงข้ามกันในข้าวพันธุ์ กข 29 ซึ่งพบว่าแคโรทีนอยด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เท่ากับ 14% โดยปกติแล้วแคโรทีนอยด์เป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ประเภทหนึ่งของพืช (Young, 2018) งานวิจัยครั้งซึ่งการวิจัยระบุว่าปริมาณแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้นนั้นอาจส่งผลมาจากการเพิ่มระดับแอนติออกซิแดนซ์ในพืชเพื่อปกป้องอันตรายจากความร้อนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นผลการศึกษาบ่งชี้ว่าข้าวสีแสดงศักยภาพในการต้านสารอนุมูลอิสระได้ดี

ถึงแม้ว่าผลของการศึกษานี้ไม่พบความแตกต่างเชิงสถิติในปริมาณของรงควัตถุของใบข้าวประเภทคลอโรฟิลล์เอของข้าวทั้ง 2 พันธุ์อาจเนื่องมาจากสภาวะในการศึกษานี้เพิ่มระดับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยตามสภาวะของ RCP 4.5 และ RCP 8.5 ซึ่งระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นอาจจะยังไม่สูงเพียงพอที่จะสลายโครงสร้างของคลอโรฟิลล์เอ อย่างไรก็ตามงานวิจัยจำนวนมากที่ยืนยันว่าระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกระบวนการเจริญเติบโตของพืชตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นการเจริญ ช่วงออกดอก โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงการสร้างสารอาหารในเมล็ด ระดับอุณหภูมิไม่ว่าจะสูงหรือต่ำเกินไปจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง metabolic processes ของพืชหลายกระบวนการ ซึ่งจะเกิดขึ้นในเนื้อเยื่อพืช เช่น การดึงธาตุอาหารจากดิน(ของราก) การสร้างคลอโรฟิลล์ยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสง และทำลายเซลล์พืช (Nxawe, 2010) มีงานวิจัยพบว่าเมื่อเพิ่มระดับอุณหภูมิสูงกว่าระดับปกติ  $10^{\circ}\text{C}$  ถึง  $15^{\circ}\text{C}$  ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางโมเลกุลของรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสง ซึ่งทำให้ยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสงในลำดับต่อไป (Tewari and Tripathy, 1998)

งานวิจัยจำนวนหนึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อปลูกพืชภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงจะส่งผลทำให้พืชนั้นลดการสร้างสารคลอโรฟิลล์ หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางชีวภาพของสารคลอโรฟิลล์ ซึ่งการสูญเสียคลอโรฟิลล์ในลักษณะนี้สอดคล้องกับความผิดปกติของการพัฒนาเนื้อเยื่อไทลาคอยด์ซึ่งเป็นสารที่อยู่คลอโรพลาสต์ พบว่าความผิดปกติเช่นนี้สามารถเกิดขึ้น ในระยะต้นกล้าของข้าวโพดได้เช่นกัน ซึ่งพบว่ามีความผิดปกติของใบโดยแสดงอาการลายคลอโรซิส (chlorosis) บนผิวใบ ซึ่งอาการเช่นนี้พบว่าเกิดจากความผิดปกติของการสังเคราะห์สารคลอโรฟิลล์นั่นเอง (Tewari and Tripathy, 1998)

ปัจจัยที่ศึกษาในเบื้องต้นทั้งในด้านการเจริญของใบ อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ ปริมาณรงควัตถุในใบ เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องและส่งผลต่อการสร้างผลผลิตและการสร้างอาหารในเมล็ดของข้าวโดยตรง ดังนั้นผลการศึกษาในอัตราผลผลิต สารอาหาร อะมิโลส ปัจจัยความหวาน สารแอนตีออกซิแดนท์ และลักษณะทางพันธุกรรม จะเป็นตัวชี้วัดที่ชัดเจนที่จะบ่งบอกถึงคุณภาพของผลผลิตข้าวทั้งข้าวขาว และข้าวสี ได้อย่างแม่นยำภายใต้สภาวะสถานการณ์ที่คาดการณ์ว่าจะเกิดขึ้นได้ในประเทศไทยในอนาคตภายใต้คือ RCP4.5 และ RCP8.5ดังที่ได้กำหนดไว้ในการวางแผนการทดลอง ซึ่งผลการศึกษาที่สำคัญดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

ผลการศึกษาในองค์ประกอบผลผลิตทั้งหมด พบว่า จำนวนรวงทั้งหมด/กอ เมล็ดสมบูรณ์ทั้งหมด/รวง จำนวนเมล็ดทั้งหมด/รวง ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ซึ่งเมื่อพิจารณาเพียงปัจจัยเหล่านี้คล้ายกับการเพิ่มระดับอุณหภูมิตั้งที่คาดการณ์ในอนาคตไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อข้าว/ รวง อย่างไรก็ตามเริ่มเห็นผลชัดเจนเมื่อวิเคราะห์สภาพผลผลิตในพื้นที่/เฮกแตร์ เนื่องจากพบว่าภายใต้การเพิ่มระดับอุณหภูมิในระดับสูงกว่า คือ HT8.5 ส่งผลทำให้ผลผลิตรวม ต้น/เฮกแตร์ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ โดยลดลง 28.5% และ 68.7% ในข้าวพันธุ์ กข 29 และไรซ์เบอร์รี่ตามลำดับ ซึ่งสังเกตว่าข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ซึ่งเป็นข้าวสีมีปริมาณการลดลงในระดับที่สูงมากเกิน 50% (ตารางภาคผนวกที่ 50)

นอกจากผลผลิตในพื้นที่ขนาดใหญ่(เฮกแตร์) จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแล้ว เมื่อพิจารณาขนาดของเมล็ดข้าวทั้ง 2 พันธุ์โดยการชั่งน้ำหนัก 100 เมล็ด เพื่อวิเคราะห์ขนาดของเมล็ดดังที่ได้กลับพบอย่างชัดเจนว่าภายใต้ 2 สถานการณ์ล้วนส่งผลทำให้ขนาดเมล็ดของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ลดลงเด่นชัด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อพิจารณาผลการศึกษาของข้าวพันธุ์ กข29 พบว่า น้ำหนัก 100 เมล็ด ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เฉพาะสถานการณ์ HT8.5 (ตารางภาคผนวกที่ 49) ซึ่งบ่งบอกว่าคุณภาพของเมล็ดลดลงโดยมีขนาดเล็กลงภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาร่วมกันทั้ง 2 พันธุ์ อาจทำให้สรุปในเบื้องต้นได้ว่าข้าว ไรซ์เบอร์รี่อ่อนไหวต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศมากกว่าพันธุ์ กข29

การวิเคราะห์คุณภาพสารอาหารที่สำคัญอีกประการคือการวิเคราะห์กรดไขมันสำคัญในข้าว โดยเลือกวิเคราะห์ 3 ชนิด โดยเลือกกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่เป็นประโยชน์ 2 ชนิดซึ่งเป็นกรดไขมันอยู่ในกลุ่มโอเมก้าคือ คือ กรดโอเลอิก (Oleic acid) กรดไขมันกลุ่มโอเมก้า 9 มีบทบาทสำคัญช่วยลดระดับคอเลสเตอรอล และสามารถเปลี่ยนเป็นกรดโอเมก้า-3 และโอเมก้า-6 ได้เมื่อร่างกายขาด และ

ไลโนเลนิก (Linoleic acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันกลุ่มโอเมก้า 6 มีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของร่างกาย การทำงานของสมองและหัวใจ ช่วยควบคุมระดับฮอร์โมนให้อยู่ในระดับปกติ บรรเทาอาการอักเสบของผิวหนัง ผื่นแดงที่ผิวหนัง (โรคเรื้อนกวาง) ผิวหนังอักเสบ หนังศีรษะอักเสบ ผมหงอก หายช้า และวิเคราะห์กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว 1 ชนิด คือ พาล์มมิติก (Palmitic acid) (ซึ่งถ้าร่างกายได้รับกรดพาล์มมิติกในร่างกายสูงจะเสี่ยงต่อการเป็นโรคระบบหัวใจหลอดเลือด) เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงระหว่างกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว และชนิดอิ่มตัวในข้าวว่ามีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างอย่างไร ผลสรุปในภาพรวมการศึกษาในการวิจัยสถานะกรดไขมันครั้งนี้ แสดงในตารางสรุปของตารางภาคผนวกที่ 22-24 และตารางภาคผนวกที่ 51-53 ดังนี้

ผลการศึกษาในภาพรวมของกรดไขมันทั้ง 3 ชนิดพบว่าสถานะ HT 4.5 ส่งผลทำให้กรดโอเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดดี (ไม่อิ่มตัว) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ในข้าวทั้ง 2 โดยข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่มีปริมาณไขมันโอเลอิกเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 6.45% ภายใต้สถานะ HT 4.5 ส่วนผลการศึกษาในไลโนเลนิกนั้นมีผลการศึกษาสอดคล้องกันเฉพาะในข้าวพันธุ์ กข 29 เนื่องจากพบว่าปริมาณกรดไขมันชนิดนี้เพิ่มขึ้นภายใต้สถานะ HT 8.5 เท่ากับ 2% ตรงข้ามกับผลการศึกษาในข้าวโรซ์เบอร์รี่กลับลดลงทั้ง 2 สถานการณ์ ซึ่งบ่งบอกว่าไขมันดี(ไม่อิ่มตัวชนิดไลโนเลนิก) นั้นจะลดลงภายใต้สถานะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่ สุดท้ายผลการศึกษาในไขมันชนิดไม่อิ่มตัวนั้นลดลงภายใต้สถานะ HT8.5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ในเมล็ดข้าวทั้ง 2 พันธุ์ อย่างไรก็ตามภายใต้สถานะ HT4.5 กลับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ในข้าวพันธุ์ กข29

การศึกษาคุนภาพสารอาหารในเมล็ดที่สำคัญอีกประการหนึ่งในงานวิจัยครั้งนี้คือการวิเคราะห์คุณสมบัติของแป้งข้าวโดยวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส (amylose) และ อะมิโลเพกติน (amylopectin) อะมิโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบขึ้นจากหน่วยดี-กลูโคส พอลิแซ็กคาไรด์เป็นหนึ่งในองค์ประกอบของแป้งมีสัดส่วน ประมาณ 20-30% ของโครงสร้าง สัดส่วนอะมิโลสในข้าวเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวสุกมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ข้าวที่มีอะมิโลสสูงในระหว่างการหุงต้ม จะดูดน้ำได้มากกว่าข้าวที่มีอะมิโลสต่ำ ส่วนข้าวอะมิโลสต่ำ เป็นข้าวที่มีปริมาณอะมิโลส 10-19% เมื่อหุงต้มลักษณะข้าวสุกจะนุ่มเหนียวข้าวอะมิโลสต่ำ ข้าวอะมิโลสปานกลาง 20-25% หุงแล้วจะค่อนข้าง่วนไม่แข็ง ถ้าข้าวอะมิโลสสูง 26-35% เมื่อหุงแล้วจะ่วน แข็ง (สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว, 2562) ในขณะที่อะมิโลเพกติน (amylopectin) นั่นคือ พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ประเภทโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (homopolysaccharide) ซึ่งเป็นส่วน ประกอบของเม็ดสตาร์ช (starch granule) เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส (glucose) ที่จัดเรียงตัวเป็นสายตรงและสาย

แขนง อะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง ถ้าสัดส่วนข้าวมีอะไมโลเพคตินสูงจะทำให้ข้าวมีความเหนียว ตัวอย่างเช่นแป้งข้าวเหนียวมีแต่อะไมโลเพคตินเกือบ 100% หรือมี อะมิโลส ปนอยู่เพียงเล็กน้อย ประมาณ 0-2% อัตราส่วนระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพคติน เป็นค่าชี้วัดหนึ่งที่บ่งบอกถึงความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์ระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพคติน ซึ่งถ้าค่าอัตราส่วนค่อนข้างสูง แสดงว่ามีปริมาณอะมิโลสสูงมากเช่นในข้าวเจ้าจะทำให้อัตราการย่อยแป้งและการดูดซึมของน้ำตาลกลูโคสต่ำลง ซึ่งอาจเป็น ปัจจัยหนึ่งที่ทำให้มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ ซึ่งปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพคตินส่งผลต่อคุณภาพข้าวที่ผู้บริโภคใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อ ซึ่งปริมาณนี้สามารถคาดคะเนโดยคุณสมบัติเคมีทางเคมี (Grain chemical properties) ปัจจัยที่ทำให้ข้าวพันธุ์ต่างๆมีคุณภาพของข้าวสุกแตกต่างกัน

ผลการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้พบว่าปริมาณอะมิโลส อะมิโลเพคติน และสัดส่วนระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพคตินของข้าวพันธุ์ กข29 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 อย่างไรก็ตามกลับพบผลการตอบสนองของการสร้างอะมิโลสที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT4.5(4.3%) และ HT8.5(1.7%) ในเมล็ดข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งทำให้สัดส่วนระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพคตินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งเป็นรูปแบบปกติของสัดส่วนระหว่าง 2 สิ่งทดลองนี้อยู่แล้ว และทำให้สารอะมิโลเพคตินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT 4.5 และ HT 8.5 (ดูเพิ่มเติม ตารางภาคผนวกที่ 25-27 และตารางภาคผนวก 54-56) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่าง 2 พันธุ์ พบว่าพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่เพิ่มระดับอะมิโลสในข้าวภายใต้สภาวะการเพิ่มระดับอุณหภูมิ

สารอาหารสำคัญประเภทอะมิโลสจะเกี่ยวข้องกับค่าความหวานของเมล็ดข้าว เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลส เป็นพอลิเมอร์สายตรงของน้ำตาลดี-กลูโคส (D-glucose) ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ชนิด แอลฟา 1,4 ประมาณ 200-2,000 หน่วย มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 150,000 ถึง 1,000,000 โดยจะผันแปรไปตามชนิดของสตาร์ช ขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลส มีผลมาจาก Degree of Polymerization (DP) ของอะไมโลสที่แตกต่างกัน อะไมโลสในสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังมี DP ของอะไมโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าในสตาร์ชข้าวโพดและข้าวสาลี ที่มี DP ของอะไมโลสอยู่ในช่วง 200 ถึง 1,200 สตาร์ชชนิดที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มของการคืนตัวหรือการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ต่ำลง (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2543) อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ค่าความหวานในเมล็ดข้าวในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่กลับพบผลการศึกษาที่ตรงข้ามกัน (เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในอะมิโลส) นั่นคือพบว่าค่าความหวานกลับลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้

สถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 และที่ตรงข้ามกันคือค่าความหวานในข้าวพันธุ์ กข29 กลับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ตารางภาคผนวก 57) สาเหตุที่ผลการศึกษาข้างนี้ลักษณะนี้เนื่องจากปัจจัยหลายประการ เช่นสายพันธุ์ข้าว และคุณสมบัติของแป้งข้าว และอะมิโลสเพียงปัจจัยเดียวยังไม่สามารถบ่งชี้ได้ถึงประมาณดัชนีความหวาน หรือดัชนีน้ำตาลในข้าวได้ (สุนีย์ สหัสสิทธิ์ และคณะ, 2558) และมีรายงานวิจัยของ Panlasigui et al. (1991) ที่ระบุว่าถึงแม้ข้าวซึ่งมีปริมาณอะมิโลสเท่ากัน แต่มีอัตราการย่อยแป้งและการตอบสนองต่อดัชนีน้ำตาล แตกต่างกันได้ ดังนั้นการศึกษาในปัจจุบันยังไม่ระบุความสัมพันธ์ของอะมิโลสและค่าดัชนีความหวานของข้าวได้

ในการวิจัยครั้งนี้ยังได้วิเคราะห์สารแอนตี้ออกซิแดนซ์ที่สำคัญในข้าวอีก 2 ชนิดคือ สารประกอบฟีนอลิก และสารแอนโทไซยานิน มีงานวิจัยศึกษาพบว่าปริมาณและคุณภาพของสารต้านอนุมูลอิสระ หรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสมุนไพร (เช่น phenols, flavonoids, anthocyanin) จะเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงหรือแปรปรวนไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาวะอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง Kaur et al. (2016) ได้ทำการศึกษาวิจัยการเพิ่มระดับ antioxidants (phenol และ flavonoid) ในสมุนไพร 5 สายพันธุ์ในพื้นที่ฝั่งตะวันตกของหิมาลัยคือ *Echinacea purpurea* L., *Matricaria chamomilla* L., *Hypericum perforatum* L., *Thymus vulgaris* L. and *Cynara cardunculus* L. ภายใต้สภาวะภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงตามระดับความสูงซึ่งทำให้แบ่งพืชออกเป็น 2 กลุ่มคือ พืชกลุ่มกึ่งเขตร้อน และพืชกลุ่มเขตอบอุ่น ผลการศึกษาพบว่า พืชกลุ่มที่เจริญในเขตกึ่งร้อนนั้น (ซึ่งมีระดับอุณหภูมิสูงกว่าเขตอบอุ่นประมาณ 7°C ถึง 13 °C ในช่วงระยะออกดอก) สามารถสร้างสาร antioxidants ประเภท phenol และ flavonoids สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (Kaur et al., 2016) อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในครั้งนี้กลับได้ผลการศึกษาที่ทั้งสองสอดคล้องและไม่สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมาดังนี้

ผลการศึกษาสารแอนตี้ออกซิแดนซ์ในข้าวพันธุ์ กข 29 พบว่าสารแอนตี้ออกซิแดนซ์ชนิดสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้การเพิ่มระดับอุณหภูมิที่สูงที่สุดคือ HT 8.5 โดยเพิ่มสูงถึง 57% ซึ่งบ่งบอกว่าระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้นประมาณ 4.5°C (เปรียบเทียบกับ CT) ส่งผลให้ข้าวมีกลไกปกป้องตนเองโดยการเพิ่มสารแอนตี้ออกซิแดนซ์เพิ่มขึ้นในระดับที่สูงมาก อย่างไรก็ตามไม่พบระดับฟีนอลิกเพิ่มขึ้นในสภาวะ HT4.5 แต่อย่างใด อย่างไรก็ตามผลการศึกษากลับตรงข้ามกันในแอนตี้ออกซิแดนซ์ชนิด แอนโทไซยานินเนื่องจากพบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สภาวะ HT4.5 (ไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะ HT8.5) ซึ่งบ่งบอกว่าข้าวพันธุ์ กข29 มีกลไกตอบสนองป้องกันตัวเองได้ในสภาวะความเครียดจากความร้อนโดยเพิ่มสารแอนตี้ออกซิแดนซ์ชนิดฟีนอลิกเท่านั้นในการศึกษานี้

ผลการศึกษาสารแอนติออกซิแดนซ์ในข้าวพันธุ์ กข 29 พบว่าสารแอนติออกซิแดนซ์ชนิด สารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้การเพิ่มระดับอุณหภูมิที่สูง ที่สุดคือ HT 8.5 โดยเพิ่มสูงถึง 57% ซึ่งบ่งบอกว่าระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้นประมาณ  $4.5^{\circ}\text{C}$  (เปรียบเทียบกับ CT) ส่งผลทำให้ข้าวมีกลไกปกป้องตนเองโดยการเพิ่มสารแอนติออกซิแดนซ์เพิ่มขึ้น ในระดับที่สูงมาก อย่างไรก็ตามไม่พบระดับฟีนอลิกเพิ่มขึ้นในสภาวะ HT4.5 แต่อย่างใด อย่างไรก็ตาม ตามผลการศึกษากลับตรงข้ามกันในแอนติออกซิแดนซ์ชนิด แอนโทไซยานินเนื่องจากพบว่าลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สภาวะ HT4.5 (ไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะ HT8.5) ซึ่ง บ่งบอกว่าข้าวพันธุ์ กข29 มีกลไกตอบสนองป้องกันตัวเองได้ในสภาวะความเครียดจากความร้อนโดย เพิ่มสารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดฟีนอลิกเท่านั้นในการศึกษารุ่นนี้ นอกจากนี้ผลการศึกษาในข้าว พันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ พบว่าปริมาณสารแอนติออกซิแดนซ์ทั้งชนิดฟีนอลิก และ แอนโทไซยานิน ทั้ง 2 ชนิด ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อแยกพิจารณาพบว่าสารประกอบฟีนอลิกลดลงภายใต้ สภาวะระดับอุณหภูมิที่สูงที่สุดคือ HT 8.5 เท่ากับ 21% ส่วนสารแอนโทไซยานินนั้นพบว่าลดลง ภายใต้สภาวะ HT4.5 และ HT8.5 โดยลดลงในระดับ 28% และ 14% ตามลำดับ

ดังนั้นเมื่อพิจารณาศักยภาพของการต้านอนุมูลอิสระของข้าวทั้ง 2 พันธุ์พบว่าพันธุ์ กข 29 มี ประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าข้าวไรซ์เบอร์รี่ภายใต้สภาวะเครียดจากระดับอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามในการศึกษารุ่นนี้ได้ศึกษาสารแอนติออกซิแดนซ์เพียง 2 ชนิดเท่านั้น ดังนั้นการสรุป สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ขึ้นอยู่กับขอบเขตของสารแอนติออกซิแดนซ์ 2 ชนิดนี้เท่านั้น ซึ่งถ้าหากได้มีการวิเคราะห์สารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดสำคัญอื่นๆ อาจจะได้ผลการศึกษาที่แตกต่างออกไป

ในการศึกษารุ่นนี้ส่วนหนึ่งต้องการทราบผลการเปลี่ยนแปลงทางด้านพันธุกรรมของข้าวว่า จะเปลี่ยนแปลงอย่างไร ภายใต้สภาวะการเพิ่มระดับอุณหภูมิ ดังนั้น ในการศึกษาเลือกใช้วิธีเอเอฟแอลพี (amplified fragment length polymorphism, AFLP) ซึ่งเป็นวิธีการที่พัฒนาขึ้นโดย Vos (1995) การตรวจสอบลายพิมพ์ดีเอ็นเอโดยวิธีการนี้เป็นการรวมเอาเทคนิคอาร์เอฟแอลพีและอาร์เอฟพีดี เซกเมนต์ไวกันเทคนิคเอเอฟแอลพี เป็นเทคนิคที่ยืดหยุ่น และซับซ้อน แต่ ผลที่ได้สามารถทำซ้ำได้ผลคงเดิม และสามารถเลือกคุณสมบัติผสมของไพรเมอร์ได้หลายแบบ ลายพิมพ์ดีเอ็นเอที่ได้จึงมีความแตกต่างกัน (polymorphism) จำนวนมาก ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเบส (point mutation) ที่ตำแหน่งจุดจำของเอนไซม์ทำให้เกิดการเสียหาย หรือเพิ่มใหม่ หรือการเปลี่ยนแปลงของเบสที่ตำแหน่งติดกับตำแหน่งจุดจำของเอนไซม์ให้ สามารถหรือไม่สามารถเพิ่มปริมาณชิ้นดีเอ็นเอได้ หรืออาจเกิดการมีชิ้นดีเอ็นเอสั้น ๆ ขาด



หายไป หรือสอดแทรกเข้ามาในระหว่งตำแหน่งตัดจำเพาะของเอนไซม์ก็ได้ ผลที่เกิดขึ้นคือการมีแถบดีเอ็นเอ หรือไม่มีแถบดีเอ็นเอที่ตำแหน่งนั้น ๆ หรือขึ้นดีเอ็นเอที่เพิ่มปริมาณใดมีขนาดเปลี่ยนไป การถ่ายทอดลักษณะของแถบดีเอ็นเอจากการทำเอเอฟแอลพี จึงมีทั้งลักษณะข่ม (dominant) โดยปรากฏเป็นการเกิดหรือไม่เกิดแถบดีเอ็นเอ และแบบที่แสดงลักษณะข่มร่วมกัน (codominant) โดยปรากฏแถบดีเอ็นเอที่มีขนาดต่างกันโดยทั่วไปจะพบเครื่องหมายเอเอฟแอลพี (AFLP marker) แบบที่ไปลักษณะข่มมากกว่า (สุรินทร์, 2543) ปัจจุบันเอเอฟแอลพีเป็นเทคนิคที่นำมาศึกษาเกี่ยวกับพันธุศาสตร์ประชากร วิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางพันธุกรรม การจัดจำแนกชนิดและพันธุ์ หรือนำมาใช้ในการศึกษาความหลากหลายทางพันธุกรรมกันอย่างกว้างขวาง

ผลการศึกษาที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือการวิเคราะห์ลักษณะทางพันธุกรรมของข้าวพันธุ์ กข 29 และ ไรซ์เบอร์รี่ พบว่าซึ่งทั้ง 2 กลุ่มข้าว แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อย (CT, HT4.5 และ HT8.5) ตามสิ่งทดลองแยกกันอย่างชัดเจน (ภาพที่ 4.44) ดังนั้นจากการวิเคราะห์ลักษณะทางพันธุกรรมจึงแยกออกมาชัดเจน 6 กลุ่ม ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า ภายใต้สถานการณ์ระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ทั้งสถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 ส่งผลทำให้ลักษณะพันธุกรรมแตกต่างแยกกลุ่มออกจากกันอย่างชัดเจน นั้นหมายถึงว่า ผลการทดลองนี้เป็นแนวทางที่สามารถบอกได้ในเบื้องต้นถึงผลของระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งได้รับการคาดการณ์ว่าจะเกิดขึ้นในอนาคตทำให้เกิดความแตกต่างในระดับพันธุกรรม

ผลการศึกษาทั้งหมดในการวิจัยครั้งนี้ทำให้ทราบว่าหากข้าวมีสภาวะความเครียดหรือสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยทางกายภาพและสามารถส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตการสังเคราะห์แสง การสร้างผลผลิต การสร้างสารอาหารสำคัญ การผลิตสารแอนติออกซิแดนท์ ลักษณะทางพันธุกรรม ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้สามารถใช้หลักการทางวิชาการในเชิงสรีรวิทยาของพืชอธิบาย ดังนี้ ผลกระทบจากสภาวะอุณหภูมิสูงขึ้นนั้นจะเริ่มที่กระบวนการสังเคราะห์แสงที่ต้องปรับกลไกเนื่องจากการถูกรบกวนจากสภาวะที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากการศึกษาพบว่าผลกระทบของสภาวะอุณหภูมิสูงส่งผลต่อการลดประสิทธิภาพในการสังเคราะห์โดยเฉพาะอย่างยิ่งพืช C3 เช่นข้าว เนื่องจากเกิดสภาวะความร้อนกระตุ้นให้พืชเกิดกระบวนการหายใจแสงได้ดีขึ้น (กณิตา ธนเจริญชณภาส, 2558) ดังที่ได้กล่าวถึงไปแล้ว อย่างไรก็ตามยังมีสาเหตุจากกระบวนการทางสรีรวิทยาอีกหลายประการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสงภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง หนึ่งในกระบวนการสำคัญคือ การรบกวนกิจกรรมของระบบแสง 1(PS-I) และ ระบบแสง 2(PS-II) PS-I เป็น

ตัวรับแสงที่ประกอบด้วยสารสีที่สำคัญ คือ คลอโรฟิลล์ เอ ชนิดดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 683 นาโนเมตร และคลอโรฟิลล์ เอ ชนิดพิเศษที่เป็นศูนย์กลางปฏิกิริยา ซึ่งดูดกลืนแสงได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่น 700 PS-II เป็นตัวรับแสงที่ประกอบด้วยสารสีที่สำคัญคือ คลอโรฟิลล์ เอ ซึ่งดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร (P680) อยู่ร่วมกับคลอโรฟิลล์ บี เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังมีสารสีอื่น ๆ อีก เช่น แคโรทีนอยด์ และไฟโคบิลิน การศึกษาโดย Bukhov et al. (1999) แสดงให้เห็นว่ากิจกรรมของระบบ PS-II ลดลงอย่างมากเมื่อพืชอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงกว่าระดับความทนทาน เนื่องจากสภาวะความเครียดจากความร้อนส่งผลต่อการสลายตัวของ oxygen evolving complex (OEC) ซึ่งเป็นเอนไซม์เร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำเกี่ยวข้องในกระบวนการทำงานของ PS-II ทำให้เสียสมดุลในการส่งผ่านอิเล็กตรอนจาก OEC สู่อำนาจของกระบวนการ PS-II จึงทำให้กิจกรรมของ PS-II ลดลงอย่างมาก ส่งผลทำให้ลดประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของพืช

ปัญหาการเพิ่มระดับของอุณหภูมิในบรรยากาศส่งผลกระทบอย่างมากต่อภาคการเกษตรทั่วโลกในปัจจุบัน ผลผลิตทางการเกษตรของโลกได้รับการคาดการณ์ว่าจะลดลงเป็นปริมาณสูงในอนาคต Ray et al. (2019) ได้ทำการศึกษาและรายงานว่าผลผลิตทางการเกษตร เช่น ถั่วเหลืองของโลกจะลดลงไปประมาณ 3.5% (ถั่วเหลือง) ภายใต้สภาวะโลกร้อน ส่วนผลผลิตข้าวจะลดลงประมาณ 10 % เมื่อระดับอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุดในพื้นที่ปลูกข้าวเพิ่มขึ้น 1 °C ฤดูกาลปลูก (Peng, 2004) ผลกระทบทางการเกษตรดังกล่าวนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐาน กระบวนการทางสรีรวิทยา เปลี่ยนแปลงกระบวนการทางชีวเคมีอันซับซ้อน รวมทั้งส่งผลต่อการเจริญและเติบโต (Wahid et al., 2007 ; Hall, 2001) เนื่องจากการเจริญเติบโตของพืชมีผลจากปัจจัยสำคัญหลายประการ แต่ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืชทุกประเภทในลำดับแรกคือระดับอุณหภูมิ เนื่องจาก อุณหภูมิที่เหมาะสมส่งผลต่อการทำงานของเมตาบอลิซึมให้เป็นไปอย่างปกติและสมบูรณ์ ทำให้พืชเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว แต่ถ้าพืชเติบโตภายใต้สภาวะความเครียดจากสภาวะอุณหภูมิที่สูงหรือต่ำเกินไปทำให้รบกวนและยังยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช และโดยทั่วไปแล้วหากอุณหภูมิเพิ่มสูงกว่าระดับปกติ (above ambient level) เช่นระดับ 10-15 °C จะทำให้เกิดภาวะช็อคหรือภาวะเครียดจากระดับอุณหภูมิได้เรียกว่าภาวะเครียดจากอุณหภูมิ ( temperature stress) (Peet and Willits, 1998; ภาคภูมิ พระประเสริฐ, 2550) ซึ่งอาจส่งผลเนื่องมาจากการยับยั้งทำงานของเอนไซม์ และส่งผลต่อเนื่องในการยับยั้งการสร้างมวลชีวภาพ และสุดท้ายการสร้างอาหารในเมล็ด (ภาคภูมิ พระประเสริฐ, 2550) แต่ในทางตรงข้ามหากพืชได้รับการกระตุ้นด้วยระดับอุณหภูมิที่สูงไม่เกินขีดความทนของพืช พืชจะถูกกระตุ้นให้เพิ่มกระบวนการการดูดธาตุอาหารมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิ ส่วนหนึ่ง

เนื่องจากพืชเพิ่มอัตราการหายใจแสง (Photorespiration) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินระดับ 40°C หรือเกินระดับความทนอัตราการดูดธาตุอาหารกลับลดลง ซึ่งอาจเกิดจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปส่งผลต่อการทำลายเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการดูดธาตุอาหารเช่นกัน (ชวนพิศ แดงสวัสดิ์, 2544)

งานวิจัยจำนวนมากพบว่าพืชค่อนข้างอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิในช่วงระยะสืบพันธุ์ อาทิเช่นการวิจัยของ Satake and Yoshida (1978) พบว่าในระยะการผสมเกสรนั้นสภาวะอุณหภูมิสูงเกินกว่า 35°C ในระยะเวลา 5 วัน จะยับยั้งการโปรยละอองเรณูและทำให้ละอองเรณูเป็นหมัน ส่งผลต่อเนื้อทำให้เมล็ดลีบและเป็นหมันในอัตราที่สูง และส่งผลต่อการทำให้ผลผลิตของเมล็ดโดยรวมลดลง เช่นเดียวกับการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความมีชีวิตของละอองเกสรและการปฏิสนธิในข้าวไทย พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การงอกของละอองเกสรในอาหารเลี้ยง และบนเกสรเพศเมีย รวมทั้งการติดเมล็ดลดลง (เจษฎา และคณะ, 2553) และถ้าระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 3°C หรือเกินระดับขีดความทนต่ออุณหภูมิอาจรบกวนต่อซีพลักษณะด้านระยะเวลาของการเจริญเติบโต เช่น ลดช่วงระยะเวลาการสร้างเมล็ดแต่เพิ่มการสูญเสียพลังงานจากอัตราการหายใจมากขึ้น ส่งผลต่อเนื้อทำให้ผลผลิตข้าวลดลง รวมทั้งคุณภาพของเมล็ดข้าวลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อทำการศึกษากาศสนามโดยปลูกข้าวภายใต้สภาวะอุณหภูมิเพิ่มกว่าระดับปกติ 3.6-7°C ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์แสงลดลงในช่วง 12.2-35.6 % (Oh-e et al., 2007; Wassmann et al., 2009a)

ผลการศึกษาในข้าวไทยพบว่าต้องการสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ อยู่ในระหว่าง 25-35°C อุณหภูมิที่ต่ำกว่า หรือ สูงเกินไป (ต่ำกว่า 20°C สูงกว่า 35°C) จะมีผลต่อการงอกของเมล็ด การยึดของใบ การแตกกอ การสร้างดอกอ่อน การผสมเกสรเป็นต้น เช่นพบว่าอุณหภูมิที่สูงเกินไปหรือต่ำเกินไปช่วงที่มีการออกดอกจะทำให้ดอกข้าวเป็นหมัน ซึ่งจะส่งผลทำให้ได้ผลผลิตที่ต่ำกว่าปกติได้ (จำรัส โปร่งศิริวัฒนา, 2534; ทรงเขาว์ อินสมพันธ์, 2530 ; พิระศักดิ์ ศรีนิเวศน์ และ เจริญศักดิ์ โรจนฤทธิ์พิเชษฐ์, 2529) ดังนั้นผลการศึกษาในครั้งนี้จึงพบว่าระดับอุณหภูมิที่สูงกว่าระดับปกติจึงส่งผลต่อการเจริญของข้าวอย่างชัดเจน

ในการวิจัยครั้งนี้เมื่อชั่งน้ำหนัก 100 เมล็ดเพื่อวิเคราะห์ขนาดเมล็ดทางอ้อม พบว่าเมล็ดข้าวลีบและเล็กลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนั้นสามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากสภาวะความเครียดจากความร้อนในระยะตั้งท้องข้าวส่งผลต่อการรบกวนการแบ่งตัวเพื่อสร้างออวูล (ovule) ซึ่งจะเจริญไปเป็นเมล็ดข้าวต่อไป ผลที่เกิดขึ้นทำให้ลดขนาดเมล็ดข้าวทำให้ข้าวมีขนาดเมล็ดที่เล็กลงและน้ำหนักของเมล็ดลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งสาเหตุอีกประการหนึ่งมีความเป็นไปได้ว่าสภาวะ

ความเครียดจากความร้อนส่งผลทำให้ยับยั้งการสะสมคาร์โบไฮเดรตในรูปแบบของแป้งและน้ำตาลจากลำต้นไปสู่เมล็ดซึ่งทำให้ลดขนาดเมล็ดได้เช่นกัน (Zhen, 2019)

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศในการทดลองครั้งนี้ที่มีต่อข้าวทั้ง 2 พันธุ์สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกทางชีวเคมีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสงเพิ่มเติมดังนี้ เนื่องด้วยพืชโดยทั่วไปสังเคราะห์อาหารโดยอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์ในช่วงคลื่น visible light ทั้งนี้พืชแต่ละชนิดตอบสนองต่อคลื่นแสงในช่วงความยาวต่างกัน (Wallace and Hobbs, 2006) ในสภาวะอุณหภูมิอยู่ในระดับเหมาะสมต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชชนิดนั้นๆ เอนไซม์ Rubisco (ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase) จะมีอิทธิพลทำให้  $\text{CO}_2$  จะรวมตัวกับ RuBP (Ribulose-1, 5-bisphosphate) (Bowes et al., 1971) ทำให้เกิดสารประกอบที่มีคาร์บอน 3 อะตอม คือ 3-Phosphoglyceric acid (3-PGA) (ในกรณีพืช C3) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปไปเป็นน้ำตาลในกระบวนการสังเคราะห์แสงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยปกติแล้วเอนไซม์ Rubisco จะตอบสนองต่อ  $\text{CO}_2$  (รวมกับ RuBP) มากกว่า  $\text{O}_2$  (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558) อย่างไรก็ตามในบรรยากาศโดยปกติแล้วความเข้มข้นของ  $\text{O}_2$  จะสูงกว่า  $\text{CO}_2$  เสมอ ซึ่งทำให้  $\text{O}_2$  จำนวน 1 โมเลกุลจะถูกรวมตัวกับ RuBP โดยเอนไซม์ Rubisco ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการตรึง  $\text{O}_2$  เช่นกัน พบว่าในสภาวะปกติการตรึง  $\text{CO}_2$  และ  $\text{O}_2$  มีสัดส่วน  $\text{CO}_2$  3 อะตอม:  $\text{O}_2$  1 อะตอม ( $\text{CO}_2$  ได้รับการตรึงสูงกว่า  $\text{O}_2$ ) (Sharkey et al., 2001)

พบว่าพืชที่สัมผัสกับระดับอุณหภูมิสูงกว่าระดับเหมาะสมจะเกิดผลกระทบโดยตรงต่อการยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสง เนื่องจากภายใต้ระดับอุณหภูมิสูงจะส่งผลทำให้เอนไซม์ Rubisco ทำปฏิกิริยาในการตรึง  $\text{O}_2$  ได้ดีกว่า  $\text{CO}_2$  จนเกิดสภาวะการหายใจแสง (photorespiration) ซึ่งสรุปสภาวะที่เกิดขึ้นอย่างสั้นๆคือ เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นได้ระหว่างการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในพืชแต่พืชใช้ออกซิเจนและปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดขึ้นในขณะที่มีแสงจึงเรียกว่าการหายใจแสง แต่การหายใจที่ไม่มีการสร้าง ATP ในปฏิกิริยานี้ และทำให้ประสิทธิภาพของการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เกิดขึ้นเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ ในใบต่ำ หรือเกิดในสภาวะใบสัมผัสกับสภาวะอุณหภูมิสูง ทำให้พืชไม่สามารถเกิดวัฏจักรคัลวินในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ส่งที่ได้มาคือทำให้ได้สารประกอบที่มีคาร์บอน 2 อะตอม ซึ่งเป็นสารพิษ คือ phosphoglycolate (PG) (Sharkey et al., 2001) ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อเนื่องคือพืชจะต้องนำพลังงานในเนื้อเยื่อมาใช้เพื่อกำจัดสารพิษ phosphoglycolate (PG) และสุดท้ายของของกระบวนการกำจัดสารพิษนี้ทำให้สูญเสีย  $\text{CO}_2$  ผ่านทางปากใบ ทำให้พืชสูญเสียพลังงาน (ATP) ในกระบวนการนี้ในระดับสูงเพื่อลดความเป็นพิษและ

ลดการสูญเสีย CO<sub>2</sub> ซึ่งกระบวนการกำจัด PG ดังที่ได้กล่าวถึงไปนี้เกิดขึ้นใน 3 organelles คือ Chloroplast Peroxisome และ mitochondria ดังนี้ (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558)

กระบวนการเริ่มต้นที่ Chloroplast เมื่อเกิดสาร PG โดยมีการตรึง O<sub>2</sub> (oxygenation) โดย ribulose biphosphate ดังที่กล่าวไปแล้ว กระบวนการที่เกิดขึ้นใน Chloroplast คือ dephosphorylated (เป็นกระบวนการที่ไม่มีการเติม Phosphate พลังงานสูงให้แก่ ADP ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ ATP) จนผลิต glycolate ผ่านเข้าสู่ organelle Peroxisome ใน peroxisome นี้มี เอนไซม์ catalase จำนวนมากจนทำให้เกิดกระบวนการ oxidation ของ glycolate กลายเป็นสาร glyoxylate และทำให้เกิดสาร hydrogenperoxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) (ซึ่งเป็นสารที่เป็นพิษในพืชเช่นกัน) ในกระบวนการนี้ จากนั้นสาร glyoxylate จะถูกเปลี่ยนรูปจนกลายเป็น glycine ผ่านเข้าสู่ mitochondria ซึ่งเป็นพื้นที่สุดท้ายทำให้มีการเปลี่ยนรูปสาร glycine ณ บริเวณนี้ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลส่วนหนึ่งถูกเปลี่ยนรูปกลายเป็น CO<sub>2</sub> ammonia และ ส่วนหนึ่งของสารประกอบคาร์บอนใน tetrahydrofolate (Sharkey et al., 2001) และเกิดกระบวนการต่อเนื่องจนสุดท้ายปลดปล่อย CO<sub>2</sub> ผ่านทางปากใบทำให้พืชสูญเสีย CO<sub>2</sub> แทนที่พืชจะกักเก็บ CO<sub>2</sub> ไว้ในใบ ซึ่งพบว่ากระบวนการนี้ทำให้พืชสูญเสีย CO<sub>2</sub> สูงถึง 30-50% ของปริมาณที่ตรึงได้ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสง และนอกจากนั้นยังพบว่าในการสร้าง H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Hydrogenperoxide) ใน peroxisome นั้นซึ่งเป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ glycolate เป็นพิษต่อพืชรวมทั้งเป็นสารตั้งต้นในการสร้างสารอนุมูลอิสระชนิด OH ในพืชซึ่งจัดเป็นสารออกซิแดนท์ที่มีฤทธิ์รุนแรงส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบทางชีวเคมีอย่างต่อเนื่องและเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารอาหารของพืช (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; Sharkey et al., 2001; Bonan, 2002)

พบว่าพืช C3 เช่นข้าว สมุนไพร ที่ขึ้นอยู่ในเขตร้อนแห้งแล้ง หรือมีผลกระทบมาจากสภาวะอุณหภูมิสูง หรือ ความแล้ง จะมีความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> ในคลอโรพลาสต์ลดลง เนื่องจากปากใบปิด อันเป็นผลมาจากพืชมีปฏิกิริยาปกป้องตนเอง (defense mechanisms) โดยการทำให้เย็นลง (plant cool themselves) ผ่านการคายน้ำ ดังนั้นพืชจะมีปฏิกิริยาคายน้ำมากขึ้นจนขาดความสมดุล พืชจะมีปฏิกิริยาปกป้องตนเองอีกครั้งโดยการปิดปากใบเพื่อลดการคายน้ำโดยพบว่าถ้า CO<sub>2</sub> ในคลอโรพลาสต์ ต่ำกว่า 50 ppm เอนไซม์รูบิสโก (RubisCO) จะเร่งปฏิกิริยา photorespiration ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง 25 % และเนื่องจากน้ำเป็นแหล่งของอิเล็กตรอนที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง เมื่อพืชลดการคายน้ำส่งผลกระทบต่อการยับยั้งการดูดน้ำขึ้นมาสู่ยอดทางไซเลมด้วย (ค่า water potential ในลำต้น ราก และในดิน ใกล้เคียงกัน) ทำให้การแพร่ของน้ำเข้าสู่ราก และดึงขึ้นสู่

ลำดับรวมทั้งใบลดลง ผนวกกับการเกิดกระบวนการหายใจแสง (photorespiration) ในพืช C3 ซึ่งทำให้พืชต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งในการเปลี่ยนรูป Phosphoglycolate จนทำให้เสียสมดุลพลังงานในเนื้อเยื่อส่งผลต่อเนื่องในการยับยั้งการเจริญเติบโต หรือสูญเสียพลังงานในกระบวนการสร้างเมล็ดรวมทั้งกระบวนการทางชีวเคมีของสรีรวิทยาอื่นๆ (กณิตา ธนเจริญชฌภาส, 2558; Hollister and Webber, 2000) สำหรับพืช C4 นั้นพบว่าในกรณีที่ใบพืชสัมผัสกับระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้นนั้นกลับยิ่งทำให้พืชตรึง CO<sub>2</sub> เข้าทางปากใบมากขึ้น ซึ่งอัตราการตรึง CO<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้นนั้นจะเกิดขึ้นถึงระดับอุณหภูมิที่ 45 °C และส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง (Bjorkman et al., 1975) ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นธัญพืชหลักที่มีความสำคัญมากที่สุด พบว่าประชากรโลกเกินครึ่งบริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก พบว่าผลผลิตมากกว่า 90% ของข้าวทั่วโลกเป็นผลผลิตในเขตเอเชีย 612 ล้านตัน บนพื้นที่ 143 ล้านเฮกเตอร์ (FAO, 2012) เมื่อพิจารณาสถานะ heat stress ที่มีต่อพืชพบว่าผลผลิตธัญพืชส่วนใหญ่ของโลกลดลงเนื่องจาก heat stress ที่อุณหภูมิสูงกว่า 33 °C ขึ้นไป ยิ่งกว่านั้น IPCC ได้เผยแพร่ภาพฉายอนาคตซึ่งแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวโลกจะเพิ่มขึ้น 0.7-0.9 °C ต่อทศวรรษในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (IPCC, 2014) ซึ่งจะส่งผลทำให้ระดับอุณหภูมิสูงถึง 4.8 °C ในปี 2100 (ADB, 2009) โดยการเพิ่มอุณหภูมิทุก ๆ 1 °C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุด (minimum) ในฤดูกาลปลูกอาจจะลดผลผลิตของเมล็ดข้าวประมาณ 10% (Peng et al., 2004) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากข้อมูลแล้วพบว่ามีกรณีที่เกิดขึ้นในพืชที่อยู่ในเขตที่อุณหภูมิฤดูกาลปลูกต่ำกว่าประเทศไทย มีงานวิจัยมากมายเช่น งานวิจัยโดย Zhen et al. (2019) ได้ยืนยันว่าการปลูกข้าว 2 พันธุ์คือ Nanjing 41 และ Wuyunjing 24 ภายใต้สภาวะการเพิ่มระดับอุณหภูมิให้สูงกว่าระดับปกติในระดับช่วงระดับสูงสุด 32 °C 36 °C, 40 °C และ 44 °C ในระยะเวลาสั้นๆจำนวน 2, 4 และ 6 วันในระยะช่วงแตกกอ days in phytotrons at booting stage ในฤดูกาลปลูกนั้นจะส่งผลทำให้ลดผลผลิต(ลดจำนวนเมล็ดรวม) โดยยับยั้งการออกดอกข้าวต่อรวง และน้ำหนักข้าว 100 เมล็ดลดลงซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

สายพันธุ์ของพืชไม่ว่าจะเป็นชนิดใดจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำหน้าที่ให้มีประสิทธิภาพทางสรีรวิทยา เช่น การเจริญเติบโต การพัฒนา และการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ อุณหภูมิที่สูงหรือต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมนั้นจะทำให้เกิดผลกระทบเชิงลบในประสิทธิภาพที่สำคัญของพืชส่งผลให้เกิดการสูญเสียผลผลิตในทางเศรษฐกิจ ความเครียดที่เกิดจากสภาวะอุณหภูมิต่ำ(0-15 องศาเซลเซียส) หรือต่ำกว่าระดับจุดเยือกแข็ง(น้อยกว่า 0 องศาเซลเซียส) (Chilling and freezing stresses) ซึ่งให้เกิดความเสียหายภายนอกและอาจเกิดผลึกน้ำแข็งภายในเนื้อเยื่ออ่อนของพืช

ความเครียดที่เป็นจุดเยือกแข็ง (freezing stresses) ข้าวมีต้นกำเนิดมาจากแถบเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน นั่นจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้มันมีความอ่อนไหวสูงต่อความเครียดที่เกิดจากความเย็นเช่นเดียวกับการผลิตก็ได้รับผลกระทบอย่างรุนแรงเช่นเดียวกันในเขตอบอุ่นที่สำคัญทำให้การปลูกพืชผลล้มเหลวในกรณีที่อุณหภูมิสุดโต่ง (Xie et al., 2012) เหตุการณ์ที่เกิดจากความเครียดจากความเย็นเกิดขึ้นได้ทั่วไปในหลายๆประเทศในเอเชีย (Koike et al., 1990; Zhang et al., 2014 a,b) พบว่าเกิดสภาวะความเครียดจากอุณหภูมิต่ำที่มีต่อข้าวในภูมิภาคอื่นๆ เช่น ตะวันตกและตะวันออกของแอฟริกา อเมริกา ยุโรป และอเมริกาใต้ รัฐทางใต้ของบราซิล (Rio Grande do Sul) พบว่าการเปลี่ยนแปลงเชิงสรีรวิทยาเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลผลิตลดลงในข้าวที่เกิดจากความเครียดที่เกิดจากความเย็นเกิดความแปรปรวนระหว่างช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบและช่วงการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ ในช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ การสร้างแหล่งสร้าง (source) (หรือแหล่งผลิต) ในขณะที่ในช่วงการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ความเครียดที่เกิดจากความเย็นจะส่งผลกระทบต่อ การสร้างแหล่งรับ(หรือแหล่งใช้) (Sink) เช่น การร่วงของดอก การเป็นหมันของอับละอองเรณู หลอดอับละอองเรณูแตก การแท้งของออวูล ตลอดจน การพัฒนาของเมล็ดที่สั้นลง (Kuroki et al., 2007; Oliver et al., 2007)

อุณหภูมิที่สูงกว่าช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและการพัฒนาตามช่วงอายุของพืชหมายถึงความเครียดจากความร้อน (heat stress) สามารถสร้างความเสียหายชั่วคราว หรือเกิดอาการบาดเจ็บ รวมทั้งก่อให้เกิดความเสียหายอย่างถาวร ในเนื้อเยื่อส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ และเนื้อเยื่อที่เกี่ยวข้องกับการสืบพันธุ์ของข้าว ผลกระทบของความเครียดที่เกิดจากความร้อนส่งผลต่อในประสิทธิภาพเชิงสรีรวิทยาของพืช แต่ความรุนแรงนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น ความรุนแรง ช่วงเวลาที่ได้รับผลกระทบ และการชงอายุที่ได้รับสัมพันธ์กับสภาวะความเครียดจากความร้อน (สัมพันธ์กับการพัฒนาของพืช)

ผลกระทบในเชิงสรีรวิทยาที่สำคัญประการหนึ่งคือในขณะที่พืชเกิดสภาวะเครียดจากความร้อน (heat stress) พืชจะเปิดปากใบเพื่อคายน้ำออกทางปากใบเพื่อเป็นการทำให้ใบมีความเย็นขึ้น อย่างไรก็ตามสภาวะนี้จะเกิดขึ้นได้ดีในกรณีที่พืชไม่ขาดน้ำในดิน แต่หากสภาวะโลกร้อนเกิดขึ้นพร้อมกับความแห้งแล้ง การปกป้องตนเองของพืชโดยการคายน้ำจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Rizhsky et al., 2002) เมื่อพิจารณาความทนทานและความอ่อนไหวของพืชโดยทั่วไปและธัญพืชต่างๆที่มีต่อสภาวะความเครียดจากอุณหภูมิ พบว่าพืชมีการตอบสนองต่อสภาวะอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าสภาวะความทนแตกต่างกันไปซึ่งขึ้นอยู่กับ สายพันธุ์ และช่วงอายุต่างๆของพืชลักษณะ

อาทิเช่น พบว่าธัญพืชโดยทั่วไปในช่วงระยะการสืบพันธุ์ (reproductive stage) มีการตอบสนองหรือได้รับผลกระทบในเชิงลบค่อนข้างไวและชัดเจนกว่าช่วงเจริญเติบโตทางลำต้น (vegetative stage) ซึ่งผลกระทบในช่วงนี้จะนำไปสู่การลดผลผลิต (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; Kondamudi et al., 2012)

รายงานจากผลการศึกษาที่หลากหลายยืนยันตรงกันว่า ผลกระทบของ heat stress จะส่งผลกระทบในช่วงระยะการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ (R stage) และระยะการสร้างสารอาหารของเมล็ด มากกว่าช่วงอื่นๆ (Cao et al., 2008; Tenorio et al., 2013) มีการศึกษาจำนวนมากยืนยันสมมติฐานนี้ ซึ่งผลการวิจัยส่วนใหญ่ระบุชัดเจนว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นจาก heat stress ส่วนหนึ่งเป็นผลต่อเนื่องมาจากผลกระทบจากช่วงการสืบพันธุ์ (R stage) เนื่องจากช่วงการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์จะมีความอ่อนไหวมากที่สุด (Andaya and Mackill, 2003; Jagadish et al., 2007; Fu et al., 2008) ช่วงการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์จะเริ่มตั้งแต่ช่วงการสร้างช่อดอกไปจนถึงความสมบูรณ์ทางสรีรวิทยาของเมล็ด ความเครียดที่เกิด heat stress และ cold stress ในระยะการสร้างช่อดอกและการพัฒนา จะส่งผลกระทบต่อพัฒนาที่ระยะ gametophyte การพัฒนาอับละอองเรณู, การออกดอกและช่วงการเจริญเต็มที่ของดอก, การถ่ายละอองเกสรและการปฏิสนธิ ซึ่งสุดท้ายแล้วจะส่งผลเสียต่อระยะการสะสมน้ำหนักเมล็ด

การศึกษาช่วงระดับอุณหภูมิที่พืชสามารถทนทานได้ (threshold temperature) และ ณ จุดที่ระดับอุณหภูมิมียุคภาพเพียงพอที่จะส่งผลทำให้ผลผลิตพืชเริ่มลดลงนั้นเรียกว่า heat stress threshold ซึ่งในการศึกษาในข้าวโดยทั่วไปพบว่าระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมนั้นอยู่ที่ระดับ 33 °C ดังนั้นสภาวะอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศนั้นจะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงผลผลิตของข้าวอย่างแน่นอนพบว่าถ้าระดับอุณหภูมิในพื้นที่ปลูกสูงเกินกว่าระดับเหมาะสมอย่างน้อยที่สุด 5°C จะส่งผลต่อทั้งการยับยั้งการทำงานของระบบเซลล์บางประการ ร่วมกับการตอบสนองเชิงเมตาบอลิซึม เพื่อปรับตัวให้อยู่รอดภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงนั่นเอง (Kondamudi et al., 2012)

ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าภายใต้สภาวะการเพิ่มระดับ CO<sub>2</sub> ไม่ได้เป็นผลดีต่อข้าวเสมอไปทั้งที่เป็นปัจจัยหลักในการสังเคราะห์แสง เนื่องจากมีการศึกษาจำนวนมากเกี่ยวกับ ผลกระทบของสภาวะระดับอุณหภูมิ และ CO<sub>2</sub> สูง ที่มีต่อสัณฐานและชีพลักษณะของข้าวเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซ CO<sub>2</sub> ส่งผลทำให้ระดับอุณหภูมิสูง



พื้นผิวโลกสูงขึ้นจริง พบว่าถ้าระดับ CO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้นเกินระดับ 600  $\mu\text{L l}^{-1}$  ภายในศตวรรษ ที่ 21 จะทำให้ระดับอุณหภูมิพื้นผิวโลกเพิ่มขึ้น 0-8°C (Kondamudi et al., 2012) มีการวิจัยคาดการณ์ว่าการเพิ่มระดับความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> ในบรรยากาศจะกระตุ้นให้ RuBisCO มีกิจกรรมเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลดีต่อการลดกระบวนการหายใจแสง ดังนั้นถ้าพิจารณาการเพิ่ม CO<sub>2</sub> เพียงปัจจัยเดียวจะส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสง และในกรณีการเพิ่มระดับอุณหภูมิ (แต่ไม่เกินจุดความทนทาน) จะกระตุ้นการสร้างคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นสารอาหารที่สำคัญในการสร้างเมล็ดของข้าว เช่น ข้าวสาลี อย่างไรก็ตามมีการศึกษาพบว่า ในกรณีที่เกิดปัจจัยร่วมระหว่างการเพิ่มระดับอุณหภูมิพร้อมกับการเพิ่มระดับ CO<sub>2</sub> กลับส่งผลทำให้เกิดสภาวะความเครียดและลดผลผลิตของข้าว เนื่องจากสภาวะเครียดจากปัจจัยร่วมดังกล่าวส่งผลต่อการลดการดูดซับคาร์บอนเก็บสะสมเนื้อเยื่อลำต้นในช่วงชีพลักษณะที่มีการเจริญเติบโตทางลำต้น ส่งผลต่อการลดการสร้างคาร์โบไฮเดรตในรังไข่ (ซึ่งจะเจริญไปเป็นเมล็ด) (Kondamudi et al., 2012)

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสูง ระดับ CO<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้นต่อปฏิสัมพันธ์ของข้าวระหว่างสรีรวิทยาต่างๆ กระบวนการชีวโมเลกุล หรือช่วงความทนทานของข้าวที่มีสภาวะเครียดจากสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป จึงเป็นประเด็นที่จำเป็นต่อการรับมือกับสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไปดังกล่าว ดังนั้นจึงมีผลการศึกษาวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับประเด็นปัญหานี้

ด้วยสรีรวิทยาของข้าวและพืชสมุนไพรรวม และ องค์ประกอบภายในเซลล์รวมทั้งกระบวนการทางชีวโมเลกุลจึงเป็นสาเหตุที่พืชประเภทข้าวมีความอ่อนไหวในระดับหนึ่งเมื่อสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะปัจจัยอุณหภูมิสูงขึ้น อาทิเช่น เนื่องจากข้าวเป็นพืชประเภท C3 ซึ่งเป็นพืชที่สังเคราะห์สารประกอบคาร์บอนชนิดแรกจากการตรึง CO<sub>2</sub> โดยใช้เอนไซม์ เอนไซม์รูบิสโก (Rubisco) ได้เป็นสารประกอบที่มีคาร์บอน 3 อะตอม) (กนิดา ธนเจริญชนภาส, 2558; Karki et al., 2013) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับพืช C4 ในธรรมชาติพบว่าพืช C4 มีการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะร้อนหรือแล้งได้ดีกว่าพืช C3 โดยการปรับกระบวนการเมตาบอลิซึมของการตรึง CO<sub>2</sub> ซึ่งมีกลไกเพิ่มความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> ภายในเซลล์ที่มีกระบวนการในวัฏจักรคัลวิน ซึ่งจะทำให้มีโอกาสดังเกิด photorespiration น้อยมากหรือไม่เกิดเลย (กระบวนการ photorespiration คือการหายใจแสงซึ่งทำให้พืชต้องเสียโอกาสในการสังเคราะห์แสง และทำให้เสียพลังงานในการกำจัดสารที่เป็นผลผลิตจากการหายใจแสงรวมทั้งการสูญเสีย CO<sub>2</sub> ผ่านออกไปทางปากใบ) (Berg, 2008) ซึ่งหมายความว่าพืชกลุ่มนี้ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับพืช C3 ที่สามารถเกิดสภาวะ photorespiration ได้ง่ายกว่าเช่นในสภาวะที่อุณหภูมิสูงเกินช่วงความทนตัวอย่าง ในกรณีที่พืชมีความทนเหมาะสมที่ระดับ

สูงสุดอยู่ในช่วงระดับอุณหภูมิ 25°C – 28°C เมื่อสภาวะอุณหภูมิสูงกว่า 28°C จะเกิดสภาวะ photorespiration ขึ้นหรือเมื่อเกิดสภาวะแห้งแล้งรวมทั้งสภาวะที่ระดับ CO<sub>2</sub> ในคลอโรพลาสต์น้อยกว่า 50 ppm จะนำไปสู่การลดประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แสง (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558)

สภาวะความเครียดจากความร้อนเป็นหนึ่งในความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพที่จำกัดการสร้างความมวลชีวภาพและผลผลิตของข้าวโดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่เขตร้อน (tropical zone) และประเทศในพื้นที่กึ่งเขตร้อน (Boyer, 1982) เมื่อพิจารณาถึงข้าวซึ่งเป็นพืช C3 ดังที่กล่าวมาแล้วจึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ข้าวจะได้รับผลกระทบภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง พบว่าข้าวมีโอกาสเปิดรับ (exposure) ต่อสภาวะอุณหภูมิสูงและส่งผลกระทบต่อได้ทั้งในช่วงระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น (Vegetative stage) และระยะสืบพันธุ์ (reproductive stage) (Pareek et al., 1995) และยังพบว่าสภาวะ มีเหตุผลเชิงกลไกสรีรวิทยาอีกหลายประการที่เกี่ยวข้องกับสภาวะอุณหภูมิสูงและส่งผลกระทบต่อการผลิตของข้าว

การศึกษาผลกระทบของสภาวะอุณหภูมิสูงที่มีต่อข้าวนั้นเป็นงานวิจัยที่ได้มีการศึกษากันมาอย่างยาวนานหลายปีในประเทศต่างๆ โดยพบผลการศึกษาค่อนข้างคล้ายคลึงกันประการหนึ่งคือ ซีพลักษณะของข้าวในช่วง ระยะการสืบพันธุ์ (reproductive stage) มีความอ่อนไหวต่อสภาวะอุณหภูมิสูงค่อนข้างชัดเจน (Kondamudi et al., 2012) ได้มีการประเมินว่าภายใต้ปี ค.ศ.2030 พื้นที่ปลูกข้าวของโลกประมาณ 16% จะเป็นพื้นที่ที่เผชิญกับปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศโดยเฉพาะระดับอุณหภูมิที่สูงกว่าระดับจุดคงทนในช่วงระยะสืบพันธุ์ซึ่งให้ผลผลิตข้าวลดลง (Zhen et al., 2019) ได้มีการศึกษาและคาดการณ์ว่าผลผลิตข้าวพันธุ์ดั้งเดิมทางตอนใต้ของประเทศญี่ปุ่นจะลดลง 40 % เนื่องจากสภาวะโลกร้อนที่จะเกิดขึ้น (ปริศนา รัตน์เมตตา, 2557) และเมื่อเปรียบเทียบช่วงซีพลักษณะที่ได้รับผลกระทบอย่างชัดเจนพบว่า ในช่วงระยะการสืบพันธุ์ ซึ่งมีการผสมเกสร การปฏิสนธิ การสร้างเมล็ดเป็นระยะวิกฤติต่อสภาวะอุณหภูมิสูงและในที่สุดจะส่งผลกระทบต่อ การสร้างผลผลิตข้าว และเมื่อ Satake and Yoshida (1978) ศึกษาเพื่อหาสาเหตุพบว่าในระยะการผสมเกสรนั้น สภาวะอุณหภูมิสูงเกินกว่า 35°C ในระยะเวลา 5 วัน จะยับยั้งการโปรยละอองเรณูและทำให้ละอองเรณูเป็นหมัน ส่งผลต่อเนื่องทำให้เมล็ดลีบและเป็นหมันในอัตราที่สูง และส่งผลต่อการทำให้ผลผลิตของเมล็ดโดยรวมลดลง และ Peng et al. (2004) รายงานว่าผลผลิตของเมล็ดข้าวพันธุ์ IR72 ลดลง 10 % เมื่ออุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยในช่วงกลางคืนเพิ่มขึ้นทุก 1°C (Peng et al., 2004) เช่นเดียวกับการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความมีชีวิตของละอองเรณู และการปฏิสนธิในข้าวไทย พบว่า เมื่ออุณหภูมิ

เพิ่มขึ้น การงอกของละอองเกสรในอาหารเลี้ยงและบนเกสร เพศเมียรวมทั้งการติดเมล็ดลดลง (เจษฎา และคณะ, 2553) และถ้าระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $3^{\circ}\text{C}$  หรือเกินระดับขีดความทนต่ออุณหภูมิ อารบกวทนต่อซีพลักษณะด้านระยะเวลาของการเจริญเติบโต เช่น ลดช่วงระยะเวลาการสร้างเมล็ดแต่เพิ่มการสูญเสียพลังงานจากอัตราการหายใจมากขึ้น สอดคล้องเนื่องทำให้ผลผลิตข้าวลดลง รวมทั้งคุณภาพของเมล็ดข้าวลดลงเช่นเดียวกัน เมื่อทดสอบภาคสนามโดยปลูกข้าวภายใต้สภาวะอุณหภูมิเพิ่มกว่าระดับปกติ  $3.6-7^{\circ}\text{C}$  ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์แสงลดลงในช่วง 12.2-35.6 % (Oh-e et al., 2007; Wassmann et al., 2009a)

การลดลงของน้ำหนักข้าว 100 เมล็ดที่เกิดขึ้นในการศึกษาภายใต้การสัมผัสอุณหภูมิสูงนั้นมีข้อมูลอธิบายจาก Ahmed et al. (2015) และ Thitisaksaku et al. (2012) ระบุว่าในช่วงที่ข้าวอยู่ในระยะการสร้างเมล็ดโดยการบรรจุแป้งในเมล็ดนั้นถ้าระดับอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าระดับเหมาะสมในช่วงนี้จะทำให้เมล็ดข้าวเกิดโพรงอากาศทำให้ข้าวสูญเสียพื้นที่การบรรจุแป้งในเมล็ดให้สมบูรณ์ทำให้น้ำหนักเมล็ดข้าวลดลง และส่งผลทำให้ข้าวมีขนาดเมล็ดที่ลดลงและรูปร่างผิดปกติ รวมทั้งมีลักษณะท้องไขทำให้สูญเสียคุณภาพของเมล็ดข้าว และซึ่งการที่เมล็ดข้าวลีบแบนดังกล่าวนี้น่าจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้งและสารอาหารสำคัญอื่นๆในเมล็ดด้วยเช่นกัน เช่น การลดปริมาณอะมิโลสในเมล็ดโดยรวมดังที่จะกล่าวถึงต่อไป

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งที่มีโครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินเป็นองค์ประกอบอยู่โดย Tian et al. (2006) ระบุว่าภายใต้สภาวะความเครียดจากความร้อนน่าจะส่งผลต่อการสร้างแป้งของเมล็ดพืชซึ่งโดยปกติแล้วการสังเคราะห์แป้งของพืชนั้นจะเริ่มจากการเปลี่ยนรูปของน้ำตาลซูโครสเป็นกระบวนการแรกก่อน ซึ่งมีปริมาณประมาณ 78% ของน้ำหนักเมล็ดซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นในเอนโดสเปิร์มของข้าว พบว่าความเครียดจากความร้อนจะรบกวนเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดังกล่าว โดยปกติแล้วการสร้างแป้ง อะมิโลสหรือแม้กระทั่งอะมิโลเพคตินจะเพิ่มขึ้นจากการสร้างคาร์โบไฮเดรต (แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่ง) ซึ่งจะถูกลดด้วยเอนไซม์และได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นกลูโคส ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงคาร์โบไฮเดรต จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการสะสมแป้งในรูปแบบอะมิโลส อะมิโลเพคติน และสุดท้ายคือปริมาณน้ำตาลซึ่งเป็นค่าความหวานของข้าวนั่นเอง คาร์โบไฮเดรตในรูปแบบที่ไม่ใช่โครงสร้าง (Non structural carbohydrate) หมายถึง คาร์โบไฮเดรต ที่เป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในเซลล์ ได้แก่ แป้ง (Starch) และน้ำตาล (Sugar) Non structural carbohydrate ถูกสร้างและสะสมในส่วนต่างๆของพืชก่อนที่จะเคลื่อนย้ายไปสะสมในเมล็ดข้าว ในช่วงที่ระยะที่ช่อดอกโผล่จากกาบใบ (heading) งานวิจัยของ

Zhen et al.(2019) ได้ยืนยันว่าการปลูกข้าว 2 พันธุ์คือ Nanjing 41 และ Wuyunjing 24 ภายใต้สภาวะการเพิ่มระดับอุณหภูมิให้สูงกว่าระดับปกติส่งผลต่อการลดผลผลิตและส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการเก็บ Non structural carbohydrate ในส่วนต่างๆของข้าว โดยเฉพาะการสะสมในเมล็ดข้าวซึ่งส่งผลให้ผลผลิตโดยรวมของข้าวลดลง ซึ่งข้าวที่มีการสะสมคาร์โบไฮเดรตในรูปแบบแป้งและน้ำตาลในระดับสูงในระยะช่อดอกนั้นมักจะเป็นข้าวที่มีความทนต่อความเครียดจากระดับอุณหภูมิสูงและทำให้มีผลผลิตมากดังนั้นหากสภาวะความเครียดจากความร้อนสูงส่งผลต่อการลดการสะสมดังกล่าวย่อมจะส่งผลต่อการลดแป้งในรูปแบบอย่างใดอย่างหนึ่ง งานวิจัยของ Ahmed et al. (2014) ซึ่งทำการวิจัยปลูกข้าวพันธุ์ basmati ภายใต้ระดับอุณหภูมิสูงเท่ากับ 32 °C ซึ่งโดยสภาวะที่เหมาะสมของการปลูกข้าว ณ พื้นที่ของประเทศปากีสถานควรอยู่ที่ 22 °C ในการศึกษาพบว่าระดับอุณหภูมิสูงนั้นส่งผลต่อการสะสมแป้งในรูปแบบอะมิโลสและเอนไซม์ในการสังเคราะห์แป้งซึ่งส่งผลทำให้ผลผลิตเมล็ดข้าว basmati ลดลง 6% และปริมาณแป้งรวมลดลง 3.1% และยังส่งผลต่อการลดลงของอะมิโลส 22% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในครั้งนี้ เนื่องด้วยพบว่าภายใต้ระดับอุณหภูมิสูงกว่าสภาวะเหมาะสมนั้นส่งผลทำให้เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเปลี่ยนแปลงซูโครสเป็นแป้งนั้นเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอนไซม์ sucrose synthase, ADP-glucose pyrophosphorylase, starch phosphorylase และ soluble starch synthase พบว่าลดลงภายใต้การปลูกที่ระดับอุณหภูมิ 32 °C ซึ่งย่อมจะส่งผลต่อการเปลี่ยนน้ำตาลไปเป็นแป้งและ/หรือการสังเคราะห์แป้งในเมล็ดข้าว อย่างไรก็ตามการวิจัยครั้งนี้ยังไม่สอดคล้องกับข้อมูลดังกล่าวเนื่องจากผลการศึกษาค่าระดับอะมิโลสลดลง แต่ค่าความหวานกลับเพิ่มขึ้นในข้าวพันธุ์ กข29 ส่วนผลการศึกษาในข้าวไรซ์เบอร์รี่พบว่าอะมิโลสและค่าความหวานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติภายใต้ระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามมีข้อมูลการศึกษาของ Panlasigui et al. (1991) และสุนีย์ สหัสโพธิ์ และคณะ(2558) ที่ระบุว่าข้าวที่มีค่าระดับอะมิโลสเท่ากันกลับมีอัตราการย่อยแป้งและการตอบสนองต่อน้ำตาลที่แตกต่างกันได้ ขึ้นกับสายพันธุ์และคุณสมบัติของแป้งข้าว ซึ่งทำให้เชื่อว่าปริมาณอะมิโลสไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการทำนายค่าดัชนีน้ำตาลในข้าวพันธุ์นั้นๆได้ ซึ่งเป็นไปได้ว่าค่าระดับอะมิโลสที่จะเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลนี้อาจจะถูกยับยั้งหรือกระตุ้นได้เช่นกัน

เมล็ดข้าว (*Oryza sativa* L.) นอกจากเป็นอาหารหลักแล้วยังเป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ และสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น สารประกอบฟีนอลิก (phenolics) และแอนโทไซยานิน (anthocyanin) ในปริมาณสูงกว่าข้าวที่ผ่านการขัดสี นอกจากนี้พบว่าข้าวกล้องพันธุ์ที่เมล็ดมีสีมีปริมาณแอนโทไซยานิน สารประกอบฟีนอลิก แกมมาออโรซานอล สารออกฤทธิ์ทาง

ชีวภาพอื่นๆ และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ สูงกว่าพันธุ์ที่เมล็ดไม่มีสี (Moko et al., 2014) โดยปกติแล้วสารแอนติออกซิแดนซ์เหล่านี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับสภาวะความเครียดจากสิ่งแวดล้อม เช่น สภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ การขาดน้ำ ความเค็ม เป็นต้น อย่างไรก็ตามบางกรณีอาจจะมีการตอบสนองที่แตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของพืช พันธุ์ที่แตกต่างกัน และสภาวะสิ่งแวดล้อมด้วย (Naikoo et al., 2019) พิจารณาผลการศึกษาในสารต้านอนุมูลอิสระในการศึกษาครั้งนี้พบว่าสารประกอบฟีนอลิกในข้าวพันธุ์ กข29 พบว่าสอดคล้องกับข้อมูลดังกล่าว เนื่องจากพบว่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในข้าวพันธุ์โรซเบอรี่กลับลดลงภายใต้สภาวะเดียวกัน ซึ่งบ่งบอกว่าการตอบสนองดังกล่าวแตกต่างกันในข้าวแต่ละพันธุ์

เมื่อพิจารณาการแสดงออกของสารแอนโทไซยานินภายใต้สภาวะเครียดจากระดับอุณหภูมิสูงกลับพบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ (ซึ่งเห็นผลชัดเจนกว่าในข้าวพันธุ์โรซเบอรี่) ดังที่ได้แสดงผลในเบื้องต้น ซึ่งผลการศึกษสอดคล้องกับการศึกษาของ Zaidi et al. (2019) ซึ่งศึกษาการตอบสนองของสารออกซิแดนซ์ (ROS: Reactive Oxygen Species), MDA (Determination of Malondialdehyde เป็นสารที่เป็นตัวชี้วัดการเกิด lipid peroxidation ในเซลล์) และ สารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดแอนโทไซยานินในข้าวสี พันธุ์ 9311 และ 9311k พบว่าข้าว 9311k ที่สัมผัสต่อสภาวะอุณหภูมิสูง (กว่าระดับปกติในการเจริญเติบโต) มีปริมาณสารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดแอนโทไซยานินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่สาร ROS และ MDA เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และยังส่งผลต่อเนื้อทำให้ starch ในเมล็ดข้าวลดลง ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการเพิ่มหรือลดสารแอนติออกซิแดนซ์สามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่ข้าวไม่สามารถใช้กลไกนี้ในการปกป้องตนเอง และ ขึ้นอยู่กับลักษณะของพันธุ์ข้าวด้วยเช่นกัน ปริมาณแอนโทไซยานินที่ลดลงนี้ได้รับการอธิบายโดยสมมติฐานว่า โดยน้ำตาลในเมล็ดข้าวจะถูกสังเคราะห์เพื่อสร้าง starch, cellulose, protein หรือแม้กระทั่งแอนโทไซยานิน ดังนั้นในสภาวะที่พืชเกิดความเครียดจากอุณหภูมินั้นเพื่อการอยู่รอดของพืชอาจจะเกิดกระบวนการยับยั้งการสร้างสารแอนติออกซิแดนซ์บางชนิดเพื่อให้พืชสร้างผลผลิตได้เพียงพอ ดังนั้นอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินในเมล็ดลดลงเพื่อให้พืชอยู่รอดได้ด้วยการสร้างสำคัญต่อการดำรงอยู่ของพืชได้ (Albert et al., 2009; Mahmood et al., 2017)

ผลการศึกษาในภาพรวมนั้นบ่งชี้ว่าถ้าพิจารณาจากองค์ประกอบผลผลิตและคุณภาพเมล็ดในด้านขนาดของเมล็ดพบว่าข้าวพันธุ์โรซเบอรี่มีความอ่อนไหวกว่าพันธุ์ กข29 เมื่อพิจารณาถึงผลการ

ตอบสนองในด้านผลผลิต เช่น ขนาดเมล็ดที่เล็กลงที่ชัดเจนกว่าพันธุ์ กข29 (ซึ่งโดยน้ำหนัก 100 เมล็ด) ผลผลิตรวม ต้น/เฮกเตอร์ ภายใต้สถานการณ์ที่อุณหภูมิสูงสุด (HT8.5) ที่ลดลงถึง 68.7% ที่สำคัญคือ สารแอนติออกซิแดนท์ ทั้งประเภทฟีนอลิกและแอนโทไซยานินที่ลดลงมากกว่าอย่างชัดเจน (ขณะที่เพิ่มขึ้นในพันธุ์ กข 29) ด อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ที่บ่งบอกในด้านบวกมีบางประการเช่น ค่าความหวานของข้าวไรซ์เบอร์รี่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้ 2 สถานการณ์ (แต่เพิ่มขึ้นในข้าวพันธุ์ กข29)



## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยโครงการนี้ได้กำหนดขอบเขตการศึกษาโดยการเลือกข้าว 2 พันธุ์ คือข้าวขาว (กข 29) และข้าวสี(ไรซ์เบอร์รี่) และ สร้างสภาวะการเพิ่มระดับอุณหภูมิ 2 สถานการณ์ภายในโรงเรือนปลูกข้าว ตามแนวโน้มสภาพฉายอนาคต RCP 4.5 (ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2.6 °C) และ RCP 8.5 (ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 4.5 °C) ซึ่งเป็นสภาวะที่มีโอกาสเป็นไปได้ในประเทศไทย ซึ่งผลการศึกษาสรุปในภาพรวมได้ดังนี้

#### 6.1 สรุปผลการวิจัยแยกตามปัจจัยที่ศึกษา

##### 6.1.1 ผลการศึกษาในปัจจัยด้านอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์

ผลการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ในระยะเวลา 100 วัน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

##### 6.1.2 ผลการศึกษาในปัจจัยด้านรวงข้าวในใบ

###### (1) รวงข้าวชนิดคลอโรฟิลล์เอ

ผลการศึกษาไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลองในข้าวทั้ง 2 พันธุ์

###### (2) รวงข้าวชนิดคลอโรฟิลล์บี

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์บีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT 8.5 ในใบข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่

###### (3) รวงข้าวชนิดแคโรทีนอยด์

ผลการศึกษาในรวงข้าวชนิดแคโรทีนอยด์ พบว่ามีผลที่แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เฉพาะภายใต้สถานการณ์ HT4.5 ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ พบว่าปริมาณแคโรทีนอยด์ลดลงในข้าวพันธุ์ กข29 แต่เพิ่มขึ้นในข้าวไรซ์เบอร์รี่

##### 6.1.3 ผลการศึกษาในปัจจัยองค์ประกอบผลผลิต

###### (1) ผลผลิต

ผลการศึกษาพบว่าถึงแม้พบว่าองค์ประกอบผลผลิตเกือบทั้งหมด คือจำนวนรวง/กอ, จำนวนเมล็ดสมบูรณ์/รวง, จำนวนเมล็ดทั้งหมด/รวง ไม่พบผลที่แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) อย่างไรก็ตามพบว่ามี 2 พารามิเตอร์ที่พบว่ามีผลการศึกษาที่แสดงผล

กระทบเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) คือผลผลิตรวม ต้น/เฮกแตร์ และน้ำหนัก 100 เมล็ด ซึ่งแสดงออกทั้ง 2 พันธุ์ ผลผลิตรวม ต้น/เฮกแตร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT8.5 เท่ากับ 28.5% และ 68.7% ในข้าวพันธุ์ กข29 และไรซ์เบอร์รี่ ตามลำดับ ส่วนน้ำหนัก 100 เมล็ดนั้นพบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญในข้าวพันธุ์ กข29 ภายใต้สถานการณ์ HT8.5 แต่ในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ลดลงทั้ง 2 สถานการณ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

#### 6.1.4 กรดไขมัน

ผลการศึกษาพบว่ากรดไขมันพาล์มมิติกและโอเลอิกตอบสนองทั้งเชิงบวกและเชิงลบแต่ละสถานการณ์ ผลการศึกษาค่อนข้างแตกต่างกันในแต่ละสภาวะอุณหภูมิและแตกต่างกันในแต่ละพันธุ์ โดยสรุปดังนี้

##### (1) กรดพาล์มมิติก

ปริมาณกรดพาล์มมิติกตอบสนองต่อสถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 รวมทั้งแสดงออกในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ในทางตรงข้ามกัน นั่นคือภายใต้สถานการณ์ HT4.5 เพิ่มขึ้นในข้าวพันธุ์ กข29 แต่ลดลงในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แต่ภายใต้สถานการณ์ HT8.5 ลดลงในข้าวพันธุ์ กข29 แต่เพิ่มขึ้นในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

##### (2) กรดโอเลอิก

ปริมาณกรดโอเลอิกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์สอดคล้องกัน

##### (3) กรดไลโนเลอิก

ปริมาณกรดไลโนเลอิกตอบสนองต่อสถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 รวมทั้งแสดงออกในข้าวทั้ง 2 พันธุ์แตกต่างกัน นั่นคือลดลงภายใต้สถานการณ์ HT4.5 ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ แต่ภายใต้สถานการณ์ HT8.5 กลับเพิ่มขึ้นในข้าวพันธุ์ กข29 แต่ลดลงในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบทั้ง 2 พันธุ์พบว่าผลการตอบสนองของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ภายใต้ HT 8.5 ทำให้กรดไขมันทั้ง 3 ชนิดลดลงชัดเจน แต่พันธุ์ กข29 มีเพียงกรดพาล์มมิติกที่ลดลง แต่กรดไขมันโอเลอิก และไลโนเลอิกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

#### 6.1.5 อะมิโลสและอะมิโลเพคติน

ผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างค่าอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในเมล็ดข้าว 2 พันธุ์ พบว่ามีเพียงข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ที่มีการตอบสนองในเชิงบวกโดยการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของอะมิโลสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 และตอบสนองในเชิงลบโดย



การลดเปอร์เซ็นต์ของอะมิโลเพคติน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้สถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5

#### 6.1.6 ค่าความหวาน

ผลการตอบสนองต่อระดับค่าความหวานของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ที่มีต่อสถานการณ์ HT4.5 และ HT8.5 ตรงข้ามกัน พบว่าค่าความหวานของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข29 เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ต่อทั้ง 2 สถานการณ์ ในขณะที่ค่าความหวานของเมล็ดข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ต่อทั้ง 2 สถานการณ์ และลดลงสูงสุดภายใต้สถานการณ์ HT8.5

#### 6.1.7 สารแอนติออกซิแดนซ์

##### (1) สารประกอบฟีนอลิก

ผลการตอบสนองต่อระดับค่าสารประกอบฟีนอลิกของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ที่มีต่อสถานการณ์ HT8.5 ตรงข้ามกัน พบว่าปริมาณฟีนอลิกของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข29 ลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ต่อสถานการณ์ HT8.5 ในขณะที่ปริมาณฟีนอลิกของเมล็ดข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ กลับเพิ่มขึ้น ต่อสถานการณ์ HT8.5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

##### (2) สารแอนโทไซยานิน

เปอร์เซ็นต์การออกฤทธิ์ของสารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดแอนโทไซยานินของสารสกัดข้าวที่ความเข้มข้น 12.5 mg/ml ของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข29 ลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ต่อสถานการณ์ HT4.5 และลดลงในเมล็ดข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ภายใต้ 2 สถานการณ์ คือ HT4.5 และ HT8.5

#### 6.1.8 ลักษณะทางพันธุกรรม

ภายใต้การเจริญเติบโตของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ส่งผลทำให้ลักษณะพันธุกรรมแตกต่างและแบ่งกลุ่มย่อยตามสถานการณ์ CT, HT4.5 และ HT8.5 ซึ่งบ่งบอกว่าการตอบสนองต่อระดับอุณหภูมิ

#### 6.1.9 ร่วมกับการสร้างแนวทางการรับมือในชุมชน

ในการวิจัยครั้งนี้ได้นำผลการศึกษาไปถ่ายทอดให้แก่ชุมชน ในการศึกษาเลือกกลุ่มตัวอย่างเกษตรกร จำนวน 38 คนในพื้นที่ศึกษา คือ ศูนย์การเรียนรู้ตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ต.รังนก อ.สามง่าม จ.พิจิตร ซึ่งผลที่ได้รับชุมชนได้ร่วมมือกันสร้างแนวทางการลดการเผา ผลผลิตและสิ่งเหลือใช้ทางการเกษตรในเบื้องต้นเพื่อรับมือกับสภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ

#### 6.2 สรุปผลทั้งหมดในภาพรวม

6.2.1 สิ่งทดลองภายใต้การจำลองสถานการณ์ให้เทียบเท่ากับระดับ RCP 4.5 (ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2.6°C) และ RCP 8.5 (ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 4.5°C) ส่งผลต่อการ

เปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เกือบทุกประเภทในการวิจัย(ยกเว้นอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์) นั่นคือ ระดับรังควัตถุชนิด คลอโรฟิลล์บี และแคโรทีนอยด์, ผลผลิตรวมต้น/เฮกเตอร์, ขนาดเมล็ด โดยการซึ่งเป็น 100 เมล็ด, กรดไขมันทั้ง 3 ชนิด, อะมิโลส, อะมิโลเพคติน, ค่าความหวาน, สารแอนตีออกซิแดนท์ ทั้งชนิดสารประกอบฟีนอลิก และแอนโทไซยานิน สุดท้ายคือการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางพันธุกรรม ของข้าวทั้ง 2 พันธุ์

6.2.2 เมื่อพิจารณาความอ่อนไหวและความทนทานของข้าวทั้ง 2 พันธุ์โดยพิจารณาจากการตอบสนองในเชิงลบของพารามิเตอร์ที่สำคัญ พบว่าข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่มีความอ่อนไหวมากกว่าเนื่องจากพิจารณาจากผลผลิตในภาพรวม (ต้น/เฮกเตอร์) ลดลงถึง 68.7% (ภายใต้ HT8.5) การลดขนาดของเมล็ด (ภายใต้ HT4.5 และHT8.5) การลดกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวไลโนเลอิก (ภายใต้ HT4.5 และHT8.5) และการลดสารแอนตีออกซิแดนท์ทั้งฟีนอลิกและแอนโทไซยานิน (ภายใต้ HT4.5 และHT8.5)ซึ่งสังเกตพบว่าสีม่วงของเมล็ดข้าวไรซ์เบอร์รี่ลดลงภายใต้สถานการณ์อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลทำให้แอนโทไซยานินที่ตรวจวิเคราะห์ลดลง

ในขณะที่ข้าวพันธุ์ กข29 การลดผลผลิตในภาพรวม (ต้น/เฮกเตอร์) ลดลงเพียง 28.5% (ภายใต้ HT8.5) กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวชนิดไลโนเลอิกเพิ่มขึ้น (ภายใต้ HT8.5)และสารแอนตีออกซิแดนท์ชนิดสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้น (ภายใต้ HT8.5) บ่งบอกถึงความสามารถในการสร้างกลไกป้องกันตัวเองได้ดีกว่าข้าวไรซ์เบอร์รี่

6.2.3 พิจารณาสถานการณ์ที่คาดการณ์ในอนาคตภายใต้การจำลองสถานการณ์ให้เทียบเท่ากับระดับ RCP 4.5 (ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2.6°C) และ RCP 8.5 (ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 4.5°C) ที่จะส่งผลต่อผลผลิตและคุณภาพของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ คือ กข29 และไรซ์เบอร์รี่ในภาพรวมที่มีต่อพารามิเตอร์สำคัญ พบว่า สถานการณ์ RCP 8.5 ส่งผลกระทบในระดับที่รุนแรงกว่าในด้านการลดผลผลิตรวม ลดขนาดของเมล็ด ลดไขมันชนิดดี(ไม่อิ่มตัว) และสุดท้ายลดสารแอนตีออกซิแดนท์

6.2.4 ลักษณะพันธุกรรมภายใต้ 2 สถานการณ์ล้วนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะพันธุกรรมของข้าวทั้ง 2 พันธุ์

### 6.3 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาครั้งต่อไปควรวิจัยในประเด็นการรับมือด้วยวิธีการปลูกข้าวหลากหลายวิธีเพื่อทดสอบความสามารถในปรับตัวต่อสภาวะโลกร้อนและควรขยายการปลูกหลากหลายฤดูกาลเพื่อทดสอบช่วงระยะเวลาการปลูกที่เหมาะสมในการปลูกข้าวของประเทศไทยภายใต้การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ

## บรรณานุกรม

- กณิตา ธนเจริญชนภาส และ โอรส รักชาติ. (2551). รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่องการจำลองสภาพการณ์โลกร้อนในพื้นที่ปลูกข้าวเพื่อประเมินผลกระทบที่มีต่ออัตราผลผลิต คุณภาพสารอาหาร และการเปลี่ยนแปลงในระดับพันธุกรรมของข้าวหอมมะลิไทย. เสนอต่อสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- กณิตา ธนเจริญชนภาส และ โอรส รักชาติ. (2552). ผลกระทบของสภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในฤดูกาลปลูกที่มีต่อผลผลิต และ อนุภาคเม็ดแป้งของข้าวหอมไทย (*Oryza sativa* L.) พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. เรื่องเต็มการประชุมวิชาการครั้งที่ 47 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เล่มที่ 9 สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, วันที่ 17-20 มีนาคม 2552, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 282-290.
- กณิตา ธนเจริญชนภาส. (2558). ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกต่อสรีรวิทยาระบบนิเวศของพืชพรรณ, โรงพิมพ์ร้านพิษณุโลกดอทคอม, 274 หน้า.
- กณิตา ธนเจริญชนภาส. (2558). การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก : ผลกระทบและการตอบสนองของสรีรวิทยาระบบนิเวศ. โรงพิมพ์พิษณุโลกดอทคอม, พิษณุโลก, 263 หน้า
- กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล. (2543). เทคโนโลยีของแป้ง, โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- กรมการข้าว. (2555). ข้าวลิ้มฟัว มรดกของแผ่นดิน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ, 36 หน้า
- กัมปนาท ปิยะอำรงชัย. (2559). รายงานฉบับสมบูรณ์ : โครงการศึกษาเพื่อวางแผนการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศแห่งชาติ, รายงานต่อสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- เจียมใจ เครือสุวรรณ. (2553). การจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสำหรับประเทศไทย ด้วยแบบจำลองภูมิอากาศ MM5, อ่างใน ศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอุนิยมวิทยา. (2559). เอกสารวิชาการ : การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณน้ำฝนจากการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในอนาคต. กรมอุตุนิยมวิทยา, กรุงเทพฯ
- เจษฎา จงใจดี, สาวิกา กอนแสง, ศันศนีย์ จำจด, เบญจวรรณ ฤกษ์เกษม และ สิทธิชัย ลอดแก้ว. (2553). ผลของอุณหภูมิ สูงต่อความมีชีวิตของละอองเรณูและการปฏิสนธิในพันธุ์ ข้าวไทย. วารสารเกษตร, 26 (พิเศษ), 29-35.

- จำรัส โปรงศิริวัฒนา. (2534). **ความรู้เรื่องข้าว**, สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ, 437 น.
- ชวนพิศ แดงสวัสดิ์. (2544). **สรีรวิทยาของพืช**. ธนัชการพิมพ์และสำนักพิมพ์พัฒนาศึกษา, กรุงเทพฯ, 379 หน้า.
- ทรงเขาว์ อินสมพันธ์, วีรชัย ศรีวัฒนพงษ์, วิเชียร เฮงศักดิ์ และ ศุภศักดิ์ ลิ้มปิติ. (2530). ผลของระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่มีต่อผลผลิตและคุณภาพของเมล็ดข้าวเหลืองพันธุ์ต่างๆ ที่ปลูกในสภาพหลังนา. รายงานการประชุมสัมมนาวิชาการเรื่องเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม, วันที่28-30 ตุลาคม 2530, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. หน้า 14-26.
- บุญหงษ์ จงคิด. (2553). **ข้าวและเทคโนโลยีการผลิต**, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ประพันธ์ นันทะไชย. 2525. **แนวทางการปรับปรุงพันธุ์สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย**. (2560). ข้อมูลเกี่ยวกับข้าว, สืบค้นเมื่อวันที่ 4 มิถุนายน 2560 ใน [http://www.thairiceexporters.or.th/rice\\_profile.htm](http://www.thairiceexporters.or.th/rice_profile.htm)
- ปราชญา เนียมคนตรง. (2559). **การฟื้นคืนสภาพและการปรับตัวของเมืองต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ กรณีศึกษา เมืองในเขตภาคเหนือตอนล่าง**. วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยา มหาวิทยาลัยนเรศวร หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร,
- ปริศนา รัตนเมตตา. (2557). **การคัดเลือกข้าวหอมนิลพันธุ์กลายภายใต้สภาพอุณหภูมิสูง**, วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พืชไร่), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ปิยะพันธ์ ศรีคุ้ม และ นิตยา รื่นสุข. (2555). **ผลการเปลี่ยนแปลงสภาพอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว**, เอกสารประกอบการประชุมสัมมนาวิชาการ กลุ่มศูนย์วิจัยข้าวภาคเหนือตอนบนและภาคเหนือตอนล่าง ณ โรงแรมท็อปแลนด์ อำเภอเมืองจังหวัดพิษณุโลก วันที่ 25-26 เมษายน 2555.
- พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์ และเจริญศักดิ์ โรจนฤทธิ์พิเชษฐ์. (2529). **การปรับปรุงพันธุ์พืชเศรษฐกิจของประเทศไทย**. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภาคภูมิ พระประเสริฐ. (2550). **สรีรวิทยาของพืช**. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ, 174 หน้า.
- มูลนิธิข้าวไทย. (2560). **ความรู้เรื่องข้าว**, สืบค้นเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม 2560 ใน <http://www.thairice.org/>

- สุนีย์ สหัสโพธิ์, ริฎู เจริญศิริ และ รัชณี คงคาอุยฉาย. (2558). ดัชนีน้ำตาลในข้าวเหนียวและข้าวเจ้าพันธุ์พื้นเมือง โดยใช้วิธี การเลียนแบบการย่อยการดูดซึมน้ำตาลในหลอดทดลอง. สารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, ปีที่ 20 (2), 1-13.
- สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2560). แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่สิบสอง พ.ศ.2560-2565, สำนักนายกรัฐมนตรี, กรุงเทพฯ, 215 หน้า.
- สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว. 2560. องค์ความรู้เรื่องข้าว, กรมการข้าว, สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มิถุนายน 2560 ใน <http://www.brrd.in.th/rkb2/seed/index.php-file=content.php&id=4.htm>
- สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว. (2562). องค์ความรู้เรื่องข้าว, สืบค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 18 ธันวาคม 2562 จาก <http://www.ricethailand.go.th/Rkb/varieties/index.php.htm>
- สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. (2560). ข้อมูลเกี่ยวกับข้าว, สืบค้นเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม 2560 ใน [http://www.thairiceexporters.or.th/rice\\_profile.htm](http://www.thairiceexporters.or.th/rice_profile.htm)
- ศูนย์ภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา. (2553). ความผันแปรและการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของประเทศไทย และการคาดการณ์ในอนาคต. เอกสารวิชาการ เลขที่ 551-524-01-2553. 137 หน้า
- ศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา. (2559). เอกสารวิชาการ : การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณน้ำฝนจากการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในอนาคต. กรมอุตุนิยมวิทยา, กรุงเทพฯ
- อานนท์ สนิทวงศ์ ณ อยุธยา. (2554). ความเสี่ยง ความเปราะบาง และการปรับตัวของระบบและภาคส่วนทางธรรมชาติและมิติความมั่นคงของมนุษย์ต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ. ใน: รายงานการสังเคราะห์และประมวลสถานภาพองค์ความรู้ด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของไทย ครั้งที่ 1: องค์ความรู้ด้านผลกระทบ ความอ่อนแอและการปรับตัว. คณะทำงานกลุ่มที่ 2 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย [อานนท์ สนิทวงศ์ ณ อยุธยา และอำนาจ ชิดไธสง (บรรณาธิการ)]
- ADB., (Asian Development Bank). (2009). The Economics of Climate Change in Southeast Asia: a Regional Review. Manila, the Philippines.

- Albert, N.W., Lewis, D.H., Zhang, H., Irving, L.J., Jameson, P.E. and Davies, K.M. (2009). **Light-induced vegetative anthocyanin pigmentation in Petunia**. *J. Exp. Bot*, 60, 2191–2202.
- Ahmed, N., Tetlow, I.J., Nawaz, S., Iqbal, A., Mubin, M., Rehman, M.S.N., Butt, A., Lightfoot, D.A., Maekawa, M. (2014). Effect of high temperature on grain filling period, yield, amylose content and activity of starch biosynthesis enzymes in endosperm of basmati rice, *Journal of the Science Food and Agriculture*, wileyonlinelibrary.com)DOI10.1002/jsfa.694
- Ahmed, N., Tetlow, I.J., Nawaz, S., Iqbal, A., Mubin, M., Nawaz ul Rehman, M.S., Butt, A., Lightfoot, D.A. and Maekawa, M. (2015). **Effect of high temperature on grain filling period, yield, amylose content and activity of starch biosynthesis enzymes in endosperm of basmati rice**. *J. Sci. Food Agric.*, 95, 2237–2243.
- Andaya, V.C., Mackill, D.J. (2003). QTLs conferring cold tolerance at the booting stage of rice using recombinant inbred lines from a japonica 9 indica cross. *Theor. Appl. Genet.* 106, 1084-1090.
- Anwar, M.R., Leary, G.O., McNeil, D., Hossian, H. and Nelson, R. (2007). Climate change impact on rainfed wheat in South-Eastern. *Australia Fields Crops Reasearch*, 104, 139-147.
- Arshad, M.S., Farooq, M., Asch, F., Krishna, J.S.V., Prasad, P.V.V. and Siddique, K.H.M. (2017). Thermal stress impacts reproductive development and grain yield in rice. *Plant Physiology and Biochemistry*, 115, 57-72.
- Aydinalp, C. and Cresser M.S. (2008). The effects of global climate change on Agriculture. *Journal of Agricultural and Environmental Science*, 3, 672-676.
- Baker, J.T. (2004). Yield responses of southern US rice cultivars to CO<sub>2</sub> and temperature. *Agric Meteorol*, 122, 129-137.
- Barnes, J.D., Balague, L. E., Elvira, M.S. and Davison, A.W. (1992). A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls-a and chlorophylls-b in lichens and higher plants, *Environ. Exp. Bot.*, 32, 85-100.

- Berg, L. (2008). **Introduction botany: Plants People, and the Environment**. Thomson Brooks/Cole, USA.
- Bielczynski, L.W., Lacki, M.K., Hoefnagels, I., Gambin, A. Crocea, R. (2017). Leaf and Plant Age Affects Photosynthetic Performance and Photoprotective Capacity. **Plant Physiology**, 175, 1634-1648.
- Bjorkman, O., Mooney, HA., Ehleringer, J. (1975). Photosynthetic responses of plants from habitats with contrasting thermal environments; comparisons of photosynthetic characteristics of intact plants. *Carnegie Inst Wash Yearb*, 74, 743-748.
- Bonan, G. (2002). **Ecological Climatology, : Concepts and Applications**, Cambridge University, 690. Retrieved August 2019, from <https://www.amazon.com/Ecological-Climatology-Applications-Gordon-Bonan/dp/0521693195>
- Bowes, G., Ogren, W.L. and Hageman, R.H. (1971). Phosphoglycolate production catalyzed by ribulose diphosphate carboxylase. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, 45, 716-722.
- Bowler, C., Montagu, M.V. and Inze, D. (1992). **Superoxide dismutase and stress tolerance**, *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*4383116
- Boyer, J.S. (1982). **Plant Productivity and Environment**. *Science*, 218, 443-448. <http://dx.doi.org/10.1126/science.218.4571.443>
- Bukhov, N.G. Wiese, C., Neimanis, S. and Heber, U. (1999). **Heat sensitivity of chloroplasts and leaves: leakage of protons from thylakoids and reversible activation of cyclic electron transport**. *Photosynthesis Research*, (59) ,81-93.
- Butsat, S. and Siriamornpun, S. (2010). **Antioxidant Capacities and Phenolic Compounds of the Husk, Bran and Endosperm of Thai Rice**. *Food Chemistry*, 119, 606-613.
- Cao, Y.Y., Duan, H., Yang, L.N., Wang, Z.Q., Zhuo, S.C., Yang, J.C. (2008). Effective heat stress during meiosis on grain yield of rice cultivars differing in heat tolerance and its physiological mechanism. *Acta. Agron Sin.* 34, 2134-2142.

- Chao, C., Guang-sheng, Z. and ZHOU, Li. (2014). Impacts of climate change on rice yield in China from 1961 to 2010 based on provincial data. **Journal of Integrative Agriculture**, 13, 1555-1564.
- Chen, K. and Arora, R. (2011). Dynamics of the antioxidant system during seed osmopriming, post-priming germination, and seedling establishment in spinach (*Spinacia oleracea*). **Plant Science**, 180, 212-220.
- Clarke, L., Edmonds, J., Jacoby, H., Pitcher, H., Reilly, J. and Richels, R. (2007). Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. Sub-report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S. **Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research**. Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington, DC, USA, 154 pp.
- Clarke, L., Jiang, K., Akimoto, K., Babiker, M., Blanford, Fisher-Vanden, G., Hourcade, K. J., Krey, C., Kriegler, V.E., Löschel, A., McCollum, D., Paltsev, S., Rose, S., Shukla, P.R., Tavoni, M., Van der Zwaan, B.C.C. and Van Vuuren, D.P. (2014). **Assessing transformation pathways**. In: **Climate change 2014: Mitigation of climate change**. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- FAO., (Food and Agriculture Organization). (2012). FAOSTAT Database. FAO, Rome. <http://www.faostat.fao.org> (Accessed 05 July 2016).
- Fu, G.F., Tao, L.X., Song, J., Wang, X., Cao, L.Y., Cheng, S.H. (2008). Responses of yield characteristic to high temperature during flowering stage in hybrid rice guodao 6. **Rice Sci.** 15, 215-222.
- Fujino, J., R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, Y. Matsuoka. (2006). Multi-gas mitigation analysis



- on stabilization scenarios using AIM global model. Multigas Mitigation and Climate Policy. **The Energy Journal Special Issue**, 3, 343-354.
- Fuhrer, J. (2003). Agroecosystem responses to combinations of elevated CO<sub>2</sub>, Ozone, and global climate change. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, 97, 1-20.
- Greer, D.H. and Weston, C. (2010). Heat stress affects flowering, berry growth, sugar accumulation and photosynthesis of *Vitis vinifera* cv. Semillon grapevines grown in a controlled environment. **Functional Plant Biology**, 37, 206-214.
- Greer, D.H. and Weedon, M.M. (2012). Modelling photosynthetic responses to temperature of grapevine (*Vitis vinifera* cv. Semillon) leaves on vines grown in a hot climate. **Plant, Cell and Environment**, 35, 1050-1064.
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K. and Fujita, M. (2013). **Extreme temperature responses, oxidative stress and Antioxidant Defense in plants**; Chapter 6 in *Abiotic Stress Plant Responses and Applications*. Retrieved on October 8, 2014, from <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/43317.pdf>
- Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M. and Zhai, P.M. (2013). **Observations: atmosphere and surface**. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Hijioka, Y., Y. Matsuoka, H. Nishimoto, M. Masui, and M. Kainuma. (2008). Global GHG emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets. **Journal of Global Environmental Engineering**, 13, 97-108.

- Hollister, R.D. and Webber, P.J. (2000). Biotic validation of small open top chamber in tundra ecosystem. **Global Change Biology**, Vol. 6, Issue 7, pp. 835.
- IPCC. (2007). Summary for Policymakers, **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. In Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, NY. pp.15.
- IPCC. (2013). Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. (2014) a. Summary for policymakers. In: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32. gov/AR5/. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2014) b. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jacobson, M.Z. (2002). **Atmospheric Pollution; History, Science, and Regulation**. Cambridge University Press, UK.

- Jagadish, S.V.K., Craufurd, P.Q., wheeler, T.R. (2007). High temperature Stress and spikelet fertility in rice. *J. Exp. Bot.* 58, 1627-1635.
- Jones, H.G. (1992). **Plants and microclimate : A quantitative approach to environmental plant physiology**, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jubb, I., Canadell, P. and Dix, M.C. 2016. **Representative Concentration Pathways (RCPs)**. Australian Climate Change Science Program, Bureau of Meteorology, Australian Government Department of the Environment, Retrieved on June 30, 2017. From [http://www.cawcr.gov.au/projects/Climatechange/wpcontent/uploads/2016/11/ACCSP\\_RCP.pdf](http://www.cawcr.gov.au/projects/Climatechange/wpcontent/uploads/2016/11/ACCSP_RCP.pdf)
- FAOSTAT. 2017. Crops Retrieved Retrieved June 25 2019 from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/OC>
- Fujino, J., R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, Y. Matsuoka. (2006). **Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. Multigas Mitigation and Climate Policy**. The Energy Journal Special Issue.
- Hall A. (2001). **Crop developmental responses to temperature, photoperiod, and light quality,** in *Crop Response to Environment* ed. Anthony E., Hall (Boca Raton: CRC; ), 83–87.
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K. and Fujita, M. (2013). **Extreme temperature responses, oxidative stress and Antioxidant Defense in plants; Chapter 6 in Abiotic Stress Plant Responses and Applications**. Retrieved on October 8, 2014, from. <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/43317.pdf>.
- Hijioka, Y., Y. Matsuoka, H. Nishimoto, M. Masui, and M. Kainuma. (2008). **Global GHG emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets**. *Journal of Global Environmental Engineering*, 13, 97-108.
- Hollister, R.D. and Webber, P.J. (2000). Biotic validation of small open top chamber in tundra ecosystem. *Global Change Biology*, Vol. 6, Issue 7, pp. 835.

- Karki, S., Rizal, G. and Quick, W.P. (2013). Improvement of photosynthesis in rice (*Oryza sativa* L.) by inserting the C4 pathway. *Rice*. 6, 2-8. DOI: 10.1186/1939-8433-6-28
- Kaur, T., Bhat, R. and Vyas, D. (2016). **Effect of contrasting climates on antioxidant and bioactive constituents in five medicinal herbs in Western Himalayas.** *Journal of Mountain Science*, 13(3), 484-492.
- Keeling, C.D. and Whorf, T.O. (2003). **Atmospheric CO2 records from sites in the SIO air sampling networks.** *Carbon Dioxide Inf. Anal. Center Commun.* 30, 4. Cited in Prasad, P.V., Boote, K.J. Allen Jr, H., 2006. Adverse high temperature effects on pollen viability, seed-set, seed yield and harvest index of grain-sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) are more severe at elevated carbon dioxide due to higher tissue temperatures, *Agriculture and Forest Meteorology*. 139, 237-251.
- Koike, S., Takeda, K., Satake, T. (1990). **Comparison of cold tolerance between isogenic pairs differing in grain size.** *Rice Genet.* Newstett 7, 133-134.
- Kondamudi, R., Swamy, N., K., Venkata, D., Chakravarthy, N., Vishnuprasanth, V., Rao, Y.V., Rao, P.R., Sarla, N., Subrahmanyam D. and Voleti, S.R. (2012). **Heat stress in Rice-hysiological Mechanisms and Adaptation Strategies.** In Venkateswarlu et al. (eds.) *Crop Stress and its Management : Perspectives and Strategies*, DOI 10.1007/978-94-007-2220-0-6, Springer Science and Business Media B.V.
- Kumar, R.R., Goswami, S., Sharma, S.K., Singh, K., Gadpayle, K.A., Kumar, N., Rai, G.K., Singh, M. and Rai, R.D. (2012). **Protection against heat stress in wheat involves change in cell membrane stability, antioxidant enzymes, osmolyte, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and transcript of heat shock protein.** *International Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, 4, 83-91.
- Kuroki, M., Saito, K., Matsuba, S., Yokogami, N., Shimizu, H., Ando, I., Sato, Y. (2007). **A quantitative trait locus for cold tolerance at the booting stage on rice chromosome 8.** *Theor. Appl. Genet.* 115. 593-600.

- Knutson, C. A. (1986). **A simplified colorimetric procedure for determination of amylose in maize starches.** *Cereal Chemistry*, 63, 89-92.
- Lichtenthaler, H.K. and Wellburn, A.R. (1983). **Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents,** *Biochemical Soc. Trans.*, 11, 591-592,
- Liu, Y., Zhou, Z., Zhang, X., Xu, X., Chen, H. and Xiong, Z. (2015). **Net global warming potential and greenhouse gas intensity from the double rice system with integrated soilecrop system management: A three-year field study.** *Atmospheric Environment*, 116, 92-101.
- Lobato, A., Gonçalves-Vidigal, M., Vidigal Filho, P.S., Andrade, C., Kvitschal, M.V. and Bonato, C.M. (2010). **Relationships between leaf pigments and photosynthesis in common bean plants infected by anthracnose,** *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 38(1), 29-37.
- Loypimai, P., Moongngam, A. and Chottanom, P. (2009). **Effects of Ohmic Heating on Lipase Activity, Bioactive Compounds and Antioxidant Activity of Rice Bran,** *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), 3642–3652.
- Mahmood, K., Xu, Z. and Rothstein, S.J. (2017). **ROS induces anthocyanin production via late biosynthetic genes and anthocyanin deficiency confers the hypersensitivity to ROS-generating stresses in Arabidopsis.** *Plant Cell Physiol*, 58, 1364–1377.
- Marks, D. (2011). **Climate change and Thailand: Impact and Response.** *Contemporary Southeast Asia*, 33(2), 229-258.
- Matsui, T., Omasa, K. and Horie, T. (2000). **High temperatures at flowering inhibit swelling of pollen grains, a driving force for thecae dehiscence in rice (*Oryza sativa* L.).** *Plant Production Science*, 3, 430-434.
- Medek, D.E., Ball, M.C. and Schortemeyer, Marcus. (2007). **Relative contributions of leaf area ratio and net assimilation rate to change in growth rate depend on growth temperature: comparative analysis of subantarctic and alpine grasses.** *New Phytologist*, 175: 290–300.

- Mishra, A., Singh, R., Raghuwanshi, N.S., Chatterjee, C. and Froebrich, J. (2013). **Spatial variability of climate change impacts on yield of rice and wheat in the Indian Ganga Basin.** *Science of the Total Environment*, 468–469, 132–138.
- Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M. and Van Breusegem, F. (2004). Reactive oxygen gene network of plant. **Trends in Plant Science**, 9, 490-498.
- Mo, Y., Liang, G., Shi, W. and Xie, J. (2010). Metabolic responses of alfalfa (*Medicago Sativa* L.) leaves to low and high temperature induced stresses. **African Journal of Biotechnology**, 10, 1117-1124.
- Moko, E.M., Purnomo, H., Kusnadi, J. and Ijong, F.G. (2014). **Phytochemical content and antioxidant properties of colored and non colored varieties of rice bran from Minahasa, North Sulawesi, Indonesia.** *International Food Research Journal*, 21(3), 1053-1059
- Munakata, K., Kawasaki, I. and Kariya, K. (1967). Quantitative studies on the effects of the climatic factors on the productivity of rice. **Bulletin of the Chugoku Agricultural Experiment Station**, 14, 59-96.
- Naikoo, M.I., Dar, M.I., Raghieb, F., Jaleel, H., Ahmad, B., Raina, A., Khan, F.A. and Naushin, F. (2019). **Role and Regulation of Plants Phenolics in Abiotic Stress Tolerance: An Overview.** In *Plant Signaling Molecules*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 157–168.
- Naheed, G., Shahbaz, M., Latif, C.A. et al. (2007). Alleviation of the adverse effects of salt stress on rice (*Oryza sativa* L.) by phosphorus applied through rooting medium: growth and gas exchange characteristics. **Pak J Bot**, 39, 729-737.
- Nxawe, S., Ndakidemi, P. A. and Laubscher, C. P. (2010). Possible effects of regulating hydroponic water temperature on plant growth, accumulation of nutrients and other metabolites, **AFR. J. Biochem.**, 9(54), 9128-9134.
- Oh-e, I., Saitoh, K., Kuroda, T. (2007). Effects of high temperature on growth, yield and dry-matter production of rice grown in the paddy field. **Plant Prod. Sci.** 10, 412e422.

- Oliver, S.N., Dennis, E.S., Dolferus, R., 2007. ABA regulates apoplastic sugar transport and is a potential signal for cold-induced pollen sterility in rice. *Plant Cell Physiol.* 48, 1319-1330.
- Osada A, Saciplapa V, Rahong M, Dhammanuvong S, Chakrabandho H. 1973. Abnormal occurrence of empty grains of indica rice plants in the dry, hot season in Thailand. *Proceedings of the Crop Science Society of Japan* 42: 103–109. [Google Scholar]
- Panlasigui, L., Thompson, L.U., Juliano, B.O., Perez, C.M., Yiu, S.H., & Greenberg, G.R. (1991). Rice varieties with similar amylose content differ in starch digestibility and glycemic response in humans. *American Journal of Clinical Nutrition*, 54, 871-877.
- Parry M A J, Andralojc P J, Scales J C, Salvucci M E, CarmoSilva A E, Alonso H, Whitney S M. (2013). Rubisco activity and regulation as targets for crop improvement. *Journal of Experimental Botany*, 64, 717–730
- Pareek, A., Singla, S.L. and Grover, A. (1995). Immunological evidence for accumulation of two novel 104 and 90 kDa HSPs in response to diverse stresses in rice and in response to high temperature stress in diverse plant genera. *Plant Mol Biol*, 29, 293-300.
- Pedro, A.C., Granato, D., Rosso, N.D. (2016). Extraction of anthocyanins and polyphenols from black rice (*Oryza sativa* L.) by modeling and assessing their reversibility and stability. *Food Chemistry*, Vol.191, pp. 12–20.
- Peet, M.M. and Willits, D.H. (1998). The effect of night temperature on greenhouse grown tomato yields in warm climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 92, pp. 191-202.
- Peng, S.B., Huang, J.L., Sheehy, J.E. et al. (2004). Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proc Natl Acad Sci USA*. 101, 9971-9975.

- Perez, C.M., Juliano, B.O., Liboon, S.P., Alcantara, J.M., Cassman, K.G. 1996. Effects of late Nitrogen fertilizer application on head rice yield, protein content, and grain quality of rice. *Cereal Chem*, Vol.73, pp.556-560.
- Porter, J.R., Moot, D.J. (1998). **Research beyond the means: climatic variability and plant growth**. In: Dalezios, N.S. (ed) International symposium on applied agrometeorology and agroclimatology. Office for Official Publication of the European Commission, Luxembourg, 13-23.
- Potters, G., Pasternak, T.P., Guisez, Y., Palme, K.J. and Jansen, MAK. (2007). **Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble**. *Trends Plant Sci*, 12, 98–105.
- Prather, M., Holmes, C. and Hsu, J. (2012). Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry. *Geophysical Research Letters*, Vol.39, L09803. Physical and Engineering Data, January 1978 ed. The Hague: Shell International Petroleum Maatschappij BV, 1978.
- Prasad, P.V., Boote, K.J. and Allen Jr, H. (2006). Adverse high temperature effects on pollen viability, seed-set, seed yield and harvest index of grain-sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) are more severe at elevated carbon dioxide due to higher tissue temperatures. *Agriculture and Forest Meteorology*, 139, 237-251.
- Ray, D.K., West, P.C., Clark, M., Gerber, J.S, Prishchepov, A.V., et al. (2019). **Climate change has likely already affected global food production** PLOS ONE, 14(5): e0217148. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217148>.
- Reda, A.G., Tripathi, N.K., Soni, P. and Tipdecho, T. (2015). Rain-Fed Rice Agriculture under Climate Variability in Southeast Asia: The Case of Thailand. *Journal of Earth Science & Climate Change*, 6(8), 1-9.
- Riahi, K., Gruebler, A. and Nakicenovic, N. (2007). **Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization**. *Technol Forecast Soc Chang*, 74(7),887–935.



- Richter, G.M. and Semenov, M.A. (2005). Modeling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales : assessing drought risks. *Agricultural Systems*, 84, 77–97.
- Rizhsky, L., Liang, H., Mittler, R. (2002). The combined effect of drought stress and heat shock on gene expression in tobacco. *Plant physiology*, 130, 1143-1151.
- Salvucci, M.E. and Crafts-Brandner, S.J. (2004). Inhibition of photosynthesis by heat stress: the activation state of Rubisco as a limiting factor in photosynthesis. *Physiology Plant*, 120, 179-186.
- Sakai, H., Hasegawa, T., Kobayashi, K. (2006). Enhancement of rice canopy carbon gain by elevated CO<sub>2</sub> is sensitive to growth stage and leaf nitrogen concentration. *New Phytol*, 170, 321-332.
- Sairam, R.K. and Saxena, D.C. (2000). Oxidative stress and antioxidants in wheat genotypes: possible mechanism of water stress tolerance. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 184, 55-61.
- Satake, T. and Yoshida, S. (1978). High temperature induced sterility in indica rices at flowering. *Japanese Journal of Crop Science*, 47, 6-17.
- Sato, Y., Masuta, Y., Saito, K., Murayama, S. and Ozawa, K. (2011). Enhanced chilling tolerance at the booting stage in rice by transgenic overexpression of the ascorbate peroxidase gene, OsAPXa. *Plant Cell Reports*, 30, 399-406.
- Savicka, M. and Škute, N. (2010). Effects of high temperature on malondialdehyde content, superoxide production and growth changes in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). *Ekologija*, 56, 26-33.
- Schlenker, W. and Roberts, M. J. (2008). **Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change.** In proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, PNAS Early Edition, 1-5.
- Sharkey, T.D. (1988). Estimating the rate of photorespiration in leaves, *Physiologia Plantarum*, 73(1), 147-152

- Sharkey T.D., Chen X.Y. and Yeh S. (2001) Isoprene increases thermotolerance of fosmidomycin-fed leaves. *Plant Physiology* , 125, 2001– 2006.
- Smith, S.J. and Wigley, T.M.L. (2006). Multi-Gas Forcing Stabilization with the MiniCAM. *Energy Journal* (Special Issue #3) pp 373-391.
- Salvucci, M.E. and Crafts-Brandner, S.J. (2004). Inhibition of photosynthesis by heat stress: the activation state of Rubisco as a limiting factor in photosynthesis. *Physiology Plant*, Vol.120, pp.179-186.
- Tan, G. and Shibasaki, R. (2003). Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. *Ecological Modelling*, 168, 357-370.
- Teng, P.S.P., Anthony, M.C. and Lassa, J.A. (2016). **The future of rice security under climate change** : NTS Report No. 4 | July 2016, Nanyang Technological University.
- Tenorio, F.A., Ye, C., Redona, E., Sierra, S., Laza, M., Argayoso, M.A., (2013). Screening rice genetic resources for heat tolerance. *SABRAOJ. Breed. Genet.* 45, 371-381.
- Tewari, A. K. and Tripathy, B. C. (1998). Temperature-stress-induced impairment of chlorophyll, *Plant Physiol.*, 117(3), 851-858, 1998.
- Thitisaksakul, M., Jiménez, R.C., Arias, M.C. and Beckles, D.M. (2012). **Effects of environmental factors on cereal starch biosynthesis and composition.** *J. Cereal Sci.* 2012, 56, 67–80.
- Tian, L., Qi-hua, L., Ohsugi, R., Yamagishi, T. and Sasaki, H. (2006). Effect of High Temperature on Sucrose Content and Sucrose Cleaving Enzyme Activity in Rice Grain During the Filling Stage. *Rice Science*, 13(3), 205-210.
- Toshihiko Masui, Yasuaki Hijioka, Sawako Ishiwatari, Tsuguki Kinoshita, Ken'ichi Matsumoto, Toru Nozawa, and Mikiko Kainuma in collaboration with Etsushi Kato at Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC).

- USDA. 2019. Classification for Kingdom Plantae Down to Species *Oryza sativa* L., Retrieved June 20 2019 from <https://plants.usda.gov/java/ClassificationServlet?source=display&classid=ORSA>
- Vallelian-bindschedler, L., Schweizer, P., Mosinger, E. and Metraux, J.P. (1998). Heat- induced resistance in barley to powdery mildew (*Blumeria graminis* f. sp. hordei) is associated with a burst of active oxygen species. **Molecular Plant Pathology**, 52, 185-199.
- Van Vuuren, D., M. den Elzen, P. Lucas, B. Eickhout, B. Strengers, B. van Ruijven, S. Wonink, R. van Houdt. (2007). Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. **Climatic Change**, doi:10.1007/s/10584-006-9172-9.
- Vos, P., Hogers, R., Bleeker, M., et al. (1995). **AFLP: a new technique for DNA fingerprinting**. *Nucleic Acids Research*, 23, 4407–4414.
- Vuuren, V., D., M. den Elzen, P. Lucas, B. Eickhout, B. Strengers, B. van Ruijven, S. Wonink, R. van Houdt. (2007). Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. **Climatic Change**, doi:10.1007/s/10584-006-9172-9.
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M. and Foolad, M.R. (2007). Heat tolerance in plants: An Overview. *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 61, pp. 199-223.
- Wallace, J.M. and Hobbs, P.V. (2006). *Atmospheric Science*, Elsevier Inc., USA.
- Wassmann, R., Jagadish, S. V., HEUER, K., ISMAIL, S., REDONA, A., SERRAJ, E., SINGH, R., HOWELL, R. K., PATHAK, G., H. and SUMFLETH, K. (2009a). Climate change affecting rice production: the physiological and agronomic basis for possible adaptation strategies. *Advances in Agronomy* 101, 59–122.
- Wassmann, R., Jagadish, S. V. K., SUMFLETH, K., PATHAK, H., HOWELL, G., ISMAIL, A., SERRAJ, R., REDONA, E., SINGH, R. K. & HEUER, S. (2009b). Regional vulnerability of climate change impacts on Asian rice production and scope for adaptation. *Advances in Agronomy* 102, 91–133.

- Wei, T., Cherry, T.L., Glomrod, S. and Zhang, T. (2014). Climate change impacts on crop yield: Evidence from China. **Science of the Total Environment**, 499, 133–140
- Weraduwege, S.M., Chen, J., Anozie, F.C., Morales, A., Weise, S.E. and Sharkey, T.D. (2015). **The relationship between leaf area growth and biomass accumulation in *Arabidopsis thaliana***. *Frontiers Plant Science*, 09 April 2015 <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00167>
- Wise, MA, Calvin, K.V., Thomson, A.M., Clarke, L.E., Bond-Lamberty, B., Sands, R.D., Smith, S.J., Janetos, A.C. and Edmonds, J.A. (2009). Implications of Limiting CO<sub>2</sub> Concentrations for Land Use and Energy. **Science**. 324:1183-1186. May 29, 2009.
- Wise, MA, KV Calvin, AM Thomson, LE Clarke, B Bond-Lamberty, RD Sands, SJ Smith, AC Janetos, JA Edmonds. 2009. Implications of Limiting CO<sub>2</sub> Concentrations for Land Use and Energy. **Science**. 324:1183-1186. May 29, 2009.
- Xie, G., Kato, H., Imai, R. (2012). Biochemical identification of the OsMKK6-OsMPK3 signalling pathway for chilling stress tolerance in rice. *Biochem. J.* 443, 95-102.
- Young, A.J. and Lowe, G.L. (2018). Carotenoids—Antioxidant Properties. **Antioxidants** , 7, 28; doi:10.3390/antiox7020028.
- Yang, L.X., Huang, J.Y., Yang, H.J. et al. (2006) Seasonal changes in the effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on dry matter production and distribution of rice (*Oryza sativa* L.). **Field Crops Res**, Vol.98, pp.12-19.
- Yang, L., Wang, Y., Dong, G., Gu, H., Huang, J., Zhu, J., Yang, H., Liu, G. and Han, Y. 2007. The Impact of Free-air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) and Nitrogen Supply on Grain Quality of Rice, *Field Crops Research*, Vol. 102, pp. 128-140
- Yoshida, S. (1978). **Tropical climate and its influence on rice**. IRRI Research Paper Series 20. Los Baños, Philippines, IRRI.
- Yoshida, S. (1981). **Fundamental of Rice Crop Science**, Interantional Rice Research Institute, Philippines. 269 p.
- Zaidi, S.H.R, Zakari, S.A., Zhao, Q., Khan, A.R., Shah, J.M. and Cheng, F. (2019). **Anthocyanin Accumulation in Black Kernel**

**Mutant Rice and its Contribution to ROS Detoxification in Response to High Temperature at the Filling Stage.** *Antioxidants*, 8, 510, doi:10.3390/antiox8110510.

Anthocyanin Accumulation in Black Kernel Mutant Rice and its Contribution to ROS Detoxification in Response to High Temperature at the Filling Stage

Zaidi, S.H.R., Zakari, S.A., Zhao, Q. Khan, A.R., Shah, J.M. and Cheng, F. (2019) **Anthocyanin Accumulation in Black Kernel Mutant Rice and its Contribution to ROS Detoxification in Response to High Temperature at the Filling Stage.** *Antioxidants* 2019, 8, 510; doi:10.3390/antiox8110510.

Zhang, H., Duan, L., Dai, J.S., Zhang, C.Q., Li, J., Gu, M.H., Liu, Q.Q., Zhu, Y. (2014). Major QTLs reduce the deleterious effects of high temperature on rice amylose content by increasing splicing efficiency of Wx pre-mRNA. *Thor. Appl. Genet.* 127, 273-282.

Zhang, Q., Chen, Q., Wang, S., Hong, Y., Wang, Z. (2014). Rice and cold stress: methods for its evaluation and summary of cold tolerance-related quantitative trait loci. *Rice* 7, 1-12.

Zhen, F., Zhou, J., Mahmood, A., Wang, W., Chang, X., Liu, B., Liu, L., Cao, W., Zhu, Y. and Tang, L. (2019). Quantifying the effects of short-term heat stress at booting stage on nonstructural carbohydrates remobilization in rice. **The Crop Journal**, <https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.07.002>



# ภาคผนวก

ตารางภาคผนวก 1 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของธาตุอาหารสำคัญในดินก่อนปลูกข้าวและทดลองภายใต้สภาวะระดับ  
อุณหภูมิต่างกัน 3 สภาวะ

ธาตุอาหาร	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
ไนโตรเจนทั้งหมด (%)	0.063 $\pm$ 0.028 <sup>a</sup>	0.063 $\pm$ 0.031 <sup>a</sup>	0.084 $\pm$ 0.019 <sup>a</sup>
ไนเตรท ((mg/1kg soil)	0.467 $\pm$ 0.283 <sup>a</sup>	0.280 $\pm$ 0.070 <sup>a</sup>	0.350 $\pm$ 0.121 <sup>a</sup>
แอมโมเนียม (mg/1kg soil)	0.467 $\pm$ 0.225 <sup>a</sup>	0560 $\pm$ 0.070 <sup>a</sup>	0.298 $\pm$ 0.053 <sup>a</sup>
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (microgram/g soil)	3.856 $\pm$ 0.866 <sup>a</sup>	2.925 $\pm$ 0.856 <sup>a</sup>	2.943 $\pm$ 1.251 <sup>a</sup>
โพแทสเซียม (mg/kg soil)	38.727 $\pm$ 19.438 <sup>a</sup>	42.927 $\pm$ 15.610 <sup>a</sup>	38.503 $\pm$ 18.997 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )  
ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 2 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ความยาวใบของอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (cm) ในระยะแตกกอ ของข้าว 2  
พันธุ์ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	34.83 $\pm$ 0.76 <sup>b</sup>	26.67 $\pm$ 0.58 <sup>a</sup>	27.33 $\pm$ 0.58 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	38.33 $\pm$ 0.29 <sup>b</sup>	26.83 $\pm$ 0.29 <sup>a</sup>	32.17 $\pm$ 7.08 <sup>ab</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )  
ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 3 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) น้ำหนักใบทั้งหมด (g) ของข้าว 2 พันธุ์ในระยะแตกกอซึ่งทดลองภายใต้สภาวะ  
ระดับอุณหภูมิต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	2.928 $\pm$ 0.132 <sup>b</sup>	0.867 $\pm$ 0.071 <sup>a</sup>	1.000 $\pm$ 0.013 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	4.119 $\pm$ 0.011 <sup>c</sup>	1.564 $\pm$ 0.005 <sup>a</sup>	1.785 $\pm$ 0.056 <sup>b</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )  
ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 4 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) พื้นที่ใบทั้งหมดของอัตรการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ ( $\text{cm}^2$ ) ในระยะแตกกอ ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	387.0 $\pm$ 56.2 <sup>b</sup>	159.0 $\pm$ 56.7 <sup>a</sup>	140.5 $\pm$ 14.1 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	498.3 $\pm$ 31.6 <sup>c</sup>	171.6 $\pm$ 16.6 <sup>a</sup>	297.5 $\pm$ 49.8 <sup>b</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 5 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ค่า LAR (Leaf Area Ratio) ของอัตรการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) ในระยะแตกกอ ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	131.99 $\pm$ 16.33 <sup>a</sup>	182.51 $\pm$ 62.64 <sup>a</sup>	140.32 $\pm$ 12.26 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	120.96 $\pm$ 7.36 <sup>a</sup>	109.70 $\pm$ 10.27 <sup>a</sup>	167.37 $\pm$ 32.56 <sup>b</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 6 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ความยาวใบของอัตรการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (cm) ในระยะเก็บเกี่ยวซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	36.83 $\pm$ 1.61 <sup>a</sup>	38.73 $\pm$ 5.75 <sup>a</sup>	43.00 $\pm$ 12.49 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	36.50 $\pm$ 9.58 <sup>a</sup>	38.83 $\pm$ 5.80 <sup>a</sup>	43.00 $\pm$ 3.61 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 7 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) น้ำหนักใบทั้งหมดของอัตรการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (g) ในระยะเก็บเกี่ยวซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	19.19 $\pm$ 1.04 <sup>a</sup>	20.14 $\pm$ 3.94 <sup>a</sup>	17.95 $\pm$ 3.35 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	32.02 $\pm$ 5.21 <sup>b</sup>	25.96 $\pm$ 2.40 <sup>ab</sup>	20.11 $\pm$ 2.91 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง



ตารางภาคผนวก 8 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) พื้นที่ใบทั้งหมดของอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ ( $\text{cm}^2$ ) ในระยะเก็บเกี่ยว ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	2002.7 $\pm$ 125.8 <sup>a</sup>	2199.4 $\pm$ 411.3 <sup>a</sup>	2135.6 $\pm$ 922.2 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	2818.9 $\pm$ 603.0 <sup>a</sup>	3274.4 $\pm$ 775.1 <sup>a</sup>	2279.1 $\pm$ 622.3 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 9 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของค่า LAR (Leaf Area Ratio) ของอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) ในระยะเก็บเกี่ยว ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	104.37 $\pm$ 4.17 <sup>a</sup>	109.48 $\pm$ 8.89 <sup>a</sup>	116.13 $\pm$ 34.56 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	88.74 $\pm$ 19.44 <sup>a</sup>	125.13 $\pm$ 18.67 <sup>a</sup>	112.65 $\pm$ 21.52 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 7 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 10 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ ( $\text{cm}^2/\text{plant}/100 \text{ days}$ ) ช่วงระหว่างระยะแตกกอและระยะเก็บเกี่ยวซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	45772 $\pm$ 10820 <sup>a</sup>	124494 $\pm$ 75849 <sup>a</sup>	132861 $\pm$ 121923 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	105407 $\pm$ 57349 <sup>a</sup>	301450 $\pm$ 180361 <sup>a</sup>	90276 $\pm$ 58710 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 11 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ( $\text{mg/g fw.}$ ) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	40.33 $\pm$ 6.63 <sup>a</sup>	40.21 $\pm$ 8.88 <sup>a</sup>	39.14 $\pm$ 0.54 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	42.21 $\pm$ 7.04 <sup>a</sup>	43.63 $\pm$ 0.29 <sup>a</sup>	50.07 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 12 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (mg/g fw.) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	29.74 $\pm$ 3.71 <sup>a</sup>	28.22 $\pm$ 5.07 <sup>a</sup>	27.92 $\pm$ 0.47 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	31.00 $\pm$ 3.60 <sup>a</sup>	31.21 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	34.45 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 13 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของปริมาณคลอโรฟิลล์บี (mg/g fw.) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	29.74 $\pm$ 3.71 <sup>a</sup>	28.22 $\pm$ 5.07 <sup>a</sup>	27.92 $\pm$ 0.47 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	11.22 $\pm$ 3.45 <sup>a</sup>	12.43 $\pm$ 0.15 <sup>ab</sup>	15.64 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 14 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของปริมาณแคโรทีนอยด์ (mg/g fw.) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	5.57 $\pm$ 0.12 <sup>b</sup>	4.77 $\pm$ 0.48 <sup>a</sup>	5.04 $\pm$ 0.18 <sup>ab</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	6.13 $\pm$ 0.46 <sup>a</sup>	6.74 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	5.67 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ภาคผนวก 15 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของจำนวนรวงทั้งหมดต่อกอซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	5.9 $\pm$ 2.1 <sup>a</sup>	6.2 $\pm$ 1.1 <sup>a</sup>	5.1 $\pm$ 1.7 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	7.1 $\pm$ 1.2 <sup>a</sup>	8.6 $\pm$ 2.0 <sup>a</sup>	8.2 $\pm$ 1.7 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 16 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	100.8 $\pm$ 12.4 <sup>ab</sup>	113.4 $\pm$ 4.7 <sup>b</sup>	84.3 $\pm$ 13.9 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	65.6 $\pm$ 5.5 <sup>a</sup>	68.8 $\pm$ 15.3 <sup>a</sup>	32.6 $\pm$ 27.0 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 17 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของจำนวนไม่เมล็ดสมบูรณ์ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	32.0 $\pm$ 17.3 <sup>a</sup>	19.7 $\pm$ 0.3 <sup>a</sup>	44.8 $\pm$ 20.2 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	32.8 $\pm$ 3.8 <sup>a</sup>	32.6 $\pm$ 15.5 <sup>a</sup>	52.9 $\pm$ 10.8 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 18 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของจำนวนเมล็ดรวมทั้งหมดซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	133.5 $\pm$ 5.9 <sup>a</sup>	133.0 $\pm$ 4.8 <sup>a</sup>	128.2 $\pm$ 8.5 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	98.4 $\pm$ 2.1 <sup>a</sup>	101.4 $\pm$ 10.8 <sup>a</sup>	95.6 $\pm$ 10.6 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 19 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ต่อรวม (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	74.8 $\pm$ 12.1 <sup>a</sup>	84.8 $\pm$ 1.0 <sup>a</sup>	66.9 $\pm$ 12.7 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	67.0 $\pm$ 4.1 <sup>a</sup>	67.8 $\pm$ 14.9 <sup>a</sup>	32.2 $\pm$ 24.6 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 20 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของน้ำหนัก 100 เมล็ด (g) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	4.19 $\pm$ 0.15 <sup>b</sup>	4.09 $\pm$ 0.09 <sup>ab</sup>	3.96 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	3.52 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	2.11 $\pm$ 0.09 <sup>a</sup>	2.16 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 21 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ผลรวมต้น/เฮกเตอร์ (ton/ha) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	1.65 $\pm$ 0.56 <sup>b</sup>	1.94 $\pm$ 0.35 <sup>b</sup>	1.18 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	1.50 $\pm$ 0.17 <sup>b</sup>	1.10 $\pm$ 0.38 <sup>b</sup>	0.47 $\pm$ 0.29 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 22 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของกรดพาล์มมิติก (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	20.10 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	20.49 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	19.14 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	20.07 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>	19.52 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	19.96 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 23 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของกรดโอเลอิก (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	33.89 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	34.36 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	34.32 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	38.39 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	40.87 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>	39.28 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 24 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของกรตลิโนเลอิก (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	39.79 $\pm$ 0.34 <sup>b</sup>	39.34 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	40.64 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	32.48 $\pm$ 0.04 <sup>c</sup>	30.37 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	31.46 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 25 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของอะมิโลส (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	25.96 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	26.42 $\pm$ 0.77 <sup>a</sup>	26.30 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	12.65 $\pm$ 0.09 <sup>a</sup>	13.19 $\pm$ 0.11 <sup>c</sup>	12.87 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 26 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของอะมิโนเพคติน (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	74.05 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	73.58 $\pm$ 0.77 <sup>a</sup>	73.70 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	87.35 $\pm$ 0.09 <sup>c</sup>	86.81 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	87.13 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 27 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของอัตราส่วนอะมิโลสต่ออะมิโลเพคติน (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	0.351 $\pm$ 0.001 <sup>a</sup>	0.359 $\pm$ 0.014 <sup>a</sup>	0.357 $\pm$ 0.005 <sup>a</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	0.145 $\pm$ 0.001 <sup>a</sup>	0.152 $\pm$ 0.002 <sup>c</sup>	0.148 $\pm$ 0.000 <sup>b</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 28 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของค่าความหวาน (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	11.67 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	12.83 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>	12.90 $\pm$ 0.10 <sup>b</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	15.87 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>	15.47 $\pm$ 0.12 <sup>b</sup>	14.77 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 29 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของสารประกอบฟีนอลิก (mg GAE/g sample) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	4.32 $\pm$ 0.37 <sup>a</sup>	4.08 $\pm$ 0.60 <sup>a</sup>	6.78 $\pm$ 0.72 <sup>b</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	17.18 $\pm$ 1.40 <sup>b</sup>	16.44 $\pm$ 1.56 <sup>b</sup>	13.46 $\pm$ 1.33 <sup>a</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 30 ค่าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ของสารแอนโทไซยานินซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ

พันธุ์	Treatments		
	CT	HT4.5	HT8.5
กข 29	16.336 $\pm$ 0.856 <sup>b</sup>	12.562 $\pm$ 2.503 <sup>a</sup>	15.055 $\pm$ 0.681 <sup>ab</sup>
ไรซ์เบอร์รี่	37.915 $\pm$ 0.603 <sup>c</sup>	27.19 $\pm$ 2.11 <sup>a</sup>	32.449 $\pm$ 1.51 <sup>b</sup>

หมายเหตุ \*อักษรในแนวนอนของตารางในแถวเดียวกัน ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ระหว่าง 3 สิ่งทดลอง

ตารางภาคผนวก 31 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลด ของความยาวใบในระยะแตกกอ (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29		-23.435		-21.541
ไรซ์เบอร์รี่		-30.000		-16.087

ตารางภาคผนวก 32 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของน้ำหนักใบทั้งหมดในระยะแตกกอ (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29		-70.370		-65.833
ไรซ์เบอร์รี่		-62.027		-56.670

ตารางภาคผนวก 33 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของพื้นที่ใบทั้งหมดในระยะแตกกอ (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29		-58.913		-63.702
ไรซ์เบอร์รี่		-65.559		-40.291

ตารางภาคผนวก 34 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของ LAR ในระยะแตกกอ (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+38.273		+6.309	
ไรซ์เบอร์รี่		-9.310	+38.373	

ตารางภาคผนวก 35 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของความยาวใบในระยะเก็บเกี่ยว (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+5.158		+16.742	
ไรซ์เบอร์รี่	+6.393		+17.808	

ตารางภาคผนวก 36 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของน้ำหนักใบทั้งหมดในระยะเก็บเกี่ยว (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+4.918			-6.461
ไรซ์เบอร์รี่		-18.924		-37.178

ตารางภาคผนวก 37 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของพื้นที่ใบทั้งหมดในระยะเก็บเกี่ยว (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+9.819		+6.633	
ไรซ์เบอร์รี่	+16.158			-19.150

ตารางภาคผนวก 38 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของ LAR ในระยะเก็บเกี่ยว (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+4.892		+11.266	
ไรซ์เบอร์รี่	+41.006		+26.934	

ตารางภาคผนวก 39 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของอัตราการผลิตใบโตสัมพัทธ์ช่วงระหว่างระยะแตกกอและระยะเก็บเกี่ยว (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+171.987		+190.267	
ไรซ์เบอร์รี่	+185.987			-14.354



ตารางภาคผนวก 40 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29		-0.298		-2.951
ไรซ์เบอร์รี่	+3.364		+18.621	

ตารางภาคผนวก 41 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของคลอโรฟิลล์เอ (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29		-5.142		-6.119
ไรซ์เบอร์รี่	+0.664		+11.117	

ตารางภาคผนวก 42 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของคลอโรฟิลล์บี (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29		-5.142		-6.119
ไรซ์เบอร์รี่	+10.812		+39.390	

ตารางภาคผนวก 43 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของแคโรทีนอยด์ (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29		-14.386		-9.528
ไรซ์เบอร์รี่	+9.958			-7.563

ตารางภาคผนวก 44 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของจำนวนรวงทั้งหมดต่อกอ (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+5.283			-13.208
ไรซ์เบอร์รี่	+21.113		+14.627	

ตารางภาคผนวก 45 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของเมล็ดสมบูรณ์/รวง (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+12.419			-16.364
ไรซ์เบอร์รี่	+4.977			-50.297

ตารางภาคผนวก 46 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของเมล็ดไม่สมบูรณ์/รวง (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29		-38.472	+39.931	
ไรซ์เบอร์รี่		-0.485	+61.398	

ตารางภาคผนวก 47 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของเมล็ดรวมทั้งหมด/รวง (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29		-0.341		-3.953
ไรซ์เบอร์รี่	+3.052			-2.895

ตารางภาคผนวก 48 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์/รวง (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+13.364			-10.552
ไรซ์เบอร์รี่	+1.252			-51.971

ตารางภาคผนวก 49 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของน้ำหนัก 100 เมล็ด (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29		-2.438		-5.489
ไรซ์เบอร์รี่		-40.057		-38.593

ตารางภาคผนวก 50 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของผลผลิตรวมต้น/เฮกแตร์ (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+17.576			-28.485
ไรซ์เบอร์รี่		-26.667		-68.667

ตารางภาคผนวก 51 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของกรดไขมันพาล์มมิติก (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+1.940			-4.776
ไรซ์เบอร์รี่		-2.757		-0.531

ตารางภาคผนวก 52 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของกรดไขมันโอเลอิก (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+1.396		+1.287	
ไรซ์เบอร์รี่	+6.452		+2.326	

ภาคผนวก 53 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของกรดไขมันลิโนเลอิก (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29		-1.123	+2.136	
ไรซ์เบอร์รี่		-6.487		-3.150

ตารางภาคผนวก 54 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของอะมิโลส (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+1.772		+1.310	
ไรซ์เบอร์รี่	+4.269		+1.739	

ตารางภาคผนวก 55 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของอะมิโนเพคติน (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29		-0.635		-0.473
ไรซ์เบอร์รี่		-0.618		-0.252

ตารางภาคผนวก 56 ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของอัตราส่วนอะมิโลสต่ออะมิโลเพคติน (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+2.454		+1.797	
ไรซ์เบอร์รี่	+4.900		+1.863	

ตารางภาคผนวก 57 เปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของค่าความหวานในเมล็ดข้าว (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

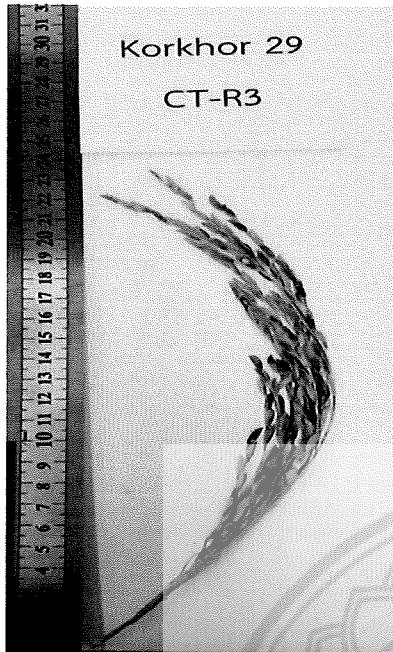
พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29	+9.994		+10.568	
ไรซ์เบอร์รี่		-2.521		-6.933

ตารางภาคผนวก 58 เปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของสารประกอบฟีนอลิกในเมล็ดข้าว (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

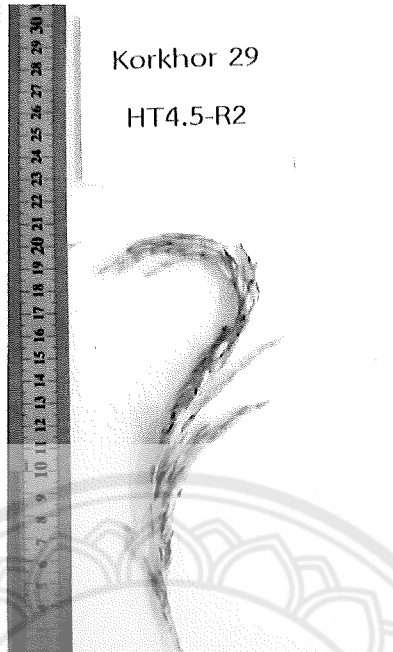
พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29		-5.558	+57.007	
ไรซ์เบอร์รี่		-4.288		-21.634

ตารางภาคผนวก 59 เปอร์เซ็นต์การเพิ่ม-ลดของสารแอนโทไซยานินในเมล็ดข้าว (%) ซึ่งทดลองภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิ ที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ เมื่อเปรียบเทียบกับ CT (กลุ่มควบคุม)

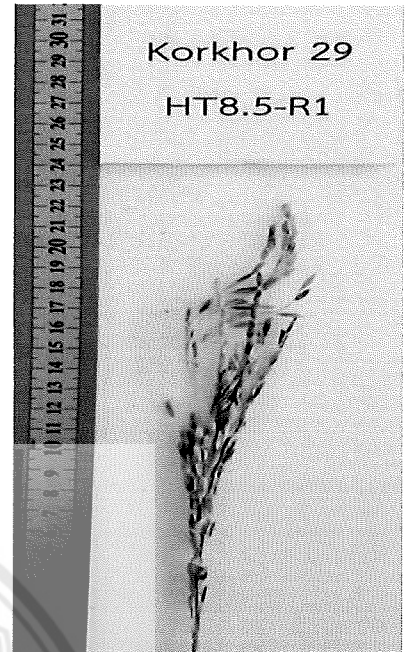
พันธุ์	Treatments			
	HT4.5		HT8.5	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
กข 29		-23.10		-7.84
ไรซ์เบอร์รี่		-28.29		-14.42



Korkhor 29  
CT-R3



Korkhor 29  
HT4.5-R2



Korkhor 29  
HT8.5-R1

ภาพภาคผนวกที่ 1

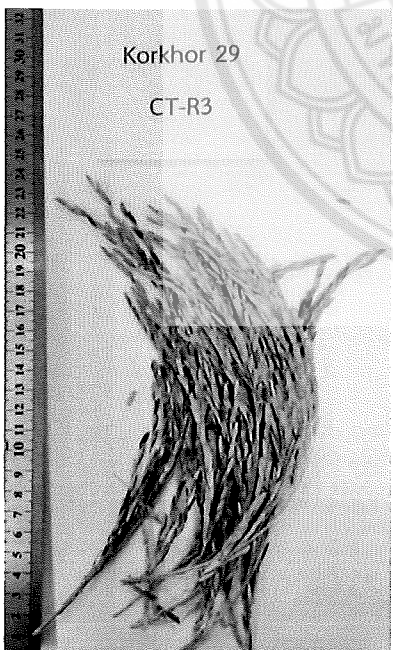
ผลผลิต 1 รวงในข้าวพันธุ์ กข 29 ใน  
สภาวะ CT

ภาพภาคผนวกที่ 2

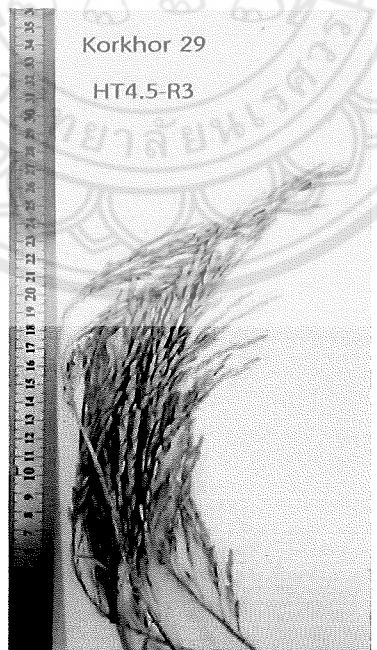
ผลผลิต 1 รวงในข้าวพันธุ์ กข 29 ใน  
สภาวะ HT 4.5

ภาพภาคผนวกที่ 3

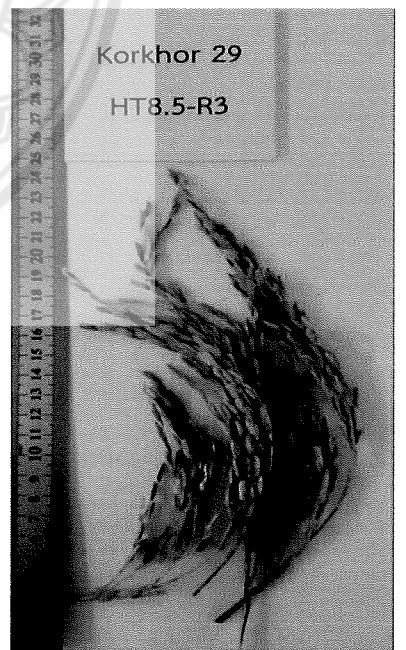
ผลผลิต 1 รวงในข้าวพันธุ์ กข 29 ใน  
สภาวะ HT 8.5



Korkhor 29  
CT-R3



Korkhor 29  
HT4.5-R3



Korkhor 29  
HT8.5-R3

ภาพภาคผนวกที่ 4

ผลผลิตรวม รวง/กอในข้าวพันธุ์ กข 29  
ในสภาวะ CT

ภาพภาคผนวกที่ 5

ผลผลิตรวม รวง/กอในข้าวพันธุ์  
กข 29 ในสภาวะ HT 4.5

ภาพภาคผนวกที่ 6

ผลผลิตรวม รวง/กอในข้าวพันธุ์ กข 29  
ในสภาวะ HT 8.5



ภาพภาคผนวกที่ 7

เปรียบเทียบระหว่างเมล็ดสมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ในข้าวพันธุ์ กข 29 ในสภาวะ CT



ภาพภาคผนวกที่ 8

เปรียบเทียบระหว่างเมล็ดสมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ในข้าวพันธุ์ กข 29 ในสภาวะ HT 4.5

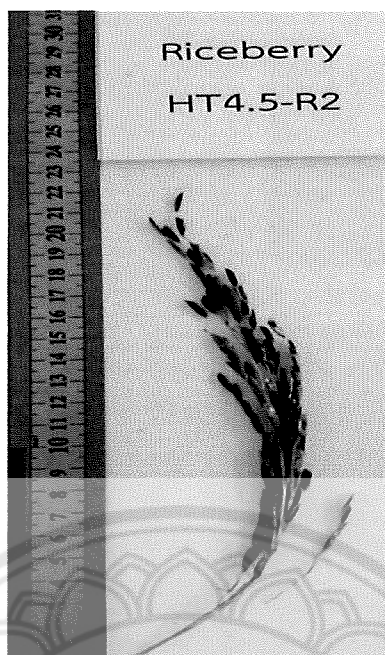


ภาพภาคผนวกที่ 9

เปรียบเทียบระหว่างเมล็ดสมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ในข้าว พันธุ์ กข 29 ในสภาวะ HT 8.5



ภาพภาคผนวกที่ 10  
ผลผลิต 1 รวงในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่  
สภาวะ CT



ภาพภาคผนวกที่ 11  
ผลผลิต 1 รวงในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่  
สภาวะ HT 4.5



ภาพภาคผนวกที่ 12  
ผลผลิต 1 รวงในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ใน  
สภาวะ HT 8.5



ภาพภาคผนวกที่ 13  
ผลผลิตรวม รวง/กอในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่  
ในสภาวะ CT

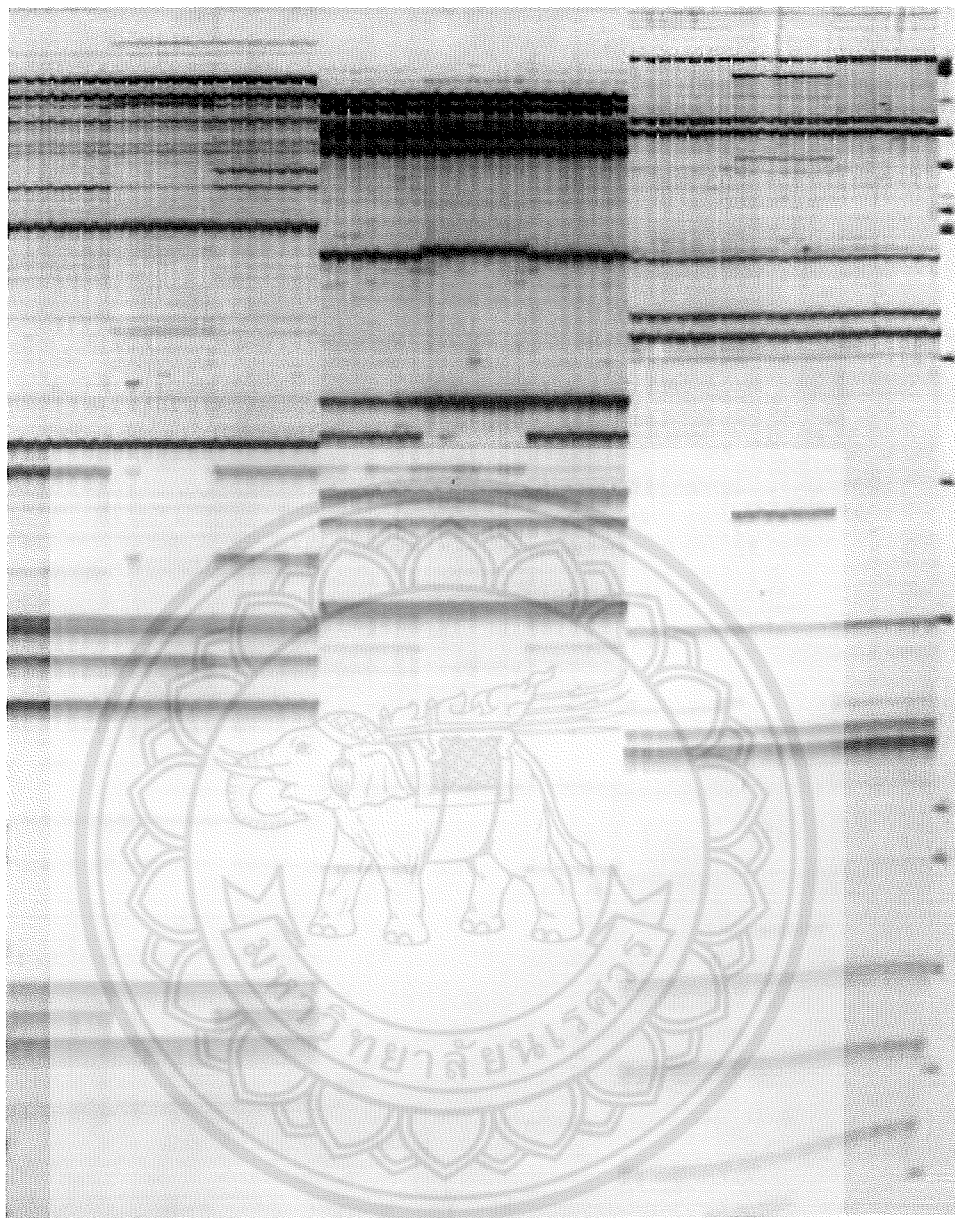


ภาพภาคผนวกที่ 14  
ผลผลิตรวม รวง/กอในข้าวพันธุ์  
ไรซ์เบอร์รี่ในสภาวะ HT 4.5



ภาพภาคผนวกที่ 15  
ผลผลิตรวม รวง/กอในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่  
ในสภาวะ HT 8.5





ภาพภาคผนวกที่ 20  
แสดงไฟร์เมอร์ 5-7 เพื่อการจำแนกพันธุกรรมระดับโมเลกุล



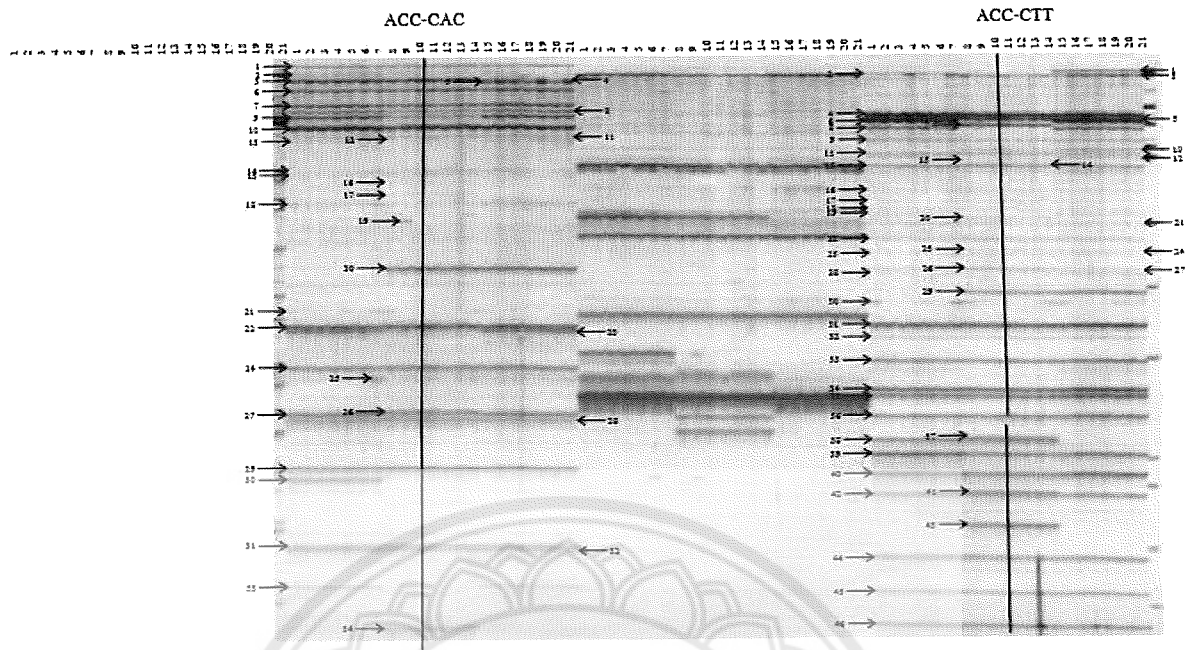
ภาพภาคผนวกที่ 21  
แสดงไพร์เมอร์ 8 เพื่อการจำแนกพันธุ์กรรมระดับโมเลกุล



ภาพภาคผนวกที่ 22  
แสดงไฟร์เมอร์ 9-10 เพื่อการจำแนกพันธุ์กรรมระดับโมเลกุล

ภาพเอกลักษณะพันธุกรรมของข้าว

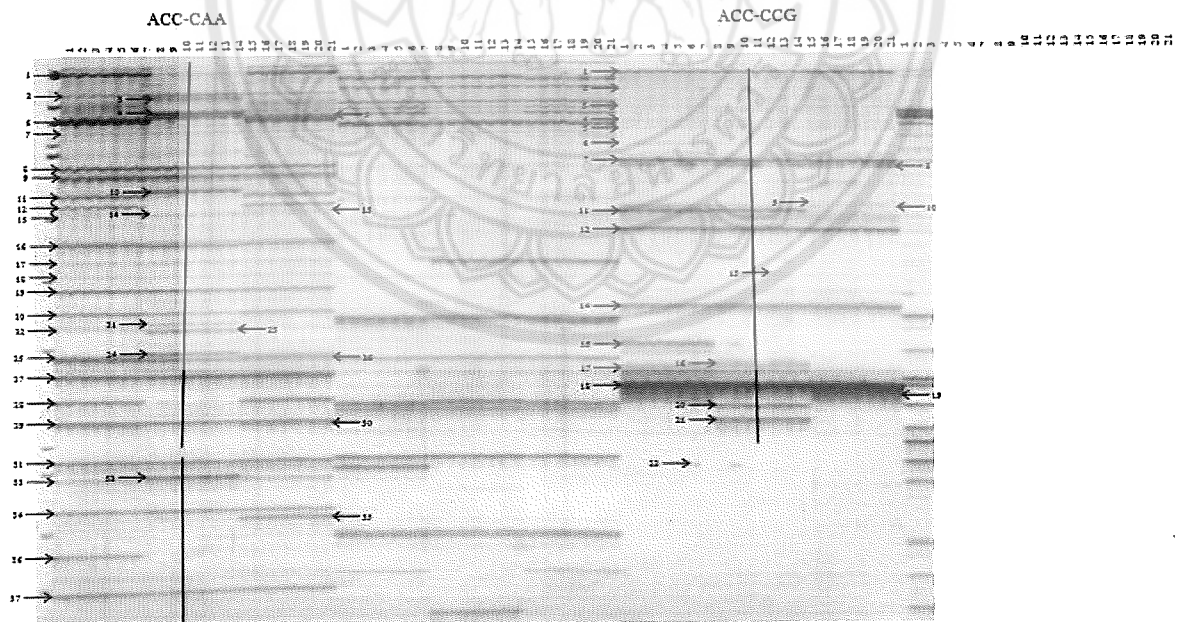
Alt. Report 623150-1



ภาพภาคผนวกที่ 23  
ภาพเอกลักษณะพันธุกรรมของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ภาพเอกลักษณะพันธุกรรมของข้าว

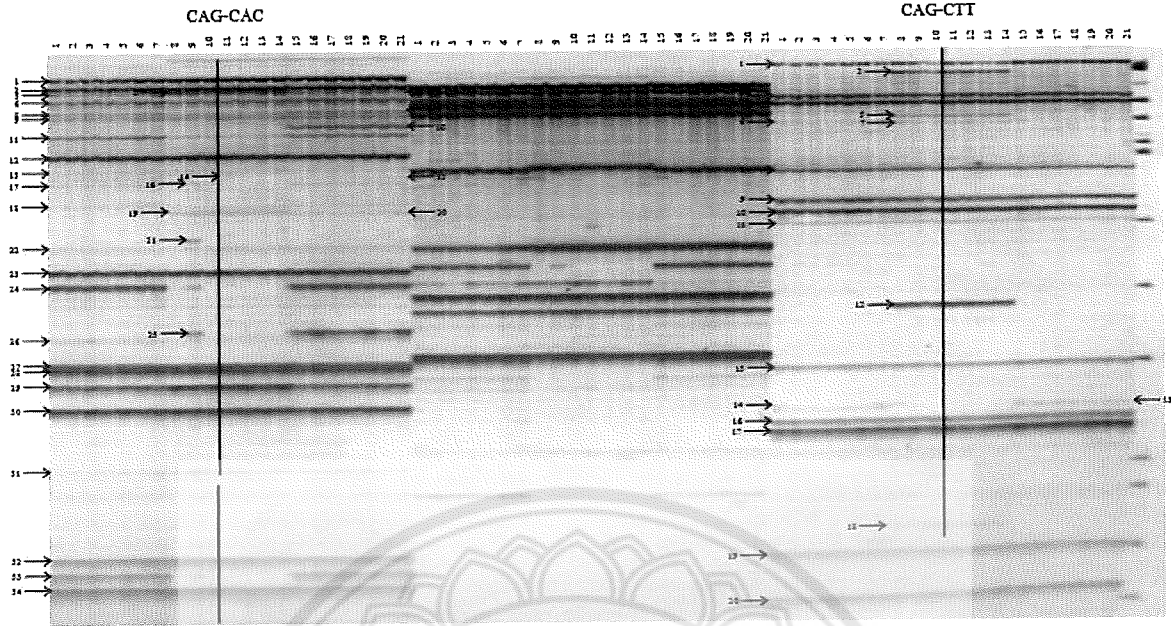
Alt. Report 623150-1



ภาพภาคผนวกที่ 24  
ภาพเอกลักษณะพันธุกรรมของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ภาพเอกลักษณะพันธุกรรมของข้าว

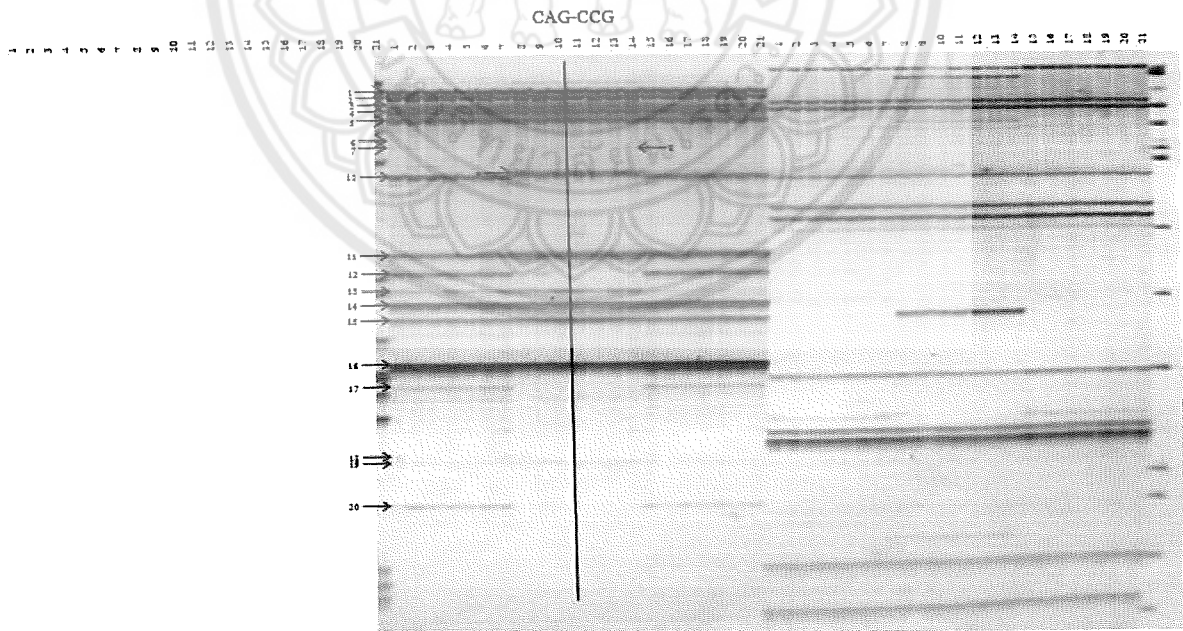
Att. Report 623150-2



ภาพภาคผนวกที่ 25  
ภาพเอกลักษณะพันธุกรรมของข้าวไรซ์เบอร์รี่

ภาพเอกลักษณะพันธุกรรมของข้าว

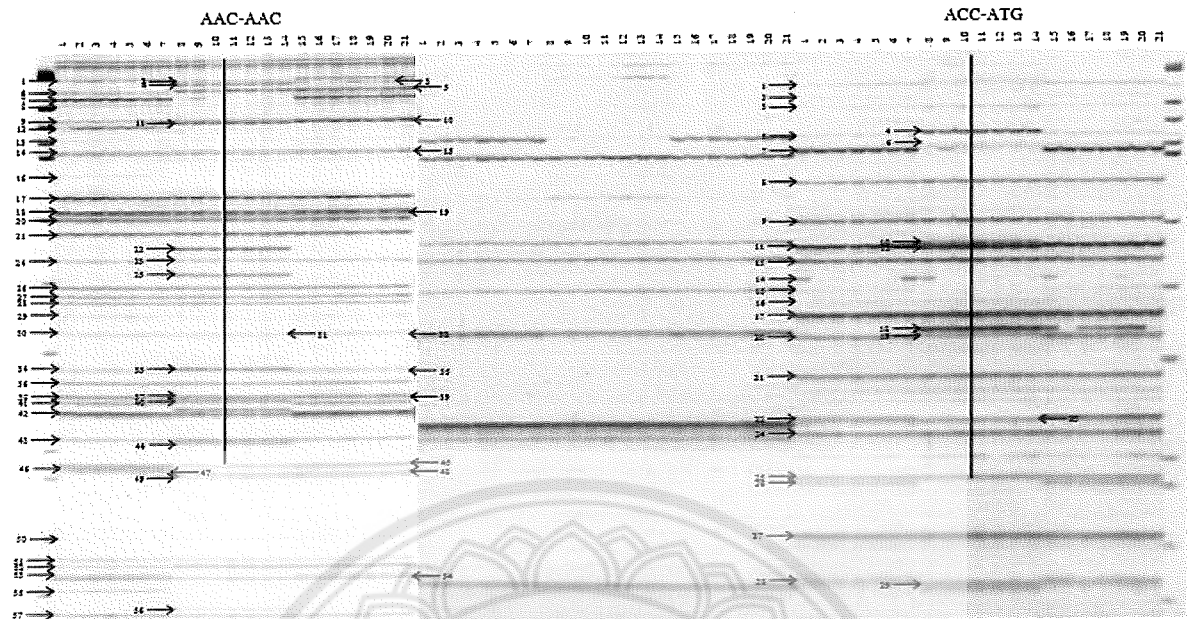
Att. Report 623150-2



ภาพภาคผนวกที่ 26  
ภาพเอกลักษณะพันธุกรรมของข้าวไรซ์เบอร์รี่

ภาพเอกลักษณ์พันธุกรรมของข้าว

Att. Report 623150-3

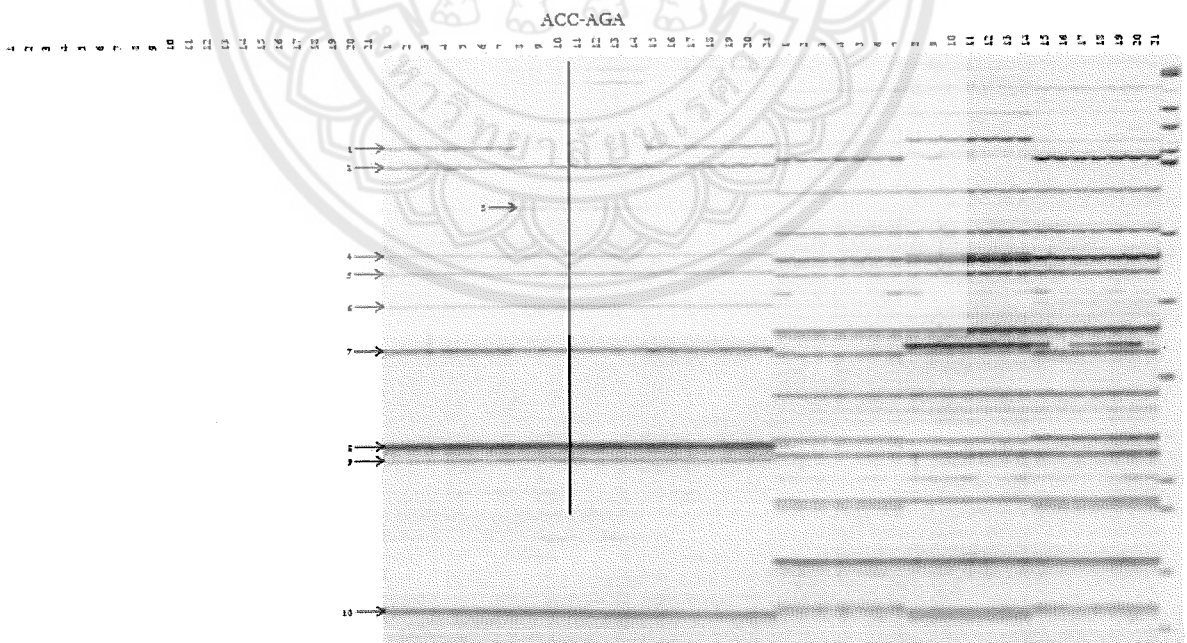


ภาพภาคผนวกที่ 27

ภาพเอกลักษณ์พันธุกรรมของข้าวเหนียวดำพันธุ์ลิ้มผิว

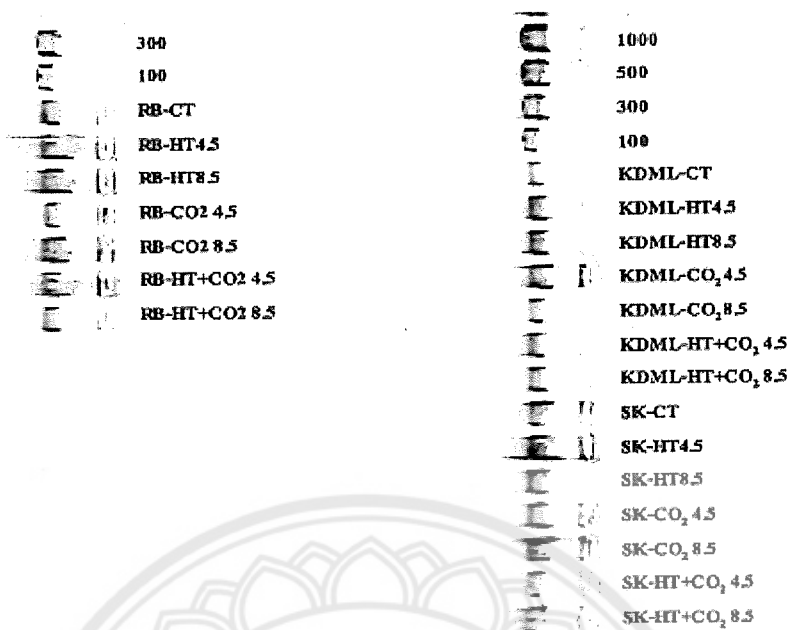
ภาพเอกลักษณ์พันธุกรรมของข้าว

Att. Report 623150-3



ภาพภาคผนวกที่ 28

ภาพเอกลักษณ์พันธุกรรมของข้าวเหนียวดำพันธุ์ลิ้มผิว



ภาพภาคผนวกที่ 29

ภาพการตรวจสอบคุณภาพและปริมาณของดีเอ็นเอใบข้าวจำนวน 21 ตัวอย่าง



ภาพภาคผนวกที่ 30

ภาพการตรวจสอบสภาพการตัดดีเอ็นเอของตัวอย่างใบข้าว ด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะ

ตารางภาคผนวกที่ 60 ค่า similarity ของข้าว 3 พันธุ์

sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
1	1.00																					
2	0.99	1.00																				
3	0.99	1.00	1.00																			
4	0.97	0.98	0.98	1.00																		
5	0.99	0.99	0.99	0.98	1.00																	
6	0.97	0.99	0.99	0.97	0.98	1.00																
7	0.98	0.97	0.97	0.96	0.97	0.97	1.00															
8	0.57	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.57	1.00														
9	0.57	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.57	0.91	1.00													
10	0.55	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.55	0.97	0.93	1.00												
11	0.56	0.57	0.57	0.56	0.57	0.56	0.56	0.97	0.91	0.97	1.00											
12	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.96	0.92	0.99	0.96	1.00										
13	0.54	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.96	0.93	0.99	0.96	0.99	1.00									
14	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.55	0.56	0.98	0.92	0.98	0.96	0.98	0.98	1.00								
15	0.85	0.84	0.84	0.83	0.84	0.84	0.85	0.59	0.60	0.57	0.57	0.57	0.57	0.58	1.00							
16	0.83	0.84	0.84	0.85	0.84	0.85	0.84	0.57	0.60	0.58	0.58	0.57	0.58	0.57	0.97	1.00						
17	0.83	0.84	0.84	0.85	0.84	0.85	0.83	0.57	0.60	0.58	0.58	0.58	0.58	0.57	0.97	0.99	1.00					
18	0.83	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.83	0.57	0.61	0.58	0.58	0.57	0.58	0.57	0.98	0.99	0.99	1.00				
19	0.84	0.85	0.54	0.84	0.84	0.85	0.85	0.58	0.60	0.57	0.58	0.57	0.57	0.58	0.99	0.98	0.98	0.99	1.00			
20	0.83	0.85	0.85	0.84	0.85	0.84	0.84	0.57	0.61	0.58	0.58	0.57	0.58	0.58	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00		
21	0.84	0.85	0.85	0.86	0.85	0.85	0.84	0.58	0.60	0.58	0.58	0.57	0.57	0.57	0.97	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	1.00	