กรมอุตุนิยมวิทยา

4353 ถนนสุขุมวิท กรุงเทพฯ 10260

METEOROLOGICAL DEPARTMENT

4353 Sukhumvit Road, Bangkok 10260, THAILAND

เอกสารวิชาการ

การวิเคราะห์หน้าต่างภูมิอากาศของค่าความร้อนสะสม (GDD) เพื่อสนับสนุนการเพาะปลูกข้าว ข้าวโพด และทานตะวัน: กรณีศึกษาสถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี

อนุชา ศรีเริงหล้า

Climate-Window Analysis of Growing Degree Days (GDD) to Support the Cultivation of Rice, Maize, and Sunflower: A Case Study at Lopburi Meteorological Station

ANUCHA SRERURNGLA

เอกสารวิชาการ เลขที่

Technical Document No.

ISBN:

การวิเคราะห์หน้าต่างภูมิอากาศของค่าความร้อนสะสม (GDD) เพื่อสนับสนุนการเพาะปลูกข้าว ข้าวโพด และทานตะวัน: กรณีศึกษาสถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี

Climate-Window Analysis of Growing Degree Days (GDD) to Support the Cultivation of Rice, Maize, and Sunflower: A Case Study at Lopburi Meteorological Station

อนุชา ศรีเริงหล้า
ส่วนอุตุนิยมวิทยาเกษตร
กองพัฒนาอุตุนิยมวิทยา

มีนาคม พ.ศ. 2569

ANUCHA SRERURNGLA
AGROMETEOROLOGY SUB-DIVISION
METEOROLOGICAL DEVELOPMENT DIVISION

MARCH 2026

บทคัดย่อภาษาไทย

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลให้ความแปรปรวนของอุณหภูมิและฝนสูงขึ้น กระทบต่อระยะเวลาการเพาะปลูกและการเติบโตของพืช เนื่องจากจำนวนวันตามปฏิทินไม่สามารถสะท้อนสภาพการเติบโตที่แท้จริงได้ การใช้หน่วยความร้อนสะสม (Growing Degree Days: GDD) จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมและแม่นยำกว่าในการประเมินพัฒนาการพืช การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากรอบการวิเคราะห์ความเหมาะสมของช่วงเวลาปลูกพืชเศรษฐกิจ โดยใช้ค่า GDD ร่วมกับการประเมินความเสี่ยงเชิงภูมิอากาศ วิเคราะห์จากข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวัน (อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด และปริมาณฝน) ของสถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี ปี พ.ศ. 2558–2567 ในพืช 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน

ผลการศึกษาพบว่า พืชแต่ละชนิดมีช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมแตกต่างกัน โดยข้าวมีช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมที่สุดในช่วงปลายเดือนเมษายนถึงปลายเดือนพฤษภาคม ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหมาะสมในช่วงต้นเดือนมิถุนายนถึงต้นกรกฎาคม และทานตะวันเหมาะสมที่จะเริ่มเพาะปลูกในเดือนกันยายน ซึ่งสะท้อนความแตกต่างของความต้องการอุณหภูมิและความไวต่อความร้อนของพืชแต่ละชนิด นอกจากนี้ การใช้ GDD ร่วมกับการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านอุณหภูมิช่วยให้สามารถระบุช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมได้อย่างมีเหตุผลเชิงสรีรวิทยาของพืช และสอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษา ผลลัพธ์จากการศึกษาถูกพัฒนาเป็นต้นแบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจในรูปแบบแดชบอร์ด ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลหน่วยความร้อนสะสม ระยะพัฒนาการของพืช และตัวชี้วัดความเสี่ยงด้านภูมิอากาศ เพื่อสนับสนุนการวางแผนการเพาะปลูกในระดับพื้นที่ และมีศักยภาพในการขยายผลสู่สถานีอุตุนิยมวิทยาอื่นทั่วประเทศ

จากการศึกษานี้จึงสรุปได้ว่า การประยุกต์ใช้หน่วยความร้อนสะสมร่วมกับการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านภูมิอากาศสามารถพัฒนากรอบการประเมินช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมได้อย่างเป็นระบบ และเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการสนับสนุนการจัดการเกษตรภายใต้สภาวะความแปรปรวนของภูมิอากาศในอนาคต

ABSTRACT

Climate change has increased the variability of temperature and precipitation, affecting crop growth and the timing of planting periods. Calendar-based approaches are unable to accurately represent actual crop development; therefore, the use of Growing Degree Days (GDD) provides a more appropriate and accurate method for evaluating crop phenology. This study aims to develop a framework for assessing the suitability of planting periods for major economic crops by integrating GDD with climatological risk analysis. The analysis is based on daily meteorological data (maximum and minimum temperature, and precipitation) from the Lopburi meteorological station during 2015–2024, focusing on three crops: Pathum Thani 1 rice, maize, and sunflower.

The results indicate that optimal planting periods differ among crop types. Rice is most optimally planted from late April to late May, maize from early June to early July, and sunflower is most suitable for planting beginning in September. These findings reflect differences in thermal requirements and sensitivity to heat stress among the crops. Furthermore, the integration of GDD with temperature risk analysis enables the identification of optimal planting periods based on crop physiological responses and local climatic conditions.

The results were further developed into a prototype decision support system in the form of a dashboard, which visualizes cumulative GDD, crop developmental stages, and climate risk indicators. This system supports agricultural planning at the local level and demonstrates strong potential for expansion to other meteorological stations nationwide.

In conclusion, the integration of Growing Degree Days with climatological risk analysis provides a systematic framework for determining optimal planting periods and offers a promising approach for supporting agricultural management under future climate variability.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการดำเนินการ	2
1.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	3
1.5 ทฤษฎี และ/หรือแนวความคิดที่นำมาใช้ในการศึกษา	7
1.6 วิธีดำเนินการศึกษาโดยสรุป	13
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	14
2. ข้อมูลและวิธีดำเนินการ	16
2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา	16
2.2 วิธีการดำเนินการศึกษา	16
3. ผลการดำเนินการ	28
3.1 ผลการสร้างชุดข้อมูลภูมิอากาศเฉลี่ยรายวันแบบปีเฉลี่ย	28
3.2 ผลการวิเคราะห์ GDD และช่วงระยะเวลาปลูกที่เหมาะสมของแต่ละพืช	33
3.3 การพัฒนาแดชบอร์ดต้นแบบสำหรับการวิเคราะห์ GDD	46
4. สรุปการดำเนินการ	50
4.1 สรุปผลการดำเนินการ	50
4.2 วิจารณ์ผลการดำเนินการ	53
4.3 ข้อเสนอแนะ	54
บรรณานุกรม	56

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ค่าอุณหภูมิฐาน (Tbase) และอุณหภูมิสูงสุด (Tupper) ของข้าวปทุมธานี 1 ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และทานตะวัน 19

ตารางที่ 2 ค่าหน่วยความร้อนสะสม (GDD) สำหรับระยะพัฒนาการของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 จำแนกตามวิธีการปลูก 20

ตารางที่ 3 ค่าหน่วยความร้อนสะสม (GDD) สำหรับระยะพัฒนาการของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จำแนกตามชนิดพันธุ์ 20

ตารางที่ 4 ค่าหน่วยความร้อนสะสม (GDD) สำหรับระยะพัฒนาการของทานตะวัน จำแนกตามชนิดพันธุ์ 21

ตารางที่ 5 ช่วงวิกฤตต่ออุณหภูมิ (Heat-sensitive window) ของพืชแต่ละชนิดในรูปของสัดส่วนหน่วยความร้อนสะสม 23

ตารางที่ 6 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 สำหรับนาดำ 36

ตารางที่ 7 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด **3** อันดับแรกสำหรับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 สำหรับนาหยอด 36

ตารางที่ 8 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 สำหรับนาหว่าน 37

ตารางที่ 9 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์เบา 40

ตารางที่ 10 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์หนัก 40

ตารางที่ 11 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับทานตะวันพันธุ์เบา 44

ตารางที่ 12 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับทานตะวันพันธุ์หนัก 44

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ภาพที่ 1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการอย่างละเอียดของงานวิจัย (Flow Chart) 14

ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิต่ำสุด และอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันจากชุดข้อมูลภูมิอากาศปีเฉลี่ยของสถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี 29

ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนเฉลี่ยรายวันจากชุดข้อมูลภูมิอากาศปีเฉลี่ยของสถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี 30

ภาพที่ 4 ความน่าจะเป็นของการเกิดฝนมากกว่า 1 มิลลิเมตรรายวันจากชุดข้อมูลภูมิอากาศปีเฉลี่ยของสถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี 30

ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดรายวันตลอดรอบปีเฉลี่ย และช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดเกิน 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นเกณฑ์อุณหภูมิสูงที่อาจส่งผลกระทบต่อพืชที่ศึกษา 31

ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของค่า GDD รายวันตลอดรอบปีเฉลี่ยสำหรับข้าว โดยแกน X แสดงวันลำดับของปี (DOY) และใช้ชื่อเดือนเป็นตัวอ้างอิงฤดูกาล 33

ภาพที่ 7 เปรียบเทียบหน่วยความร้อนสะสมและพัฒนาการของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 โดยเปรียบเทียบการเพาะปลูกแบบนาดำ (A) นาหยอด (B) และนาหว่าน (C) โดยพื้นที่แรเงาสีชมพูแสดงช่วงวิกฤตที่อ่อนไหวต่อความร้อน (Critical stage); แถบกราฟแท่งแสดงปริมาณน้ำฝนรายวัน (mm) 35

ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของค่า GDD รายวันตลอดรอบปีเฉลี่ยสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยแกน X แสดงวันลำดับของปี (DOY) และใช้ชื่อเดือนเป็นตัวอ้างอิงฤดูกาล 38

ภาพที่ 9 เปรียบเทียบหน่วยความร้อนสะสมและพัฒนาการของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์เบา (A) และพันธุ์หนัก (B) โดยพื้นที่แรเงาสีชมพูแสดงช่วงวิกฤตที่อ่อนไหวต่อความร้อน (Critical stage) แถบกราฟแท่งแสดงปริมาณน้ำฝนรายวัน (mm) 39

ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของค่า GDD รายวันตลอดรอบปีเฉลี่ยสำหรับทานตะวัน โดยแกน X แสดงวันลำดับของปี (DOY) และใช้ชื่อเดือนเป็นตัวอ้างอิงฤดูกาล 42

ภาพที่ 11 เปรียบเทียบหน่วยความร้อนสะสมและพัฒนาการของทานตะวันพันธุ์เบา (A) และพันธุ์หนัก (B) โดยพื้นที่แรเงาสีชมพูแสดงช่วงวิกฤตที่อ่อนไหวต่อความร้อน (Critical stage) แถบกราฟแท่งแสดงปริมาณน้ำฝนรายวัน (mm) 43

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสม (DOY) ของข้าว ข้าวโพด เลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน ในรอบปีเฉลี่ย 45
ภาพที่ 13 รูปแบบหน้าหลักของระบบแดชบอร์ด GDD สำหรับเลือกพืชเพื่อการวิเคราะห์ 46
ภาพที่ 14 ตัวอย่างแดชบอร์ดการวิเคราะห์ GDD สำหรับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 แสดงผลการคำนวณระยะพัฒนาการของพืช ตัวชี้วัดความเสี่ยงด้านภูมิอากาศ และกราฟข้อมูลเชิงเวลาของค่า GDD รายวันร่วมกับข้อมูลฝน เพื่อประเมินความเหมาะสมของช่วงเวลาการเพาะปลูก 47

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ภาคการเกษตรของประเทศไทยมีความอ่อนไหวต่อความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอุณหภูมิและปริมาณฝนซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดการเจริญเติบโตของพืชในแต่ละช่วงระยะพัฒนาการ ภายใต้บริบทของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ความผันแปรของอุณหภูมิสูงสุด ความถี่ของคลื่นความร้อน และรูปแบบฝนที่ไม่สม่ำเสมอ ล้วนเพิ่มระดับความเสี่ยงต่อผลผลิตทางการเกษตร และทำให้การกำหนดช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

ในอดีต การประเมินระยะเจริญเติบโตมักใช้ "จำนวนวันคงที่" (Calendar Days) ซึ่งมีข้อจำกัดสำคัญคือไม่สามารถสะท้อนอัตราการพัฒนาทางสรีรวิทยาที่แท้จริง เนื่องจากพืชเจริญเติบโตตามพลังงานความร้อนที่ได้รับ มิใช่ตามปฏิทิน แนวคิดหน่วยความร้อนสะสม (Growing Degree Days: GDD) จึงกลายเป็นหัวใจสำคัญของการเกษตรแม่นยำ และการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืชในระบบเกษตรสมัยใหม่ โดย GDD เป็นการสะสมอุณหภูมิที่เกินค่าฐาน (Base temperature) ซึ่งสะท้อนอัตราการพัฒนาของพืชในเชิงสรีรวิทยาได้แม่นยำกว่าการนับจำนวนวันแบบตายตัว

การเปลี่ยนผ่านจากแนวคิด “Days-based” ไปสู่ “GDD-based” ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะในระดับงานวิจัยเท่านั้น แต่ได้รับการยอมรับในระดับสากล ดังจะเห็นได้จากการปรับปรุงแนวทางขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) ที่ได้ทำการปรับปรุงคู่มือ FAO56 โดยเปลี่ยนการกำหนดความยาวของระยะพัฒนาการพืช (Initial, Development, Mid-season, Late-season) จากจำนวนวันไปสู่ค่า GDD และได้รับการอธิบายเชิงประยุกต์ในงานของ Paredes et al. (2025) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ GDD มีความแม่นยำสูงกว่าในการกำหนดระยะการเจริญเติบโตของพืชและการสร้างเส้นโค้งค่าสัมประสิทธิ์พืช (Crop Coefficient Curve: Kc curve) ที่มีความแม่นยำสูงขึ้นในการบริหารจัดการน้ำท่ามกลางสภาพอากาศที่ผันแปร

แม้ว่าหลักการ GDD จะได้รับการยอมรับในระดับสากล แต่การประยุกต์ใช้ในบริบทภูมิอากาศของประเทศไทย โดยเฉพาะในเชิงการวิเคราะห์ช่วงปลูกที่เหมาะสมระดับสถานี และการบูรณาการร่วมกับปัจจัยเสี่ยงด้านอุณหภูมิสูงและฝนทิ้งช่วงเชิงความน่าจะเป็น ยังมีการศึกษาอย่างจำกัด งานวิจัยส่วนใหญ่มักพิจารณาเพียงค่า GDD สะสมจนถึงระยะเก็บเกี่ยว โดยไม่ได้วิเคราะห์ช่วงวิกฤตด้านความร้อน (Heat-sensitive window) หรือความเสี่ยงฝนทิ้งช่วงที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละช่วงการพัฒนาการของพืช

ดังนั้น การศึกษานี้จึงมุ่งพัฒนา กรอบการวิเคราะห์เชิงภูมิอากาศแบบบูรณาการ (Integrated Climatological Phenology Framework) โดยใช้ข้อมูลรายวันย้อนหลังอย่างน้อย 10 ปี เพื่อสร้างปีตัวแทนทางภูมิอากาศ และประยุกต์ใช้การคำนวณ GDD แบบปรับแก้ร่วมกับการ

วิเคราะห์ช่วงวิกฤตด้านอุณหภูมิ และการประเมินฝนทิ้งช่วงเชิงความน่าจะเป็น เพื่อระบุช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมในระยะยาว

การศึกษานี้เลือกใช้สถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรีเป็นกรณีศึกษา และประยุกต์กรอบดังกล่าวกับพืชเศรษฐกิจสำคัญ ได้แก่ ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน โดยกำหนดระยะพัฒนาการตามค่า GDD สะสมและแนวทาง FAO สำหรับพืชแต่ละชนิด พร้อมทั้งพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจในรูปแบบแดชบอร์ดต้นแบบ เพื่อรองรับการขยายผลสู่สถานีอื่น ๆ ทั่วประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนากรอบการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืชเชิงภูมิอากาศ โดยใช้หน่วยความร้อนสะสม (Growing Degree Days: GDD) จากข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวันย้อนหลังอย่างน้อย 10 ปี และสร้างปีตัวแทนจากค่าเฉลี่ย 10 ปี (Mean-Year 365-day) สำหรับการประเมินระยะยาว

1.2.2 เพื่อกำหนดและวิเคราะห์ระยะพัฒนาการของพืชเศรษฐกิจต้นแบบ ซึ่งมีลักษณะการตอบสนองต่ออุณหภูมิแตกต่างกัน ได้แก่ ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน โดยอาศัยค่า GDD สะสมร่วมกับแนวทางการแบ่งระยะการเจริญเติบโตของพืชตามมาตรฐานสากล

1.2.3 เพื่อประเมินความเหมาะสมของช่วงเวลาปลูกเชิงภูมิอากาศ โดยใช้การสะสมหน่วยความร้อนและการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านอุณหภูมิสูงในช่วงวิกฤตของพืชเป็นเกณฑ์หลัก และจัดเตรียมข้อมูลความน่าจะเป็นของการเกิดฝนทิ้งช่วงเพื่อประกอบการตัดสินใจตามบริบทการจัดการน้ำของแต่ละพื้นที่

1.2.4 เพื่อพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจในรูปแบบแดชบอร์ดต้นแบบ (Prototype Agro-Climatological Decision Support System) ที่สามารถประยุกต์ใช้กับสถานีอุตุนิยมวิทยาอื่น ๆ และขยายผลสู่ระดับประเทศได้

1.3 ขอบเขตของการดำเนินการ

การศึกษานี้มุ่งวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืชในเชิงภูมิอากาศ โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวันย้อนหลังอย่างน้อย 10 ปี จากสถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรีเป็นกรณีศึกษา ข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วย อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิต่ำสุด และปริมาณฝน ซึ่งถูกนำมาประมวลผลเพื่อสร้างปีตัวแทนทางภูมิอากาศแบบ 365 วัน สำหรับใช้เป็นฐานในการวิเคราะห์ช่วงเวลาปลูกในระยะยาว การศึกษานี้ไม่มุ่งเน้นการวิเคราะห์รายปีหรือการพยากรณ์ระยะสั้น แต่เน้นการประเมินเชิงภูมิอากาศในลักษณะภาพรวมระยะยาวของพื้นที่ศึกษา

การเลือกใช้ข้อมูลย้อนหลังอย่างน้อย 10 ปี มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างฐานข้อมูลที่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์เชิงภูมิอากาศในระดับการเกษตร โดยคำนึงถึงความสมดุลระหว่างความยาวของช่วงข้อมูลและความสอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศปัจจุบัน ทั้งนี้ การศึกษานี้ไม่ได้มุ่งสร้างค่าปกติ

ภูมิอากาศตามนิยามมาตรฐานระยะ 30 ปีขององค์การอุตุนิยมวิทยาโลก แต่เป็นการพัฒนากรอบการประเมินความเหมาะสมเชิงอุณหภูมิสำหรับการตัดสินใจด้านการเพาะปลูกในบริบทสภาพภูมิอากาศปัจจุบัน

การกำหนดระยะพัฒนาการของพืชอาศัยการคำนวณหน่วยความร้อนสะสม (Growing Degree Days: GDD) แบบปรับแก้ โดยกำหนดค่าอุณหภูมิฐานและค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณตามลักษณะของพืชแต่ละชนิด ความเหมาะสมของช่วงเวลาปลูกถูกประเมินโดยใช้อุณหภูมิเป็นเกณฑ์หลัก ผ่านการสะสมค่า GDD และการวิเคราะห์ความเสี่ยงอุณหภูมิสูงในช่วงวิกฤตของพืชตามสัดส่วนของ GDD สะสม ขณะที่การวิเคราะห์ฝนทิ้งช่วงดำเนินการในรูปแบบความน่าจะเป็น และนำเสนอในฐานะข้อมูลประกอบการตัดสินใจเท่านั้น โดยไม่ได้ใช้เป็นเกณฑ์หลักในการจัดลำดับความเหมาะสม ทั้งนี้เพื่อเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานสามารถพิจารณาตามบริบทของการจัดการน้ำและการเข้าถึงระบบชลประทานที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่

พืชที่ใช้ในการศึกษาเป็นพืชเศรษฐกิจต้นแบบ 3 ชนิด ได้แก่ ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน โดยกำหนดระยะพัฒนาการตามค่า GDD สะสมจากเอกสารงานวิจัยและแนวทางมาตรฐานของ FAO ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ถูกพัฒนาเป็นต้นแบบเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจในรูปแบบแดชบอร์ด ซึ่งออกแบบให้สามารถประยุกต์ใช้กับสถานีอุตุนิยมวิทยาอื่น ๆ ได้ อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้มุ่งเน้นการทดสอบกรอบแนวคิดในระดับสถานีต้นแบบ และยังไม่ได้ดำเนินการวิเคราะห์ครอบคลุมทุกสถานีทั่วประเทศ

1.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

สำหรับการวิเคราะห์หน้าต่างภูมิอากาศของค่าความร้อนสะสม (GDD) เพื่อสนับสนุนการเพาะปลูกข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน จำเป็นต้องอาศัยองค์ความรู้ที่บูรณาการระหว่างสรีรวิทยาการเจริญเติบโตของพืช การจัดการข้อมูลอุตุนิยมวิทยา และการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านภูมิอากาศ เนื่องจากการประเมินช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมต้องพิจารณาทั้งกลไกการตอบสนองของพืชต่ออุณหภูมิ การกำหนดระยะพัฒนาการด้วยหน่วยความร้อนสะสม ผลกระทบของอุณหภูมิสูงในช่วงวิกฤต ตลอดจนการคำนึงถึงปัจจัยความแปรปรวนของฝนในระดับพื้นที่ ดังนั้น การทบทวนวรรณกรรมจึงครอบคลุมแนวคิดพื้นฐานของ GDD การกำหนดระยะพัฒนาการตามมาตรฐานสากล ผลกระทบของความเครียดจากความร้อน และแนวทางการประยุกต์ใช้ข้อมูลภูมิอากาศเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจด้านการเกษตร โดยสามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังต่อไปนี้

1.4.1 แนวคิดและพัฒนาการของ Growing Degree Days (GDD)

Growing Degree Days (GDD) หรือหน่วยความร้อนสะสม เป็นแนวคิดพื้นฐานทางอุตุนิยมวิทยาเกษตรที่อธิบายว่า การเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืชมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ

อุณหภูมิ พืชจะสะสมพลังงานความร้อนในแต่ละวัน และใช้พลังงานดังกล่าวในการเปลี่ยนผ่านระยะพัฒนาการทางสรีรวิทยา ตั้งแต่ระยะเริ่มงอกจนถึงระยะเก็บเกี่ยว

หลักการคำนวณ GDD ขั้นพื้นฐานทำได้โดยนำอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน (คำนวณจากค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด) มาหักลบด้วยอุณหภูมิฐาน (Base temperature: Tbase) ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่พืชเริ่มมีการเจริญเติบโต หากอุณหภูมิต่ำกว่าค่านี้ กระบวนการพัฒนาของพืชจะหยุดชะงัก นอกจากนี้ยังมีการกำหนดเพดานอุณหภูมิสูงสุด (Ceiling temperature หรือ Tupper) ซึ่งเป็นระดับอุณหภูมิสูงสุดที่พืชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากอุณหภูมิสูงเกินกว่าค่านี้จะไม่ก่อให้เกิดการสะสม GDD เพิ่มเติม ค่าวิกฤตเหล่านี้มีความเฉพาะเจาะจงตามชนิดพืช เช่น ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มี Tbase ประมาณ 10°C และ Tupper ประมาณ 30–32°C ทานตะวันมี Tbase ประมาณ 8°C และ Tupper ประมาณ 30°C ส่วนข้าวมี Tbase อยู่ในช่วงประมาณ 8–10°C และ Tupper ประมาณ 30°C (Anandhi, 2013; Paredes et al., 2025)

ในทางปฏิบัติ ได้มีการพัฒนาและดัดแปลงสมการ GDD หลายรูปแบบเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการสะท้อนการตอบสนองของพืชต่ออุณหภูมิ หนึ่งในแนวทางสำคัญคือการเปรียบเทียบวิธีคำนวณที่แตกต่างกัน เช่น วิธีที่มีการกำหนดเงื่อนไขการตัดค่า Tbase ก่อนหรือหลังการคำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน ซึ่งอาจให้ค่า GDD ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ยังมีแนวคิดการปรับค่าความร้อนสะสมให้สอดคล้องกับอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดของพืช โดยลดประสิทธิภาพการสะสมความร้อนลงเมื่ออุณหภูมิสูงเกินระดับที่เหมาะสม เพื่อสะท้อนผลกระทบของความเครียดจากความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูง (Aiken, 2005)

เมื่อเปรียบเทียบกับการนับอายุพืชด้วยจำนวนวันตามปฏิทิน (Calendar Days) ซึ่งกำหนดระยะเวลาการเจริญเติบโตเป็นจำนวนวันคงที่ การใช้ GDD มีความยืดหยุ่นและแม่นยำมากกว่า เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนตามความผันแปรของอุณหภูมิในแต่ละปีและแต่ละพื้นที่ได้ดีกว่า ทั้งนี้ พืชชนิดเดียวกันมักต้องการปริมาณความร้อนสะสมใกล้เคียงกันในการเปลี่ยนผ่านแต่ละระยะพัฒนาการ แม้ว่าจำนวนวันที่ใช้จริงอาจแตกต่างกันตามสภาพภูมิอากาศ (Paredes et al., 2025)

1.4.2 การกำหนดระยะพัฒนาการของพืชตามมาตรฐานสากล

แนวคิดการใช้หน่วยความร้อนสะสม (GDD) ในการกำหนดระยะพัฒนาการของพืชได้รับการยอมรับมากขึ้นในระดับสากล โดยแนวทางล่าสุดของขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) ที่ทำการปรับปรุงคู่มือ FAO56 มาเป็นฉบับปรับปรุงใหม่ โดยเสนอให้ใช้ GDD ในการกำหนดความยาวของระยะพัฒนาการทั้ง 4 ระยะ แทนการใช้จำนวนวันคงที่ตามปฏิทินแบบเดิม ซึ่งช่วยให้การกำหนดระยะพัฒนาการสอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศจริงมากขึ้น (Pereira et al., 2025)

การแบ่งระยะการเจริญเติบโตของพืชตามแนวทางมาตรฐานประกอบด้วย 4 ระยะหลัก ได้แก่ ระยะเริ่มแรก (Initial stage) ระยะพัฒนาการ (Development stage) ระยะกลางฤดู (Mid-season stage) และระยะปลายฤดู (Late-season stage) โดยแต่ละระยะสามารถกำหนดความยาวของช่วงได้ด้วยค่า GDD สะสมที่เฉพาะเจาะจงสำหรับพืชแต่ละชนิด การใช้ GDD ในการกำหนดระยะดังกล่าวช่วยให้สามารถสร้างเส้นโค้งค่าสัมประสิทธิ์พืช (Kc curve) ได้อย่างแม่นยำและสอดคล้องกับความผันแปรของอุณหภูมิในพื้นที่ศึกษา (Paredes et al., 2025)

ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่ประยุกต์ใช้ GDD ในการติดตามสัณฐานวิทยา (Phenology) ของพืช เช่น การกำหนดระยะออกช่อดอกตัวผู้ (Tasseling) และระยะออกไหม (Silking) ของข้าวโพดหวาน (จิราลักษณ์ ภูมิไธสง และคณะ, 2557) การประเมินระยะตั้งแต่เริ่มเห็นตาดอกจนถึงระยะสุกแก่ของทานตะวัน (Aiken, 2005) ตลอดจนการทำนายวันเก็บเกี่ยวข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และ กข-แม่โจ้ 2 ที่สัมพันธ์กับค่า GDD ได้อย่างแม่นยำ (ศุภณัฐ กายถวาย และคณะ, 2567)

1.4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อพืชในช่วงวิกฤต

แม้ว่าการสะสมหน่วยความร้อนจะเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดระยะพัฒนาการของพืช แต่อุณหภูมิสูงเกินระดับที่เหมาะสมในช่วงวิกฤตของการเจริญเติบโตสามารถก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อผลผลิตได้

สำหรับข้าว มีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิสูงอย่างมากในระยะเจริญพันธุ์ โดยเฉพาะช่วงดอกบาน หากอุณหภูมิสูงเกิน 33-35°C จะส่งผลให้การแตกของอับละอองเกสรล้มเหลว ทำให้ข้าวเป็นหมัน (Spikelet sterility) และไม่ติดเมล็ด (Satake and Yoshida, 1978; ดวงฤทัย ป้อมเพชร และคณะ, 2560) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในข้าวนาสวนพื้นเมืองไทยที่พบว่าอุณหภูมิสูงในระยะเติมเต็มเมล็ดทำให้น้ำหนักเมล็ดลดลงและอัตราเมล็ดลีบเพิ่มขึ้น (กฤษณาพร เทิดกิจเจริญ และคณะ, 2566)

ในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ซึ่งเป็นพืชระยะผสมเกสรเป็นช่วงเวลาที่สั้นมาก (เพียง 3-5 วัน) อุณหภูมิที่สูงเกิน 35°C จะทำให้ละอองเกสรตัวผู้สูญเสียความมีชีวิต (Pollen viability) และลดความพร้อมรับของไหม นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงกว่า 30°C ยังทำลายกระบวนการแบ่งเซลล์ในเมล็ด ทำให้ผลผลิตลดลง (Hatfield and Prueger, 2015)

สำหรับทานตะวัน ความเครียดจากความร้อนส่งผลกระทบต่อทานตะวันอย่างมากในช่วงการเติมเต็มเมล็ด หากได้รับอุณหภูมิ 35-40°C ในช่วง 10-19 วันหลังดอกบาน จะทำให้น้ำหนักเมล็ดลดลง การพัฒนาของเอ็มบริโอเสียหาย และเพิ่มสัดส่วนความเป็นหมันของละอองเรณูได้สูงถึง 60% (Chimenti et al., 2001; Rondanini et al., 2003; Kalyar et al., 2014)

ดังนั้น การวิเคราะห์ช่วงปลูกโดยพิจารณาเพียงการสะสม GDD อาจไม่เพียงพอ หากไม่พิจารณาความเสี่ยงอุณหภูมิสูงในช่วงวิกฤตร่วมด้วย การบูรณาการแนวคิดการสะสมหน่วยความร้อน

กับการประเมินความเสี่ยงจากความร้อนจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการประเมินความเหมาะสมของช่วงเวลาปลูกในบริบทภูมิอากาศปัจจุบัน

1.4.4 การประยุกต์ใช้ข้อมูลภูมิอากาศในการกำหนดช่วงปลูก

การวิเคราะห์ช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสม (Planting window analysis) เป็นการประยุกต์ใช้ข้อมูลหน่วยความร้อนสะสมเพื่อปรับเลื่อนวันปลูกให้สอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศของพื้นที่ โดยมีเป้าหมายเพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงจากอุณหภูมิสูงในช่วงวิกฤตของพืช ตัวอย่างเช่น การศึกษาการกำหนดวันปลูกข้าวโพดหวานในช่วงกลางเดือนพฤศจิกายนถึงมีนาคม พบว่าการปลูกในเดือนธันวาคมให้ผลผลิตสูงสุด เนื่องจากสามารถหลีกเลี่ยงอุณหภูมิสูงในช่วงออกดอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ (จิราลักษณ์ ภูมิไธสง และคณะ, 2557) ในทำนองเดียวกัน การวางแผนวันปลูกทานตะวันโดยใช้ข้อมูล GDD สามารถช่วยหลีกเลี่ยงความร้อนในระยะออกดอกและระยะเติมเต็มเมล็ด ซึ่งเป็นช่วงที่มีความอ่อนไหวสูงต่อความเครียดจากความร้อน (Kalyar et al., 2014)

นอกจากนี้ GDD ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินความเหมาะสมเชิงภูมิอากาศของพื้นที่ (Climatological suitability studies หรือ Agro-climatic zoning) โดยใช้ข้อมูลระยะยาวเพื่อประเมินศักยภาพการเพาะปลูกภายใต้สภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน เช่น การศึกษาในภูมิภาคตะวันออกไกลของรัสเซีย ซึ่งใช้ GDD ในการประเมินศักยภาพการปลูกพืชภายใต้สภาพภูมิอากาศที่หนาวเย็นและมีความผันผวนสูง (Grigorieva et al., 2010) แนวทางดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของ GDD ในการเชื่อมโยงข้อมูลภูมิอากาศกับการวางแผนการเพาะปลูกเชิงพื้นที่อย่างเป็นระบบ

1.4.5 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการสะสมหน่วยความร้อนและความเสี่ยงทางการเกษตร

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในช่วงครึ่งหลังของศตวรรษที่ 20 ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยผิวโลกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และแนวโน้มดังกล่าวยังคงดำเนินต่อเนื่องในหลายภูมิภาคของโลก งานศึกษาระยะยาวในสหรัฐอเมริกาพบว่า ค่า Growing Degree Days (GDD) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในศตวรรษที่ 20 สะท้อนถึงการสะสมความร้อนที่มากขึ้นในฤดูปลูก (Kukal & Irmak, 2018) ในบริบทของพืชเศรษฐกิจ เช่น ข้าว การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไม่ได้เพียงเร่งการสะสมหน่วยความร้อน แต่ยังเพิ่มความเสี่ยงต่อความเครียดจากอุณหภูมิสูง (heat stress) ในระยะพัฒนาการที่สำคัญ โดยเฉพาะในช่วงระยะตั้งท้อง และระยะออกรวง–ออกดอก ซึ่งเป็นช่วงที่พืชมีความไวต่ออุณหภูมิสูงอย่างมาก งานศึกษาในประเทศจีนระหว่างปี 1960–2009 พบว่า ภาวะโลกร้อนส่งผลให้ความเครียดจากความร้อนของพืชเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (0.04–0.12°C ต่อปีในบางระยะพัฒนาการ) ขณะที่ความเครียดจากความหนาวลดลง (Zhang et al., 2014) ผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนว่าภายใต้

ภาวะโลกร้อน ความเสี่ยงด้านการผลิตมิได้จำกัดอยู่เพียง “การมีฤดูปลูกยาวขึ้น” แต่เกี่ยวข้องกับ “ความรุนแรงของอุณหภูมิวิกฤตในช่วงสำคัญของพืช” ดังนั้น การศึกษาค่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature threshold) ในช่วงออกดอกหรือระยะสืบพันธุ์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

ในเชิงภูมิอากาศวิทยา การใช้ข้อมูลระยะ 30 ปีมักถูกใช้เพื่อสะท้อนค่า climate normal อย่างไรก็ตาม ในบริบทของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างรวดเร็ว การใช้ช่วงเวลายาวเกินไปอาจทำให้ค่าเฉลี่ยถูก “เจือจาง” ด้วยข้อมูลอดีตที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ งานศึกษาระดับประเทศในสหรัฐอเมริการายงานว่า ค่า GDD รายปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 50°C ต่อศตวรรษ (Kukal & Irmak, 2018) ซึ่งสะท้อนว่าภายในช่วงเวลาเพียง 20–30 ปี ค่าการสะสมความร้อนสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างมีนัยสำคัญเชิงเกษตรกรรม

นอกจากนี้ งานวิเคราะห์แนวโน้มระยะยาวในรัฐ Nebraska พบการเปลี่ยนแปลงของฤดูปลูกและวันน้ำค้างแข็งวันแรก/สุดท้ายในระดับหลายวันต่อศตวรรษ (Skaggs & Irmak, 2012) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอุณหภูมิในระบบเกษตรมีความต่อเนื่องและไม่คงที่ ดังนั้น ในวัตถุประสงค์ของการประเมินความเสี่ยงเชิงเกษตรกรรมภายใต้สภาพภูมิอากาศปัจจุบัน การศึกษานี้จึงเลือกใช้ช่วงข้อมูล 10 ปีล่าสุด เพื่อให้สามารถสะท้อนสภาวะภูมิอากาศปัจจุบันที่ส่งผลต่อการผลิตจริงได้อย่างแม่นยำ โดยเป็นระยะเวลาที่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและแนวโน้มทางสถิติ อีกทั้งยังช่วยลดอิทธิพลจากข้อมูลในอดีตซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนหรือไม่สอดคล้องกับบริบทความแปรปรวนของภูมิอากาศในปัจจุบัน

1.5 ทฤษฎี และ/หรือแนวความคิดที่นำมาใช้ในการศึกษา

1.5.1 ทฤษฎีการสะสมหน่วยความร้อน (Growing Degree Days: GDD)

แนวคิดการสะสมหน่วยความร้อนตั้งอยู่บนหลักการที่ว่า อัตราการพัฒนาทางสรีรวิทยาของพืชมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิภายในช่วงที่เหมาะสม กล่าวคือ พืชแต่ละชนิดต้องการปริมาณพลังงานความร้อนสะสมในระดับหนึ่งเพื่อเปลี่ยนผ่านจากระยะการเจริญเติบโตหนึ่งไปสู่อีกระยะหนึ่ง แนวคิดนี้สะท้อน “เวลาเชิงชีวภาพ” (Biological time) ซึ่งแตกต่างจากเวลาเชิงปฏิทินที่นับจำนวนวันคงที่

ในการคำนวณพื้นฐาน อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน (Tavg) คำนวณจากอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดรายวัน ดังสมการ

$$T_{avg} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

ค่า GDD รายวันในรูปแบบทั่วไปสามารถคำนวณได้จาก

$$GDD = T_{avg} - T_{base}$$

โดยที่ Tbase คืออุณหภูมิฐาน (Base temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่พืชเริ่มมีการเจริญเติบโต หาก Tavg < Tbase จะกำหนดให้ค่า GDD เท่ากับศูนย์

อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การคำนวณสะท้อนการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืชต่ออุณหภูมิสูง การศึกษานี้ใช้วิธีคำนวณแบบปรับแก้ (Modified GDD) ซึ่งกำหนดเพดานอุณหภูมิสูงสุด Tupper เพื่อจำกัดอุณหภูมิที่ใช้ในการคำนวณ ดังนั้น ค่า GDD รายวันจึงคำนวณได้ตามสมการ

$$GDD = \max\left(\min\left(T_{avg}, T_{upper}\right) - T_{base},\ 0\right)$$

สมการดังกล่าวสะท้อนว่า

(1) หากอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่า Tbase จะไม่เกิดการสะสมหน่วยความร้อน

(2) หากอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่า Tupper จะถูกจำกัดค่าไว้ที่ Tupper เพื่อไม่ให้เกิดการสะสมความร้อนเกินกว่าช่วงที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ค่า GDD รายวันจะถูกสะสมต่อเนื่องเป็นค่า GDD สะสม GDD_{cum} ดังนี้

$$GDD_{cum}(n) = \sum_{i=1}^{n} GDD_i$$

โดยที่ n คือจำนวนวันหลังปลูก การสะสมค่า GDD ดังกล่าวถูกนำมาใช้กำหนดระยะพัฒนาการของพืช และระบุช่วงเวลาที่พืชเข้าสู่ระยะวิกฤตทางสรีรวิทยา

ข้อได้เปรียบสำคัญของแนวคิด GDD คือความสามารถในการสะท้อนความผันแปรของอุณหภูมิในแต่ละปีและแต่ละพื้นที่ หากปีใดมีอุณหภูมิสูงกว่าค่าเฉลี่ย พืชจะสะสมหน่วยความร้อนได้รวดเร็วและเข้าสู่ระยะพัฒนาการถัดไปเร็วกว่าปกติ ในทางกลับกัน หากอุณหภูมิต่ำกว่าค่าเฉลี่ย การพัฒนาจะล่าช้าออกไป แนวคิดนี้จึงเป็นพื้นฐานสำคัญของการวิเคราะห์ช่วงปลูกเชิงภูมิอากาศในงานวิจัยฉบับนี้

1.5.2 แนวคิดการสร้างปีตัวแทนทางภูมิอากาศ (Representative Climatic Year Concept)

การวิเคราะห์หน้าต่างภูมิอากาศ (Climate Window) เพื่อสนับสนุนการกำหนดวันปลูกจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลอุตุนิยมวิทยาระยะยาวเพื่อสะท้อนลักษณะภูมิอากาศโดยรวมของพื้นที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม การใช้ข้อมูลรายวันต่อเนื่องหลายปีโดยตรงอาจก่อให้เกิดความซับซ้อนในการสื่อสารผลลัพธ์ และทำให้การตีความเชิงประยุกต์ในระดับเกษตรกรหรือผู้กำหนดนโยบายทำได้ยาก ดังนั้น

การศึกษานี้จึงประยุกต์แนวคิดการสร้าง “ปีตัวแทนทางภูมิอากาศ” (Representative Climatic Year) ขึ้นเพื่อใช้เป็นฐานวิเคราะห์

ปีตัวแทนทางภูมิอากาศในงานวิจัยนี้ หมายถึง ชุดข้อมูลรายวันจำนวน 365 วัน ซึ่งได้จากการคำนวณค่าเฉลี่ยของตัวแปรอุตุนิยมวิทยารายวันย้อนหลัง 10 ปี (พ.ศ. 2558–2567) สำหรับแต่ละวันตามลำดับวันของปี (Day of Year: DOY) โดยตัวแปรที่นำมาสร้างปีตัวแทน ได้แก่ อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิเฉลี่ย และปริมาณน้ำฝนหรือความน่าจะเป็นของฝน ทั้งนี้ การคำนวณค่า GDD รายวันจะดำเนินการบนชุดข้อมูลปีตัวแทนดังกล่าว

กระบวนการสร้างปีตัวแทนประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ ได้แก่

1. การจัดกลุ่มข้อมูลรายวันตามลำดับวันของปี (DOY 1–365)
2. การคำนวณค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวแปรในแต่ละ DOY จากข้อมูลย้อนหลังหลายปี
3. การจัดเรียงข้อมูลให้เป็นไทม์ไลน์ต่อเนื่อง 365 วัน
4. การทำซ้ำข้อมูลปีตัวแทนเป็น 2 รอบ (two-year timeline) เพื่อรองรับการวิเคราะห์ฤดูปลูกที่คร่อมปีปฏิทิน

แนวคิดดังกล่าวมีพื้นฐานอยู่บนสมมติฐานว่า ค่าเฉลี่ยหลายปีสามารถสะท้อน “สภาพภูมิอากาศปกติ” (Climatological Mean Condition) ของพื้นที่ศึกษาได้ แม้จะไม่แทนเหตุการณ์สุดขั้วในปีใดปีหนึ่งโดยเฉพาะ การใช้ปีตัวแทนจึงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์เชิงวางแผน (Planning-oriented analysis) มากกว่าการพยากรณ์เชิงเหตุการณ์ (Event-specific forecasting)

ข้อดีของแนวทางนี้ ได้แก่

- ลดอิทธิพลของปีสุดขั้ว (Extremely hot/cool year) ต่อผลการวิเคราะห์
- ทำให้การเปรียบเทียบช่วงปลูกต่าง ๆ สามารถดำเนินการบนฐานภูมิอากาศเดียวกัน
- เอื้อต่อการพัฒนาแดชบอร์ดและเครื่องมือเชิงโต้ตอบสำหรับผู้ใช้งาน

อย่างไรก็ตาม ปีตัวแทนไม่สามารถสะท้อนความแปรปรวนรายปี (Interannual variability) หรือเหตุการณ์ผิดปกติรุนแรงได้โดยตรง ดังนั้น ผลลัพธ์จากปีตัวแทนควรถูกตีความในฐานะ “แนวโน้มเชิงภูมิอากาศเฉลี่ย” และอาจต้องใช้การวิเคราะห์เสริมในกรณีที่ต้องการประเมินความเสี่ยงจากเหตุการณ์สุดขั้วโดยเฉพาะ

1.5.3 แนวคิดการวิเคราะห์ช่วงปลูกเชิงอุณหภูมิ (Temperature-based Planting Window Analysis)

การกำหนดช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสม (Planting Window) บนพื้นฐานของอุณหภูมิ มีรากฐานจากหลักสรีรวิทยาพืชที่ระบุว่า การพัฒนาการของพืชขึ้นอยู่กับการสะสมหน่วยความร้อน (GDD) และพืชแต่ละชนิดมีความไวต่ออุณหภูมิสูงแตกต่างกัน โดยเฉพาะในช่วงวิกฤต เช่น ระยะออกดอกหรือผสมเกสร ซึ่งอุณหภูมิสูงเกินค่าขีดวิกฤตอาจส่งผลให้ผลผลิตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

แนวคิดการวิเคราะห์ช่วงปลูกเชิงอุณหภูมิในการศึกษานี้ จึงตั้งอยู่บนหลักการสำคัญ 3 ประการ ได้แก่

1.5.3.1 หลักการสะสมความร้อนเพื่อกำหนดระยะพัฒนาการ

การวิเคราะห์เริ่มจากการสมมติ “วันเริ่มปลูก” (Candidate planting date) สำหรับทุกวันในปี (DOY 1–365) จากนั้นคำนวณค่า GDD สะสมรายวันจากปีตัวแทนทางภูมิอากาศ โดยใช้ค่า Tbase และ Tupper เฉพาะของพืชแต่ละชนิด

เมื่อค่า GDD สะสมถึงค่า threshold ของแต่ละระยะพัฒนาการ (Initial, Development, Mid-season, Late-season หรือ maturity) จะกำหนดวันเปลี่ยนผ่านระยะดังกล่าว วิธีนี้ทำให้สามารถระบุได้ว่า หากปลูกในวันใด พืชจะเข้าสู่ระยะออกดอกหรือเก็บเกี่ยวในช่วงเวลาใดของปีปฏิทิน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ การแปลง “วันปลูก” ให้เป็น “ตำแหน่งของช่วงวิกฤตในปฏิทินปี” ผ่านกลไกของ GDD

1.5.3.2 การระบุช่วงวิกฤตทางอุณหภูมิ (Critical Temperature Window)

หลังจากทราบช่วงเวลาของระยะสำคัญ เช่น ระยะออกดอก การวิเคราะห์จะประเมินความเสี่ยงจากอุณหภูมิสูงในช่วงดังกล่าว โดยกำหนดเกณฑ์อุณหภูมิวิกฤต ไว้ดังนี้

- Tmax > 35°C ในช่วงออกดอกของข้าว
- Tmax > 35°C ในช่วงผสมเกสรของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์
- Tmax > 35°C ในช่วงระยะออกดอกถึงระยะสะสมเมล็ดของทานตะวัน

การวิเคราะห์จะนับจำนวนวันที่อุณหภูมิสูงเกินค่าขีดวิกฤตภายในช่วงเวลานั้น และใช้เป็นตัวชี้วัดความเสี่ยงเชิงอุณหภูมิของวันปลูกแต่ละวัน

1.5.3.3 การเปรียบเทียบวันปลูกในเชิงสัมพัทธ์

เมื่อทำการคำนวณครบทุกวันในปี จะสามารถเปรียบเทียบวันปลูกทั้งหมดภายใต้ฐานภูมิอากาศเดียวกัน (ปีตัวแทน) โดยพิจารณาเกณฑ์ เช่น

- จำนวนวันความร้อนเกินวิกฤตในช่วงสำคัญ
- ค่าอุณหภูมิสูงสุดในช่วง critical window
- ความยาวฤดูปลูกที่เหมาะสม

ผลลัพธ์ที่ได้คือ “ช่วงปลูกเชิงอุณหภูมิที่เหมาะสม” ซึ่งเป็นช่วงวันที่ทำให้พืชผ่านระยะวิกฤตโดยมีความเสี่ยงด้านความร้อนต่ำที่สุด

สำหรับกรอบแนวคิดเชิงตรรกะของการวิเคราะห์ สามารถสรุปกระบวนการเป็นลำดับแนวคิดได้ดังนี้:

1. เลือกวันปลูก (DOY)
2. คำนวณ GDD สะสมรายวัน
3. ระบุวันเริ่มแต่ละระยะพัฒนาการ
4. กำหนดช่วงวิกฤตทางอุณหภูมิ
5. ประเมินความเสี่ยงจากอุณหภูมิสูง
6. จัดอันดับความเหมาะสมของวันปลูก

สำหรับขอบเขตและข้อจำกัดในการศึกษานี้: แนวทางนี้มุ่งเน้น “ความเสี่ยงเชิงอุณหภูมิ” เป็นหลัก และไม่ได้รวมปัจจัยน้ำฝนหรือชลประทานโดยตรงในการคัดเลือกวันปลูก (ซึ่งถูกนำเสนอเป็นข้อมูลประกอบในแดชบอร์ดเพื่อให้ผู้ใช้ตัดสินใจตามบริบทพื้นที่) ดังนั้น ผลการวิเคราะห์จึงสะท้อนความเหมาะสมด้านอุณหภูมิเป็นหลัก

การวิเคราะห์ดังกล่าวเหมาะสำหรับการวางแผนเชิงภูมิอากาศระยะกลาง–ระยะยาว มากกว่าการพยากรณ์เหตุการณ์เฉพาะปี

1.5.4 แนวคิดการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของฝน

ในการศึกษานี้ “ฝน” ถูกนำเสนอในฐานะ ข้อมูลประกอบการตัดสินใจ (decision support) เพื่อให้ผู้ใช้เลือกวันปลูกได้ตามบริบทการจัดการน้ำ/ชลประทานของพื้นที่ โดยไม่ได้ใช้เป็นเกณฑ์หลักในการจัดอันดับช่วงปลูก ซึ่งใช้อุณหภูมิเป็นหลัก ทั้งนี้ได้พัฒนาตัวชี้วัดความน่าจะเป็นจากข้อมูลฝนรายวันย้อนหลังหลายปีให้อยู่ในรูปแบบ “รายวันของปีตัวแทน (DOY 1–365)” เพื่อให้สอดคล้องกับแนวคิดการสร้างปีตัวแทนทางภูมิอากาศ

(1) ความน่าจะเป็นของ “วันฝนถึงเกณฑ์” ราย DOY

นิยามความน่าจะเป็นของฝนรายวันตามลำดับวันของปี (Day of Year: DOY) จากข้อมูลหลายปี โดยคำนวณเป็นสัดส่วนของจำนวนปีที่ “ฝนถึงเกณฑ์” ต่อจำนวนปีที่มีข้อมูลใน DOY นั้น ๆ ตามสมการ

$$\Pr(R \geq r_0)_d = \frac{\#\{y: R_{y,d} \geq r_0\}}{\#\{y: R_{y,d\ \text{มีข้อมูล}}\}}$$

โดย $R_{y,d}$ คือฝนของปี y ใน DOY ที่ d และ r_0 คือค่าฝนเกณฑ์ (มม.) ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้เกณฑ์ r_0 > 1 มม. เป็นตัวแทนวันที่มีฝนตก

การเลือกใช้เกณฑ์ 1 มิลลิเมตร อ้างอิงตามข้อกำหนดมาตรฐานขององค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (WMO) ที่ระบุให้ "จำนวนวันที่มีปริมาณน้ำฝน ≥ 1 mm" เป็นหนึ่งในตัวแปรหลักทางอุตุนิยมวิทยาผิวพื้น (Principal climatological surface parameters) สำหรับการคำนวณและ

รายงานค่าปกติภูมิอากาศ (Climate Normals) เพื่อให้เป็นมาตรฐานสากลในการจำกัดความวันที่มีฝนตก (WMO, 2017)

(2) ความน่าจะเป็นของ “ฝนน้อยกว่าเกณฑ์” (ใช้ทำฝนทิ้งช่วงแบบ probability)

เพื่อสะท้อนความเสี่ยงฝนทิ้งช่วง เรานิยามความน่าจะเป็นราย DOY ของเหตุการณ์ “ฝนน้อยกว่าเกณฑ์” ดังสมการ

$$Pr(R < r0)d \; = \; \frac{\#\{y: R_{y,d} < r_0\}}{\#\{y: R_{y,d \text{ มีข้อมูล}}\}}$$

เพื่อนำไปใช้เป็นเกณฑ์เชิงความน่าจะเป็นเพื่อบอกช่วงเสี่ยงฝนทิ้งช่วงในช่วงการเพาะปลูกที่เลือก

(3) เกณฑ์การนับ “ฝนทิ้งช่วง” แบบความน่าจะเป็นในฤดูปลูก

เมื่อกำหนดวันปลูกแล้ว (และมีวันเก็บเกี่ยวจาก GDD) เราพิจารณาความเสี่ยงฝนทิ้งช่วงในช่วงฤดูปลูกด้วยตรรกะ:

- สร้างตัวแปรตรรกะรายวัน

$$D_t = [\Pr(R < 1 \text{ mm})_t \geq \theta]$$

โดย θ คือเกณฑ์โอกาส “ฝนต่ำกว่า 1 มม.” ที่ถือว่า เสี่ยงแห้ง โดยในการศึกษานี้ตั้งค่า θ ไว้ที่เกณฑ์ความน่าจะเป็น 0.70 โดยเขียนโค้ดให้นับ “เหตุการณ์ฝนทิ้งช่วง” จากความยาวช่วงต่อเนื่องของ D_t เพื่อแสดงบนแดชบอร์ด โดยแบ่งเป็น 2 กรณีสำหรับประกอบการตัดสินใจ คือ

  - เหตุการณ์ที่เสี่ยงแห้ง มากกว่า/เท่ากับ 7 วัน
  - เหตุการณ์ที่เสี่ยงแห้ง มากกว่า/เท่ากับ 15 วัน

1.5.5 แนวคิดระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support System: DSS)

การวิเคราะห์ช่วงปลูกด้วยหน่วยความร้อนสะสม (GDD) และความน่าจะเป็นของฝนในงานวิจัยนี้ ไม่ได้มุ่งเพียงการคำนวณเชิงทฤษฎี แต่พัฒนาให้อยู่ในรูปแบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support System: DSS) เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถประเมินทางเลือกของวันปลูกภายใต้เงื่อนไขภูมิอากาศของพื้นที่ได้อย่างเป็นระบบ

แนวคิดของ DSS ในการศึกษานี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่

1. การใช้ข้อมูลภูมิอากาศระยะยาวในการสร้างปีตัวแทน
2. การประมวลผลด้วยแบบจำลอง GDD และการประเมินความเสี่ยงเชิงอุณหภูมิ
3. การแสดงผลในรูปแบบแดชบอร์ดเชิงโต้ตอบ เพื่อให้ผู้ใช้เลือกวันปลูกและพิจารณาความเสี่ยงได้ด้วยตนเอง

ระบบดังกล่าวใช้ “อุณหภูมิ” เป็นเกณฑ์หลักในการประเมินความเหมาะสม และใช้ “ความน่าจะเป็นของฝน” เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจ โดยไม่ได้กำหนดคำตอบตายตัว แต่แสดงช่วงเวลาที่มีความเสี่ยงต่ำเพื่อสนับสนุนการวางแผนตามบริบทของแต่ละพื้นที่

ดังนั้น แดชบอร์ดที่พัฒนาขึ้นจึงทำหน้าที่เป็นต้นแบบของระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้านการเพาะปลูกเชิงภูมิอากาศ ซึ่งสามารถขยายผลไปยังสถานีอุตุนิยมวิทยาอื่นและพืชชนิดอื่นได้ในอนาคต

1.6 วิธีดำเนินการศึกษาโดยสรุป

การวิเคราะห์หน้าต่างภูมิอากาศของค่าความร้อนสะสม (Growing Degree Days: GDD) เพื่อสนับสนุนการเพาะปลูกข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน: กรณีศึกษาสถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี มีขั้นตอนการดำเนินการโดยสรุป ดังนี้

1.6.1 ศึกษาค้นคว้าแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหน่วยความร้อนสะสม (GDD) การกำหนดระยะพัฒนาการของพืชตามแนวทางสากล ตลอดจนแนวทางการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านอุณหภูมิสูง รวมถึงแนวทางการประยุกต์ใช้ GDD ในการจัดการน้ำและการกำหนดช่วงปลูก

1.6.2 รวบรวมข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวันย้อนหลังอย่างน้อย 10 ปี จากสถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี ประกอบด้วย อุณหภูมิสูงสุดรายวัน อุณหภูมิต่ำสุดรายวัน และปริมาณฝนรายวัน จากนั้นดำเนินการตรวจสอบความครบถ้วนของข้อมูล และประมวลผลเพื่อสร้างปีตัวแทนทางภูมิอากาศแบบ 365 วัน

1.6.3 คำนวณค่า GDD จากค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน โดยกำหนดค่าอุณหภูมิฐาน (Tbase) และค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณ (Tupper) ตามชนิดของพืช จากนั้นทำการสะสมค่า GDD เพื่อกำหนดระยะพัฒนาการของพืชแต่ละชนิดตามค่าเกณฑ์สะสมที่กำหนด

1.6.4 การประเมินช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมผ่านการจำลองวันปลูกตลอดทั้งปี เพื่อประเมินระยะพัฒนาการพืชและวิเคราะห์ความเสี่ยงจากอุณหภูมิวิกฤต โดยพิจารณาจำนวนวันที่อุณหภูมิสูงสุดเกินเกณฑ์ที่กำหนดภายในช่วงสัดส่วนของ GDD สะสม จากนั้นจัดลำดับช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมตามเกณฑ์ความเสี่ยงเชิงอุณหภูมิ

1.6.5 วิเคราะห์รูปแบบปริมาณฝนรายวันในเชิงความน่าจะเป็น เพื่อประเมินโอกาสการเกิดฝนทิ้งช่วงในแต่ละช่วงเวลา โดยนำเสนอผลในฐานะข้อมูลประกอบการตัดสินใจ ทั้งนี้ไม่ได้ใช้เป็นเกณฑ์หลักในการจัดลำดับความเหมาะสมของช่วงปลูก

1.6.6 นำผลการวิเคราะห์มาพัฒนาเป็นต้นแบบแดชบอร์ดของพืชทั้ง 3 ชนิด เพื่อแสดงผลการคำนวณระยะพัฒนาการ ช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสม และข้อมูลความเสี่ยงที่เกี่ยวข้อง โดยออกแบบให้สามารถรองรับข้อมูลจากสถานีอื่น ๆ ได้

1.6.7 สรุปผลการศึกษาและเผยแพร่ข้อมูลผ่านช่องทางโซเชียลมีเดียต่าง ๆ ของส่วนอุตุนิยมวิทยาเกษตร

โดยมีแผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการ ดังภาพที่ 1

ภาพที่ 1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการอย่างละเอียดของการศึกษา (Flow Chart)

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษานี้คาดว่าจะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อกลุ่มผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในหลายระดับ ดังต่อไปนี้

1.7.1 เกษตรกรได้ข้อมูลช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมเชิงอุณหภูมิสำหรับพืชเศรษฐกิจต้นแบบ ได้แก่ ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน พร้อมข้อมูลความเสี่ยงด้านอุณหภูมิสูงในช่วงวิกฤต และความน่าจะเป็นของการเกิดฝนทิ้งช่วง เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจเลือกวันปลูกให้สอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศของพื้นที่และบริบทการจัดการน้ำของตนเอง

1.7.2 ส่วนอุตุนิยมวิทยาเกษตรและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการส่งเสริมการเกษตร ได้กรอบการวิเคราะห์เชิงภูมิอากาศที่ใช้หน่วยความร้อนสะสม (GDD) เป็นฐาน ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางสากลและสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการให้คำแนะนำด้านปฏิทินการปลูกในระดับพื้นที่ได้อย่างมีหลักฐานเชิงวิทยาศาสตร์รองรับ

1.7.3 ผู้กำหนดนโยบายและผู้วางแผนการเกษตรในระดับจังหวัดหรือระดับประเทศ ได้ข้อมูลเชิงวิเคราะห์ที่สามารถใช้ประกอบการกำหนดแนวทางการวางแผนการเพาะปลูก การบริหารจัดการน้ำ และการปรับตัวต่อความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ โดยมีกรอบการประเมินที่เป็นระบบและสามารถขยายผลไปยังพื้นที่อื่น ๆ ได้

1.7.4 กรมอุตุนิยมวิทยาหรือหน่วยงานที่ต้องการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้านการเกษตร ได้ต้นแบบเครื่องมือในรูปแบบแดชบอร์ด พร้อมกรอบแม่แบบเชิงระบบ (Modular Agro-Climatological Framework) ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสถานีอุตุนิยมวิทยาและพืชชนิดอื่น ๆ ได้

2. ข้อมูลและวิธีดำเนินการ

การศึกษาครั้งนี้ดำเนินการโดยรวบรวมและตรวจสอบคุณภาพข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวันย้อนหลังไม่น้อยกว่า 10 ปี เพื่อนำมาสร้างชุดข้อมูลปีตัวแทนจากค่าเฉลี่ยแทนการวิเคราะห์รายปีและใช้คำนวณค่า Growing Degree Days (GDD) สำหรับกำหนดระยะพัฒนาการของข้าว (ปทุมธานี 1) ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน จากนั้นบูรณาการการวิเคราะห์หน้าต่างเสี่ยงอุณหภูมิแบบ fraction-based ร่วมกับการประเมินความน่าจะเป็นของฝนและเหตุการณ์ฝนทิ้งช่วง เพื่อพัฒนากรอบการวิเคราะห์ช่วงปลูกที่เหมาะสมเชิงภูมิอากาศและต้นแบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่สามารถขยายผลได้ในระดับประเทศ โดยมีรายละเอียดข้อมูลและขั้นตอนการวิเคราะห์ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวันตรวจวัดจริง (Observed Data) จากสถานีตรวจอากาศลพบุรี ของกรมอุตุนิยมวิทยา โดยกำหนดช่วงเวลาศึกษาครอบคลุมระยะเวลา 10 ปี ระหว่างปี พ.ศ. 2558–2567 (ค.ศ. 2015–2024) ทั้งนี้เพื่อให้ข้อมูลสามารถสะท้อนลักษณะภูมิอากาศปัจจุบันที่มีผลต่อการผลิตทางการเกษตรได้อย่างเหมาะสม ระยะเวลาดังกล่าวถือว่าเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเชิงภูมิอากาศและลักษณะความแปรปรวนทางสถิติ อีกทั้งช่วยลดอิทธิพลของข้อมูลในอดีตที่อาจไม่สอดคล้องกับบริบทการเปลี่ยนแปลงและความแปรปรวนของภูมิอากาศในปัจจุบัน

ตัวแปรหลักที่ใช้ในการคำนวณและประเมินความเหมาะสมของช่วงปลูก ประกอบด้วย อุณหภูมิสูงสุดรายวัน (Tmax) อุณหภูมิต่ำสุดรายวัน (Tmin) และปริมาณฝนรายวัน (Rain) ซึ่งเป็นตัวแปรพื้นฐานสำหรับการคำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน (Tavg) การคำนวณหน่วยความร้อนสะสม (GDD) และการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านปริมาณฝนเชิงความน่าจะเป็นในขั้นตอนถัดไปของการศึกษา

2.2 วิธีการดำเนินการศึกษา

วิธีการดำเนินการศึกษาแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอนหลัก โดยเริ่มจากการเตรียมข้อมูลและการควบคุมคุณภาพ การกำหนดกรอบแนวคิดเชิงทฤษฎีของการวิเคราะห์หน่วยความร้อนสะสม (Growing Degree Days: GDD) และการนิยามระยะพัฒนาการของพืช จากนั้นสร้างปีตัวแทนเชิงภูมิอากาศเพื่อใช้เป็นฐานในการสแกนวันปลูกตลอดทั้งปี แล้วคำนวณการสะสมหน่วยความร้อนและกำหนดจุดสิ้นสุดของแต่ละระยะพัฒนาการสำหรับพืชทั้งสามชนิด ขั้นตอนถัดมาคือการประเมินความเสี่ยงด้านอุณหภูมิด้วยแนวคิดหน้าต่างวิกฤตแบบสัดส่วนของฤดู (fraction-based heat-sensitive window) ควบคู่กับการวิเคราะห์ฝนเชิงความน่าจะเป็นและเหตุการณ์ฝนทิ้งช่วง ก่อนนำตัวชี้วัด

ทั้งหมดเข้าสู่กระบวนการจัดลำดับความเหมาะสมของช่วงปลูกตามเกณฑ์เฉพาะของแต่ละพืช และสุดท้ายพัฒนาเป็นระบบต้นแบบเชิงปฏิบัติการในรูปแบบแดชบอร์ดเพื่อรองรับการประยุกต์ใช้จริงและการขยายผลไปสู่สถานีอื่นๆทั่วประเทศ

2.2.1 การเตรียมข้อมูลและการควบคุมคุณภาพ

2.2.1.1 การเตรียมและตรวจสอบความครบถ้วนของข้อมูล

ข้อมูลรายวันถูกจัดโครงสร้างใหม่ให้อยู่ในรูปแบบชุดข้อมูลเวลา (time series) โดยกำหนดดัชนีวันที่ (Date index) และจัดเรียงลำดับเวลาอย่างต่อเนื่อง จากนั้นทำการสร้างลำดับวันเต็ม (daily continuous index) ตั้งแต่วันแรกถึงวันสุดท้ายของช่วงศึกษา และทำการ reindex เพื่อเติมวันขาดหายให้อยู่ในชุดข้อมูลเดียวกัน

ค่าที่ขาดหาย (missing values) รวมถึงรหัสข้อมูลขาด เช่น -99 และ -999 ถูกแปลงเป็นค่า NaN อย่างเป็นระบบ และมีการกำหนดตัวแปรสถานะ (flag) เพื่อบันทึกสภาพข้อมูลแต่ละวัน เช่น “MISSING” สำหรับค่าที่ไม่ปรากฏจริงในข้อมูลต้นทาง ทั้งนี้สำหรับตัวแปรอุณหภูมิ มีการเติมค่าที่ขาดหายด้วยวิธี interpolation ตามลำดับเวลา เพื่อให้ข้อมูลมีความต่อเนื่องสำหรับการคำนวณ GDD ขณะที่ข้อมูลปริมาณฝนไม่ได้ถูกปรับค่าด้วยวิธี interpolation แต่อย่างใด

สัดส่วนข้อมูลที่ขาดหายถูกเก็บรักษาไว้ในชุดข้อมูลผลลัพธ์ และนำไปพิจารณาในการตีความผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

2.2.1.2 การตรวจสอบค่าผิดปกติและความสอดคล้องเชิงตรรกะของข้อมูล (Outlier and Logical Checks)

มีการกำหนดช่วงค่าที่เป็นไปได้ทางกายภาพ (physical plausibility range) สำหรับตัวแปรอุณหภูมิและปริมาณฝน โดยดำเนินการดังนี้

1. ตรวจสอบช่วงค่าอุณหภูมิ โดยค่าอุณหภูมิสูงสุด (Tmax) อยู่นอกช่วง -5 ถึง 50°C ถูกกำหนดสถานะเป็น “OUT_RANGE” เช่นเดียวกับอุณหภูมิต่ำสุด (Tmin) ที่อยู่นอกช่วง -10 ถึง 40°C ถูกกำหนดสถานะเป็น “OUT_RANGE” ซึ่งค่าดังกล่าวไม่ได้ถูกลบออกโดยอัตโนมัติ แต่มีการติดธง (flag) ไว้เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์คุณภาพข้อมูล

2. ตรวจสอบตรรกะพื้นฐานของอุณหภูมิ โดยมีเงื่อนไขว่า Tmax ≥ Tmin เสมอ หากพบกรณี Tmax < Tmin ระบบจะทำการสลับค่าโดยอัตโนมัติ และบันทึกหมายเหตุการปรับแก้ไว้ในตัวแปรเฉพาะเพื่อให้สามารถตรวจสอบย้อนหลังได้

3. ตรวจสอบค่าฝนรายวัน โดยหากค่าฝนติดลบจะถูกปรับเป็นศูนย์ (0 มม.) และบันทึกสถานะ “NEGATIVE_SET_TO_ZERO” สำหรับค่าฝนที่ขาดหายจะถูกกำหนดสถานะ “MISSING”

ภายหลังการตรวจสอบและปรับแก้เชิงตรรกะแล้ว จึงคำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน Tmean จากค่า Tmax และ Tmin ที่ผ่านการควบคุมคุณภาพแล้ว กระบวนการดังกล่าวช่วยให้ข้อมูลที่นำเข้าสู่ขั้นตอนการสร้างปีตัวแทนทางภูมิอากาศ และการคำนวณ GDD มีความต่อเนื่องสอดคล้องเชิงตรรกะ และลดผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของข้อมูลต้นทาง โดยยังคงรักษาความโปร่งใสและสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ในทุกขั้นตอน

2.2.2 การสร้างปีตัวแทนเชิงภูมิอากาศ (Mean-Year 365-day Climatology)

การสร้างปีตัวแทนเชิงภูมิอากาศดำเนินการโดยแปลงข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวันหลายปีให้เป็นชุดข้อมูลตัวแทนจำนวน 365 วัน (Day of Year: DOY 1–365) เพื่อสะท้อนลักษณะเฉลี่ยเชิงภูมิอากาศระยะยาวของพื้นที่ศึกษา โดยทำการจัดกลุ่มข้อมูลตามลำดับวันในปี (DOY) จากทุกปีในช่วงศึกษา แล้วคำนวณค่าสถิติรายวัน เช่น ค่าเฉลี่ยราย DOY ของอุณหภูมิสูงสุด (Tmax) และอุณหภูมิต่ำสุด (Tmin) เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่า GDD ในขั้นตอนถัดไป สำหรับปริมาณฝนจะ คำนวณทั้งค่าเฉลี่ยและความถี่ของวันฝนตก เพื่อใช้ในการประเมินความเสี่ยงด้านฝนในเชิงความน่าจะเป็น ทั้งนี้เพื่อให้ปีตัวแทนดังกล่าวสามารถใช้เป็นฐานในการสแกนวันปลูกตลอด 365 วันภายใต้กรอบการวิเคราะห์เชิงภูมิอากาศ

สำหรับการจัดการวันอธิกสุรทิน (29 กุมภาพันธ์) กำหนดให้ตัดวันดังกล่าวออกจากชุดข้อมูล และปรับการจัดเรียงวันในปีให้เหลือ 365 วันอย่างสอดคล้องกันทุกปี เพื่อให้โครงสร้าง DOY มีความสม่ำเสมอ และไม่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่าเฉลี่ยรายวันหรือการสะสมหน่วยความร้อนในขั้นตอนการวิเคราะห์ถัดไป

2.2.3 หลักการคำนวณหน่วยความร้อนสะสม

2.2.3.1 นิยามและหลักการคำนวณ

การศึกษานี้ใช้แนวคิด Modified Growing Degree Day (GDD) เพื่อประเมินการสะสมหน่วยความร้อนที่พืชได้รับในแต่ละวัน โดยคำนวณจากค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน ซึ่งได้จากค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุดรายวัน ทั้งนี้มีการกำหนดเพดานอุณหภูมิสูงสุด (Tupper cap) เพื่อจำกัดผลของอุณหภูมิที่สูงเกินช่วงการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืช และกำหนดค่าอุณหภูมิฐาน (Tbase) ซึ่งเป็นระดับอุณหภูมิต่ำสุดที่พืชเริ่มมีการเจริญเติบโต

ค่าหน่วยความร้อนรายวันจะถูกนับเฉพาะในกรณีที่อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่เหนือค่าอุณหภูมิฐาน และไม่เกินเพดานอุณหภูมิสูงสุด โดยค่าพารามิเตอร์ Tbase และ Tupper ถูกกำหนดแตกต่างกันตามชนิดพืชและพันธุ์ที่ศึกษา เพื่อสะท้อนลักษณะการตอบสนองต่ออุณหภูมิของพืชแต่ละชนิดตามกรอบทฤษฎีที่กำหนดไว้ในการศึกษานี้ โดยได้กำหนดอุณหภูมิฐาน (Tbase) และอุณหภูมิ

สูงสุด (Tupper) ของพืชแต่ละชนิดโดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ เบ็ญญา เจมิทำ และคณะ (2564) และ Paredes et al. (2025) ไว้ดังนี้

ตารางที่ 1 ค่าอุณหภูมิฐาน (Tbase) และอุณหภูมิสูงสุด (Tupper) ของข้าวปทุมธานี 1 ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และทานตะวัน

	อุณหภูมิฐาน (°C)	**อุณหภูมิสูงสุด (°C)**
ข้าวปทุมธานี 1	10	30
ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	10	32
ทานตะวัน	8	30

2.2.3.2 การคำนวณหน่วยความร้อนสะสม (Cumulative GDD)

ภายหลังการคำนวณหน่วยความร้อนรายวันแล้ว จะทำการสะสมค่า GDD ต่อเนื่องนับจากวันปลูกที่กำหนด (DOY ปลูก) ไปข้างหน้าในปีตัวแทนเชิงภูมิอากาศ (Mean-Year) จนกระทั่งค่าหน่วยความร้อนสะสมถึงเกณฑ์ที่กำหนดสำหรับสิ้นสุดฤดู หรือครบระยะพัฒนาการสุดท้ายของพืชแต่ละชนิด โดยกระบวนการสะสมหน่วยความร้อนดังกล่าวจะใช้เป็นกลไกหลักในการกำหนดจุดสิ้นสุดของแต่ละระยะพัฒนาการ (stage endpoints) และใช้เป็นฐานในการนิยามหน้าต่างวิกฤตด้านอุณหภูมิแบบ fraction-based ในขั้นตอนการวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงภูมิอากาศต่อไป

2.2.4 การกำหนดระยะพัฒนาการของพืชด้วยหน่วยความร้อนสะสม

การกำหนดระยะพัฒนาการของพืชในงานวิจัยนี้อาศัยแนวคิดการสะสมหน่วยความร้อน (GDD) เป็นกลไกหลักในการอธิบายการเจริญเติบโตเชิงอุณหภูมิ โดยกำหนดเกณฑ์หน่วยความร้อนสะสมสำหรับสิ้นสุดแต่ละระยะพัฒนาการ (stage endpoints) ตามลักษณะเฉพาะของพืชแต่ละชนิด ทั้งนี้เพื่อให้การวิเคราะห์ช่วงปลูกมีความสอดคล้องกับสรีรวิทยาการเจริญเติบโตของพืช และสามารถเชื่อมโยงกับการประเมินความเสี่ยงด้านอุณหภูมิและฝนในช่วงวิกฤตได้อย่างเป็นระบบ

2.2.4.1 ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1

การวิเคราะห์ระยะพัฒนาการของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 อาศัยแนวคิดการกำหนดระยะการเจริญเติบโตโดยใช้เกณฑ์ค่าความร้อนสะสม (Stage-based GDD thresholds) ซึ่งแบ่งช่วงการเจริญเติบโตออกเป็นระยะสำคัญตามลำดับพัฒนาการทางสรีรวิทยา ได้แก่ ระยะแตกกอสูงสุด (Maximum tillering) ระยะกำเนิดช่อดอก (Panicle initiation) ระยะออกดอก 50% (50% flowering) และระยะสุกแก่ (Maturity) (เบ็ญญา เจมิทำ และคณะ, 2564) ทั้งนี้ จุดสิ้นสุดของแต่ละ

ระยะจะถูกกำหนดโดยใช้ค่าความร้อนสะสม (Cumulative GDD) ที่คำนวณต่อเนื่องตั้งแต่วันปลูกจนบรรลุตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในกรอบพารามิเตอร์ของการวิจัย (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ค่าหน่วยความร้อนสะสม (GDD) สำหรับระยะพัฒนาการของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 จำแนกตามวิธีการปลูก

วิธีการปลูก	แตกกอสูงสุด	สร้างช่อดอก	ดอกบาน 50%	สุกแก่/เก็บเกี่ยว
นาดำ	675	813.5	1,308.00	1,903.50
นาหยอด	813.5	940.5	1,544.50	2,184.50
นาหว่าน	813.5	940.5	1,607.00	2,229.00

ในด้านการประยุกต์ใช้เชิงปฏิบัติ มีการพิจารณารูปแบบการปลูก ได้แก่ นาดำ นาหยอด และนาหว่าน เพื่อใช้ประกอบการตีความผลลัพธ์และจัดทำคำอธิบายเชิงปฏิบัติการ (narrative layer) อย่างไรก็ตาม โครงสร้างการคำนวณ GDD และเกณฑ์ระยะพัฒนาการยังคงใช้กรอบเดียวกันเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบช่วงปลูกในเชิงภูมิอากาศได้อย่างเป็นมาตรฐาน

2.2.4.2 ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (พันธุ์เบาและพันธุ์หนัก)

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์กำหนดระยะพัฒนาการตามกรอบ FAO stages (Paredes et al., 2025)ได้แก่ Initial, Development, Mid และ Late โดยใช้ค่า GDD สะสมในแต่ละช่วงเป็นเกณฑ์กำหนดจุดสิ้นสุดของแต่ละระยะอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันปลูกจนสิ้นสุดฤดู โดยแบ่งระยะตามชนิดพันธุ์ โดยแบ่งออกเป็น พันธุ์เบา (short season) และพันธุ์หนัก (long season) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าหน่วยความร้อนสะสม (GDD) สำหรับระยะพัฒนาการของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จำแนกตามชนิดพันธุ์

สายพันธุ์	ระยะที่ 1 ระยะต้น	ระยะที่ 2 ระยะพัฒนา	ระยะที่ 3 ระยะกลางฤดู	ระยะที่ 4 ระยะปลายฤดู	GDD รวม
พันธุ์เบา	200	380	500	340	1420
พันธุ์หนัก	295	420	775	465	1955

2.2.4.3 ทานตะวัน (พันธุ์เบาและพันธุ์หนัก)

ทานตะวันแบ่งระยะพัฒนาการตามกรอบ FAO stages เช่นเดียวกับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยกำหนดค่า GDD สะสมในแต่ละช่วงสำหรับกำหนดจุดสิ้นสุดของแต่ละระยะตามชนิดพันธุ์ (พันธุ์เบาและพันธุ์หนัก) ซึ่งมีความต้องการหน่วยความร้อนรวมแตกต่างกัน

ตารางที่ 4 ค่าหน่วยความร้อนสะสม (GDD) สำหรับระยะพัฒนาการของทานตะวัน จำแนกตามชนิดพันธุ์

สายพันธุ์	ระยะที่ 1 ระยะต้น	ระยะที่ 2 ระยะพัฒนา	ระยะที่ 3 ระยะกลางฤดู	ระยะที่ 4 ระยะปลายฤดู	GDD รวม
พันธุ์เบา	345	555	715	175	1790
พันธุ์หนัก	385	570	685	265	1905

การกำหนดนิยามระยะพัฒนาการดังกล่าวทำให้กรอบการวิเคราะห์สามารถเชื่อมโยงการสะสมหน่วยความร้อนเข้ากับความเสี่ยงด้านอุณหภูมิและฝนได้อย่างเป็นระบบ และเป็นพื้นฐานสำคัญของการพัฒนาแบบจำลองเชิงภูมิอากาศและระบบสนับสนุนการตัดสินใจในระดับปฏิบัติการต่อไป

2.2.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ช่วงปลูกที่เหมาะสม (Planting-Date Scan)

การวิเคราะห์ช่วงปลูกที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ใช้แนวทางการตรวจสอบวันปลูกตลอดทั้งปีภายใต้ปีตัวแทนเชิงภูมิอากาศ (Mean-Year 365-day Climatology) เพื่อประเมินผลลัพธ์เชิงอุณหภูมิและความเสี่ยงต่อพืชในลักษณะเป็นระบบเดียวกันทุกวันปลูก วิธีการดังกล่าวทำให้สามารถเปรียบเทียบช่วงปลูกต่าง ๆ บนฐานภูมิอากาศเดียวกัน และลดอิทธิพลจากความผันผวนรายปี

2.2.5.1 การตรวจสอบวันปลูกที่เหมาะสมที่สุด (Planting-Date Scan)

กระบวนการเริ่มจากการกำหนดวันปลูกสมมติ (Planting Date) ตั้งแต่ DOY 1 ถึง DOY 365 บนชุดข้อมูลปีตัวแทนเชิงภูมิอากาศ โดยถือว่าวันปลูกแต่ละวันเป็นจุดเริ่มต้นของการสะสมหน่วยความร้อนและการเจริญเติบโตของพืช

สำหรับแต่ละ DOY ที่ถูกกำหนดเป็นวันปลูก จะเกิดเส้นทางการเจริญเติบโตเชิงภูมิอากาศ (climatological growth trajectory) หนึ่งเส้น ซึ่งแสดงการสะสมหน่วยความร้อนรายวันตามลำดับเวลา พร้อมทั้งลักษณะอุณหภูมิและฝนที่พืชจะเผชิญตลอดฤดูปลูก เส้นทางดังกล่าวเป็นผลลัพธ์จากปีตัวแทนเชิงภูมิอากาศ ไม่ใช่ปีจริงใดปีหนึ่ง ทำให้สามารถใช้วิเคราะห์แนวโน้มเชิงสถิติของความเหมาะสมช่วงปลูกได้อย่างเป็นระบบ

2.2.5.2 การกำหนดจุดสิ้นสุดระยะพัฒนาการด้วยเกณฑ์ GDD (Stage Endpoints)

สำหรับแต่ละวันปลูกที่ถูกสแกน จะดำเนินการคำนวณค่า GDD รายวันจากข้อมูล Mean-Year และทำการสะสมค่าอย่างต่อเนื่องนับจากวันปลูกเป็นต้นไป กระบวนการสะสมหน่วยความร้อนจะดำเนินไปจนถึงค่าหน่วยความร้อนรวมครบตามเกณฑ์สิ้นสุดฤดู หรือครบระยะพัฒนาการสุดท้ายของพืช

เมื่อค่า GDD สะสมถึงค่าที่กำหนดเป็นเกณฑ์ของแต่ละระยะการเจริญเติบโต จะกำหนดให้วันดังกล่าวเป็นวันสิ้นสุดของระยะนั้น จากนั้นจึงบันทึกวันเริ่มต้นและวันสิ้นสุดของแต่ละระยะ เพื่อสร้างลำดับเวลาการเจริญเติบโตของพืชภายใต้วันปลูกนั้น ๆ

ผลลัพธ์ที่ได้คือชุดข้อมูลลำดับเวลา (phenological timeline) ซึ่งระบุช่วง DOY ของแต่ละระยะพัฒนาการอย่างชัดเจน และใช้เป็นฐานสำหรับการประเมินความเสี่ยงด้านอุณหภูมิและฝนในขั้นตอนถัดไป

2.2.5.3 การคำนวณความเสี่ยงช่วงร้อนแบบ Fraction-Based

ภายหลังการคำนวณค่า GDD สะสมของแต่ละวันปลูกแล้ว จะทำการแปลงค่า GDD สะสมให้อยู่ในรูปสัดส่วนความก้าวหน้าของฤดูปลูก (ร้อยละ 0–100 ของหน่วยความร้อนสะสมรวมทั้งฤดู) เพื่อใช้เป็นแกนกลางในการนิยามช่วงวิกฤตด้านอุณหภูมิในลักษณะ fraction-based ซึ่งช่วยให้สามารถเปรียบเทียบพืชที่มีความยาวฤดูแตกต่างกันได้บนมาตรฐานเดียวกัน และลดข้อจำกัดของการกำหนดช่วงวิกฤตด้วยวันตามปฏิทิน

สำหรับพืชทั้งสามชนิดที่ศึกษา ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 มีการกำหนดระยะพัฒนาการและจุดออกดอกที่ชัดเจนในกรอบ stage-based phenology ตามที่รายงานไว้ในงานวิจัยก่อนหน้า จึงสามารถใช้ค่า GDD สะสม ณ จุดสิ้นสุดของแต่ละระยะ โดยเฉพาะระยะออกดอกซึ่งเป็นช่วงวิกฤตด้านอุณหภูมิได้โดยตรง และทำการประเมินจำนวนวันเสี่ยงจากอุณหภูมิสูงภายในช่วงดังกล่าว อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สอดคล้องกับแนวคิด fraction-based phenology ที่ใช้ในการเปรียบเทียบข้ามพืช ช่วงระยะดังกล่าวจึงถูกแปลงเป็นสัดส่วนของ GDD สะสมทั้งฤดู โดยค่าที่คำนวณได้แสดงว่าระยะออกดอกอยู่ที่ประมาณ 0.69 ของฤดูปลูก ดังนั้น ในการวิเคราะห์จึงกำหนดช่วงอ่อนไหวต่อความร้อนของข้าวให้อยู่ในช่วงประมาณ 57–70% ของ GDD สะสม ซึ่งครอบคลุมระยะตั้งท้องถึงระยะออกดอก อันเป็นช่วงวิกฤตต่ออุณหภูมิสูง

ในทางตรงกันข้าม ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และทานตะวันซึ่งแบ่งระยะพัฒนาการตามกรอบ FAO (Initial–Development–Mid–Late) มิได้ระบุจุดออกดอกในรูปค่าหน่วยความร้อนสะสมที่จำเพาะ ทำให้ไม่สามารถกำหนดช่วงวิกฤตจากจุดสิ้นสุดของระยะการเจริญเติบโตได้โดยตรงเหมือนในกรณีของข้าว งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้แนวคิด fraction-based heat-sensitive window โดย

กำหนดช่วงวิกฤตจากสัดส่วนของหน่วยความร้อนสะสมทั้งฤดูแทน สำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ กำหนดช่วงร้อยละ 30–50 ของ GDD รวม ซึ่งครอบคลุมช่วงปลายการเจริญทางลำต้นจนถึงระยะผสมเกสร อันเป็นช่วงที่การสร้างเกสรและการกำหนดจำนวนเมล็ดมีความไวต่อความร้อนสูง ส่วนทานตะวันกำหนดช่วงร้อยละ 45–70 ของ GDD รวม เนื่องจากระยะออกดอกและการติดเมล็ดเกิดค่อนไปทางกลางถึงปลายฤดู และความเครียดจากอุณหภูมิสูงในช่วงดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อการติดเมล็ด ขนาดเมล็ด และปริมาณน้ำมัน

ตารางที่ 5 ช่วงวิกฤตต่ออุณหภูมิ (Heat-sensitive window) ของพืชแต่ละชนิดในรูปของสัดส่วนหน่วยความร้อนสะสม

ชนิดพืช	**Heat-sensitive window**	**ระยะพัฒนาการ**
ข้าวพันธุ์ปทุมธานี1	57–70% GDD	ระยะออกดอก
ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	30–50% GDD	ระยะออกช่อดอกตัวผู้ถึงไหมข้าวโพด
ทานตะวัน	45–70% GDD	ระยะออกดอกถึงเริ่มติดเมล็ด

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่าพืชทั้งข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน มีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิสูงในช่วงระยะสืบพันธุ์ โดยค่าที่ก่อให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อการผสมเกสรและการพัฒนาเมล็ดมักอยู่ในช่วงประมาณ 33–40°C ดังนั้นการศึกษานี้จะทำการประเมินความเสี่ยงด้านความร้อนโดยใช้เกณฑ์อุณหภูมิสูงสุดรายวันมากกว่า 35°C เป็นตัวชี้วัดหลักของภาวะเครียดจากความร้อน (heat stress threshold) โดยนับจำนวนวันที่ Tmax > 35°C ภายในช่วงวิกฤตที่กำหนดเป็นตัวบ่งชี้ระดับความเสี่ยงของแต่ละวันปลูก เนื่องจากเป็นค่ากลางที่สามารถแทนระดับความเครียดจากความร้อนที่มีนัยสำคัญทางสรีรวิทยาได้ และเอื้อต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบประเมินความเสี่ยงเชิงปฏิบัติ ทั้งนี้อุณหภูมิระดับดังกล่าวเป็นระดับที่มีหลักฐานเชิงสรีรวิทยาว่าสามารถส่งผลกระทบต่อกระบวนการออกดอก การผสมเกสร และการกำหนดผลผลิตของพืชหลายชนิดในเขตร้อน

นอกจากจำนวนวันร้อนดังกล่าวแล้ว ยังพิจารณาตัวชี้วัดเสริม ได้แก่ จำนวนวันที่อุณหภูมิสูงสุดมากกว่า 40°C ซึ่งสะท้อนเหตุการณ์ร้อนจัด (extreme heat events) ตลอดจนค่าอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยและค่าสูงสุดสัมบูรณ์ภายในหน้าต่างวิกฤต เพื่อใช้ประกอบการตีความระดับความรุนแรงของความเครียดจากอุณหภูมิ ทั้งหมดนี้ถูกนำไปบูรณาการร่วมกับการวิเคราะห์ฝนเชิงความน่าจะเป็นเพื่อจัดลำดับความเหมาะสมของช่วงปลูกในระดับฤดูปลูกอย่างเป็นระบบ

2.2.5.4 การคำนวณความเสี่ยงต่อปริมาณฝนในช่วงเก็บเกี่ยวของทานตะวัน

ในกรณีของทานตะวัน ได้กำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมด้านฝนในช่วงปลายฤดู ซึ่งแตกต่างจากข้าวและข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยทำการประเมินความน่าจะเป็นของฝนในระยะสุกแก่ และ

ใช้เป็นตัวกรองในการจัดลำดับความเหมาะสมของช่วงปลูก ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะทางสรีรวิทยาและระบบการเก็บเกี่ยวของทานตะวันมีความอ่อนไหวต่อความชื้นในช่วงปลายฤดูมากกว่าพืชสองชนิดแรก

โดยทั่วไป ความเครียดจากอุณหภูมิสูงในช่วงออกดอกถึงติดเมล็ด (heat stress) ส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการผสมเกสร การพัฒนาเกสรตัวผู้–ตัวเมีย และการกำหนดจำนวนเมล็ด ซึ่งมีผลต่อ “จำนวนเมล็ดต่อช่อ” และผลผลิตเชิงปริมาณของพืช อย่างไรก็ตาม สำหรับทานตะวัน ความเสี่ยงไม่ได้จำกัดเฉพาะจำนวนเมล็ดเท่านั้น เนื่องจากในช่วงสุกแก่ก่อนเก็บเกี่ยว ความชื้นและฝนที่เกิดขึ้นสามารถส่งผลกระทบต่อ “คุณภาพเมล็ด” และ “ปริมาณน้ำมัน” อย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดเชื้อรา การงอกในช่อ และความเสียหายระหว่างการเก็บเกี่ยว

ดังนั้น แบบจำลองสำหรับทานตะวันในงานวิจัยนี้จึงประเมินทั้งความเสี่ยงเชิงปริมาณ (quantity risk) จาก heat stress ในช่วงวิกฤต และความเสี่ยงเชิงคุณภาพ (quality risk) จากฝนในช่วงปลายฤดู โดยได้นำปริมาณฝนสะสมเฉลี่ยในช่วงระยะสุกแก่มาใช้เป็นเกณฑ์เพื่อจัดอันดับช่วงปลูกที่เหมาะสม

ในทางตรงกันข้าม ข้าวและข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในกรอบการศึกษานี้เน้นการประเมินผลกระทบของความร้อนต่อกระบวนการกำหนดผลผลิตเป็นหลัก และมีความยืดหยุ่นต่อความชื้นในช่วงใกล้เก็บเกี่ยวมากกว่า จึงไม่ได้กำหนดเงื่อนไขฝนช่วงปลายฤดูเป็นตัวกรองหลักในการจัดลำดับช่วงปลูก

การกำหนดเงื่อนไขเฉพาะสำหรับทานตะวันดังกล่าวจึงสะท้อนความแตกต่างเชิงสรีรวิทยาและเชิงระบบการผลิตของพืชแต่ละชนิด และช่วยให้กรอบการประเมินความเหมาะสมของช่วงปลูกมีความสอดคล้องกับความเสี่ยงที่แท้จริงในภาคปฏิบัติ

2.2.6 การวิเคราะห์ฝนเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic Rainfall Layer)

การวิเคราะห์ฝนในงานวิจัยนี้ดำเนินการในลักษณะเชิงความน่าจะเป็น เพื่อสะท้อนความเสี่ยงด้านน้ำที่พืชอาจเผชิญในแต่ละช่วงพัฒนาการ ภายใต้กรอบปีตัวแทนเชิงภูมิอากาศ โดยเริ่มจากการคำนวณตัวชี้วัดพื้นฐาน ได้แก่ ปริมาณฝนสะสม รวมถึงจำนวนวันฝนตกซึ่งกำหนดเกณฑ์วันฝนตกตามมาตรฐานที่ใช้ เช่น ปริมาณฝนรายวันตั้งแต่ 1 มิลลิเมตรขึ้นไป ทั้งนี้เพื่อสะท้อนทั้งปริมาณน้ำรวมและความถี่ของเหตุการณ์ฝน

ในระดับความเสี่ยงเชิงสถิติ ได้กำหนดเงื่อนไขความน่าจะเป็นของฝนต่ำ (dry probability) โดยประเมินความน่าจะเป็นที่ปริมาณฝนต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดภายในช่วงเวลาหรือระยะพัฒนาการที่สนใจ เช่น ความน่าจะเป็นที่ฝนรายวันต่ำกว่าค่าหนึ่ง หรือฝนสะสมในช่วง k วันต่ำกว่าค่าที่กำหนด หากค่าความน่าจะเป็นดังกล่าวสูงกว่าระดับเกณฑ์ เช่น ร้อยละ 70 จะถือว่าเป็นภาวะเสี่ยงด้านการขาดน้ำ

นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์เหตุการณ์ฝนทิ้งช่วง (dry spell events) โดยตรวจนับช่วงเวลาต่อเนื่องที่ไม่มีฝนตกตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้เกินระยะเวลาหนึ่ง เช่น มากกว่า 7 วัน หรือ

มากกว่า 15 วัน แล้วสรุปเป็นความถี่หรือความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวภายในช่วงวิกฤตของพืช เช่น ระยะงอก–ตั้งตัว หรือช่วงปลายฤดูของทานตะวัน การวิเคราะห์ในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถประเมินความเสี่ยงด้านน้ำได้ทั้งในมิติของปริมาณรวม ความถี่ และความต่อเนื่องของการขาดฝน และนำไปบูรณาการร่วมกับตัวชี้วัดด้านอุณหภูมิในการประเมินความเหมาะสมของช่วงปลูกอย่างเป็นระบบ

2.2.7 การจัดลำดับความเหมาะสมของช่วงปลูก (Suitability Ranking)

ภายหลังจากการคำนวณตัวชี้วัดด้านอุณหภูมิและฝนสำหรับแต่ละวันปลูกแล้ว จะดำเนินการจัดลำดับความเหมาะสมของช่วงปลูกโดยใช้กรอบการประเมินแบบหลายเกณฑ์ ซึ่งผนวก 2 มิติหลัก ได้แก่ (1) ความเสี่ยงด้านอุณหภูมิในช่วงวิกฤต และ (2) ความเสี่ยงด้านฝนเชิงความน่าจะเป็น ทั้งนี้ หลักเกณฑ์และลำดับความสำคัญในการจัดอันดับถูกออกแบบให้สอดคล้องกับลักษณะทางสรีรวิทยาและระบบการผลิตของพืชแต่ละชนิด เพื่อสะท้อนความเสี่ยงที่มีผลต่อผลผลิตจริงอย่างเหมาะสม

สำหรับข้าวและข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ การจัดลำดับช่วงปลูกที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้พิจารณาความเสี่ยงด้านอุณหภูมิเป็นหลัก โดยไม่ใช้เงื่อนไขฝนเป็นตัวกรองโดยตรง ขณะที่ทานตะวันมีการพิจารณาทั้งความเสี่ยงจากความร้อนและเงื่อนไขด้านฝนช่วงปลายฤดูร่วมกัน

2.2.7.1 ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1

สำหรับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 การจัดลำดับเน้นความเสี่ยงจากความร้อนในช่วงดอกบานตามที่กำหนดจากระยะพัฒนาการแบบอิงหน่วยความร้อนสะสม โดยใช้จำนวนวันที่อุณหภูมิสูงสุดเกิน 35 องศาเซลเซียสในช่วงดอกบานเป็นตัวชี้วัดหลัก ช่วงปลูกที่มีจำนวนวันร้อนน้อยกว่าจะได้รับการจัดอันดับดีกว่า

ในลำดับถัดไป จะพิจารณาระยะเวลาตั้งแต่วันปลูกจนถึงเก็บเกี่ยว โดยช่วงที่มีอายุสั้นกว่าจะถือว่ามีความเหมาะสมมากกว่า และหากยังมีค่าใกล้เคียงกัน จะเลือกช่วงปลูกที่สามารถเริ่มต้นได้เร็วกว่า

กระบวนการจัดลำดับดังกล่าวทำให้แต่ละวันปลูกได้รับระดับความเหมาะสมพร้อมเหตุผลเชิงตัวเลขที่ตรวจสอบได้ สามารถนำไปสร้างคำอธิบายเชิงปฏิบัติการ และใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้านอุตุนิยมวิทยาเกษตรได้อย่างโปร่งใสและเป็นระบบ

2.2.7.2 ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

การจัดลำดับของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มุ่งเน้นความเสี่ยงด้านอุณหภูมิในช่วงวิกฤตของการผสมเกสร ซึ่งกำหนดเป็นช่วงที่พืชมีการสะสมค่า GDD อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 30–50 ของ

ค่าหน่วยความร้อนสะสมตลอดฤดูปลูก โดยให้ความสำคัญลำดับแรกกับการไม่มีวันที่อุณหภูมิสูงสุดเกิน 35 องศาเซลเซียสในช่วงดังกล่าว

หากพบมากกว่าศูนย์วัน จะพิจารณาจำนวนวันที่อุณหภูมิสูงเกินเกณฑ์ โดยช่วงที่มีจำนวนวันร้อนน้อยกว่าจะได้รับการจัดอันดับดีกว่า จากนั้นพิจารณาค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจริงในช่วงวิกฤต โดยช่วงที่มีค่าสูงสุดต่ำกว่าจะถือว่ามีความเสี่ยงน้อยกว่า

ในลำดับถัดไป จะพิจารณาระยะเวลาตั้งแต่วันปลูกจนถึงเก็บเกี่ยว โดยช่วงที่ใช้เวลาสั้นกว่าจะได้รับการจัดอันดับดีกว่า และหากยังมีค่าใกล้เคียงกัน จะเลือกช่วงปลูกที่เริ่มต้นได้เร็วกว่า

กรอบดังกล่าวสะท้อนการลดความเสี่ยงต่อการผสมเกสรล้มเหลวและการลดจำนวนเมล็ด ซึ่งเป็นตัวกำหนดผลผลิตเชิงปริมาณของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

2.2.7.3 ทานตะวัน

การจัดลำดับช่วงปลูกสำหรับทานตะวันมุ่งเน้นการหลีกเลี่ยงความเสี่ยงจากความร้อนในช่วงวิกฤตของการพัฒนาพืช ซึ่งกำหนดเป็นช่วงที่พืชมีการสะสมค่า GDD อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 45–70 ของค่าหน่วยความร้อนสะสมตลอดฤดูปลูก รวมทั้งการหลีกเลี่ยงสภาพฝนในช่วงสุกแก่ก่อนเก็บเกี่ยว โดยให้ความสำคัญตามลำดับดังนี้

ประการแรก ช่วงปลูกจะต้องไม่มีวันที่อุณหภูมิสูงสุดเกิน 35 องศาเซลเซียสภายในช่วงวิกฤตดังกล่าว จึงจะถือว่าเป็นช่วงที่ผ่านเกณฑ์เบื้องต้นด้านความร้อน

ประการที่สอง จะพิจารณาปริมาณฝนสะสมในช่วงตั้งแต่ระยะสุกแก่จนถึงเก็บเกี่ยว (Late–Maturity) โดยจัดกลุ่มปริมาณฝนสะสมเป็นช่วงละ 10 มิลลิเมตร เพื่อหลีกเลี่ยงการจัดอันดับที่ไวต่อความแตกต่างของค่าฝนเพียงเล็กน้อย ช่วงปลูกที่อยู่ในกลุ่มฝนสะสมต่ำกว่าจะได้รับการจัดอันดับดีกว่า

จากนั้นจะพิจารณาจำนวนวันที่อุณหภูมิสูงเกินเกณฑ์ในช่วงวิกฤต โดยช่วงที่มีจำนวนวันร้อนน้อยกว่าจะได้รับการจัดอันดับดีกว่า

ในกรณีที่ยังมีค่าคะแนนใกล้เคียงกัน จะพิจารณาระยะเวลาตั้งแต่วันปลูกจนถึงเก็บเกี่ยว โดยช่วงที่มีระยะเวลาสั้นกว่าจะได้รับการพิจารณาดีกว่า เนื่องจากช่วยลดการสะสมความเสี่ยงและต้นทุนการจัดการ

โดยลำดับสุดท้าย หากยังไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ จะใช้เกณฑ์ว่าช่วงปลูกที่เริ่มต้นได้เร็วกว่านั้นเหมาะสมกว่า

แนวทางดังกล่าวสะท้อนทั้งความเสี่ยงเชิงปริมาณจากความร้อนในช่วงดอกบาน–ติดเมล็ด และความเสี่ยงด้านความชื้นในช่วงปลายฤดู ซึ่งมีผลต่อคุณภาพเมล็ดและประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยว

2.2.8 การพัฒนาระบบนำเสนอ Dashboard Prototype

นอกเหนือจากกรอบทฤษฎีและการวิเคราะห์เชิงภูมิอากาศแล้ว งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบต้นแบบ (Dashboard Prototype) เพื่อทดสอบการประยุกต์ใช้กรอบ GDD-Based Agro-Climatological Framework ในระดับปฏิบัติการ ระบบดังกล่าวถูกออกแบบให้สามารถรองรับการขยายผลในระดับประเทศ โดยมีโครงสร้างแบบยืดหยุ่นต่อแหล่งข้อมูล (station-agnostic) กล่าวคือ สามารถรับข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวันจากสถานีใดก็ได้ที่มีชุดตัวแปรมาตรฐาน ได้แก่ อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิต่ำสุด และปริมาณฝน แล้วประมวลผลภายใต้ขั้นตอนเดียวกันโดยไม่ต้องปรับโครงสร้างหลักของแบบจำลอง

ภายในระบบต้นแบบ มีการคำนวณค่า GDD และการสะสมหน่วยความร้อนแบบอัตโนมัติ พร้อมแสดงลำดับระยะพัฒนาการของพืชในรูปแบบเส้นเวลา (stage timeline) สำหรับแต่ละวันปลูกที่เลือก นอกจากนี้ ระบบยังแสดงหน้าต่างวิกฤตด้านอุณหภูมิ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเห็นช่วงที่พืชมีความไวต่อความร้อนอย่างชัดเจน ควบคู่กับการแสดงตัวชี้วัดด้านฝน ได้แก่ ปริมาณฝนสะสม ความถี่วันฝนตก และความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ฝนทิ้งช่วง

อีกองค์ประกอบสำคัญของระบบคือ “Data Story Layer” ซึ่งทำหน้าที่สังเคราะห์ผลลัพธ์เชิงตัวเลขให้อยู่ในรูปแบบคำอธิบายเชิงปฏิบัติการโดยอัตโนมัติ เพื่อสนับสนุนการสื่อสารกับผู้ใช้งาน เช่น เกษตรกร นักวิชาการเกษตรหรือผู้จัดทำข่าวพยากรณ์อากาศเกษตร การพัฒนา Data Story Layer ดังกล่าวจึงเป็นการเชื่อมโยงชั้นวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและเชิงสถิติเข้ากับการใช้งานจริง และเป็นต้นแบบสำหรับการขยายสู่ระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้านอุตุนิยมวิทยาเกษตรในระดับประเทศต่อไป

3. ผลการดำเนินการ

บทนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์ภูมิอากาศและการประยุกต์ใช้แนวคิดหน่วยความร้อนสะสม (Growing Degree Days: GDD) เพื่อประเมินความเหมาะสมของช่วงเพาะปลูกสำหรับพืชที่สำคัญ ได้แก่ ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน โดยเริ่มจากการสร้างชุดข้อมูลภูมิอากาศเฉลี่ยรายวันแบบปีเฉลี่ย ซึ่งสะท้อนลักษณะภูมิอากาศเฉลี่ยของพื้นที่ศึกษาในระดับรายวัน จากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณหน่วยความร้อนสะสมเพื่อวิเคราะห์ระยะพัฒนาการของพืชแต่ละชนิด และใช้เป็นพื้นฐานในการประเมินความเหมาะสมของช่วงเพาะปลูกในเชิงอุณหภูมิ (thermal suitability) สำหรับพืชและรูปแบบการปลูกที่แตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์จะนำเสนอในรูปแบบของกราฟและตารางที่แสดงลักษณะภูมิอากาศรายวัน การสะสมของหน่วยความร้อนตลอดฤดูปลูก และการจัดลำดับช่วงเพาะปลูกที่เหมาะสมสำหรับพืชแต่ละชนิด รวมถึงการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างพันธุ์หรือวิธีการปลูกที่มีระยะฤดูปลูกแตกต่างกัน นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการเกิดฝนทิ้งช่วงเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจด้านการจัดการน้ำ โดยแยกจากเกณฑ์การจัดอันดับความเหมาะสมเชิงอุณหภูมิ เพื่อให้การตีความผลการวิเคราะห์มีความชัดเจนในมิติของปัจจัยภูมิอากาศที่แตกต่างกัน

ในส่วนท้ายของบท จะนำเสนอการพัฒนาแดชบอร์ดต้นแบบซึ่งถ่ายทอดกรอบการวิเคราะห์ดังกล่าวสู่เครื่องมือเชิงปฏิบัติการสำหรับการสื่อสารข้อมูลและสนับสนุนการตัดสินใจด้านการเพาะปลูก โดยแสดงตัวอย่างการนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในระบบแสดงผลข้อมูลบนเว็บ ซึ่งสามารถใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบบริการข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเกษตรต่อไป

3.1 ผลการสร้างชุดข้อมูลภูมิอากาศเฉลี่ยรายวันแบบปีเฉลี่ย

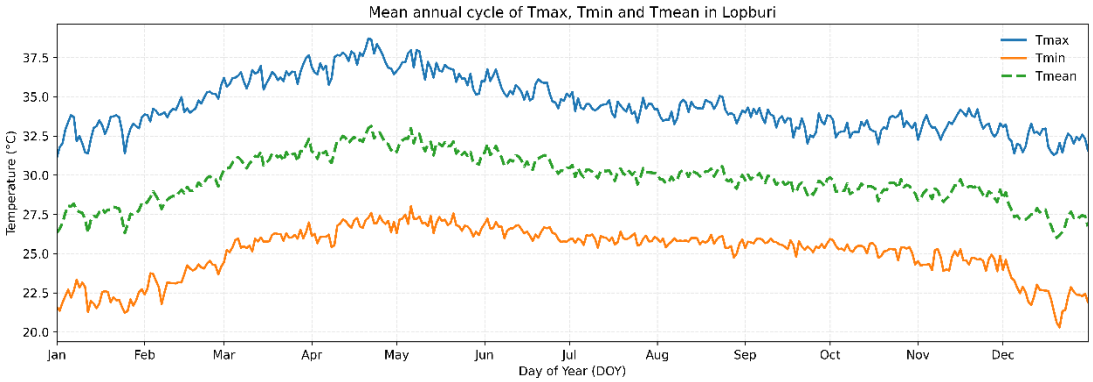
เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์หน่วยความร้อนสะสมและการประเมินช่วงเพาะปลูกที่เหมาะสมของพืช ชุดข้อมูลภูมิอากาศเฉลี่ยรายวันแบบปีเฉลี่ยจึงได้ถูกจัดทำขึ้น โดยใช้ข้อมูลตรวจอากาศระยะยาวของตัวแปรสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิต่ำสุด และปริมาณฝนของสถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี โดยทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละวันของปี เพื่อให้ได้ลักษณะภูมิอากาศเฉลี่ยตลอดรอบปีจำนวน 365 วัน ซึ่งสามารถสะท้อนรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศตามฤดูกาลในพื้นที่ศึกษาได้อย่างต่อเนื่อง

ชุดข้อมูลดังกล่าวทำหน้าที่เป็นตัวแทนของสภาวะภูมิอากาศเฉลี่ยในระดับรายวัน และถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณหน่วยความร้อนสะสม (GDD) สำหรับการวิเคราะห์ระยะพัฒนาการของพืช ตลอดจนใช้ประเมินลักษณะการกระจายของปริมาณฝนและความน่าจะเป็นของการเกิดฝนทิ้งช่วงในช่วงเวลาต่าง ๆ ของปี ผลการวิเคราะห์ในส่วนนี้จึงมีความสำคัญในฐานะข้อมูล

พื้นฐานที่ใช้เชื่อมโยงระหว่างลักษณะภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษากับการประเมินความเหมาะสมของช่วงเพาะปลูกในขั้นตอนต่อไปของการศึกษา

3.1.1 ชุดข้อมูลอุณหภูมิรายวันแบบปีเฉลี่ย

เพื่อทำความเข้าใจลักษณะภูมิอากาศพื้นฐานของพื้นที่ศึกษา จึงได้ทำการสร้างชุดข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันแบบปีเฉลี่ยจากข้อมูลตรวจอากาศระยะยาว โดยการคำนวณค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิต่ำสุด และอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละวันของปี เพื่อให้ได้รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตลอดรอบปีในลักษณะวัฏจักรรายปี (annual cycle) ชุดข้อมูลดังกล่าวทำหน้าที่เป็นตัวแทนของสภาพภูมิอากาศเฉลี่ยของพื้นที่ศึกษา และถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณหน่วยความร้อนสะสม (GDD) สำหรับการวิเคราะห์ระยะพัฒนาการของพืชในขั้นตอนต่อไป



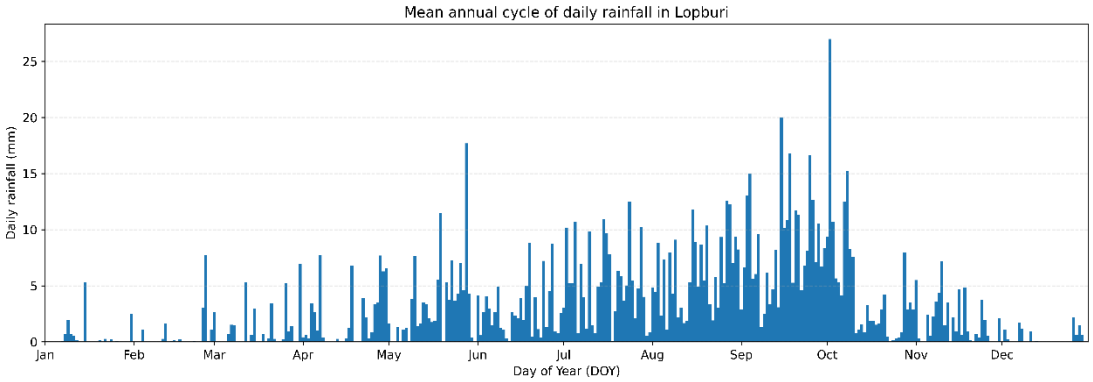
ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิต่ำสุด และอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันจากชุดข้อมูลภูมิอากาศปีเฉลี่ยของสถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี

จากภาพที่ 2 แสดงให้เห็นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิต่ำสุด และอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันตลอดรอบปี โดยพบว่าอุณหภูมิสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ช่วงต้นปี และมีค่าสูงสุดในช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคม ซึ่งสอดคล้องกับช่วงฤดูร้อนของประเทศไทย หลังจากนั้นอุณหภูมิจะเริ่มลดลงในช่วงฤดูฝนและลดลงอย่างชัดเจนในช่วงปลายปี ขณะที่อุณหภูมิต่ำสุดมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าต่ำสุดในช่วงฤดูหนาวและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเข้าสู่ช่วงฤดูร้อน

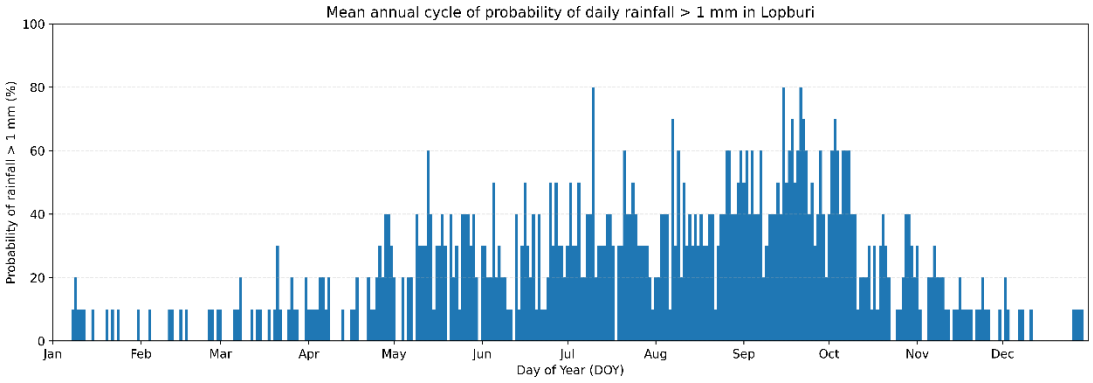
ในภาพรวม รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรายวันสะท้อนลักษณะฤดูกาลของพื้นที่ศึกษาอย่างชัดเจน โดยช่วงที่มีอุณหภูมิสูงต่อเนื่องในช่วงปลายฤดูร้อนถึงต้นฤดูฝนมีความสำคัญต่อการสะสมหน่วยความร้อนของพืช ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระยะพัฒนาการและความเหมาะสมของช่วงเพาะปลูกที่นำมาวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

3.1.2 ชุดข้อมูลฝนรายวันแบบปีเฉลี่ย

นอกจากอุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการสะสมหน่วยความร้อนของพืชแล้ว ปริมาณฝนยังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความเหมาะสมของช่วงเพาะปลูก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบการเพาะปลูกที่อาศัยน้ำฝนเป็นหลัก ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของฝนรายวันจากชุดข้อมูลภูมิอากาศเฉลี่ยรายวันแบบปีเฉลี่ย เพื่อให้เห็นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของฝนตลอดรอบปีในพื้นที่ศึกษา



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนเฉลี่ยรายวันจากชุดข้อมูลภูมิอากาศปีเฉลี่ยของสถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี



ภาพที่ 4 ความน่าจะเป็นของการเกิดฝนมากกว่า 1 มิลลิเมตรรายวันจากชุดข้อมูลภูมิอากาศปีเฉลี่ยของสถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี

ภาพที่ 3 แสดงปริมาณฝนเฉลี่ยรายวันตลอดรอบปี ซึ่งสะท้อนความเข้มของฝนที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา โดยพบว่าปริมาณฝนเฉลี่ยรายวันมีค่าต่ำในช่วงฤดูแล้งและเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

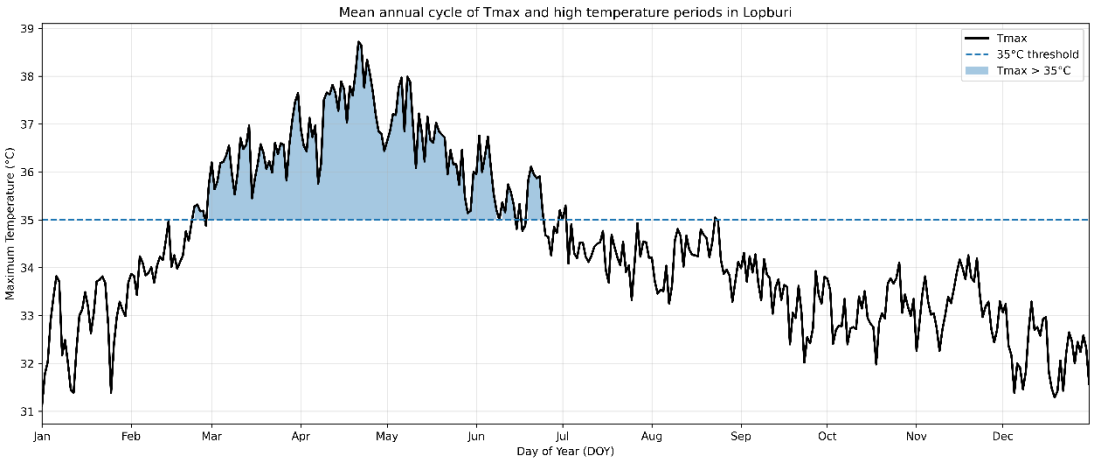
ตั้งแต่ช่วงปลายฤดูร้อน ก่อนจะมีค่าสูงในช่วงฤดูฝน โดยเฉพาะในช่วงปลายฤดูฝนซึ่งมักมีเหตุการณ์ฝนตกหนักเกิดขึ้นเป็นระยะ

ในขณะเดียวกัน ภาพที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความน่าจะเป็นในการเกิดฝนรายวันมากกว่า 1 มิลลิเมตรตลอดรอบปี ซึ่งสะท้อนถึงความถี่ของการเกิดฝนในแต่ละช่วงเวลา จากกราฟพบว่าความน่าจะเป็นของการเกิดฝนมีค่าค่อนข้างต่ำในช่วงต้นปี โดยเฉพาะในช่วงฤดูหนาวถึงต้นฤดูร้อน หลังจากนั้นความถี่ของการเกิดฝนเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตั้งแต่ช่วงปลายฤดูร้อนเข้าสู่ฤดูฝน และมีค่าสูงในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงกันยายน ซึ่งเป็นช่วงที่อิทธิพลของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ส่งผลต่อพื้นที่ศึกษา ทำให้เกิดฝนอย่างต่อเนื่อง

โดยภาพรวม รูปแบบการกระจายของความถี่และปริมาณฝนรายวันดังกล่าวสะท้อนลักษณะภูมิอากาศแบบมรสุมของพื้นที่ศึกษาอย่างชัดเจน ซึ่งมีช่วงฤดูแล้งที่ยาวในช่วงต้นปีและมีฝนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าสู่ฤดูฝน ข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญในการใช้ประกอบการตีความความเหมาะสมของช่วงเพาะปลูก โดยเฉพาะการประเมินความเสี่ยงจากฝนทิ้งช่วงในระบบการปลูกที่อาศัยน้ำฝน ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติมในหัวข้อถัดไปของการศึกษา

3.1.3 ช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดสูงเกิน 35 องศาเซลเซียส

เนื่องจากอุณหภูมิวิกฤตที่อาจส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชทั้งสามชนิด ได้แก่ ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน อยู่ที่ประมาณ 35 องศาเซลเซียส การศึกษานี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดรายวันเกินค่าเกณฑ์ดังกล่าว โดยใช้ชุดข้อมูลภูมิอากาศปีเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลภูมิอากาศระยะยาว เพื่อระบุช่วงเวลาที่มีความเสี่ยงต่อความเครียดจากอุณหภูมิสูง (heat stress) ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดรายวันตลอดรอบปีเฉลี่ย และช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดเกิน 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นเกณฑ์อุณหภูมิสูงที่อาจส่งผลกระทบต่อพืชที่ศึกษา

จากภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่าช่วงเวลาที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอุณหภูมิสูงสุดเกิน 35 องศาเซลเซียสจะกระจุกตัวอยู่ในช่วงประมาณเดือนมีนาคมถึงเดือนมิถุนายน โดยมีค่าสูงสุดในช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคม ซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อนของประเทศไทย ลักษณะดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าพืชที่มีระยะพัฒนาการสำคัญ เช่น ระยะออกดอก อยู่ในช่วงเวลาดังกล่าว อาจมีความเสี่ยงต่อการได้รับผลกระทบจากความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิสูง (heat stress) ซึ่งอาจส่งผลต่อกระบวนการผสมเกสร การติดเมล็ด และปริมาณผลผลิตในท้ายที่สุด

3.1.4 สรุปลักษณะภูมิอากาศจากชุดข้อมูลปีเฉลี่ย

จากการวิเคราะห์ชุดข้อมูลภูมิอากาศเฉลี่ยรายวันแบบปีเฉลี่ยในหัวข้อก่อนหน้า พบว่าพื้นที่ศึกษามีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปริมาณฝนที่สอดคล้องกับลักษณะภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อนของประเทศไทย โดยอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ช่วงต้นปีและมีค่าสูงสุดในช่วงปลายฤดูร้อน ก่อนจะลดลงเมื่อเข้าสู่ฤดูฝนและฤดูหนาว ขณะที่อุณหภูมิต่ำสุดมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันแต่มีช่วงความแปรผันที่แคบกว่า ลักษณะดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงช่วงเวลาที่มีการสะสมหน่วยความร้อนสูง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนาการของพืชและระยะการเจริญเติบโตในระบบการเพาะปลูก

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเกณฑ์อุณหภูมิสูงที่อาจส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช โดยเฉพาะค่าอุณหภูมิสูงสุดมากกว่า 35 องศาเซลเซียส ซึ่งถือเป็นระดับอุณหภูมิที่อาจก่อให้เกิดความเครียดจากความร้อน (heat stress) ต่อพืชหลายชนิด พบว่าช่วงเวลาที่มีโอกาสเกิดอุณหภูมิสูงเกินเกณฑ์ดังกล่าวจะกระจุกตัวอยู่ในช่วงปลายฤดูร้อนของปี โดยเฉพาะประมาณเดือนมีนาคมถึงเดือนมิถุนายน

ในด้านของปริมาณฝน พบว่าความน่าจะเป็นของการเกิดฝนและปริมาณฝนเฉลี่ยรายวันมีค่าต่ำในช่วงฤดูแล้งของต้นปี ก่อนจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเข้าสู่ฤดูฝนภายใต้อิทธิพลของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยช่วงกลางถึงปลายฤดูฝนมีทั้งความถี่ของการเกิดฝนและปริมาณฝนเฉลี่ยรายวันที่สูง ซึ่งสะท้อนถึงช่วงเวลาที่มีความพร้อมด้านน้ำสำหรับการเพาะปลูกมากขึ้น ในขณะที่ช่วงต้นปีมีความเสี่ยงต่อการเกิดฝนทิ้งช่วงสูงกว่าช่วงอื่นของปี

โดยภาพรวม ชุดข้อมูลภูมิอากาศเฉลี่ยรายวันแบบปีเฉลี่ยสามารถสะท้อนลักษณะฤดูกาลของพื้นที่ศึกษาได้อย่างชัดเจน ทั้งในมิติของอุณหภูมิและปริมาณฝน ซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญต่อการกำหนดช่วงเพาะปลูกของพืช ข้อมูลดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้เป็นฐานในการคำนวณหน่วยความร้อนสะสมและการวิเคราะห์ความเหมาะสมของช่วงเพาะปลูกสำหรับพืชแต่ละชนิดในหัวข้อถัดไปของการศึกษา

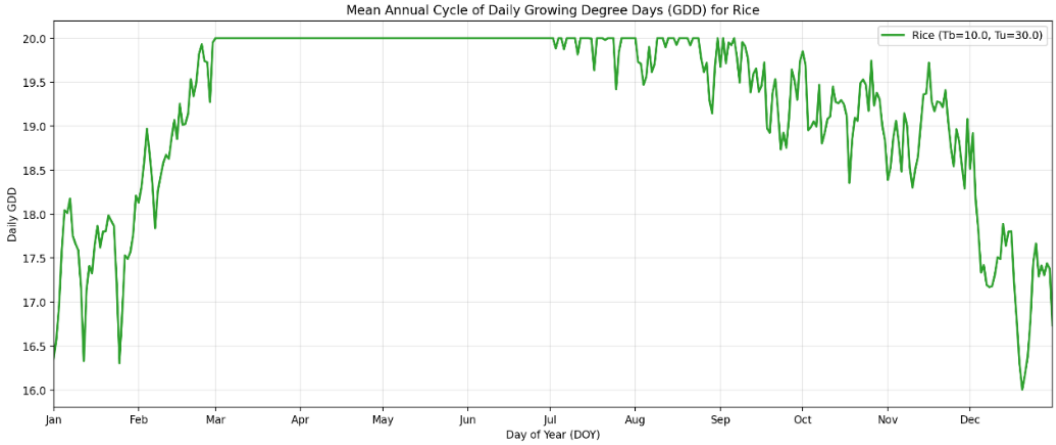
3.2 ผลการวิเคราะห์ GDD และช่วงระยะเวลาปลูกที่เหมาะสมของแต่ละพืช

3.2.1 ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์หน่วยความร้อนสะสม (Growing Degree Days: GDD) และระยะพัฒนาการของพืชสำหรับพืชเศรษฐกิจสามชนิด ได้แก่ ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน โดยใช้ข้อมูลภูมิอากาศเฉลี่ยรายวันแบบปีเฉลี่ยจากสถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี

การวิเคราะห์ประกอบด้วยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า GDD รายวันตลอดรอบปีของพืชแต่ละชนิด เส้นโค้งของหน่วยความร้อนสะสม (Cumulative GDD) และการกำหนดระยะพัฒนาการของพืชตามเกณฑ์หน่วยความร้อนสะสมของพืชแต่ละชนิด นอกจากนี้ยังนำข้อมูลความเสี่ยงจากอุณหภูมิสูงและรูปแบบการกระจายของฝนมาประกอบการพิจารณา เพื่อประเมินช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมของพืชแต่ละชนิดภายใต้สภาพภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษา

ผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูปแบบของกราฟการเปลี่ยนแปลงของค่า GDD รายวัน เส้นโค้งการสะสมของหน่วยความร้อนสะสม และตารางสรุปช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุดของพืชแต่ละชนิด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของค่า GDD รายวันตลอดรอบปีเฉลี่ยสำหรับข้าว โดยแกน X แสดงวันลำดับของปี (DOY) และใช้ชื่อเดือนเป็นตัวอ้างอิงฤดูกาล

จากภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่าค่า GDD รายวันของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ช่วงต้นปี และมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนตั้งแต่ประมาณเดือนกุมภาพันธ์จนถึงช่วงต้นเดือนมีนาคม หลังจากนั้นค่า GDD จะคงอยู่ในระดับสูงใกล้เคียงกันตลอดช่วงฤดูร้อนและฤดูฝน โดย GDD ของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่คำนวณได้ในการศึกษานี้จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 20 องศาเซลเซียส-วัน ก่อนจะเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงปลายปี โดยเฉพาะในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคม ลักษณะดังกล่าว

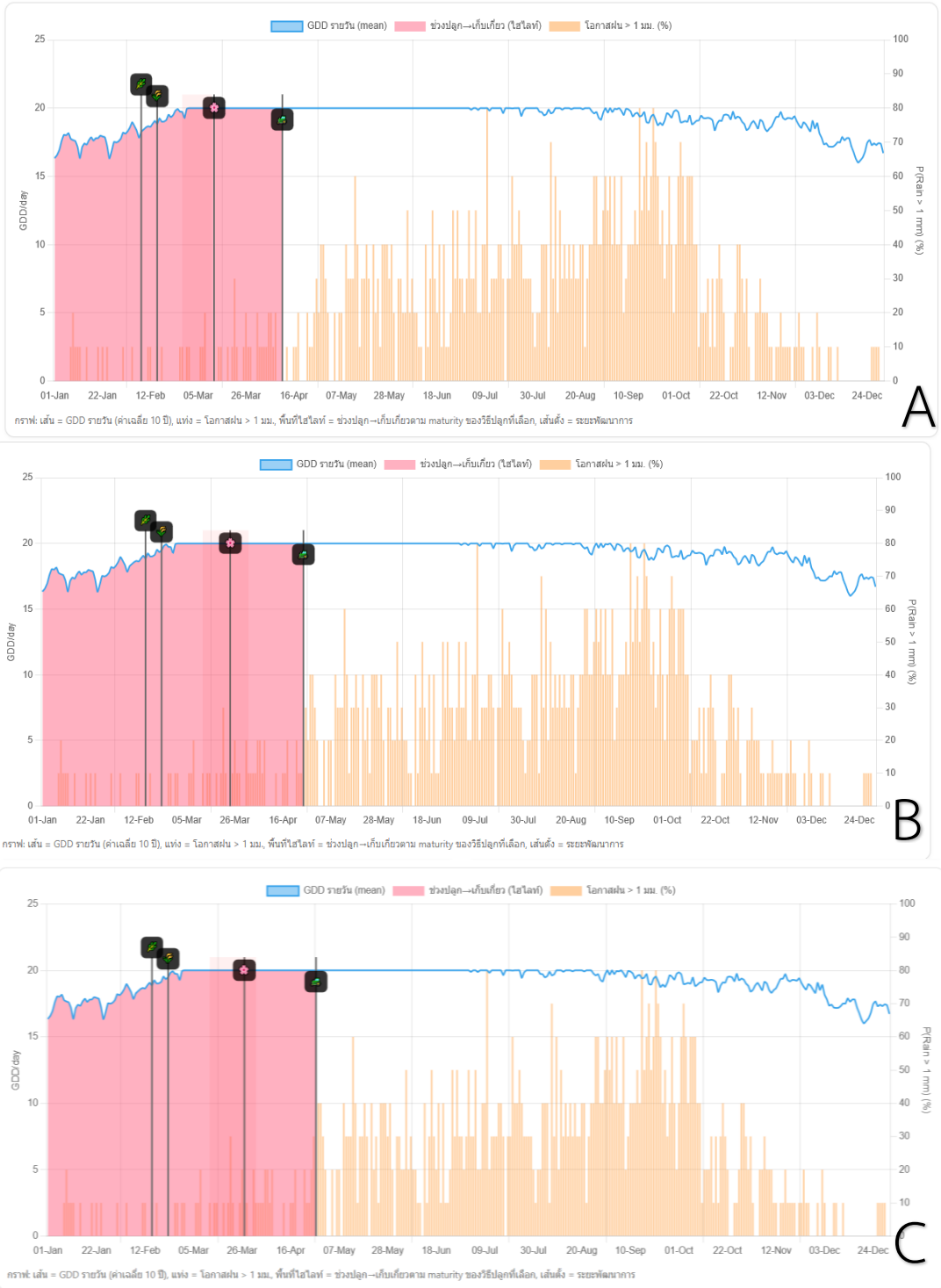
สะท้อนให้เห็นถึงรูปแบบการสะสมหน่วยความร้อนของพื้นที่ศึกษาที่มีค่าค่อนข้างสูงและค่อนข้างคงที่ในช่วงกลางปี ซึ่งเป็นช่วงที่สภาพภูมิอากาศเอื้อต่อการเจริญเติบโตของพืช ขณะที่ช่วงปลายปีมีแนวโน้มของการสะสมหน่วยความร้อนลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ

ภาพที่ 7 แสดงเส้นโค้งของหน่วยความร้อนสะสม (Cumulative GDD) สำหรับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 โดยเปรียบเทียบการเพาะปลูก 3 วิธี ได้แก่ นาดำ (A) นาหยอด (B) และนาหว่าน (C) ภายใต้เงื่อนไขวันเริ่มต้นปลูกเดียวกันคือวันที่ 1 มกราคม เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของระยะเวลาที่ใช้ในการสะสมหน่วยความร้อนและการเข้าสู่ระยะพัฒนาการของพืชในแต่ละวิธีการปลูกได้อย่างชัดเจน

เส้นโค้งในกราฟแสดงการเพิ่มขึ้นของหน่วยความร้อนสะสมตามลำดับวันของปี โดยค่าหน่วยความร้อนสะสมสามารถตีความได้ว่าเท่ากับผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟของค่า GDD รายวันในช่วงเวลาที่พิจารณา ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณพลังงานความร้อนที่พืชได้รับเพื่อใช้ในการพัฒนาการเจริญเติบโตของพืช เมื่อหน่วยความร้อนสะสมถึงค่าที่กำหนดไว้สำหรับแต่ละระยะพัฒนาการ พืชจะเข้าสู่ระยะพัฒนาการถัดไปตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบทั้งสามวิธีการปลูกจะเห็นได้ว่า แม้จะกำหนดวันเริ่มต้นปลูกเดียวกัน แต่จำนวนวันที่ต้องใช้ในการสะสมหน่วยความร้อนจนถึงแต่ละระยะพัฒนาการแตกต่างกันตามวิธีการปลูก เนื่องจากแต่ละระบบการปลูกมีความต้องการหน่วยความร้อนสะสมรวมตลอดฤดูปลูกไม่เท่ากัน โดยจากผลการคำนวณในกรณีที่กำหนดวันเริ่มต้นปลูกเป็นวันที่ 1 มกราคม พบว่า การปลูกแบบนาดำใช้ระยะเวลาประมาณ 101 วันจนถึงระยะเก็บเกี่ยว ขณะที่การปลูกแบบนาหยอดใช้เวลาประมาณ 115 วัน และการปลูกแบบนาหว่านใช้เวลาประมาณ 117 วัน แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของระยะเวลาการเพาะปลูกที่เกิดจากความต้องการหน่วยความร้อนสะสมของแต่ละวิธีการปลูก

เส้นโค้งของหน่วยความร้อนสะสม (Cumulative GDD curve)



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบหน่วยความร้อนสะสมและพัฒนาการของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 โดยเปรียบเทียบการเพาะปลูกแบบนาดำ (A) นาหยอด (B) และนาหว่าน (C) โดยพื้นที่แรเงาสีชมพูแสดงช่วงวิกฤตที่อ่อนไหวต่อความร้อน (Critical stage); แถบกราฟแท่งแสดงปริมาณน้ำฝนรายวัน (mm)

นอกจากนี้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวันเริ่มต้นปลูก ค่า GDD รายวันที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของปีจะเปลี่ยนไป ส่งผลให้จำนวนวันที่ใช้ในการสะสมหน่วยความร้อนเพื่อบรรลุระยะพัฒนาการของพืชเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เช่นเมื่อเปลี่ยนวันเริ่มต้นปลูกเป็นวันที่ 1 เมษายน จะพบว่าการปลูกแบบนาดำใช้ระยะเวลาเพาะปลูกจนถึงระยะเก็บเกี่ยวประมาณ 96 วัน ขณะที่การปลูกแบบนาหยอดใช้เวลาประมาณ 110 วัน และการปลูกแบบนาหว่านใช้เวลาประมาณ 112 วัน ซึ่งแตกต่างจากกรณีที่กำหนดวันเริ่มต้นปลูกเป็นวันที่ 1 มกราคมอย่างชัดเจน และเป็นหลักการสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์และกำหนดช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมในงานศึกษานี้

เพื่อประเมินช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ได้ทำการวิเคราะห์ช่วงวันเริ่มปลูกที่ให้ผลการสะสมหน่วยความร้อนสอดคล้องกับระยะพัฒนาการของพืช และสามารถหลีกเลี่ยงช่วงที่มีความเสี่ยงจากอุณหภูมิสูงในระยะวิกฤตของการเจริญเติบโต โดยผลการวิเคราะห์ได้ทำการจัดลำดับช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละวิธีการปลูก ได้แก่ นาดำ นาหยอด และนาหว่าน จากผลการคำนวณและการจัดลำดับคะแนนความเหมาะสม

ตารางที่ 6-8 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรก สำหรับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 โดยจำแนกตามวิธีการปลูก ได้แก่ นาดำ นาหยอด และนาหว่าน ซึ่งสะท้อนถึงช่วงวันเริ่มปลูกที่ทำให้พืชสามารถสะสมหน่วยความร้อนได้อย่างเหมาะสมตลอดฤดูปลูก และช่วยลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสมในช่วงพัฒนาการที่สำคัญของพืช

ตารางที่ 6 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 สำหรับนาดำ

ลำดับที่	วันเพาะปลูก	วันเก็บเกี่ยว	จำนวนวันที่ใช้	ความเสี่ยงต่อความร้อน
1	8 พ.ค. -14 มิ.ย.	11 ส.ค. -17 ก.ย.	96	-
2	29 มิ.ย.–14 ก.ค.	3 ต.ค. -18 ต.ค.	97	-
3	15 ก.ค.– 4 ส.ค.	20 ต.ค.– 9 พ.ย.	98	-

ตารางที่ 7 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 สำหรับนาหยอด

ลำดับที่	วันเพาะปลูก	วันเก็บเกี่ยว	จำนวนวันที่ใช้	ความเสี่ยงต่อความร้อน
1	24 เม.ย.-24 พ.ค.	11 ส.ค.-10 ก.ย.	110	-
2	15 มิ.ย.-29 มิ.ย.	3 ต.ค.-17 ต.ค.	111	-
3	30 มิ.ย.-19 ก.ค.	19 ต.ค.-7 พ.ย.	112	-

ตารางที่ 8 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 สำหรับนาหว่าน

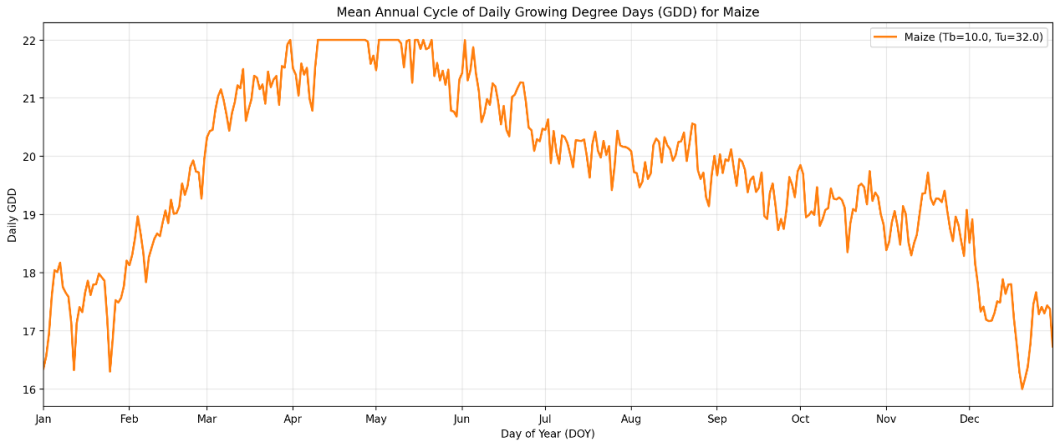
ลำดับที่	วันเพาะปลูก	วันเก็บเกี่ยว	จำนวนวันที่ใช้	ความเสี่ยงต่อความร้อน
1	24 เม.ย.-24 พ.ค.	13 ส.ค. -12 ก.ย.	112	-
2	15 มิ.ย.-21 มิ.ย.	5 ต.ค. -11 ต.ค.	113	-
3	22 มิ.ย.-13 ก.ค.	13 ต.ค. -3 พ.ย.	114	-

จากผลการจัดลำดับช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุดของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ทั้งสามวิธีการปลูก พบว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเริ่มเพาะปลูกส่วนใหญ่กระจุกตัวอยู่ในช่วงปลายเดือนเมษายนถึงช่วงต้นเดือนกรกฎาคม ซึ่งเป็นช่วงที่สภาพภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษามีอุณหภูมิและการสะสมหน่วยความร้อนในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของข้าว และสามารถหลีกเลี่ยงช่วงที่มีความเสี่ยงจากอุณหภูมิสูงในระยะพัฒนาการที่สำคัญของพืชได้

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบทั้งสามวิธีการปลูกพบว่า การปลูกแบบนาดำมีระยะเวลาการเพาะปลูกสั้นที่สุด โดยใช้เวลาประมาณ 96–98 วันจนถึงระยะเก็บเกี่ยว ขณะที่ การปลูกแบบนาหยอดและนาหว่านใช้ระยะเวลานานกว่า โดยอยู่ในช่วงประมาณ 110–114 วัน ทั้งนี้ความแตกต่างของระยะเวลาการเพาะปลูกดังกล่าวเกิดจากความต้องการหน่วยความร้อนสะสมของแต่ละวิธีการปลูกที่แตกต่างกัน ส่งผลให้จำนวนวันที่ใช้ในการสะสมหน่วยความร้อนจนถึงระยะเก็บเกี่ยวไม่เท่ากัน

3.2.2 ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

จากกราฟการเปลี่ยนแปลงของค่า GDD รายวันตลอดรอบปีเฉลี่ยสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (ภาพที่ 8) จะเห็นได้ว่า GDD รายวันของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ช่วงต้นปี โดยเริ่มมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนตั้งแต่ประมาณเดือนกุมภาพันธ์ และเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงปลายเดือนมีนาคมถึงเดือนเมษายน ซึ่งเป็นช่วงที่มีการสะสมหน่วยความร้อนสูงสุดของปี หลังจากนั้นค่า GDD จะยังคงอยู่ในระดับค่อนข้างสูงในช่วงปลายฤดูร้อน ก่อนจะเริ่มลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปเมื่อเข้าสู่ฤดูฝนและช่วงปลายปี โดยค่า GDD รายวันที่คำนวณได้สำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในการศึกษานี้มีค่าสูงสุดที่ 22 องศาเซลเซียส–วัน และเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ช่วงประมาณเดือนกรกฎาคมเป็นต้นไป โดยเฉพาะในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคมที่มีค่าลดลงชัดเจน

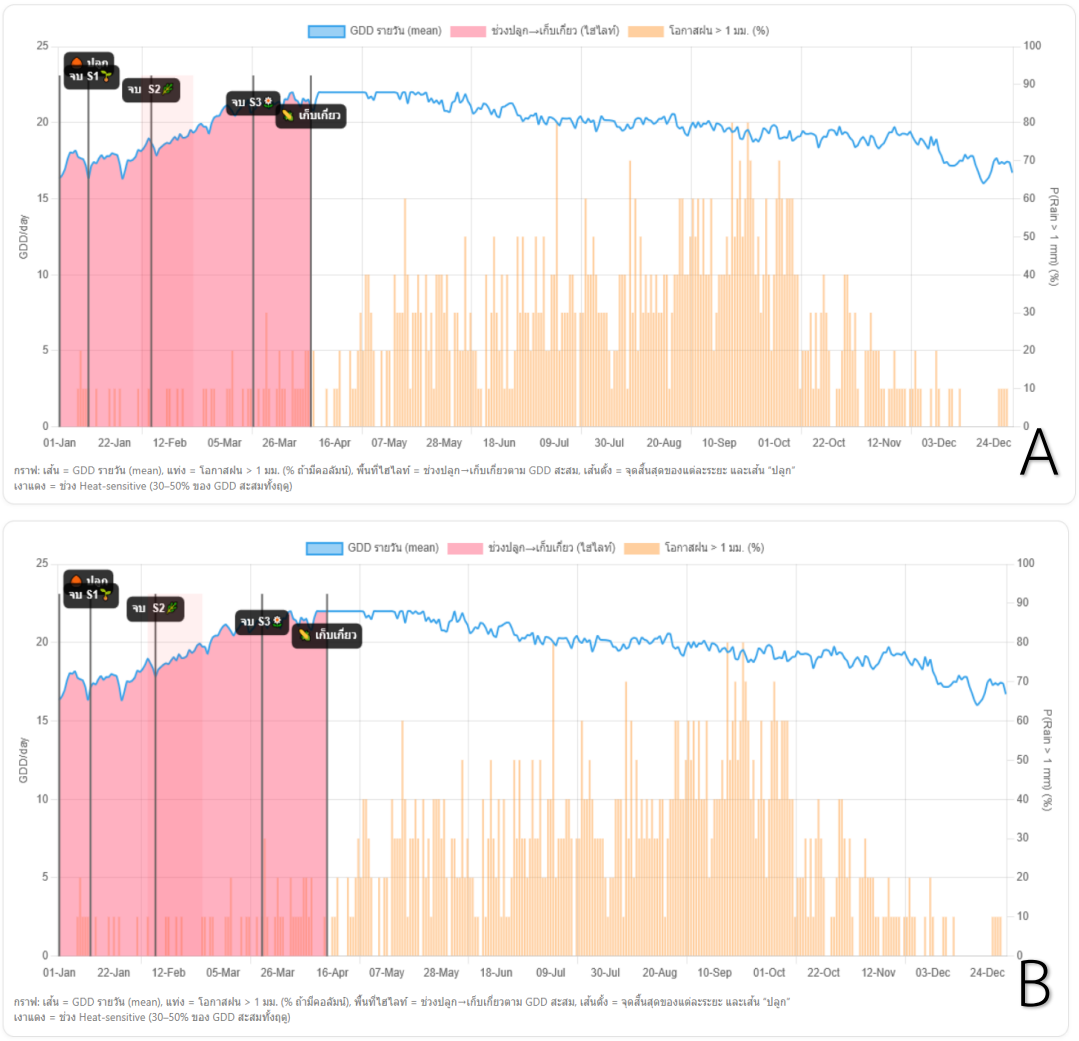


ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของค่า GDD รายวันตลอดรอบปีเฉลี่ยสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยแกน X แสดงวันลำดับของปี (DOY) และใช้ชื่อเดือนเป็นตัวอ้างอิงฤดูกาล

เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 จะพบว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลมีลักษณะคล้ายคลึงกัน เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากสภาพภูมิอากาศของพื้นที่เดียวกัน อย่างไรก็ตาม ค่า GDD สูงสุดของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่ามากกว่าข้าว เนื่องจากในการคำนวณ GDD สำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ กำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณสูงกว่า จึงทำให้ค่า GDD ที่คำนวณได้มีเพดานสูงกว่าข้าว ลักษณะดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของการตอบสนองต่ออุณหภูมิของพืชแต่ละชนิด ซึ่งส่งผลให้ศักยภาพการสะสมหน่วยความร้อนในแต่ละวันแตกต่างกัน แม้ว่าจะอยู่ภายใต้สภาพภูมิอากาศเดียวกันก็ตาม

ภาพที่ 9 แสดงเส้นโค้งของหน่วยความร้อนสะสม (Cumulative GDD) สำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยเปรียบเทียบระยะพัฒนาการของ พันธุ์เบา (A) และพันธุ์หนัก (B) ภายใต้เงื่อนไขวันเริ่มต้นปลูกเดียวกันคือวันที่ 1 มกราคม เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของระยะเวลาที่ใช้ในการสะสมหน่วยความร้อนและการเข้าสู่ระยะพัฒนาการของพืชแต่ละพันธุ์ได้อย่างชัดเจน

เส้นโค้งในกราฟแสดงการสะสมของหน่วยความร้อนตามลำดับวันของปี ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณพลังงานความร้อนที่พืชได้รับเพื่อใช้ในการพัฒนาการเจริญเติบโต เมื่อหน่วยความร้อนสะสมถึงค่าที่กำหนดไว้สำหรับแต่ละระยะพัฒนาการ พืชจะเข้าสู่ระยะพัฒนาการถัดไปตามลำดับ



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบหน่วยความร้อนสะสมและพัฒนาการของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์เบา (A) และพันธุ์หนัก (B) โดยพื้นที่แรเงาสีชมพูแสดงช่วงวิกฤตที่อ่อนไหวต่อความร้อน (Critical stage) แถบกราฟแท่งแสดงปริมาณน้ำฝนรายวัน (mm)

จากผลการคำนวณในกรณีที่กำหนดวันเริ่มต้นปลูกเป็นวันที่ 1 มกราคม พบว่า ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์เบาใช้ระยะเวลาประมาณ 97 วันจนถึงระยะเก็บเกี่ยว ขณะที่พันธุ์หนักใช้เวลาประมาณ 104 วัน แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของระยะเวลาการเพาะปลูกที่เกิดจากความต้องการหน่วยความร้อนสะสมของแต่ละพันธุ์ โดยพันธุ์หนักต้องการหน่วยความร้อนสะสมรวมมากกว่าพันธุ์เบา จึงทำให้ระยะเวลาการเจริญเติบโตยาวนานกว่า ทั้งนี้ หากมีการเปลี่ยนแปลงวันเริ่มต้นปลูก ค่า GDD รายวันที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของปีจะเปลี่ยนไปตามฤดูกาล ส่งผลให้จำนวนวันที่ต้องใช้ในการสะสมหน่วยความร้อนเพื่อบรรลุระยะพัฒนาการของพืชเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

เพื่อประเมินช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์วันเริ่มปลูกที่ทำให้พืชสามารถสะสมหน่วยความร้อนสะสมได้สอดคล้องกับความต้องการของระยะพัฒนาการของพืชตลอดฤดูปลูก โดยพิจารณาจากผลการคำนวณหน่วยความร้อนสะสมร่วมกับเงื่อนไขความเสี่ยงด้านอุณหภูมิในช่วงพัฒนาการที่สำคัญของพืช จากนั้นทำการจัดลำดับช่วงเวลาการเพาะปลูกที่มีความเหมาะสมมากที่สุด

เนื่องจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ใช้ในการศึกษานี้แบ่งออกเป็น สองกลุ่มพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์เบา และพันธุ์หนัก ซึ่งมีความต้องการหน่วยความร้อนสะสมตลอดฤดูปลูกแตกต่างกัน จึงนำเสนอผลการวิเคราะห์แยกเป็นสองตาราง เพื่อให้เห็นความแตกต่างของช่วงเวลาการเริ่มปลูกและระยะเวลาการเพาะปลูกของแต่ละกลุ่มพันธุ์ได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 9 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์เบา ขณะที่ตารางที่ 10 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์หนัก โดยแต่ละตารางแสดงช่วงวันเริ่มปลูก ช่วงวันเก็บเกี่ยว และจำนวนวันที่ใช้ในการเพาะปลูก ซึ่งสะท้อนถึงผลของการสะสมหน่วยความร้อนที่แตกต่างกันของพันธุ์ข้าวโพดแต่ละประเภทภายใต้สภาพภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 9 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์เบา

ลำดับที่	วันเพาะปลูก	วันเก็บเกี่ยว	จำนวนวันที่ใช้	ความเสี่ยงต่อความร้อน
1	13 มิ.ย.– 3 ก.ค.	22 ส.ค.-11ก.ย.	71	-
2	4 ก.ค.-18 ก.ค.	13 ก.ย.-27 ก.ย.	72	-
3	3 ส.ค.–19 ส.ค.	14 ต.ค.-30 ต.ค.	73	-

ตารางที่ 10 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์หนัก

ลำดับที่	วันเพาะปลูก	วันเก็บเกี่ยว	จำนวนวันที่ใช้	ความเสี่ยงต่อความร้อน
1	5 มิ.ย.–10 มิ.ย.	9 ก.ย.-14 ก.ย.	97	-
2	11 มิ.ย.–22 มิ.ย.	16 ก.ย.-27 ก.ย.	98	-
3	23 มิ.ย.-5 ก.ค.	29 ก.ย.-11 ต.ค.	99	-

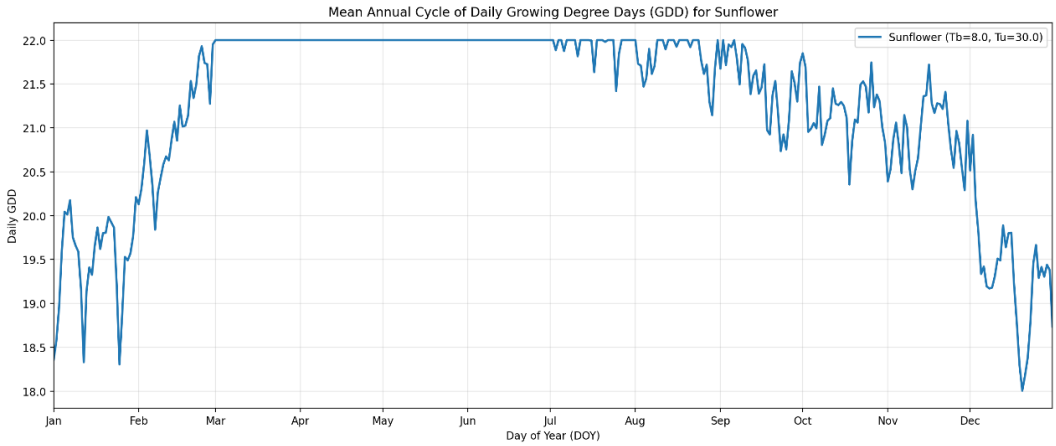
จากผลการจัดลำดับช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ทั้งสองพันธุ์ พบว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเริ่มเพาะปลูกส่วนใหญ่อยู่ในช่วงต้นเดือนมิถุนายนถึงช่วงต้นเดือนสิงหาคม ซึ่งเป็นช่วงที่สภาพภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษามีอุณหภูมิและการสะสมหน่วยความร้อนในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพด และไม่พบความเสี่ยงจากอุณหภูมิสูงในช่วงพัฒนาการที่สำคัญของพืช

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองกลุ่มพันธุ์พบว่า ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์เบามีระยะเวลาการเพาะปลูกสั้นกว่าพันธุ์หนักอย่างชัดเจน โดยใช้เวลาประมาณ 71–73 วัน จนถึงระยะเก็บเกี่ยว ขณะที่พันธุ์หนักใช้เวลาประมาณ 97–99 วัน สะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของความต้องการหน่วยความร้อนสะสมตลอดฤดูปลูกของแต่ละกลุ่มพันธุ์ โดยพันธุ์หนักต้องการหน่วยความร้อนสะสมรวมมากกว่าจึงทำให้ระยะเวลาการเจริญเติบโตยาวนานกว่า โดยช่วงเก็บเกี่ยวของทั้งสองพันธุ์กระจุกตัวอยู่ในช่วงปลายฤดูฝนถึงต้นฤดูหนาวประมาณเดือนกันยายนถึงต้นเดือนตุลาคม

3.2.3 ทานตะวัน

จากภาพที่ 10 จะเห็นได้ว่าค่า GDD รายวันของทานตะวันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ช่วงต้นปี และเริ่มมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนตั้งแต่ประมาณเดือนกุมภาพันธ์จนถึงช่วงต้นเดือนมีนาคม หลังจากนั้นค่า GDD จะคงอยู่ในระดับสูงใกล้เคียงกันตลอดช่วงฤดูร้อนและฤดูฝน โดยค่า GDD ของทานตะวันที่คำนวณได้ในการศึกษานี้มีค่าสูงสุดประมาณ 22 องศาเซลเซียส–วัน ก่อนจะเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงปลายปี โดยเฉพาะในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคมที่ค่ามีแนวโน้มลดลงชัดเจน ลักษณะดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงรูปแบบการสะสมหน่วยความร้อนของพื้นที่ศึกษาที่มีค่าสูงในช่วงกลางปี ซึ่งเป็นช่วงที่สภาพภูมิอากาศเอื้อต่อการเจริญเติบโตของพืช ขณะที่ช่วงปลายปีมีแนวโน้มของการสะสมหน่วยความร้อนลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในฤดูหนาว

เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จะพบว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลมีลักษณะใกล้เคียงกัน เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากสภาพภูมิอากาศของพื้นที่เดียวกัน อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของค่าหน่วยความร้อนสะสมรายวันระหว่างพืชแต่ละชนิดเกิดจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ GDD ที่แตกต่างกัน โดยในการศึกษานี้ทานตะวันกำหนดค่าอุณหภูมิฐาน (Tbase) ที่ 8°C และค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณ (Tupper) ที่ 30°C ซึ่งแตกต่างจากเกณฑ์อุณหภูมิที่ใช้ในข้าวและข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ค่าพารามิเตอร์ที่ต่างกันนี้ไม่เพียงแต่สะท้อนถึงขีดความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่แตกต่างกันของพืชแต่ละชนิด แต่ยังส่งผลให้ระดับและเพดานการสะสมหน่วยความร้อนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แม้จะอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกันก็ตาม



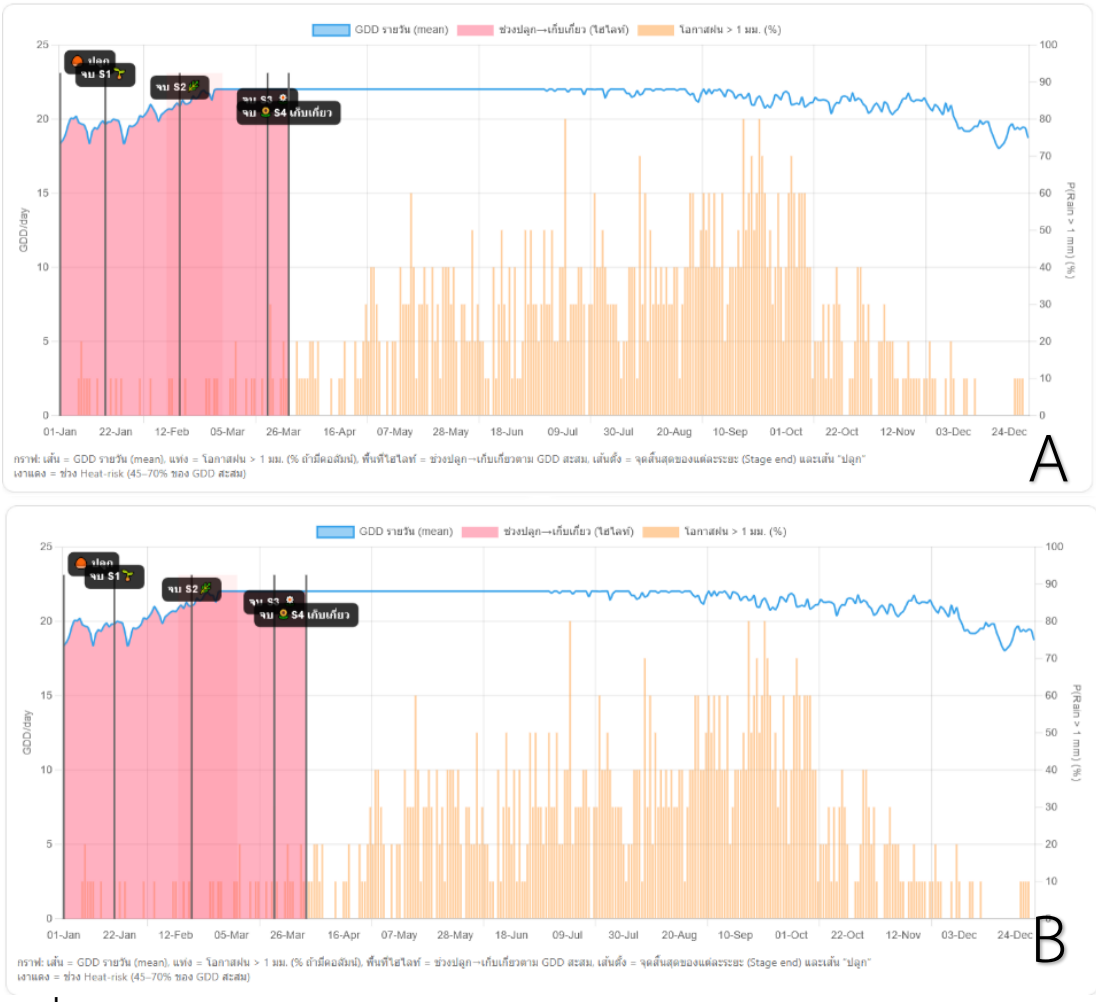
ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของค่า GDD รายวันตลอดรอบปีเฉลี่ยสำหรับทานตะวัน โดยแกน X แสดงวันลำดับของปี (DOY) และใช้ชื่อเดือนเป็นตัวอ้างอิงฤดูกาล

ภาพที่ 11 แสดงเส้นโค้งของหน่วยความร้อนสะสม (Cumulative GDD) สำหรับทานตะวัน โดยเปรียบเทียบระยะพัฒนาการของ พันธุ์เบา (A) และพันธุ์หนัก (B) ภายใต้เงื่อนไขวันเริ่มต้นปลูกเดียวกันคือวันที่ 1 มกราคม เพื่อแสดงความแตกต่างของระยะเวลาที่ใช้ในการสะสมหน่วยความร้อนจนถึงระยะเก็บเกี่ยวของแต่ละพันธุ์

เส้นโค้งในกราฟแสดงการสะสมของหน่วยความร้อนตามลำดับวันของปี ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณพลังงานความร้อนที่พืชได้รับเพื่อใช้ในการพัฒนาการเจริญเติบโต เมื่อหน่วยความร้อนสะสมถึงค่าที่กำหนดไว้สำหรับแต่ละระยะพัฒนาการ พืชจะเข้าสู่ระยะพัฒนาการถัดไปตามลำดับ

จากผลการคำนวณเมื่อกำหนดวันเริ่มต้นปลูกเป็นวันที่ 1 มกราคม พบว่า ทานตะวันพันธุ์เบาใช้ระยะเวลาประมาณ 87 วันจนถึงระยะเก็บเกี่ยว ขณะที่พันธุ์หนักใช้เวลาประมาณ 92 วัน แสดงให้เห็นว่าพันธุ์หนักต้องใช้ระยะเวลาในการเจริญเติบโตยาวนานกว่าพันธุ์เบา เนื่องจากมีความต้องการหน่วยความร้อนสะสมรวมตลอดฤดูปลูกมากกว่า

ทั้งนี้ เช่นเดียวกับพืชชนิดอื่นในการศึกษานี้ หากมีการเปลี่ยนแปลงวันเริ่มต้นปลูก ค่า GDD รายวันที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของปีจะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ส่งผลให้จำนวนวันที่ใช้ในการสะสมหน่วยความร้อนเพื่อบรรลุระยะพัฒนาการของพืชแตกต่างกัน ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการวิเคราะห์และกำหนดช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมของทานตะวันในพื้นที่ศึกษาต่อไป



ภาพที่ 11 เปรียบเทียบหน่วยความร้อนสะสมและพัฒนาการของทานตะวันพันธุ์เบา (A) และพันธุ์หนัก (B) โดยพื้นที่แรเงาสีชมพูแสดงช่วงวิกฤตที่อ่อนไหวต่อความร้อน (Critical stage) แถบกราฟแท่งแสดงปริมาณน้ำฝนรายวัน (mm)

เพื่อแสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมของทานตะวัน ได้ทำการวิเคราะห์และจัดลำดับวันเริ่มปลูกที่ให้ผลการสะสมหน่วยความร้อนสอดคล้องกับความต้องการของพืชตลอดฤดูปลูก โดยจำแนกตามพันธุ์เบาและพันธุ์หนัก ซึ่งมีระยะเวลาการเจริญเติบโตและความต้องการหน่วยความร้อนสะสมแตกต่างกัน

ตารางที่ 11 และตารางที่ 12 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับทานตะวันพันธุ์เบาและพันธุ์หนักตามลำดับ โดยแสดงช่วงวันเริ่มปลูก วันเก็บเกี่ยว และจำนวนวันที่ใช้ในการเพาะปลูก ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างของระยะเวลาการสะสมหน่วยความร้อนของทานตะวันแต่ละกลุ่มพันธุ์ภายใต้สภาพภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 11 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับทานตะวันพันธุ์เบา

ลำดับที่	วันเพาะปลูก	วันเก็บเกี่ยว	จำนวนวันที่ใช้	ความเสี่ยงต่อความร้อน
1	4 ก.ย.-12 ก.ย.	27 พ.ย.-5 ธ.ค.	85	-
2	13 ก.ย.-22 ก.ย.	7 ธ.ค.-16 ธ.ค.	86	-
3	23 ก.ย.-30 ก.ย.	18 ธ.ค.-25 ธ.ค.	87	-

ตารางที่ 12 แสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด 3 อันดับแรกสำหรับทานตะวันพันธุ์หนัก

ลำดับที่	วันเพาะปลูก	วันเก็บเกี่ยว	จำนวนวันที่ใช้	ความเสี่ยงต่อความร้อน
1	4 ก.ย.	2 ธ.ค.	90	-
2	8 ก.ย.-12 ก.ย.	7 ธ.ค.-11 ธ.ค.	91	-
3	13 ก.ย.–20 ก.ย.	13 ธ.ค.-20 ธ.ค.	92	-

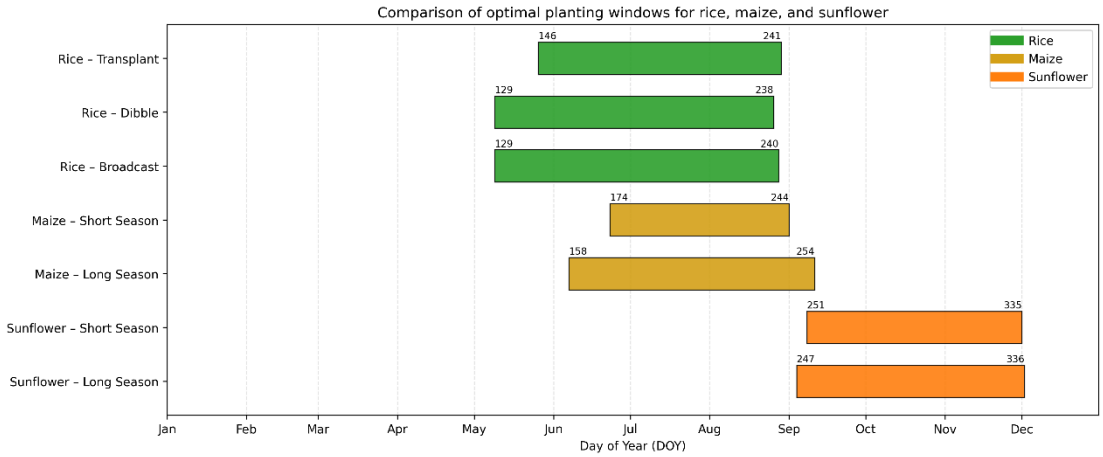
จากผลการจัดลำดับช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมของทานตะวันทั้งสองพันธุ์ พบว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเริ่มเพาะปลูกส่วนใหญ่อยู่ในช่วง ต้นเดือนกันยายนถึงปลายเดือนกันยายน ซึ่งเป็นช่วงที่สภาพภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษามีอุณหภูมิและปริมาณหน่วยความร้อนสะสมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของทานตะวัน และสามารถหลีกเลี่ยงช่วงที่มีอุณหภูมิสูงในระยะพัฒนาการที่สำคัญของพืชได้

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองกลุ่มพันธุ์พบว่า ทานตะวันพันธุ์เบาใช้ระยะเวลาการเพาะปลูกสั้นกว่าพันธุ์หนักเล็กน้อย โดยใช้เวลาประมาณ 85–87 วัน จนถึงระยะเก็บเกี่ยว ขณะที่ พันธุ์หนักใช้เวลาประมาณ 90–92 วัน สะท้อนให้เห็นว่าพันธุ์หนักต้องการหน่วยความร้อนสะสมรวมตลอดฤดูปลูกมากกว่าพันธุ์เบา จึงทำให้ระยะเวลาการเจริญเติบโตยาวนานกว่า

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นว่าการปลูกทานตะวันในช่วงเวลาดังกล่าวทำให้ระยะเก็บเกี่ยวกระจุกตัวอยู่ในช่วง ปลายเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนธันวาคม ซึ่งเป็นช่วงที่สภาพอากาศค่อนข้างแห้งและมีความเสี่ยงต่ำต่อปัญหาเรื่องความชื้นในช่วงเก็บเกี่ยว จึงเอื้อต่อการพัฒนาผลผลิตและการเก็บเกี่ยวของทานตะวันในพื้นที่ศึกษา

จากผลการวิเคราะห์ช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุดของพืชทั้งสามชนิดซึ่งสรุปไว้ในตารางก่อนหน้า ข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาจัดทำกราฟเพื่อแสดงช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมของข้าว ข้าวโพด และทานตะวันในรูปแบบเชิงเปรียบเทียบ โดยใช้แกนเวลาในรูปแบบวันของปี (Day of Year: DOY) เพื่อให้สามารถมองเห็นช่วงเวลาที่เหมาะสมของการเพาะปลูกของพืชแต่ละชนิดตลอดทั้ง

ปีได้อย่างชัดเจน ซึ่งช่วยสนับสนุนการวางแผนการจัดการการเพาะปลูกและการจัดสรรพื้นที่เพาะปลูกได้อย่างเหมาะสม



ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสม (DOY) ของข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน ในรอบปีเฉลี่ย

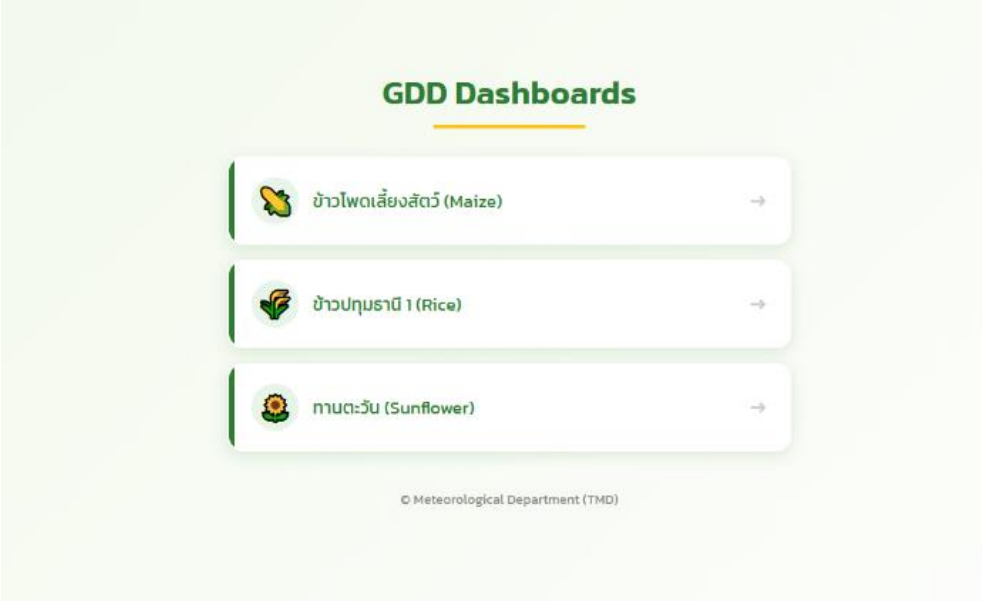
จากภาพที่ 12 จะเห็นได้ว่า ช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมของข้าวและข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มีแนวโน้มซ้อนทับกันในช่วงกลางปี โดยข้าวมีช่วงเริ่มต้นการเพาะปลูกเร็วกว่าข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เล็กน้อยและมีระยะเวลาการเพาะปลูกยาวนานกว่า ขณะที่ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มีช่วงเวลาการเพาะปลูกที่สั้นกว่าเล็กน้อยแต่ยังคงอยู่ในช่วงฤดูกาลเดียวกัน ส่งผลให้ช่วงเวลาการเพาะปลูกของพืชทั้งสองชนิดมีการทับซ้อนกันอย่างชัดเจน

ในทางตรงกันข้าม ทานตะวันมีช่วงเวลาการเพาะปลูกที่แตกต่างออกไปอย่างชัดเจน โดยช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเพาะปลูกจะอยู่ในช่วงปลายปี ซึ่งแทบไม่ทับซ้อนกับช่วงการเพาะปลูกหลักของข้าวและข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ลักษณะดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าทานตะวันมีศักยภาพในการใช้เป็นพืชทางเลือกสำหรับปลูกในช่วงพักระหว่างฤดูเพาะปลูกของข้าวหรือข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พื้นที่เพาะปลูกและลดความเสี่ยงจากการพึ่งพาพืชชนิดเดียว

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้แนวคิด GDD ร่วมกับข้อมูลภูมิอากาศย้อนหลังในการกำหนดช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสมของพืช และสามารถพัฒนาเป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการจัดการการผลิตทางการเกษตรในอนาคตได้

3.3 การพัฒนาแดชบอร์ดต้นแบบสำหรับการวิเคราะห์ GDD

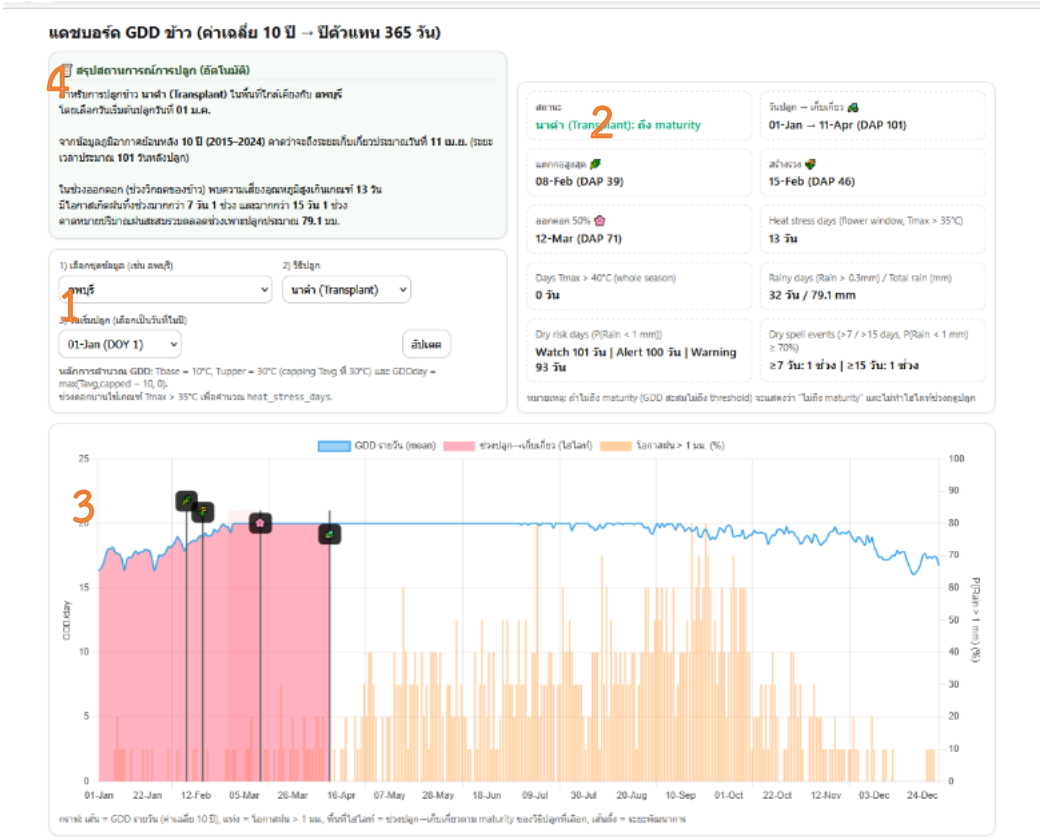
เพื่อสนับสนุนการนำผลการวิเคราะห์หน่วยความร้อนสะสม (Growing Degree Days: GDD) ไปใช้ประโยชน์ในเชิงปฏิบัติการ แดชบอร์ดต้นแบบสำหรับการแสดงผลข้อมูลภูมิอากาศและตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้องกับการเพาะปลูกพืชจึงได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยออกแบบให้สามารถแสดงผลข้อมูลในรูปแบบกราฟิกและตัวชี้วัดที่เข้าใจง่าย ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดพืช สถานีอุตุนิยมวิทยา และวันเริ่มปลูกเพื่อประเมินความเหมาะสมของช่วงเวลาการเพาะปลูกภายใต้สภาพภูมิอากาศเฉลี่ยระยะยาว



ภาพที่ 13 รูปแบบหน้าหลักของระบบแดชบอร์ด GDD สำหรับเลือกพืชเพื่อการวิเคราะห์

หน้าแรกของระบบแดชบอร์ดทำหน้าที่เป็นส่วนเลือกชนิดพืช (Crop Selection Interface) ซึ่งสามารถเข้าถึงได้ผ่านเว็บไซต์ของระบบสารสนเทศอุตุนิยมวิทยาเกษตร กรมอุตุนิยมวิทยา ที่ http://www.arcims.tmd.go.th/dailydata/GDD/ โดยแสดงรายการพืชที่มีการพัฒนาแดชบอร์ด ได้แก่ ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน ผู้ใช้สามารถเลือกพืชที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อเข้าสู่แดชบอร์ดเฉพาะของพืชนั้น ๆ ซึ่งออกแบบให้มีโครงสร้างและรูปแบบการนำเสนอข้อมูลในลักษณะเดียวกัน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างพืชได้อย่างเป็นระบบ

สำหรับการอธิบายโครงสร้างของแดชบอร์ดในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้แดชบอร์ดของ **ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1** เป็นตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการอธิบายแนวคิดและกระบวนการวิเคราะห์เพื่อสร้างแดชบอร์ดของพืชทั้ง 3 ชนิดได้อย่างเป็นรูปธรรม



ภาพที่ 14 ตัวอย่างแดชบอร์ดการวิเคราะห์ GDD สำหรับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 แสดงผลการคำนวณระยะพัฒนาการของพืช ตัวชี้วัดความเสี่ยงด้านภูมิอากาศ และกราฟข้อมูลเชิงเวลาของค่า GDD รายวันร่วมกับข้อมูลฝน เพื่อประเมินความเหมาะสมของช่วงเวลาการเพาะปลูก

โครงสร้างของแดชบอร์ด

แดชบอร์ดที่พัฒนาขึ้นถูกออกแบบให้แสดงผลข้อมูลภูมิอากาศและตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้องกับการเพาะปลูกพืชในรูปแบบที่เข้าใจง่ายและสามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจได้ โดยโครงสร้างของแดชบอร์ดประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน ได้แก่

1) ส่วนเลือกชุดข้อมูล

ส่วนนี้ทำหน้าที่เป็นส่วนกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์ โดยผู้ใช้สามารถเลือกชนิดข้อมูลที่ต้องการใช้ในการประเมิน ได้แก่ วิธีการเพาะปลูก สถานีอุตุนิยมวิทยา และวันเริ่มต้นเพาะปลูก

สำหรับการวิเคราะห์ข้าว ผู้ใช้สามารถเลือกวิธีการปลูกได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ นาดำ นาหว่าน และนาหยอด ซึ่งแต่ละวิธีการปลูกมีความต้องการหน่วยความร้อนสะสม (GDD) ในแต่ละระยะการเจริญเติบโตแตกต่างกัน การกำหนดวิธีการปลูกจึงส่งผลต่อระยะเวลาการพัฒนาการของพืชในระบบการคำนวณ

นอกจากนี้ ผู้ใช้สามารถเลือกสถานีอุตุนิยมวิทยาที่ต้องการใช้เป็นตัวแทนของพื้นที่ศึกษา เพื่อให้ข้อมูลภูมิอากาศที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มีความใกล้เคียงกับสภาพพื้นที่จริงมากที่สุด รวมทั้งสามารถกำหนดวันเริ่มต้นการเพาะปลูกที่ต้องการศึกษาได้ ซึ่งระบบจะนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการคำนวณระยะเวลาการเจริญเติบโตและตัวชี้วัดทางภูมิอากาศที่เกี่ยวข้อง

2) ส่วนแสดงสถานะ

หลังจากกำหนดเงื่อนไขในส่วนเลือกชุดข้อมูลแล้ว ระบบจะแสดงผลลัพธ์การวิเคราะห์ในรูปแบบสถานะของการเพาะปลูก รวมทั้งแสดงตัวชี้วัดความเสี่ยงด้านภูมิอากาศ โดยประกอบด้วยข้อมูลสำคัญหลายประการ ได้แก่

- ระยะเวลาที่คาดว่าจะใช้ตั้งแต่วันเพาะปลูกจนถึงวันเก็บเกี่ยว
- ระยะเวลาที่พืชใช้ในการเข้าสู่แต่ละระยะพัฒนาการตามค่า GDD สะสม
- จำนวนวันที่คาดว่าจะเผชิญกับอุณหภูมิสูงเกินเกณฑ์ 35 องศาเซลเซียสในช่วงออกดอก ซึ่งเป็นช่วงที่พืชมีความอ่อนไหวต่อความร้อน
- จำนวนวันที่คาดว่าจะมีฝนตกและปริมาณฝนสะสมตลอดช่วงฤดูปลูก
- ความเสี่ยงของการเกิดช่วงฝนทิ้งช่วง โดยแสดงโอกาสที่ฝนจะไม่ตกต่อเนื่องมากกว่า 7 วัน และมากกว่า 15 วัน

นอกจากนี้ สำหรับการวิเคราะห์ทานตะวัน ระบบยังมีการประเมินปริมาณฝนสะสมในช่วงระยะปลายฤดู ซึ่งเป็นช่วงพัฒนาการที่มีความอ่อนไหวต่อปริมาณฝนสะสม เพื่อช่วยประเมินความเหมาะสมของช่วงเวลาการปลูกได้อย่างครอบคลุมมากขึ้น

3) ส่วนกราฟแสดงข้อมูลเชิงเวลา (Time-series Visualization)

ส่วนล่างของแดชบอร์ดเป็นกราฟแสดงข้อมูลเชิงเวลา ซึ่งรวมข้อมูลสำคัญหลายชนิดไว้ในกราฟเดียว ได้แก่

- ค่า GDD รายวันเฉลี่ย
- ช่วงพัฒนาการของพืช
- ข้อมูลโอกาสการเกิดฝนรายวัน
- ช่วงเวลาที่พืชมีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิสูง

การนำเสนอข้อมูลหลายมิติในกราฟเดียวช่วยให้ผู้ใช้สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการสะสมหน่วยความร้อนกับสภาพภูมิอากาศได้อย่างชัดเจน และสามารถประเมินความเหมาะสมของช่วงเวลาการเพาะปลูกได้อย่างเป็นระบบ ทั้งในด้านการเจริญเติบโตของพืชและความเสี่ยงด้านภูมิอากาศ

4) ส่วนสรุปผลอัตโนมัติ (Data Story)

ส่วนนี้ทำหน้าที่สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดที่ปรากฏบนแดชบอร์ดให้อยู่ในรูปแบบข้อความที่เข้าใจง่าย โดยมีลักษณะเป็นการอธิบายสถานการณ์การเพาะปลูกในเชิงเรื่องราว (data story) เพื่อให้ผู้ใช้งานทั่วไป เช่น เกษตรกร หรือผู้ปฏิบัติงานด้านการเกษตร สามารถตีความข้อมูลได้สะดวกมากขึ้น

ตัวอย่างข้อความสรุป เช่น

“สำหรับการปลูกข้าว นาดำ (Transplant) ในพื้นที่ใกล้เคียงกับสถานีลพบุรี โดยเลือกวันเริ่มต้นปลูกวันที่ 1 มกราคม จากข้อมูลภูมิอากาศย้อนหลัง 10 ปี (ค.ศ. 2015–2024) คาดว่าจะถึงระยะเก็บเกี่ยวประมาณวันที่ 11 เมษายน หรือประมาณ 101 วันหลังปลูก ในช่วงออกดอกซึ่งเป็นช่วงวิกฤตของข้าว พบว่ามีความเสี่ยงที่จะเผชิญกับอุณหภูมิสูงเกินเกณฑ์จำนวน 13 วัน นอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดฝนทิ้งช่วงมากกว่า 7 วัน จำนวน 1 ช่วง และมากกว่า 15 วัน จำนวน 1 ช่วง โดยคาดว่าปริมาณฝนสะสมตลอดช่วงเพาะปลูกจะอยู่ที่ประมาณ 79.1 มิลลิเมตร”

ข้อความในส่วนนี้จะมีการปรับเปลี่ยนโดยอัตโนมัติทุกครั้งเมื่อผู้ใช้เปลี่ยนสถานี อุตุนิยมวิทยา วิธีการปลูก หรือวันเริ่มต้นการเพาะปลูก ทำให้ผู้ใช้สามารถประเมินสถานการณ์การเพาะปลูกในเงื่อนไขต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว

แดชบอร์ดที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการกำหนดช่วงเวลาการเพาะปลูกที่เหมาะสม โดยผู้ใช้สามารถเลือกสถานีอุตุนิยมวิทยา วิธีการปลูก และวันเริ่มปลูก เพื่อดูผลการวิเคราะห์ GDD และตัวชี้วัดทางภูมิอากาศที่เกี่ยวข้อง ผลลัพธ์ที่ได้ช่วยให้สามารถประเมินความเสี่ยงจากอุณหภูมิสูงและความแปรปรวนของฝนในช่วงพัฒนาการที่สำคัญของพืช ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับการวางแผนการเพาะปลูกและการบริหารจัดการความเสี่ยงทางการเกษตร

4. สรุปการดำเนินการ

การศึกษานี้มุ่งพัฒนากรอบการวิเคราะห์ความเหมาะสมของช่วงเวลาปลูกพืชเศรษฐกิจโดยใช้หน่วยความร้อนสะสม (Growing Degree Days: GDD) ร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวันย้อนหลัง เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างพัฒนาการของพืชกับสภาพภูมิอากาศในระดับสถานีตรวจอากาศ การศึกษาครอบคลุมพืชเศรษฐกิจตัวแทนสามชนิด ได้แก่ ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน พร้อมทั้งประเมินความเสี่ยงจากอุณหภูมิสูงในช่วงวิกฤตของการเจริญเติบโตของพืช และพัฒนาเครื่องมือแสดงผลในรูปแบบแดชบอร์ดต้นแบบเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจด้านการเกษตร

บทนี้นำเสนอการสรุปผลการดำเนินการศึกษา พร้อมทั้งวิจารณ์ผลการศึกษาในเชิงแนวคิดและวิธีการ ตลอดจนเสนอแนะแนวทางการพัฒนาและการประยุกต์ใช้ในอนาคต

4.1 สรุปผลการดำเนินการ

เพื่อให้การนำเสนอผลการศึกษาสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย การสรุปผลการดำเนินการในหัวข้อนี้จึงจัดเรียงตามลำดับวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยเริ่มจากการพัฒนากรอบการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืชในเชิงภูมิอากาศด้วยหน่วยความร้อนสะสม การกำหนดระยะพัฒนาการของพืชเศรษฐกิจต้นแบบ การประเมินความเหมาะสมของช่วงเวลาปลูกภายใต้เงื่อนไขความเสี่ยงด้านภูมิอากาศ ตลอดจนการพัฒนาเครื่องมือแสดงผลข้อมูลในรูปแบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้านอุตุนิยมวิทยาเกษตร รวมเป็น 4 ประเด็นหลัก ดังนี้

4.1.1 การพัฒนากรอบการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืชเชิงภูมิอากาศด้วยหน่วยความร้อนสะสม

การศึกษานี้ได้พัฒนากรอบการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืชในเชิงภูมิอากาศ โดยใช้หน่วยความร้อนสะสม (Growing Degree Days: GDD) เป็นตัวแปรหลักในการเชื่อมโยงข้อมูลอุณหภูมิรายวันกับพัฒนาการของพืช ภายใต้แนวคิดว่าการเจริญเติบโตของพืชสามารถอธิบายได้ด้วยการสะสมพลังงานความร้อนมากกว่าการอิงช่วงเวลาปฏิทินเพียงอย่างเดียว

กรอบการวิเคราะห์ดังกล่าวถูกออกแบบให้มีโครงสร้างเชิงระบบ โดยเริ่มจากการสร้างปีตัวแทน (Mean-Year 365-day) จากข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวันย้อนหลังอย่างน้อย 10 ปี เพื่อเป็นตัวแทนของสภาพภูมิอากาศเฉลี่ยของพื้นที่ศึกษา จากนั้นจึงคำนวณหน่วยความร้อนสะสมอย่างต่อเนื่อง และใช้เป็นฐานในการกำหนดลำดับพัฒนาการของพืชในเชิงอุณหภูมิ พร้อมทั้งเชื่อมโยงไปสู่การประเมินความเสี่ยงจากอุณหภูมิสูงในช่วงวิกฤตของพืช ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดความเหมาะสมของช่วงเวลาปลูก ผลลัพธ์ที่ได้ไม่เพียงเป็นการคำนวณเชิงตัวเลข แต่เป็นการจัดระเบียบกระบวนการวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปของกรอบแนวคิดที่มีขั้นตอนชัดเจน มีหลักการรองรับ และสามารถ

นำไปประยุกต์ใช้ซ้ำได้กับสถานีตรวจอากาศอื่นที่มีข้อมูลรายวันย้อนหลังเพียงพอ รวมถึงพืชชนิดอื่นที่มีข้อมูลพารามิเตอร์ด้านหน่วยความร้อนสะสมและลักษณะการเจริญเติบโต กรอบการวิเคราะห์นี้จึงทำหน้าที่เป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ระยะพัฒนาการของพืช การประเมินช่วงเวลาปลูกและการพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจด้านอุตุนิยมวิทยาเกษตรในลำดับถัดไป

4.1.2 การกำหนดระยะพัฒนาการของพืชเศรษฐกิจด้วยหน่วยความร้อนสะสม

การศึกษานี้ได้กำหนดและวิเคราะห์ระยะพัฒนาการของพืชเศรษฐกิจต้นแบบ ได้แก่ ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และทานตะวัน โดยใช้หน่วยความร้อนสะสม (GDD) เป็นตัวแปรหลักร่วมกับแนวทางการแบ่งระยะการเจริญเติบโตของพืชตามมาตรฐานที่ยอมรับ โดยในกรณีของข้าว อ้างอิงการแบ่งระยะพัฒนาการจากงานวิจัยของ เบ็ญญา เจมิทำ และคณะ (2564) ซึ่งมีการจำแนกระยะการเจริญเติบโตอย่างละเอียด ขณะที่ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และทานตะวันใช้แนวทางการแบ่งระยะพัฒนาการตามมาตรฐานของ FAO

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าพืชแต่ละชนิดมีรูปแบบการสะสมหน่วยความร้อนและความยาวของระยะพัฒนาการที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การใช้ GDD ทำให้สามารถกำหนดช่วงระยะสำคัญของพืชในลักษณะอิงพัฒนาการจริง แทนการอ้างอิงตามจำนวนวันคงที่ ส่งผลให้การวิเคราะห์มีความยืดหยุ่นและสอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศของแต่ละพื้นที่มากยิ่งขึ้น โดยผลลัพธ์ของการกำหนดระยะพัฒนาการดังกล่าวได้ถูกนำเสนอในรูปแบบแดชบอร์ดในบทที่ 3 ซึ่งช่วยให้สามารถติดตามลำดับพัฒนาการของพืชได้อย่างชัดเจนและเข้าใจง่าย

แนวทางดังกล่าวจึงเป็นองค์ประกอบสำคัญของกรอบการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพืชชนิดอื่นได้ภายใต้หลักการเดียวกัน เมื่อมีข้อมูลพารามิเตอร์ด้านหน่วยความร้อนสะสมและลักษณะการเจริญเติบโตที่เหมาะสม

4.1.3 การประเมินความเหมาะสมของช่วงเวลาปลูกเชิงภูมิอากาศจากหน่วยความร้อนสะสมและความเสี่ยงอุณหภูมิสูง

การศึกษานี้ได้ประเมินความเหมาะสมของช่วงเวลาปลูกพืชเศรษฐกิจโดยใช้หน่วยความร้อนสะสม (GDD) ร่วมกับการวิเคราะห์ความเสี่ยงจากอุณหภูมิสูงในช่วงวิกฤตของพืชเป็นเกณฑ์หลัก ซึ่งเป็นช่วงที่พืชมีความไวต่อความเครียดจากความร้อนและมีผลต่อผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ แนวทางดังกล่าวทำให้สามารถระบุช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมในเชิงภูมิอากาศได้อย่างเป็นระบบ โดยอิงทั้งการพัฒนาการของพืชและความเสี่ยงด้านอุณหภูมิร่วมกัน

ผลการวิเคราะห์พบว่าพืชแต่ละชนิดมีช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยข้าวมีช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมอยู่ในช่วงประมาณเดือนพฤษภาคมถึงปลายเดือนสิงหาคม (ประมาณ DOY 129–241 ขึ้นอยู่กับวิธีปลูก) ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมอยู่ในช่วงเดือน

มิถุนายนถึงต้นเดือนกันยายน (ประมาณ DOY 158–254) ขณะที่ทานตะวันมีช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมในช่วงปลายฤดูฝนต่อเนื่องถึงฤดูหนาว (ประมาณ DOY 247–336) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของความต้องการอุณหภูมิและความไวต่อความร้อนของพืชแต่ละชนิดอย่างชัดเจน

นอกจากนี้ การศึกษายังได้จัดเตรียมข้อมูลความน่าจะเป็นของการเกิดฝนทิ้งช่วง รวมทั้งปริมาณฝนสะสมเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลาปลูก เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจภายใต้บริบทการจัดการน้ำของแต่ละพื้นที่ โดยข้อมูลดังกล่าวถูกนำเสนอในรูปแบบแดชบอร์ด ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถพิจารณาทั้งความเสี่ยงด้านอุณหภูมิและความเสี่ยงด้านน้ำควบคู่กันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการประเมินดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากรอบการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการคัดเลือกช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมได้ และสามารถประยุกต์ใช้เพื่อสนับสนุนการวางแผนการเพาะปลูกในระดับพื้นที่ได้อย่างเป็นระบบ

4.1.4 การพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจด้านอุตุนิยมวิทยาเกษตรในรูปแบบแดชบอร์ดต้นแบบ

การศึกษานี้ได้พัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจด้านอุตุนิยมวิทยาเกษตรในรูปแบบแดชบอร์ดต้นแบบ โดยนำกรอบการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการประมวลผลและแสดงผลข้อมูลเชิงภูมิอากาศที่เกี่ยวข้องกับการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจอย่างเป็นระบบ แดชบอร์ดดังกล่าวสามารถแสดงข้อมูลหน่วยความร้อนสะสม ระยะพัฒนาการของพืช ตลอดจนตัวชี้วัดความเสี่ยงด้านอุณหภูมิและความน่าจะเป็นของฝนทิ้งช่วงในรูปแบบที่เข้าใจง่ายและสามารถใช้งานได้จริง เพื่อให้เกษตรกรและผู้สนใจสามารนำไปใช้วิเคราะห์หาช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสมที่เหมาะกับลักษณะภูมิอากาศในพื้นที่และการเข้าถึงชลประทานของตนได้

เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะเป็นระบบเปิดที่สามารถประยุกต์ใช้กับสถานีตรวจอากาศอื่น ๆ ได้ โดยอาศัยข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวันย้อนหลังที่มีความต่อเนื่องเพียงพอ และสามารถปรับใช้กับพืชชนิดอื่นได้เมื่อมีข้อมูลพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ทำให้มีศักยภาพในการขยายผลสู่ระดับพื้นที่และระดับประเทศ เพื่อสนับสนุนการวางแผนการเพาะปลูกและการบริหารจัดการความเสี่ยงด้านภูมิอากาศในภาคการเกษตร

แดชบอร์ดต้นแบบที่พัฒนาขึ้นได้ถูกนำเสนอผ่านระบบออนไลน์ของส่วนอุตุนิยมวิทยาเกษตร ซึ่งสามารถเข้าถึงได้ที่ http://www.arcims.tmd.go.th/dailydata/GDD/ โดยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการบูรณาการข้อมูลอุตุนิยมวิทยากับการวิเคราะห์เชิงภูมิอากาศเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในเชิงปฏิบัติการได้อย่างเป็นรูปธรรม

4.2 วิจารณ์ผลการดำเนินการ

การวิจัยเรื่องการพัฒนากรอบการวิเคราะห์ช่วงเวลาปลูกพืชเศรษฐกิจโดยใช้หน่วยความร้อนสะสม (GDD) ร่วมกับข้อมูลภูมิอากาศย้อนหลัง มีประเด็นที่ควรนำมาวิจารณ์เพื่อชี้ให้เห็นถึงความสอดคล้องระหว่างทฤษฎีและผลการดำเนินการ ดังนี้

4.2.1 ประสิทธิภาพของ GDD ในการกำหนดระยะพัฒนาการพืช

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการใช้หน่วยความร้อนสะสม (GDD) สามารถสะท้อนเวลาเชิงชีวภาพ (Biological Time) ของพืชได้ดีกว่าการนับจำนวนวันคงที่แบบเดิม สอดคล้องกับแนวทางของ FAO เนื่องจากอัตราการเจริญเติบโตของพืชขึ้นอยู่กับพลังงานความร้อนที่ได้รับจริง โดยยกตัวอย่างจากการวิเคราะห์ระยะเวลาเก็บเกี่ยวของข้าวปทุมธานี 1 ซึ่งพบว่าระยะเวลาเพาะปลูกมีความแปรผันตามวิธีการปลูกและวันเริ่มต้นปลูก เมื่อเปลี่ยนวันเริ่มปลูกจากวันที่ 1 มกราคม เป็น 1 เมษายน ระยะเวลาเพาะปลูกจนถึงเก็บเกี่ยวของนาดำลดลงจาก 101 วัน เหลือ 96 วัน และนาหว่านลดลงจาก 117 วัน เหลือ 112 วัน เนื่องจากพืชได้รับค่า GDD รายวันที่สูงขึ้นในช่วงฤดูร้อน ส่งผลให้สามารถสะสมหน่วยความร้อนได้ครบเกณฑ์เร็วขึ้น

ความผันแปรของจำนวนวันในฤดูปลูกตามวันเริ่มต้นปลูกนี้สะท้อนบทบาทของอุณหภูมิในฐานะปัจจัยสำคัญที่กำหนดพัฒนาการทางสรีรวิทยาของพืชในพื้นที่ศึกษา การใช้กรอบการวิเคราะห์ GDD จึงช่วยให้สามารถอธิบายและประมาณช่วงเวลาการพัฒนาของพืชได้อย่างยืดหยุ่นตามสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้นจริง แตกต่างจากการวางแผนแบบดั้งเดิมที่อิงปฏิทิน ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญที่งานวิจัยนี้นำมาใช้เพื่อสนับสนุนการกำหนดช่วงเวลาเพาะปลูกที่เหมาะสม

4.2.2 การบูรณาการ "ความเสี่ยงอุณหภูมิวิกฤต" เข้ากับกรอบการวิเคราะห์

จุดแข็งที่สำคัญของการศึกษานี้คือการไม่พิจารณาเพียงแค่การสะสมความร้อนให้ครบตามเกณฑ์ แต่มีการบูรณาการ "ช่วงวิกฤตด้านความร้อน" (Heat-sensitive window) เข้าไปด้วย จากการวิเคราะห์ชุดข้อมูลปีตัวแทน พบว่าช่วงเดือนมีนาคมถึงมิถุนายนเป็นช่วงที่มีความเสี่ยงสูงที่สุดเนื่องจากอุณหภูมิเกิน 35 องศาเซลเซียส หากพืชเข้าสู่ระยะออกดอกในช่วงนี้ เช่น ข้าวจะเสี่ยงต่อการเป็นหมันหรือข้าวโพดจะสูญเสียความมีชีวิตของละอองเกสร แดชบอร์ดที่พัฒนาขึ้นจึงช่วยให้เกษตรกรสามารถ "เลื่อนวันปลูก" เพื่อหลีกเลี่ยงหน้าต่างความเสี่ยงนี้ได้อย่างเป็นรูปธรรม

อย่างไรก็ตาม การประเมินความเหมาะสมของช่วงเวลาปลูกในงานวิจัยนี้ยังเน้นปัจจัยด้านอุณหภูมิเป็นหลัก โดยใช้ข้อมูลฝนในรูปแบบความน่าจะเป็นเป็นเพียงข้อมูลประกอบการตัดสินใจไม่ได้นำมาใช้เป็นเกณฑ์หลักในการจัดลำดับความเหมาะสม ส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้สะท้อน “ความเหมาะสมเชิงอุณหภูมิ” มากกว่าความเหมาะสมเชิงระบบการผลิตจริงที่ต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านน้ำ ดิน และการจัดการร่วมด้วย

4.2.3 ปีตัวแทนทางภูมิอากาศ และการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ

การใช้ข้อมูลย้อนหลัง 10 ปี (พ.ศ. 2558–2567) เพื่อสร้างปีตัวแทน ถือเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการสะท้อนสภาวะภูมิอากาศปัจจุบัน (Current Climate) ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ระบุว่าการใช้ข้อมูลย้อนหลังนานเกินไป (เช่น 30 ปีตามมาตรฐาน WMO) อาจทำให้ค่าเฉลี่ยถูก "เจือจาง" ด้วยข้อมูลในอดีตที่อุณหภูมิยังไม่สูงเท่าปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์บนพื้นฐานของค่าเฉลี่ย (Climatological Mean) อาจมีข้อจำกัดในการประเมินเหตุการณ์สุดขั้ว (Extreme Events) ที่เกิดขึ้นเป็นรายปี ซึ่งเกษตรกรยังคงต้องใช้ข้อมูลพยากรณ์อากาศระยะสั้นประกอบการตัดสินใจ

4.2.4 ศักยภาพของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) ในเชิงปฏิบัติ

แดชบอร์ดต้นแบบที่พัฒนาขึ้นทำหน้าที่เป็น "ตัวแปลผล" (Interpreter) ที่เปลี่ยนข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่ซับซ้อนให้สามารถสื่อสารผ่านภาพ (Visualization) และสร้างเป็น "Data Story" หรือเรื่องราวที่เข้าใจง่ายสำหรับเกษตรกร โดยเฉพาะการนำเสนอความน่าจะเป็นของฝนทิ้งช่วงเป็นข้อมูลประกอบ ซึ่งช่วยให้การวางแผนเพาะปลูกมีความยืดหยุ่นตามบริบทการจัดการน้ำและการเข้าถึงระบบชลประทานที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ผลจากการเปรียบเทียบช่วงปลูกที่เหมาะสม (Optimal Planting Windows) ยังชี้ให้เห็นว่าทานตะวันเป็นพืชทางเลือกที่เหมาะสมมากสำหรับปลูกในช่วงปลายปี เนื่องจากแทบไม่ทับซ้อนกับฤดูปลูกหลักของข้าวและข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงกลยุทธ์ที่สำคัญในการบริหารจัดการพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ที่ดินและลดความเสี่ยงจากการพึ่งพาพืชชนิดเดียว

4.3 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาครั้งนี้ มีข้อเสนอแนะแนวทางการนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์และการศึกษาต่อยอดในอนาคต ดังนี้

4.3.1 การขยายผลสู่พืชเศรษฐกิจชนิดอื่น

ควรพัฒนากรอบการวิเคราะห์นี้ไปประยุกต์ใช้กับพืชเศรษฐกิจชนิดอื่นที่มีความสำคัญในระบบการเกษตรของประเทศ เช่น อ้อย ถั่วเหลือง ถั่วลิสง และกาแฟ ซึ่งมีลักษณะการตอบสนองต่ออุณหภูมิและช่วงวิกฤตที่แตกต่างกัน การขยายผลดังกล่าวจะช่วยเพิ่มความครอบคลุมของฐานข้อมูลเชิงภูมิอากาศ และสนับสนุนการวางแผนการเพาะปลูกในระดับประเทศได้ดียิ่งขึ้น

4.3.2 การประยุกต์ใช้กับสถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วประเทศ

กรอบการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสถานีอุตุนิยมวิทยาอื่น ๆ ที่มีข้อมูลรายวันย้อนหลังอย่างน้อย 10 ปี เพื่อสร้างข้อมูลเชิงพื้นที่ (spatial analysis) ของความเหมาะสมของช่วงเวลาปลูก ซึ่งจะช่วยให้สามารถพัฒนาแผนที่ความเหมาะสมเชิงภูมิอากาศ (agro-climatic zoning) และสนับสนุนการตัดสินใจในระดับพื้นที่และระดับภูมิภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.3.3 การพัฒนาพารามิเตอร์เฉพาะสายพันธุ์

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และทานตะวันอ้างอิงจากแนวทางมาตรฐานของ FAO ซึ่งยังอยู่ในระดับกว้าง เช่น การแบ่งพันธุ์เป็นพันธุ์เบาและพันธุ์หนัก ดังนั้น การศึกษาเพิ่มเติมเพื่อกำหนดค่า GDD และพารามิเตอร์ที่เฉพาะเจาะจงตามสายพันธุ์ จะช่วยเพิ่มความแม่นยำและความเหมาะสมของผลการวิเคราะห์ในระดับการใช้งานจริง

4.3.4 การบูรณาการปัจจัยด้านน้ำและดิน

แม้ว่าการศึกษานี้จะมีการนำข้อมูลความน่าจะเป็นของฝนมาใช้เป็นข้อมูลประกอบ แต่ยังไม่ได้รวมปัจจัยด้านความชื้นในดิน ระบบชลประทาน หรือคุณสมบัติดินเข้ามาเป็นเกณฑ์หลัก ดังนั้น การพัฒนากรอบการวิเคราะห์ให้บูรณาการปัจจัยด้านน้ำและดินร่วมกับ GDD จะช่วยให้การประเมินความเหมาะสมของช่วงเวลาปลูกมีความสมบูรณ์และใกล้เคียงกับสภาพการผลิตจริงมากยิ่งขึ้น

4.3.5 การพัฒนาเพื่อรองรับความแปรปรวนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

การใช้ข้อมูลปีตัวแทนจากค่าเฉลี่ยย้อนหลังช่วยให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์เชิงวางแผนระยะยาว อย่างไรก็ตาม ควรมีการพัฒนาเพิ่มเติมโดยนำข้อมูลปีสุดขั้ว (extreme years) หรือข้อมูลพยากรณ์ภูมิอากาศในอนาคตมาวิเคราะห์ร่วม เพื่อประเมินความเสี่ยงภายใต้สภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง และเพิ่มความสามารถในการรองรับความไม่แน่นอนในอนาคต

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

เอกสารภาษาอังกฤษ

Aiken, R. M. (2005). Applying thermal time scales to sunflower development. Agronomy Journal, 97(3), 746-754.

Anandhi, A., Perumal, S., Gowda, P. H., Knapp, M., Hutchinson, S., Harrington Jr., J., Murray, L., Kirkham, M. B., & Rice, C. W. (2013). Long-term spatial and temporal trends in frost indices in Kansas, USA. Climatic Change, 120(1–2), 169–181.

Chimenti, C. A., Hall, A. J., & López, M. S. (2001). Embryo-growth rate and duration in sunflower as affected by temperature. Field Crops Research, 69(1), 81-88.

Grigorieva, E. (2020). Evaluating the Sensitivity of Growing Degree Days as an Agro-Climatic Indicator of the Climate Change Impact: A Case Study of the Russian Far East. Atmosphere, 11, 404.

Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. Weather and Climate Extremes, 10, 4-10.

Kalyar, T., Rauf, S., Teixeira Da Silva, J. A., & Shahzad, M. (2014). Handling sunflower (Helianthus annuus L.) populations under heat stress. Archives of Agronomy and Soil Science, 60(5), 655-672.

Kukal, M. S., & Irmak, S. (2018). Climate-driven crop yield and yield variability and climate change impacts on the US Great Plains agricultural production. Scientific Reports, 8, 3450.

Paredes, P., López-Urrea, R., Martínez-Romero, Á., Petry, M., Cameira, M. R., Montoya, F., Salman, M., & Pereira, L. S. (2025). Estimating the lengths of crop growth stages to define the crop coefficient curves using growing degree days (GDD): Application of the revised FAO56 guidelines. Agricultural Water Management, 319, 109758.

Rondanini, D., Savin, R., & Hall, A. J. (2003). Dynamics of fruit growth and oil quality of sunflower (Helianthus annuus L.) exposed to brief intervals of high temperature during grain filling. Field Crops Research, 83(2), 79-90.

Satake, T., & Yoshida, S. (1978). High temperature-induced sterility in indica rices at flowering. Japanese Journal of Crop Science, 47(1), 6-17.

Skaggs, K. E., & Irmak, S. (2012). Long-term trends in air temperature distribution and extremes, growing degree days, and spring and fall frosts for climate impact assessments on agricultural practices in Nebraska. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 51, 2060-2073.

World Meteorological Organization. (2017). WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals (WMO-No. 1203).

Zhang, Z., Wang, P., Chen, Y., Song, X., Wei, X., & Shi, P. (2014). Global warming over 1960–2009 did increase heat stress and reduce cold stress in the major rice-planting areas across China. European Journal of Agronomy, 59, 49-56.

เอกสารภาษาไทย

กฤษณาพร เทิดกิจเจริญ, สมพงศ์ จันทร์แก้ว, ธิดารัตน์ มอญขาม, และ จิรวัฒน์ สนิทชน. (2566). การประเมินความทนทานต่ออุณหภูมิสูงในเชื้อพันธุกรรมข้าวนาสวนพื้นเมืองไทย ในระยะต้นกล้า และระยะเติมเต็มเมล็ด. แก่นเกษตร, 51(5), 975-993.

จิราลักษณ์ ภูมิไธสง, อัจฉรา จอมสง่าวงศ์, เชาวนาถ พฤทธิเทพ, ปวีณา ไชยวรรณ์, และอารดา มาสริ. (2558). ผลของช่วงวันปลูกต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดหวาน. รายงานผลงานเรื่องเต็มการทดลองที่สิ้นสุด, ศูนย์วิจัยพืชไร่ชัยนาท, 1-13.

ดวงฤทัย ป้อมเพชร, วิทิตร ใจอารีย์, พีรพล ม่วงงาม, และ ชเนษฎ์ ม้าลำพอง. (2560). การประเมินความทนทานต่ออุณหภูมิสูงที่ระยะเจริญพันธุ์ในพันธุ์ข้าวที่ไม่ไวต่อช่วงแสง. แก่นเกษตร, 45(ฉบับพิเศษ 1), 1024-1030.

เบ็ญญา เจมิทำ, ปาริชาติ พรมโชติ, สุตเขตต์ นาคะเสถียร, ธานี ศรีวงศ์ชัย, พีรพงษ์ พักโพธิ์เย็น, อธิชา ศรีจุ้ย, และ จรัชญาน์ คงสุวรรณ. (2564). อิทธิพลของวิธีการปลูกต่อค่าความร้อนสะสม การเจริญเติบโต และผลผลิตของข้าวพันธุ์กข49 และปทุมธานี 1. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 60 สาขาพืช. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศุภณัฐ กายถวาย, สุเนตร สืบค้า, ปารวี กาญจนประโชติ, และ โชติพงศ์ กาญจนประโชติ. (2567). การทำนายวันเก็บเกี่ยวข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และ กข – แม่โจ้ 2 อย่างแม่นยำจากค่าอุณหภูมิสะสม (GDD) ด้วยการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ IoT เก็บข้อมูลสภาพอากาศแบบดิจิทัล. วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม, 17(4), 1-10.