

การวิเคราะห์ภาวะความเครียดจากการขาดน้ำในข้าวโพดภายใต้สภาวะการขาดน้ำ
โดยการถ่ายภาพความร้อน



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร
มีนาคม 2563
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง “การวิเคราะห์ภาวะความเครียดการขาดน้ำในข้าวโพดภายใต้สภาวะขาดน้ำ
โดยการถ่ายภาพความร้อน”
ของ นายชูเกียรติ พระดาเวช

ได้รับการพิจารณาให้ไว้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์/กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรรณวิภา แก้วประดิษฐ์ พลพิณิจ)

.....ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันวิสาข์ ปั่นศักดิ์)

.....กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(Dr. Wolfram Spreer)

.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ดร. สุพรรณิกา อินต๊ะนนท์)

อนุมัติ
.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มณีสว่าง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

118 ส.ค. 2563

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประสบความสำเร็จอย่างสมบูรณ์ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันวิสาข์ บัณเฑาะดี ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ Dr.Wolfram Spreer กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิภา แก้วประดิษฐ์ พลพิณิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และดร.สุพรรณิกา อินต๊ะนนท์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าแก่ผู้วิจัย เพื่อให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2562 ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ ประสบความสำเร็จอย่างสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัวของผู้วิจัย และขอขอบคุณ นายณัฐพล คงดี และทีมผู้ช่วยวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันวิสาข์ บัณเฑาะดี ผู้ซึ่งช่วยให้คำแนะนำสนับสนุน และช่วยเหลือมาโดยตลอด ขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ทุกๆ ท่าน

ชูเกียรติ พระดาเวช

ชื่อเรื่อง	การวิเคราะห์ภาวะความเครียดจากการขาดน้ำในข้าวโพด ภายใต้สภาวะการขาดน้ำโดยการถ่ายภาพความร้อน
ผู้วิจัย	ชูเกียรติ พระดาเวท
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันวิสาข์ บัณเฑาะดี
กรรมการที่ปรึกษา	Dr.Wolfram Spreer
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2562
คำสำคัญ	ภาวะความเครียดการขาดน้ำของพืช กล้องถ่ายภาพความร้อน ดัชนีการขาดน้ำของพืช

บทคัดย่อ

การผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์และเมล็ดพันธุ์ ความเครียดจากการขาดน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ลดประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แสง ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการเจริญเติบโตและการพัฒนาของต้นข้าวโพด (*Zea mays* L.) ทำให้ผลผลิตข้าวโพดลดลง การศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ภาวะเครียดจากการขาดน้ำของข้าวโพดโดยใช้ภาพถ่ายทางความร้อน และเพื่อประเมินลักษณะทางสรีรวิทยา องค์ประกอบผลผลิตและผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ภายใต้สภาวะขาดน้ำ ทำการทดลองภายใต้สภาพเรือนทดลองในตำบลท่าโพธิ์ จังหวัดพิษณุโลก โดยทำการทดลองวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) ประกอบด้วย 5 กรรมวิธี กรรมวิธีละ 5 ซ้ำ โดยกำหนดปัจจัยต่างๆ ลงในแผนการทดลอง ดังนี้ กรรมวิธีที่ 1 ระดับการชลประทานเต็มรูปแบบ 100% (กรรมวิธีควบคุม: T1) กรรมวิธีที่ 2 ลดการให้น้ำ 50% ของกรรมวิธีที่ 1 เมื่อข้าวโพดมีพื้นที่การปกคลุมดิน 20% (20 วันหลังปลูก) และกลับมาให้น้ำเท่ากับกรรมวิธีที่ 1 เมื่อข้าวโพดมีเกสรตัวผู้ (T2) กรรมวิธีที่ 3 ลดการให้น้ำ 50% ของกรรมวิธีที่ 1 เมื่อข้าวโพดมีพื้นที่การปกคลุมดิน 20% (20 วันหลังปลูก) ถึงอายุการเก็บเกี่ยว (T3) กรรมวิธีที่ 4 ลดการให้น้ำ 50% ของกรรมวิธีที่ 1 เมื่อพืชมีเกสรตัวผู้ถึงช่วงอายุการเก็บเกี่ยว (T4) และกรรมวิธีที่ 5 งดการให้น้ำเมื่อพืชมีเกสรตัวผู้ถึงช่วงอายุการเก็บเกี่ยว (T5) ทำการปลูกข้าวโพดลูกผสม ซีพี888 จำนวนสองเมล็ดต่อถุงพลาสติก ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนถ่ายภาพความร้อน (FLIR C2) ทั้งหมดสามช่วงเวลา ได้แก่ 08.00 - 10.00 น., 10.00 - 12.00 น. และ 12.00 - 14.00 น. ใช้ซอฟต์แวร์ FLIR Tool 5.1 ในการแปลภาพความร้อนเพื่อให้ได้ข้อมูลอุณหภูมิของทรงพุ่มข้าวโพด และใช้ในการคำนวณดัชนีความเครียดของน้ำ (Crop Water Stress

Index: CWSI) การถ่ายภาพกำหนดระยะห่างระหว่างกล้องกับทรงพุ่มต้นข้าวโพดที่ 1.5 เมตร สำหรับการวิเคราะห์ความเครียดจากการขาดน้ำโดยกล้องถ่ายภาพความร้อน และค่าชักนำการเปิด-ปิดปากใบ จะเก็บข้อมูลเมื่อต้นข้าวโพดอายุ 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 วันหลังปลูก และการประเมินลักษณะทางสรีรวิทยา ได้แก่ ความสูงต้น พื้นที่ใบ ค่าความเขียวใบ (ค่า SPAD) และประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง (Maximum quantum yield of PSII) เก็บข้อมูลเมื่อต้นข้าวโพดอายุ 20, 35 และ 50 วัน หลังปลูก และหลังเก็บเกี่ยวผลผลิตทำการประเมินองค์ประกอบผลผลิตและผลผลิตต่อต้น ดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest Index) ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ผลการศึกษา พบว่า เมื่อดินเริ่มขาดน้ำนำไปสู่ค่าดัชนีความเครียดของน้ำ (CWSI) ที่สูงขึ้นโดยเฉพาะในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. และพบว่า ค่าชักนำการเปิด-ปิดปากใบมีค่าสูงเมื่อดัชนีความเครียดของน้ำต่ำ และค่าชักนำการเปิด-ปิดปากใบลดลงเมื่อค่าดัชนีความเครียดของน้ำสูงขึ้น นอกจากนี้ พบว่า ช่วงเวลา 12.00 -14.00 น. ค่าดัชนีความเครียดของน้ำกับค่าชักนำการเปิด-ปิดปากใบมีความสัมพันธ์กันในทางลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และอยู่ในระดับสูงถึงสูงมาก ($R^2 = 0.82-0.92$) สำหรับ T2 และ T3 ที่อยู่ภายใต้สภาวะการขาดน้ำตั้งแต่ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบจนถึงระยะออกดอก และสะสมน้ำหนักเมล็ด ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง ค่าชักนำการเปิด-ปิดปากใบ พื้นที่ใบ ค่าความเขียวใบ ดัชนีการเก็บเกี่ยว จำนวนเมล็ดต่อฝัก น้ำหนักฝักต่อต้น มวลชีวภาพแห้งต่อต้น ต่ำกว่ากรรมวิธีควบคุม T4 และ T5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และยังส่งผลให้ผลผลิตต่อต้นลดลงถึง 72 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีควบคุม ทั้งนี้ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง CWSI กับค่าชักนำการเปิด-ปิดปากใบ ความสูงต้น พื้นที่ใบ ค่าความเขียว ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง ดัชนีการเก็บเกี่ยว จำนวนเมล็ดต่อฝัก น้ำหนักฝักต่อต้น มวลชีวภาพแห้งต่อต้น ผลผลิตต่อต้น สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้โดยสมการเชิงเส้น และพบว่า มีความสัมพันธ์กันในเชิงลบอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง ($R^2 = 0.49 - 0.72$) ดังนั้น การใช้ภาพถ่ายความร้อนมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เพื่อตรวจสอบความเครียดจากการขาดน้ำในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

Title DIAGNOSIS OF CROP WATER STRESS IN MAIZE UNDER
WATER DEFICIT DONDITIONS BY THERMAL IMAGING

Author Chukiat Pradawet

Advisor Assistant Professor Wanwisa Pansak, Ph.D.

Co-Advisor Wolfram Spreer, Ph.D.

Academic Paper Thesis M.S. in Agriculture science,
Naresuan University, 2019

Keywords Crop water stress, Thermal camera, Crop water stress index:
CWSI

ABSTRACT

Maize production plays an important role in the feed and seed industries. Water deficit stress is a major factor that reduces efficiency of photosynthesis and impacts growth and development in maize (*Zea mays* L.), leading to decreased maize yield. The objectives of this study were to develop a technique for diagnosis of crop water stress in maize by thermal imaging under water deficit condition and to evaluate the physiological characteristics, yield components and yield of maize under varying water deficit conditions. A greenhouse experiment was conducted at the green house experiment at Tha Pho Sub-district, Phitsanulok province. The experiment was arranged in a completely randomized design (CRD). There were five treatments with five replications consisting of 1) 100% full irrigation level (control; T1) 2) full irrigation level until 20 day after sowing (DAS), after that 50% of full irrigation was applied until anthesis (T2) 3) full irrigation level until 20 day after sowing (DAS), after that 50% of full irrigation was applied until harvest (T3) 4) 50% of full irrigation was applied after anthesis until harvest (T4) and 5) no irrigation after anthesis (T5). Two maize hybrid CP888 seeds were sown per plastic bag. Thermal images were captured by thermal camera (FLIR C2) for three periods at 8.00 - 10.00 a.m., 10.00 a.m. - 12.00 p.m. and 12.00 - 2.00 p.m. FLIR Tool 5.1 software was used for the image analysis to get canopy temperature. A thermal imager was used for measuring the canopy temperature to calculate crop water stress index (CWSI) of maize under water deficit conditions.

The distance between the camera and the plant canopy was set at 1.5 m. Thermal images and stomatal conductance (gs) were measured at 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 and 60 DAS. Moreover, assessing the physiological characteristics example maize height, leaf area, SPAD values and Maximum quantum yield of PSII were collected at 20 35 and 50 DAS. After harvest, yield components, yield and harvest index of maize were evaluated. The result showed that soil water deficit led to higher CWSI values during 12.00 - 2.00 p.m. Stomata conductance (gs) were high at low CWSI and reduced with increasing CWSI. At 12.00 - 2.00 p.m., CWSI and stomatal conductance (gs) were at high level statistically with significant negative relationship with R^2 from 0.82 to 0.92. For T2 and T3 under water deficit conditions from vegetative stage until flowering stage to grain filling, resulting in photosynthesis system, stomata conductance, leaf area, SPAD harvest index, number of seeds per pod, pod weight per plant, dry biomass per plant were significantly ($p < 0.05$) lower than the control, T4 and T5 and also resulted in a 72 percent reduction in yield per plant when compared to the control treatment. The relationship between CWSI and stomatal conductance, photosynthesis system, maize height, leaf area, SPAD values, harvest index, number of seeds per pod, pod weight per plant, dry biomass per plant and maize yield per plant were described by linear equation and the negative relationship were observed with medium to high level statistically with significant relationship with R^2 from 0.49 to 0.72. Therefore, it is feasible to use thermal infrared imager to determine crop water stress in maize.

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
จุดมุ่งหมายของการวิจัย.....	4
สมมุติฐานของการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
ขอบเขตการวิจัย.....	4
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
ความสำคัญของน้ำต่อพืช.....	6
สภาวะการขาดน้ำของพืช.....	6
วิธีวัดความเครียดจากการขาดน้ำของพืช.....	8
การถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared thermal imaging).....	10
สภาพพื้นที่ที่เหมาะสมในการปลูกข้าวโพดและฤดูการปลูกที่เหมาะสม.....	11
ลักษณะทั่วไปของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์.....	13
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	15
อุปกรณ์.....	15
สถานที่ทำการทดลอง.....	15
การเตรียมการปลูก.....	15
การวางแผนการทดลอง.....	16
ระบบการให้น้ำ.....	17
การวัดความเครียดของความชื้นดิน.....	18
การเก็บข้อมูลสภาพอากาศในโรงเรือน.....	18
การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต องค์ประกอบผลผลิตและผลผลิต.....	18

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การวัดภาวะความเครียดการขาดน้ำในข้าวโพด.....	19
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	21
4 ผลการวิจัย.....	22
สภาพภูมิอากาศในโรงเรือนระหว่างการทดลอง.....	22
ความเครียดของน้ำในดิน (ค่า pF).....	23
อุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพดภายใต้ภาวะขาดน้ำแตกต่างกัน.....	24
ดัชนีความเครียดของข้าวโพด (CWSI) และการชักนำการเปิดปิดปากใบ สัมพันธ์ภายใต้ภาวะขาดน้ำแตกต่างกัน.....	27
ลักษณะทางสรีรวิทยา องค์ประกอบผลผลิต และผลผลิตข้าวโพดภายใต้ ภาวะขาดน้ำแตกต่างกัน.....	29
ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CWSI กับการชักนำการเปิดปิดปากใบ.....	34
ความสัมพันธ์ระหว่างสรีรวิทยา องค์ประกอบผลผลิต ผลผลิตข้าวโพดและ ค่า CWSI.....	37
5 บทสรุป.....	47
อภิปรายผลการทดลอง.....	47
สรุปผลการวิจัย.....	51
ข้อเสนอแนะงานวิจัย.....	52
บรรณานุกรม.....	53
ประวัติผู้วิจัย.....	60

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 Crop Water Requirement.....	12
2 Soil properties of the experimental study.....	16
3 Irrigation plan.....	17
4 Yield and yield components under different water deficit conditions.....	34



สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 The number of days varies between different growth classes and environments.....	7
2 Sack bag/with hole.....	16
3 Image processing by FLIR tool software.....	20
4 Daily minimum, maximum and mean temperatures (°C) in a greenhouse during 08.-00 am. - 06.00 p.m.....	22
5 Daily minimum, maximum and mean relative humidity (%) In a greenhouse during 08.-00 am. - 06.00 p.m.....	23
6 Curve of average change in pF value at 10 cm soil depth under different water deficit conditions.....	24
7 Canopy temperature during 10.00 a.m.-12.00 p.m. under different water deficit conditions.....	25
8 Canopy temperature during 12.00 - 02.00 p.m. under different water deficit conditions.....	26
9 Crop water stress index during 12.00 - 02.00 p.m. under different water deficit conditions.....	27
10 Relative stomatal conductance during 12.00 - 02.00 p.m. under different water deficit conditions.....	28
11 Maize height under different water deficit condition.....	29
12 Maize leaf area under different water deficit conditions.....	30
13 SPAD values under different water deficit conditions.....	31
14 Maximum quantum yield of PSII under different water deficit conditions.....	32
15 Relationship between CWSI and stomatal conductance during 08.00-10.00 a.m.....	35

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
16 Relationship between CWSI and stomatal conductance during 10.00-12.00 a.m.....	36
17 Relationship between CWSI and stomatal conductance during 12.00 -2.00 p.m.....	37
18 Relationship between CWSI and maize height.....	38
19 Relationship between CWSI and leaf area.....	39
20 Relationship between CWSI and SPAD values.....	40
21 Relationship between CWSI and maximum quantum yield of PSII.....	41
22 Relationship between CWSI and dry pods weight.....	42
23 Relationship between CWSI and number of seeds.....	43
24 Relationship between CWSI and dry biomass weight.....	44
25 Relationship between CWSI and yield.....	45
26 Relationship between CWSI and harvest Index.....	46

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (*Zea mays* Linn.) จัดเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นหนึ่งในวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ประมาณ 94 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตข้าวโพดใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ของไทย โดยความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ปี 2559/60 มีความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในปริมาณ 5.85 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจาก 5.72 ล้านตัน ในปี 2558/59 คิดเป็นร้อยละ 2.27 (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2559) ทั้งนี้ เนื่องจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์ โดยเฉพาะไก่เนื้อ และสุกร ทำให้ความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพื่อเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์เพิ่มขึ้น โดยความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพื่อเป็นส่วนประกอบในการผลิตอาหารสัตว์ประมาณ 5.6-6 ล้านตันต่อปี (สำนักงานวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อีกส่วนหนึ่งจะนำไปใช้ในด้านอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมแป้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และโรงงานไฟฟ้าชีวมวล เป็นต้น สำหรับสถานการณ์การผลิต และการตลาดข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย ปี 2561/62 คาดว่าเนื้อที่เพาะปลูกมีประมาณ 6.92 ล้านไร่ เพิ่มขึ้นจาก 6.57 ล้านไร่ ในปี 2560 ในส่วนของพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ส่วนใหญ่อยู่ในเขตภาคเหนือ คิดเป็นร้อยละ 67 จังหวัดที่เนื้อที่เพาะปลูกมากที่สุด 5 อันดับแรก ได้แก่ จังหวัดเพชรบูรณ์ น่าน นครราชสีมา เลย และตาก (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2561) โดยในปี 2561/62 มีผลผลิตรวม 5.06 ล้านตัน ปัญหาที่พบในการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในเขตภาคเหนือ คือพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่บริเวณพื้นที่ลาดชันเชิงเขาและอาศัยน้ำฝนเป็นหลัก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตต่ำ ทำให้เกษตรกรมีการบุกเบิกพื้นที่ป่าเพื่อปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เชิงเดี่ยวเพิ่มเติม การบุกเบิกพื้นที่ป่าเพื่อทำเกษตรเชิงเดี่ยวส่งผลให้เกิดปัญหาพื้นที่ป่าต้นน้ำถูกบุกรุกเพื่อทำการเกษตร ทำให้ดินเกิดการชะล้างพังทลายของดินอย่างรุนแรง ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและดินเสื่อมโทรม จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าถึงเกษตรกรสามารถขยายพื้นที่การผลิตข้าวโพดเพิ่มให้มากขึ้น แต่ผลผลิตต่อไร่กลับไม่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทำให้เป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตและสิ้นเปลืองทรัพยากรในด้านต่างๆ เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ทำให้ในปี 2560 กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้กำหนดมาตรการแก้ไขปัญหของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ คือ ลดการปลูกข้าวโพดในพื้นที่ไม่ถูกต้อง วางแผนปรับสัดส่วนผลผลิตข้าวโพด ช่วงต้นฤดูฝน : ปลายฤดูฝน : ฤดูแล้ง จากเดิม 72 : 23 : 5 เป็น 30 : 20 : 50 โดยปลูกในพื้นที่ทั่วไป ทำการเพิ่มพื้นที่ปลูกข้าวโพดในฤดูแล้งแทนข้าวรอบที่ 2 โดยส่งเสริมข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในพื้นที่นาและดำเนินการบริหารจัดการข้าวโพด

รูปแบบแปลงใหญ่ เพื่อบริหารจัดการน้ำ การผลิต และการตลาด (สำนักงานปลัดกระทรวงมหาดไทย, 2560) รวมถึงนโยบายการลดการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในพื้นที่ป่าและพื้นที่ลาดชัน ดังนั้น ปัจจัยสำคัญที่จะสนับสนุนให้การผลิตข้าวโพดช่วงฤดูแล้งหรือการปลูกข้าวโพดในพื้นที่ราบลุ่มนี้ประสบผลสำเร็จ คือการจัดการน้ำ โดยการกำหนดเวลาการให้น้ำชลประทานอย่างแม่นยำและเหมาะสม ซึ่งน้ำเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากในการผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ถึงแม้ว่าข้าวโพดจะใช้น้ำตลอดฤดูการผลิตน้อยกว่าการปลูกข้าวนาปรัง แต่ถ้าข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เกิดความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำจะจำกัดการคายน้ำของพืช รวมทั้งการปิดของปากใบ และการระเหยของน้ำจากพื้นผิวใบ นอกจากนี้ ยังลดประสิทธิภาพของการสังเคราะห์ด้วยแสง นอกจากนี้ ความเครียดจากการขาดน้ำส่งผลให้ความสูงต้น ต้นนี้พื้นที่ใบ น้ำหนักแห้ง และผลผลิตลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเครียดจากการขาดน้ำในช่วงของการออกไหม (tasselling) ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ส่งผลให้ผลสูญเสียผลผลิต 66-93% และความเครียดจากการขาดน้ำในช่วงการเจริญเติบโต (vegetative) ส่งผลให้สูญเสียผลผลิตถึง 40% (Cakir, 2004) โดยลักษณะทางสรีรวิทยาการทนแล้งที่มีความสัมพันธ์กับผลผลิตข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมในภาวะขาดน้ำ คือ น้ำหนักแห้งรวม อุณหภูมิพุ่มใบ และศักย์ของน้ำในใบ (Boonpradub, & Grudloyma, 2007) ดังนั้น การประมาณการให้น้ำที่ถูกต้อง จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการตัดสินใจวางแผนการชลประทานและทำนายผลผลิตพืชผลในการทำเกษตรกรรม (Zhang Li, & Zhang, 2012)

สำหรับวิธีวัดสภาวะความเครียดจากการขาดน้ำของพืช มีหลายวิธี เช่น การวัดค่าสรีรวิทยาของน้ำในใบพืช การชักนำการเปิดปิดปากใบของพืช ปริมาณการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช และวัดอุณหภูมิใบหรือเรณอยอดของพืช เป็นต้น เป็นต้น (Jones, 2004; Ni et al., 2015) สำหรับการวัดศักย์ของน้ำโดยตรงทำได้โดยการใช้ Pressure chamber เป็นวิธีมาตรฐานในการวัดความเครียดน้ำของพืช โดยการวัดศักย์ความดันในน้ำหล่อเลี้ยงในเนื้อเยื่อของพืช ซึ่งสามารถทำได้ในภาคสนาม แต่วิธีการนี้เป็นวิธีที่ต้องทำลายตัวอย่างพืชที่ทดสอบและใช้เวลานาน (Supacharoenkun, 2008) การวัดการชักนำการเปิด-ปิดของปากใบพืช โดยเครื่อง Porometer เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวัดการชักนำการเปิด-ปิดของปากใบพืชในภาคสนาม แต่ยังมีข้อจำกัดของวิธีการนี้ทำให้ต้องวัดแยกเป็นใบๆ จึงต้องใช้เวลานานในการวัด (Jones et al., 2002) และเครื่องมือวัดการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยการวัดอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างใบพืชกับอากาศบริเวณรอบใบพืช (Sophaanodora, 1993) เนื่องจากในกระบวนการการสังเคราะห์แสงมีวัตถุดิบหลัก คือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้ำ และแสง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แสง คือ แป้งและน้ำตาล แต่ในสภาวะการขาดน้ำของพืช จะส่งผลให้เกิดการใช้ CO_2 ในกระบวนการเปิดปิดปากใบน้อยลง เนื่องจาก CO_2 จะผ่านเข้ามา

ทางช่องปากใบของพืชและพืชที่อยู่ในสภาวะความเครียดน้ำปากใบจะปิดเพื่อลดการคายน้ำ (สายัณห์ สดุดี, 2534) และเครื่องมือวัดการสังเคราะห์แสงจะวัดอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ระหว่างใบพืชกับอากาศรอบใบหรือกลุ่มพืช การวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของกลุ่มพืชใน แปลงปลูกค่อนข้างยุ่งยากและมีราคาแพง ทั้งนี้ เพราะต้องมีเครื่องมือวัด ตลอดจน chamber ต้องมี ขนาดใหญ่เพียงพอ อีกทั้งการวัดการสังเคราะห์ด้วยแสงในแปลงปลูกพืชมักมีข้อจำกัด เนื่องจาก สภาพธรรมชาติ เช่น ฝน แสง และปริมาณ CO_2 ที่สามารถควบคุมได้ยาก (Sophanodora, 1993) อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างวิธีการข้างต้นเหล่านี้ใช้เวลานานในการวิเคราะห์ ไม่สามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง ไม่สะดวกสำหรับการพกพา ต้องวัดแยกเป็นใบๆ และทำลายตัวอย่างในการวิเคราะห์ ดังนั้น ในปัจจุบัน จึงมีการพัฒนาวิธีวัดความเครียดจากการขาดน้ำพืช โดยการวัดอุณหภูมิใบหรือเรือนยอดของพืช และนำมาพัฒนาเป็นดัชนีความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำของพืช (Crop Water Stress Index, CWSI) ถูกนำไปใช้ในพืชหลายชนิด เช่น ข้าวสาลี (Yuan et al., 2004; Gontia, & Tiwari, 2008) ฝ้าย (Silva et al., 2005; O'shaughnessy et al., 2011) ข้าวโพด (Anda, 2009; Li et al., 2010; Romano et al., 2011; Taghvaeian et al., 2012) ถั่ว (Erdem et al., 2006) เป็นต้น โดยการวัดดัชนี ความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำของพืชด้วยวิธีการวัดอุณหภูมิของวัดจากการแผ่รังสีอินฟราเรด โดยการถ่ายภาพรังสีความร้อนของใบพืชหรือเรือนยอดทรงพุ่มของพืชปลูก จึงเป็นอีกวิธีการที่สามารถ ใช้ในการตรวจจับจุดเริ่มต้นภาวะความเครียดจากการขาดน้ำของพืช เพื่อกำหนดเวลาการให้น้ำ ที่แม่นยำ (Ben-Gal et al., 2009; Alchanatis et al., 2010) การตรวจวัดอุณหภูมิของใบด้วยเครื่องวัด อุณหภูมิแบบอินฟราเรด เพื่อตรวจจับความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำของพืช ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิใบเป็นผลมาจากการปิดช่องปากของพืชเพื่อลดการคายน้ำ เนื่องจากพืชเกิดสภาวะเครียด จากการขาดน้ำ (Romano et al., 2011) อุณหภูมิของใบจึงใช้เป็นตัวบ่งชี้การเกิดสภาวะเครียดจาก การขาดน้ำของพืชได้ (Gontia, & Tiwari, 2008; Zia et al., 2012) การตรวจวัดอุณหภูมิด้วยเครื่อง ตรวจวัดรังสีอินฟราเรดเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำของพืช โดยไม่ทำลายตัวอย่างรวดเร็วแม่นยำ และสามารถวัดได้อย่างต่อเนื่องและมีราคาไม่แพง (DeJonge et al., 2015)

ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาดัชนีภาวะวิกฤตจากการขาดน้ำของข้าวโพด โดยใช้ภาพถ่ายความร้อนด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งเป็นวิธีการวัดภาวะความเครียดการขาดน้ำ ในข้าวโพดโดยไม่ทำลายตัวอย่างพืช รวดเร็วและแม่นยำ รวมถึงการประเมินลักษณะทางสรีรวิทยา และผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ภายใต้สภาวะขาดน้ำ

จุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาเทคนิคสำหรับการวินิจฉัยภาวะเครียดจากการขาดน้ำของข้าวโพดโดยใช้ภาพถ่ายทางความร้อน
2. เพื่อประเมินลักษณะทางสรีรวิทยาและผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ภายใต้สภาวะขาดน้ำของแต่ละระยะการเจริญเติบโต

สมมุติฐานของการวิจัย

การใช้ภาพถ่ายความร้อนสามารถใช้วิเคราะห์ภาวะความเครียดจากการขาดน้ำและพัฒนาดัชนีภาวะวิกฤตจากการขาดน้ำในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ได้ และข้าวโพดที่ได้รับภาวะความเครียดจากการขาดน้ำมีผลทำให้ผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลดลง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงเทคนิคในการวิเคราะห์ภาวะความเครียดการขาดน้ำในข้าวโพดโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Image camera) เพื่อช่วยในการวางแผนการชลประทานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นในการเกษตรแม่นยำ ได้ข้อมูลทางสรีรวิทยาและผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ภายใต้สภาวะขาดน้ำในระยะต่างๆ ของการเจริญเติบโต

ขอบเขตการวิจัย

ทำการศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์ภาวะความเครียดการขาดน้ำในข้าวโพดโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Image camera) บริเวณหมู่ที่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก พิกัดละติจูด 16.736463 ลองจิจูด 100.188596 โดยทำการทดลองในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลูกผสม พันธุ์ซีพี 888 ทำการทดลอง 5 กรรมวิธี กรรมวิธีละ 5 ซ้ำ

นิยามศัพท์เฉพาะ

ภาวะความเครียดการขาดน้ำของพืช (Crop water stress) คือ สภาวะที่พืชมีอัตราการคายน้ำออกของพืชมากกว่าอัตราการดูดน้ำของพืช ส่งผลให้ปริมาณน้ำในพืชลดลงและมีผลกระทบต่อลักษณะทางสรีรวิทยาของพืช ยังรวมไปถึงผลผลิตพืชอีกด้วย ช่วงเวลาและระดับความรุนแรงของการเกิดสภาวะการขาดน้ำ ส่งผลให้พืชมีการตอบสนองต่อสภาวะการขาดน้ำที่แตกต่างกันออกไป (สายัณห์ สดุดี, 2537)

กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal camera) คือ ระบบการถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด เครื่องตรวจจับอินฟราเรดจะดูดซับพลังงานอินฟราเรดที่ถูกปล่อยออกมาจากวัตถุ และแปลงเป็นไฟฟ้าแรงกระตุ้น แรงกระตุ้นทางไฟฟ้าถูกส่งไปที่สัญญาณหน่วยประมวลผล ซึ่งจะทำให้การแปลงข้อมูลลงในภาพความร้อน อุปกรณ์สแกนภาพความร้อนส่วนใหญ่จะสแกนในอัตรา 30 ครั้งต่อวินาที และสามารถตรวจจับอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -20 ถึง $1,500^{\circ}\text{C}$ (Meola, & Carlomagno, 2004)

ดัชนีการขาดน้ำของพืช (Crop water stress index: CWSI) ดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (CWSI) เป็นดัชนีที่ใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีความเครียดของน้ำในพืช โดยใช้อุณหภูมิของใบพืช (Idso et al., 1981)



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความสำคัญของน้ำต่อพืช

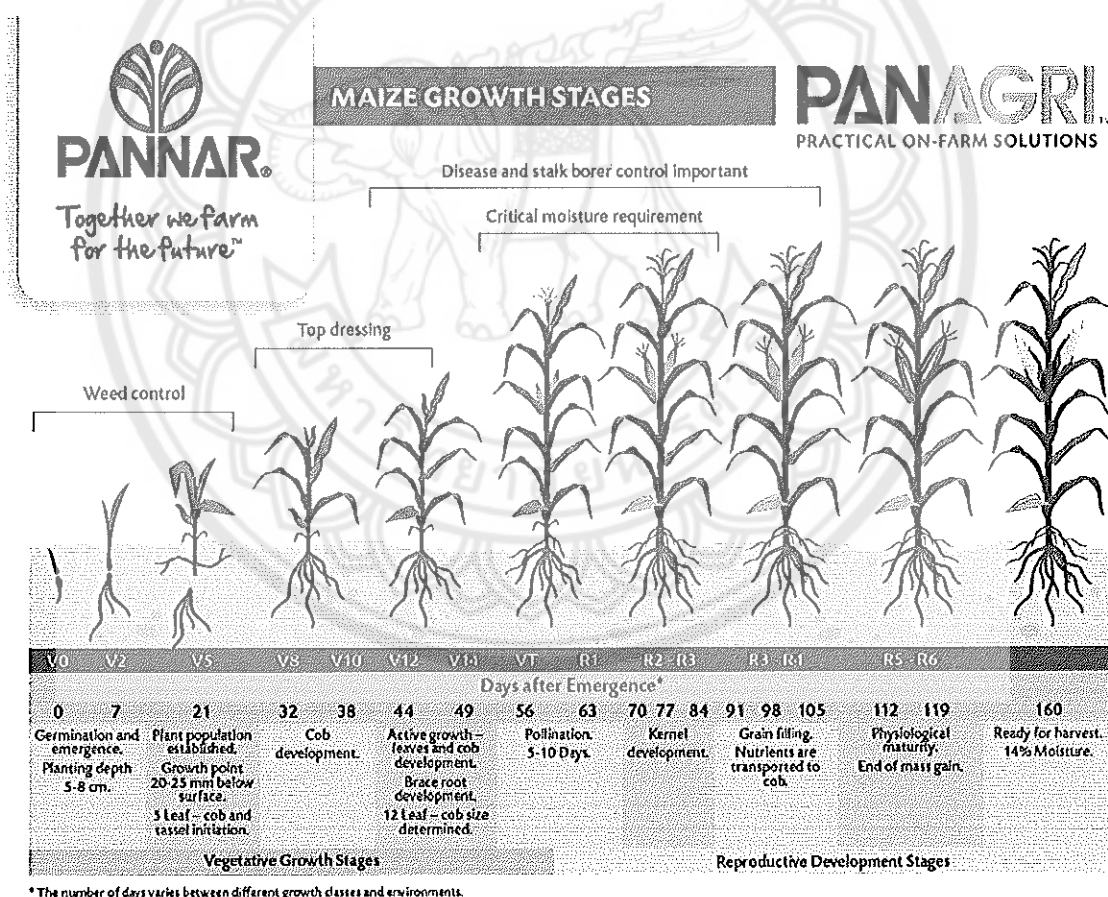
น้ำเป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเซลล์พืช โดยในพืชจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบ 30-95 % ของน้ำหนักสดของพืช ปริมาณในพืชขึ้นอยู่กับชนิดของพืช อายุพืช เนื้อเยื่อหรืออวัยวะของพืช น้ำเป็นตัวทำละลายที่ช่วยในการละลายธาตุอาหารในดินและลำเลียงอาหาร แร่ธาตุอาหาร สารละลายต่างๆ ภายในพืช น้ำยังเป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการสังเคราะห์ของพืช โดยที่คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำจะทำปฏิกิริยากันเมื่อได้รับแสงทำให้ได้แป้งหรือน้ำตาลออกมา ซึ่งแป้งหรือน้ำตาลที่ได้เป็นอาหารของพืช และในกระบวนการคายน้ำเป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะน้ำจากของเหลวเปลี่ยนไปเป็นไอ ซึ่งกระบวนการนี้ต้องอาศัยความร้อนที่มีปริมาณสูงน้ำจึงช่วยให้พืชลดอุณหภูมิของใบลง (สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์, 2536)

สภาวะการขาดน้ำของพืช

สภาวะการขาดน้ำ คือ สภาวะที่พืชมีอัตราการคายน้ำออกของพืชมากกว่าอัตราการดูดน้ำของพืช ส่งผลให้ปริมาณน้ำในพืชลดลงและมีผลกระทบต่อลักษณะทางสรีรวิทยาของพืช ยังรวมไปถึงผลผลิตพืชอีกด้วย ช่วงเวลาและระดับความรุนแรงของการเกิดสภาวะการขาดน้ำ ส่งผลให้พืชมีการตอบสนองต่อสภาวะการขาดน้ำที่แตกต่างกันออกไป (สายัณห์ สดุดี, 2537)

น้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญที่สุดในการผลิตพืช ความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำจะจำกัดการคายน้ำของพืช รวมทั้งการปิดของปากใบ และการระเหยของน้ำจากพื้นผิวใบ นอกจากนี้ยังลดประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แสงและจำกัดการผลิตพืช ดังนั้น จึงมีนัยสำคัญในการเกษตรแนวทางการจัดการเพื่อตรวจจับปริมาณน้ำในพืช การประมาณค่าน้ำที่ถูกต้อง จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อตัดสินใจในการชลประทานและทำนายผลผลิตพืชผลในการทำเกษตรกรรม (Zhang Li, & Zhang, 2012) ผลกระทบของการขาดน้ำต่อผลผลิตพืชในการศึกษาผลของความเครียดน้ำในระยะการเจริญเติบโตที่แตกต่างกันต่อระยะการเจริญเติบโตของพืชและระยะเจริญพันธุ์ของข้าวโพด ความเครียดจากการขาดน้ำส่งผลให้ความสูงต้น ดัชนีพื้นที่ใบ น้ำหนักแห้ง และผลผลิตลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเครียดจากการขาดน้ำในช่วงของการออกไหม (tasselling) ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ส่งผลให้ผลสูญเสียผลผลิต 66-93% และความเครียดจากการขาดน้ำในช่วงการเจริญเติบโต (vegetative) ส่งผลให้ผลสูญเสียผลผลิตถึง 40% (Cakir, 2004) และในการศึกษาลักษณะ

ทางสรีรวิทยาที่เกี่ยวข้องกับความทนแล้งในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ยังพบว่า สภาพการขาดน้ำในช่วงออกดอกของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ทำให้ผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลดลง 44-65% สำหรับพันธุ์ลูกผสม และสำหรับลักษณะทางสรีรวิทยาการทนแล้งที่มีความสัมพันธ์กับผลผลิตข้าวโพดพันธุ์ลูกผสมในภาวะขาดน้ำ คือ น้ำหนักแห้งรวม อุณหภูมิฟุมโบ และศักย์ของน้ำในใบ (Boonpradub, & Grudloyma, 2007) การชลประทานที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตพืช แม้พืชจะรับปัจจัยอื่นๆ อย่างเพียงพอ แต่หากพืชเกิดสภาวะการขาดน้ำจะทำให้พืชหยุดการเจริญเติบโตหรือตายได้ การชลประทานจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทำเกษตรกรรม (Mihailovic et al., 2014) การทำให้พืชเกิดสภาวะเครียดจากการขาดน้ำ ส่งผลกระทบต่อการซึมผ่านของน้ำและการดูดซึมน้ำของพืชลดลง เมื่อพืชสัมผัสกับความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำ ทำให้พืชลดการซึมผ่านของน้ำและการดูดซึมน้ำของพืช และยังส่งผลให้อุณหภูมิในใบเพิ่มสูงขึ้น (Naeeni et al., 2014)



ภาพ 1 The number of days varies between different growth classes and environments

ที่มา: <http://www.pannar.com>

วิธีวัดความเครียดจากการขาดน้ำของพืช

วิธีวัดสภาวะความเครียดจากการขาดน้ำของพืช มีหลายวิธี เช่น การวัดศักย์ของน้ำในใบ การชักนำการเปิดปิดปากใบของพืช ปริมาณการสังเคราะห์แสงของพืช และการใช้กล้อง Thermal imaging เป็นต้น (Jones, 2004; Ni et al., 2015) สำหรับการวัดศักย์ของน้ำโดยตรงทำได้โดยการใช้ Pressure chamber เป็นวิธีมาตรฐานในการวัดความเครียดน้ำของพืชโดยการวัดศักย์ความดันในน้ำหล่อเลี้ยงในเนื้อเยื่อของพืช ซึ่งสามารถทำได้ในภาคสนาม แต่วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ต้องทำลายตัวอย่างพืชที่ทดสอบและใช้เวลามาก (Supacharoenkun, 2008) การวัดการชักนำการเปิด-ปิดของปากใบพืช โดยเครื่อง Porometer (Jones et al., 2002) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวัดการวัดการชักนำการเปิด-ปิดของปากใบพืชในภาคสนาม แต่ยังมีข้อจำกัดของวิธีการนี้ทำให้ต้องวัดแยกเป็นใบๆ จึงต้องใช้เวลาในการวัด การวัดปริมาณการสังเคราะห์แสงของพืชด้วยเครื่องมือวัดการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดเคลื่อนย้ายได้ (Sophanodora, 1993) เนื่องจากในกระบวนการการสังเคราะห์แสงมีวัตถุดิบหลัก คือ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และแสง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แสง คือ แป้งและน้ำตาล แต่ในสภาวะการขาดน้ำของพืช จะส่งผลให้เกิดการใช้ CO_2 ในกระบวนการเปิดปิดปากใบน้อยลง เนื่องจาก CO_2 จะผ่านเข้ามาทางช่องปากใบของพืชและพืชที่อยู่ในสภาวะความเครียดน้ำปากใบจะปิดเพื่อลดการคายน้ำ (สายัณห์ สดุดี, 2534) และเครื่องมือวัดการสังเคราะห์แสงจะวัดอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ระหว่างใบพืชกับอากาศรอบใบหรือกลุ่มพืช การวัดอัตราการสังเคราะห์แสงของกลุ่มพืชในแปลงปลูกค่อนข้างยุ่งยากและมีราคาแพง ทั้งนี้ เพราะต้องมีเครื่องมือวัด ตลอดจน chamber ต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอ อีกทั้งการวัดการสังเคราะห์แสงในแปลงปลูกพืชมักมีข้อจำกัด เนื่องจากสภาพธรรมชาติ เช่น ฝน แสง และคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สามารถควบคุมได้ยาก (Sophanodora, 1993) อย่างไรก็ตามวิธีการเบื้องต้นเหล่านี้ใช้เวลาในการวิเคราะห์ ไม่สามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง ไม่สะดวกสำหรับการพกพา ต้องวัดแยกเป็นใบๆ และทำลายตัวอย่างในการวิเคราะห์ ดังนั้น ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาวิธีวัดความเครียดจากการขาดน้ำพืช โดยใช้ Thermal imaging ซึ่งเป็นวิธีการใหม่ในการตรวจหาความเครียดของน้ำในพืชที่ไม่ทำลายต้นพืช เป็นดัชนีชี้วัดความเครียดน้ำของพืช โดยปกติต้นพืชที่อยู่ในสภาวะความเครียดน้ำปากใบจะปิดเพื่อลดการคายน้ำ ถ้าการคายน้ำน้อยอุณหภูมิใบจะสูงขึ้น ผลกระทบนี้สามารถมองเห็นได้ด้วยภาพถ่ายความร้อน จากการใช้กล้อง Thermal imaging ซึ่งการใช้เทคนิคดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อใช้คู่กับการวัดการเปิด-ปิดของปากใบพืชโดยเครื่อง Porometer (Jones et al., 2002) ในการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า กล้อง Thermal imaging มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการชักน้ำของปากใบ (Jones et al., 2002; Leinonen et al., 2006) และมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับศักย์น้ำในใบ (LWP) (Cohen et al., 2005) อย่างไรก็ตาม สภาพอากาศในพื้นที่มีผลต่อการวัด

พลังงานความร้อนภายในทรงพุ่ม การวิเคราะห์ภาพโดยรวมที่ได้จากกล้องสามารถปรับปรุงความแม่นยำได้ด้วยสูตรคำนวณค่าดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (Crop Water Stress Index, CWSI) ที่คำนวณจากอุณหภูมิเรือนยอดของพืช CWSI ให้ข้อมูลที่ชัดเจนเกี่ยวกับความเครียดของพืช และการชักนำการเปิด-ปิดของปากใบพืช (Moller et al., 2007) ดัชนีความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำของพืช (CWSI) ได้ถูกนำไปใช้ในพืชหลายชนิด เช่น ข้าวสาลี (Yuan et al., 2004; Gontia, & Tiwari, 2008) ฝ้าย (Silva et al., 2005; O'shaughnessy et al., 2011) ข้าวโพด (Anda, 2009; Li et al., 2010; Romano et al., 2011; Taghvaeian et al., 2012) ถั่ว (Erdem et al., 2006) และผักบางชนิด (Cremona et al., 2004; Simsek et al., 2005; Erdem et al., 2010; Aladenola, & Madramootoo, 2014; Rud et al., 2014) หรือผลไม้ (Erdem et al., 2006; Paltineanu et al., 2009) เป็นต้น โดยในการศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าพืชไม่จำเป็นต้องให้น้ำจนกว่าจะมีค่าดัชนีความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำของพืช (CWSI) เท่ากับ 0.25 (Anda, 2009) นอกจากนี้ Carroll II et al., (2017) ได้รายงานการศึกษาดูอุณหภูมิใบข้าวโพดและดัชนีความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำของพืชที่มีการชลประทานและการจัดหาไนโตรเจนแบบต่างๆ โดยพบว่า ค่า CWSI แตกต่างกันไปในแต่ละระบบการให้น้ำชลประทาน ในสภาพเรือนกระจกที่มีการให้น้ำตลอดเวลาจะมีค่า CWSI เท่ากับ 0.37 และ 0.54 สำหรับเรือนกระจกที่อยู่ในสภาวะที่พืชมีการขาดน้ำ และ สำหรับพื้นที่ที่ได้รับน้ำสม่ำเสมอจะมีค่า CWSI เท่ากับ 0.34 และ ค่า CWSI เท่ากับ 0.47 สำหรับพื้นที่ที่มีสภาวะแห้งแล้ง

โดยการวัดดัชนีความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำของพืชด้วยวิธีการวัดอุณหภูมิของวัตถุจากการแผ่รังสีอินฟราเรด เป็นการถ่ายภาพรังสีความร้อนของใบพืชหรือเรือนยอดทรงพุ่มของพืชปลูก จึงเป็นอีกวิธีการที่สามารถใช้ในการตรวจจับจุดเริ่มต้นภาวะความเครียดจากการขาดน้ำของพืช เพื่อกำหนดเวลาการให้น้ำที่แม่นยำ (Ben-Gal et al., 2009; Alchanatis et al., 2010) การตรวจวัดอุณหภูมิของใบด้วยการถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด เพื่อตรวจจับความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำของพืชเป็นวัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในใบที่เป็นผลมาจากการปิดช่องปากของพืชเพื่อลดการคายน้ำ เนื่องจากพืชเกิดสภาวะเครียดจากการขาดน้ำ (Romano et al., 2011) อุณหภูมิของใบจึงใช้เป็นตัวบ่งชี้การเกิดสภาวะเครียดจากการขาดน้ำของพืชได้ (Gontia, & Tiwari, 2008; Zia et al., 2012) การตรวจวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องตรวจวัดรังสีอินฟราเรดการถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำของพืชโดยไม่ทำลายตัวอย่างรวดเร็วแม่นยำ และสามารถวัดได้อย่างต่อเนื่องและมีราคาไม่แพง (Dejonge et al., 2015) ถึงแม้ว่าการวัดดัชนีความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำของพืช (CWSI) ด้วยการถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด วิธีที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำ

ของพืช โดยไม่ทำลายตัวอย่างรวดเร็วแม่นยำ แต่ก็อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้จากปัจจัยแวดล้อม ในถ่ายภาพความร้อน เช่น การถ่ายภาพความร้อนขณะมีลมพัดพาอาจส่งผลให้อุณหภูมิใบลดต่ำลง และขณะที่ความแสงเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิใบสูงขึ้นไปด้วย ทำให้การประเมินดัชนีความเครียด จากการขาดน้ำต่ำกว่าหรือสูงกว่าที่ควรจะเป็น (วันวิสาข์ จันทิก้า, 2555)

การถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared thermal imaging)

ระบบการถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด เครื่องตรวจจับอินฟราเรดจะดูดซับ พลังงานอินฟราเรดที่ถูกปล่อยออกมาจากวัตถุและแปลงเป็นไฟฟ้าแรงกระตุ้น แรงกระตุ้นทางไฟฟ้า ถูกส่งไปที่สัญญาณหน่วยประมวลผล ซึ่งจะทำการแปลงข้อมูลลงในภาพความร้อน อุปกรณ์สแกนภาพ ความร้อนส่วนใหญ่จะสแกนในอัตรา 30 ครั้งต่อวินาที และสามารถตรวจจับอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -20 ถึง 1,500 องศาเซลเซียส (Meola, & Carlomagno, 2004) ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา กล้องถ่ายภาพ ความร้อนได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในทางด้านการเกษตรอย่างแพร่หลาย เนื่องจากไม่ทำลาย ตัวอย่าง รวดเร็วแม่นยำ สามารถวัดได้อย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับกล้องถ่ายภาพ ความร้อนและได้นำมาใช้ในในการวัดสภาวะเครียดจากการขาดน้ำของพืชกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการเกษตร ถูกนำมาตรวจวัดสภาวะเครียดจากการขาดน้ำของพืชในพืช หลายชนิด เช่น ลำไย (Wiriya-Alongkron et al., 2013) ผักบุ้ง (Jantika et al., 2013) ผักยี่ (Stoll, & Jones, 2007) องุ่น (Sela et al., 2007; Stoll et al., 2008) ถั่ว (Jones, 2004) แตงกวา (Oerke et al., 2006) ผลไม้ตระกูลส้ม (Bulanon et al., 2008) แอปเปิ้ล (Stajniko et al., 2004) ข้าว (Jones et al., 2009; Xu et al., 2016) ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (Chen et al., 2013) การศึกษาที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ การวัดภาวะความเครียดการขาดน้ำของพืชด้วยการถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับ การวัดศักย์เมทริกของน้ำในดิน (matric potential of soil water) แสดงให้เห็นว่าศักย์เมทริกของน้ำ ในดินของแปลงพืชที่ถูกงดให้น้ำ ค่าศักย์เมทริกของน้ำในดินลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงระดับสูงสุด ที่ Tensiometer สามารถวัดได้ และสอดคล้องกับค่าดัชนีความเครียดของน้ำของพืชที่เพิ่มสูงขึ้น (Wiriya-Alongkron et al., 2013) การถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดจึงสามารถนำมา ประยุกต์ใช้ในการวัดภาวะความเครียดการขาดน้ำของพืชได้ เพื่อความแม่นยำและความรวดเร็ว ในการประเมินภาวะความเครียดการขาดน้ำของพืช

Wiriya-Alongkron et al. (2013) ได้ทดลองใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิของใบลำไย โดยการถ่ายภาพรังสีความร้อนด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนเพื่อตรวจสอบความเครียดจากการขาดน้ำ ในต้นลำไยโดยถ่ายภาพความร้อนในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. โดยตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อนอยู่ที่ ระยะห่าง 5 เมตร จากต้นลำไยในด้านที่ถูกแสงแดดและด้านที่มีแสงเงา โดยการอ้างอิงที่อุณหภูมิ

สูงสุดเมื่อใบพืชไม่สามารถคายน้ำได้ โดยการเคลือบใบพืชด้วยวาสลีน (ทาวาสลีนที่ด้านบนและด้านล่างของใบพืช) เพื่อปิดกั้นการระเหยน้ำโดยสมบูรณ์นาน 10 นาที และอุณหภูมิต่ำสุดของเรือนยอดที่เป็นไปได้ ทดสอบโดยการพ่นน้ำเป็นละอองให้เปียกเรือนยอดทั้งหมดนาน 10 นาที เพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิพืชปกติและนำไปใช้ในสมการคำนวณดัชนีความเครียดน้ำของพืช (Jantika et al., 2013; Wiriya-Alongkron et al., 2013) การคำนวณโดยสูตรของ (Jones, 1999)

$$CWSI = \frac{(Tl - Twet)}{(Tdry - Twet)}$$

เมื่อ Tl คือ ค่าอุณหภูมิใบพืชที่วัดได้ตามสภาพจริงของแต่ละกรรมวิธี

Twet คือ ค่าอุณหภูมิต่ำสุดของใบที่เป็นไปได้ เมื่อมีการพ่นน้ำเป็นละอองให้เปียกใบพืช

Tdry คือ ค่าอุณหภูมิสูงสุดของใบพืชเมื่อใบพืชไม่สามารถคายน้ำได้ คือ ใบพืชถูกเคลือบด้วยวาสลีนปิดกั้นการระเหยน้ำโดยสมบูรณ์

อย่างไรก็ตาม การตรวจวัดสถานะเครียดจากการขาดน้ำของพืชด้วยวิธีการถ่ายภาพความร้อนด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ยังมีอุปสรรคที่ควรระมัดระวังและควรสังเกตไม่ให้เกิดการถ่ายภาพความร้อนมีปัจจัยอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง วิธีการวิเคราะห์ดัชนีความเครียดของพืช (CWSI) จะต้องไม่ได้รับผลกระทบจากปัจจัยอื่น เช่น อุณหภูมิพื้นดินที่อาจทำให้เกิดความแปรปรวนของค่า CWSI เนื่องจากกล้องถ่ายภาพความร้อนเป็นการถ่ายภาพจากรังสีความร้อนของวัตถุ (Taghvaeian et al., 2012)

สภาพพื้นที่ที่เหมาะสมในการปลูกข้าวโพดและฤดูกาลปลูกที่เหมาะสม

1. สภาพพื้นที่ที่เหมาะสม

ข้าวโพดเป็นพืชที่สามารถปลูกได้เกือบทุกพื้นที่ ตั้งแต่เส้นรุ้งที่ 50 องศาเหนือ ไปจนถึงเส้นรุ้งที่ 50 องศาใต้ ทั้งในพื้นที่ที่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลและพื้นที่ที่สูงกว่าระดับน้ำทะเล 1000 เมตร เนื่องจากข้าวโพดมีความแปรปรวนทางพันธุกรรมของข้าวโพด

การปลูกข้าวโพดในช่วงวันยาวจะช่วยให้จำนวนใบเพิ่มขึ้น และเพิ่มเวลาในการออกดอกและดอกแก่ยาวขึ้น เนื่องจากข้าวโพดเป็นพืชวันสั้น ข้าวโพดเป็นพืชที่มีการปรับตัวเข้าได้เกือบทุกสภาพแวดล้อม แต่อุณหภูมิที่ทำให้ข้าวโพดมีการเจริญเติบโตได้คือตั้งแต่ 24-30 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ข้าวโพดสามารถทนได้คือ 10 องศาเซลเซียส ในช่วงการงอกของข้าวโพด ในช่วงที่ข้าวโพดยังเป็นต้นกล้าจะมีความต้านทานต่อสภาพอากาศหนาวได้ดี แต่เมื่อข้าวโพดมีการเจริญเติบโตมากขึ้นจะต้านทานสภาพอากาศหนาวได้ไม่ดี ดินที่มีความเหมาะสมในการปลูกข้าวโพดจะต้องมีค่าพีเอช

5.5-8 และมีธาตุอาหารหลักสูง ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแตสเซียม (สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558)

2. ฤดูกาลปลูกที่เหมาะสม

ปริมาณน้ำฝนและการกระจายตัวของฝนในช่วงการปลูกเป็นปัจจัยหลักในการปลูกข้าวโพด ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อการปลูกและผลผลิตข้าวโพด สำหรับประเทศไทยฤดูกาลปลูกข้าวโพดที่เหมาะสม คือ เดือนเมษายน - พฤษภาคม เป็นช่วงต้นฝนจะให้ผลผลิตดีกว่าช่วงเดือนกรกฎาคม - สิงหาคม เป็นช่วงปลายฝน แต่การปลูกช่วงต้นฝนจะประสบปัญหาในช่วงการเก็บเกี่ยว เนื่องจากมีฝนตกชุก (สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558)

3. ความต้องการน้ำและการให้น้ำแก่ข้าวโพด

ตลอดช่วงระยะเวลาในการปลูกข้าวโพด ข้าวโพดจะมีความต้องการใช้น้ำประมาณ 736 มิลลิเมตร หรือประมาณ 1,177 ลูกบาศก์เมตร/ไร่

ตาราง 1 Crop Water Requirement

สัปดาห์ ที่	ระยะการเจริญเติบโต	ปริมาณความต้องการน้ำของข้าวโพด	
		มิลลิเมตรต่อสัปดาห์	ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อสัปดาห์
1	เริ่มงอก	28	44
2		33	53
3		38	62
4		46	74
5	เจริญเติบโตทางลำต้นและใบ	56	90
6		63	101
7		68	109
8		72	116
9	ออกดอก	73	116
10		68	109
11		64	103
12		52	84
13	สะสมน้ำหนักเมล็ด	42	67
14		32	50
ปริมาณน้ำที่ข้าวโพดต้องการใช้		736	1,177
ตลอดฤดูกาลปลูก			

4. การให้น้ำข้าวโพด

4.1 การให้น้ำครั้งแรกเมื่อปลูก

หลังจากการไถพรวนดินแล้วก่อนหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวโพด ควรมีการให้น้ำแก่ดิน 50 - 65 ลูกบาศก์เมตร/ไร่ เพื่อให้ดินมีความชื้น แล้วจึงหยอดเมล็ดพันธุ์ ห้ามให้มีน้ำขังในบริเวณแปลงปลูก

4.2 การให้น้ำในช่วงระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพด

ในช่วงที่เมล็ดเกิดการงอกเป็นต้นกล้าแล้วควรมีการให้น้ำ 65 - 80 ลูกบาศก์เมตร/ไร่/สัปดาห์ เป็นเวลา 11 - 12 สัปดาห์ ห้ามให้มีน้ำขังในบริเวณแปลงปลูก (สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558)

ลักษณะทั่วไปของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

วงศ์ Gramineae

ชื่อวิทยาศาสตร์ Zea mays L.

ชื่อสามัญ Maize

ชื่อไทย ข้าวโพด

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ข้าวโพดมีระบบรากเป็นระบบรากฝอย (fibrous root system) มีการเจริญส่วนของระบบราก 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่มีการเจริญของระบบรากออกมาจากคัพภะ (primary root) ระบบรากที่มีการเจริญออกมาจากคัพภะจะมีรากแขนงโผล่ออกมา (secondary root) ขณะที่ข้าวโพดยังเป็นต้นอ่อนจะตายเมื่อข้าวโพดเติบโตขึ้น และส่วนที่มีการเจริญของระบบรากออกมาจากส่วนของข้อของลำต้น (adventitious root) เป็นการเจริญมาจากปมที่ส่วนข้อของลำต้นส่วนล่าง เป็นระบบรากหลักที่ใช้ในการดูดน้ำและหาอาหาร มีทั้งส่วนที่อยู่ใต้ดินและส่วนที่เป็นรากอากาศ ส่วนของลำต้นข้าวโพดมีลักษณะเป็นข้อ (node) และปล้อง (internode) มีรูปร่างกลมเป็นต้นตรง เป็นเรียวเล็กขึ้นไปหายอด ส่วนของใบข้าวโพด ประกอบไปด้วย กาบใบ (leaf sheath) และแผ่นใบ (leaf blade) กาบใบจะอยู่ส่วนล่างของลำต้น ทำหน้าที่ห่อหุ้มต้นข้าวโพด แผ่นใบจะมีเส้นใบขนานไปกับเส้นกลางใบ และมีขนอยู่ที่บริเวณผิวใบด้านบน ด้านบนของใบมีขนาดปากใบที่ใหญ่กว่าด้านล่างใบ แต่ด้านล่างใบมีจำนวนปากใบมากกว่าด้านบน ช่อดอกแบ่งออกเป็นช่อดอกตัวผู้และช่อดอกตัวเมีย ข้าวโพดจะมีช่อดอกตัวผู้อยู่บริเวณปลายยอดของลำต้น บริเวณปล้องสุดท้าย และดอกตัวผู้ของข้าวโพดจะมีละอองเกสรตัวผู้เป็นสีเหลือง ส่วนช่อดอกตัวเมียจะเกิดอยู่บนลำต้นนับจากใบธงลงมา 7-8 ใบ ช่อดอกหรือเรียกทั่วไปว่าฝัก จะเริ่มโผล่ออกมาเมื่อข้าวโพดอายุ 40-45 วัน และจะมีดอกอยู่บนฝักจะมีไหมโผล่ออกมาเพื่อ

รับการผสมเกสร และส่วนของเมล็ดหรือผล ภายในจะประกอบไปด้วย คัพภะที่มีน้ำมันค่อนข้างสูง และมีส่วนที่สะสมอาหารคือ เอนโดสเปิร์ม หลังจากมีการผสมเกสรแล้ว 45 วัน เมล็ดหรือผลจะมีการหยุดการเจริญเติบโต รูปร่างของเมล็ดจะมีลักษณะค่อนข้างกลม แบน และมีเหลี่ยม ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเมล็ดที่อยู่บนฝัก (เรวัต เลิศฤทัยโยธิน, 2541)



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์

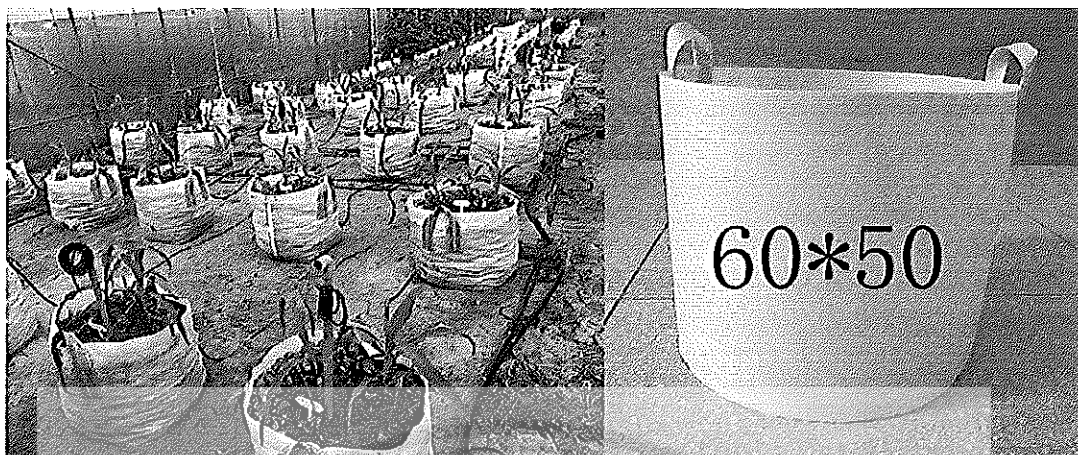
1. เมล็ดพันธุ์ข้าวโพดสีพี 888
2. ปุ๋ยเคมี ได้แก่ ปุ๋ยสูตร 15-15-15 ปุ๋ยสูตร 46-0-0
3. อุปกรณ์การปลูกและดูแลรักษา
4. อุปกรณ์การให้น้ำแบบระบบน้ำหยด
5. ถังบีกแบ็คสำหรับการปลูกข้าวโพดในการทดลอง
6. ไม้วัดความสูงต้นข้าวโพด
7. เครื่องวัดความเขียว (เครื่อง SPAD 502)
8. กล้องถ่ายภาพความร้อน (กล้องอินฟราเรดรุ่น FLIR C2)
9. เครื่อง Porometer รุ่น SC-1 leaf porometer
10. เครื่องวัดความชื้นในดิน (WATERMARK 84 Soil Moisture)
11. เครื่องวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง (เครื่อง FluorPen FP 100)
12. ตู้อบ
13. เครื่องชั่งไฟฟ้า
14. อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ดิน

สถานที่ทำการทดลอง

โรงเรียนพลาสติก ตั้งอยู่ที่ หมู่ที่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก (Latitude 16.73 Longitude 100.18) เป็นโรงเรียนหลังคาเหล็ก ขนาดกว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร สูง 5 เมตร หลังคาคลุมด้วยพลาสติกขุ่น โดยทำการทดลองระหว่างเดือนสิงหาคม ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

การเตรียมการปลูก

เก็บตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลองเพื่อวิเคราะห์สมบัติดินบางประการก่อนทำการทดลอง แสดงในตาราง 1 หลังจากนั้น บดดินให้ขนาดเล็กลง และใช้ตะแกรงร่อนดินขนาด 5 มิลลิเมตร นำดินใส่ในถังบีกแบ็คขนาดกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร ฤๅละ 80 กิโลกรัม ให้ความสูงของดินสูงฤๅละ 50 เซนติเมตร



ภาพ 2 Sack bag/with hole

ตาราง 2 Soil properties of the experimental study

Soil properties	Values	Standard
EC (dS/m)	0.38	เค็มน้อย
pH	5.6	กรดปานกลาง
OM (%)	1.2	ค่อนข้างต่ำ
Total N (%)	0.06	ต่ำมาก
Available P (mg/kg)	7.99	ต่ำมาก
Exchangeable K (mg/kg)	46.08	ต่ำ
Soil texture		Clay loam

การวางแผนการทดลอง

ทำการศึกษาโดยการวางแผนการทดลองแบบ CRD (Completely randomized design) ประกอบด้วย 5 กรรมวิธี กรรมวิธีละ 5 ซ้ำ โดยกำหนดปัจจัยต่างๆ ลงในแผนการทดลอง ดังนี้

กรรมวิธีที่ 1 กรรมวิธีควบคุมให้น้ำตลอด (คำนวณตามความต้องการน้ำของพืช) (T1)

กรรมวิธีที่ 2 ลดการให้น้ำลง 50% ของกรรมวิธีที่ 1 เมื่อข้าวโพดมีพื้นที่การปกคลุมดิน 20% และให้เท่ากับกรรมวิธีที่ 1 เมื่อข้าวโพดมีเกสรตัวผู้ออกมา (T2)

กรรมวิธีที่ 3 ลดการให้น้ำลง 50% ของกรรมวิธีที่ 1 เมื่อข้าวโพดมีพื้นที่การปกคลุมดิน 20% ถึงอายุการเก็บเกี่ยว (T3)

กรรมวิธีที่ 4 ลดการให้น้ำลง 50% ของกรรมวิธีที่ 1 เมื่อพืชมีเกสรตัวผู้ออกมาถึงอายุการเก็บเกี่ยว (T4)

กรรมวิธีที่ 5 งดการให้น้ำเมื่อพืชมีเกสรตัวผู้ถึงอายุการเก็บเกี่ยว (T5)

การทดลอง ประกอบด้วย 5 กรรมวิธี กรรมวิธีละ 5 ซ้ำ ทำการทดลองปลูกในถุงบิกแบ็ค จำนวน 25 ถุง ระยะห่างระหว่างต้น 0.25 เมตร ในหนึ่งถุงทำการปลูกข้าวโพดสูงละ 2 ต้น และหยอดเมล็ดหลุมละ 3 เมล็ดต่อหลุม พร้อมกับใส่ปุ๋ยรองพื้นสูตร 15-15-15 อัตรา 30 กิโลกรัมต่อไร่ หลังจากข้าวโพดงอกอายุได้ 10 วัน ถอนแยกให้เหลือหลุมละ 1 ต้น และให้น้ำแบบระบบน้ำหยดตามกรรมวิธีการที่กำหนดไว้ (ตาราง 3) เมื่อข้าวโพดอายุได้ 30 วันหลังปลูก ทำการกำจัดวัชพืช พร้อมใส่ปุ๋ยแต่งหน้าสูตร 46-0-0 อัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (ศูนย์วิจัยพืชไร่นครสวรรค์, 2562)

ระบบการให้น้ำ

การให้น้ำในการศึกษาครั้งนี้เป็นการให้น้ำด้วยระบบน้ำหยด ปริมาณน้ำ 0-100 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 1.5-1.83 ลิตรต่อนาที่ 1 หัว ต่อ 1 ถุงโดยติดตั้งหัวน้ำหยด 1 หัวต่อ 1 ถุงบิกแบ็คที่ใช้ในการทดลอง การให้น้ำ 1 วันให้น้ำ 1 ครั้ง และให้น้ำในเวลาเดียวกันตลอดการทดลอง ปริมาณการให้น้ำในแต่ละวันมีดังนี้

ตาราง 3 Irrigation plan

Week	T1 (L/pot*day)	T2 (L/pot*day)	T3 (L/pot*day)	T4 (L/pot*day)	T5 (L/pot*day)
1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4	0.7	0.4	0.4	0.7	0.7
5	0.7	0.4	0.4	0.7	0.7
6	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0
7	1.2	0.6	0.6	1.2	1.2
8	1.5	0.8	0.8	1.5	1.5
9	1.5	0.8	0.8	1.5	1.5
10	1.5	1.5	0.8	0.75	stop irrigation
11	1.5	1.5	0.8	0.75	
12	1.5	1.5	0.8	0.75	

ตาราง 3 (ต่อ)

Week	T1 (L/pot*day)	T2 (L/pot*day)	T3 (L/pot*day)	T4 (L/pot*day)	T5 (L/pot*day)
13	1.5	1.5	0.8	0.75	
14	1.5	1.5	0.8	0.75	
15	1.0	1.0	0.5	0.5	
16	1.0	1.0	0.5	0.5	
17	0.5	0.5	0.3	0.25	

การวัดความเครียดของพืชขึ้นดิน

การประเมินแรงดึงหรือความเครียดของน้ำในดินวันละ 1 ครั้ง เวลา 16.00 น. ตลอดการทดลอง โดยใช้ WATERMARK 84 (Spectrum Technologies, Aurora, IL, USA) วัดแรงดึงหรือความเครียดของน้ำในดินที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร แล้วนำมาคำนวณหาค่า pF หรือค่าความเครียดของความชื้นดิน โดยใช้สูตรของ Lal and Shukla, 2004 ดังนี้

$$pF = \log |\Psi_m|$$

การเก็บข้อมูลสภาพอากาศในโรงเรือน

การเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพอากาศภายในโรงเรือนที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้ Tiny tag (Tinytag Plus 2 - TGP-4500) จาก Gemini Data Loggers เก็บรวบรวมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เก็บรวบรวมข้อมูลทุกๆ 5 นาที

การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต องค์ประกอบผลผลิตและผลผลิต

1. ลักษณะการเจริญเติบโตและลักษณะทางสรีรวิทยา

เก็บตัวอย่างการเก็บข้อมูลข้าวโพดทุกต้นในการทดลอง โดยทำการเก็บข้อมูลทุกสัปดาห์ เริ่มเก็บข้อมูลเมื่อข้าวโพดอายุ 2 สัปดาห์ ถึง 12 สัปดาห์ หลังจากการงอก เพื่อบันทึกข้อมูลดังต่อไปนี้

1.1 ความสูงของต้น วัดจากผิวดินถึงข้อใบสุดท้ายที่มีการเจริญเติบโตเต็มที่

1.2 การหาพื้นที่ใบ โดยการเก็บข้อมูลความกว้าง ความยาว และจำนวน แล้วมาคำนวณหาพื้นที่ใบด้วยสูตรของ Kang et al. (2003)

$$\text{Leaf Area} = 0.74 \times \sum_{i=1}^n L_i W_i$$

เมื่อ i = จำนวนใบ

L = ความยาวใบ

W = ความกว้างใบ

1.3 ดัชนีความเขียวใบ วัดด้วยเครื่องวัดความเขียว SPAD 502 (SPAD chlorophyll meter reading units, KONICA MINOLTA)

1.4 ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช โดยใช้ FluorPen FP 100 ของบริษัท ManualsLib

2. ผลผลิตและองค์ประกอบของผลผลิต

การประเมินผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ภายใต้สภาวะขาดน้ำของแต่ละระยะการเจริญเติบโต ด้วยการประเมินข้อมูล ดังต่อไปนี้

- 2.1 มวลชีวภาพแห้งเหนือดิน เป็นน้ำหนักมวลชีวภาพเฉพาะส่วนของลำต้นและใบ
- 2.2 น้ำหนักแห้งฝัก เป็นน้ำหนักเฉพาะส่วนของเมล็ดและแกนกลางของข้าวโพด
- 2.3 จำนวนเมล็ดต่อฝัก
- 2.4 ดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest Index)
- 2.5 น้ำหนักแห้งเมล็ด
- 2.6 น้ำหนัก 100 เมล็ด
- 2.7 จำนวนฝักต่อต้น

การวัดภาวะความเครียดการขาดน้ำในข้าวโพด

1. กล้องถ่ายภาพความร้อน

การถ่ายภาพความร้อน เริ่มเก็บข้อมูลดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำของพืชด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน FLIR C2 (FLIR Systems, Inc., Wilsonville, OR, USA) เมื่อทำการงดการให้น้ำแก่ข้าวโพด โดยการถ่ายภาพรังสีความร้อนด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนเพื่อตรวจสอบความเครียดจากการขาดน้ำในต้นพืชโดยถ่ายภาพความร้อนในช่วงเวลา 08.00-10.00 น., 10.00-12.00 น. และ 12.00-14.00 น. เมื่อข้าวโพดอายุ 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 วันหลังปลูก โดยถ่ายภาพความร้อนอยู่ในมุม 90 องศา และระยะห่างของการถ่ายภาพอยู่เหนือจากใบพืช 1.5 เมตร โดยการอ้างอิงที่อุณหภูมิสูงสุดเมื่อใบพืชไม่สามารถคายน้ำได้ โดยการใช้ผ้าฟองน้ำอเนกประสงค์สีเขียวขนาด 20 x 20 เซนติเมตร ทิ้งไว้กลางแดดนาน 30 นาที และการอ้างอิงที่อุณหภูมิต่ำสุดของใบที่เป็นไปได้ โดยการใช้ผ้าฟองน้ำอเนกประสงค์สีเขียวขนาด 20 x 20 เซนติเมตร ชุบน้ำแล้วทิ้งไว้

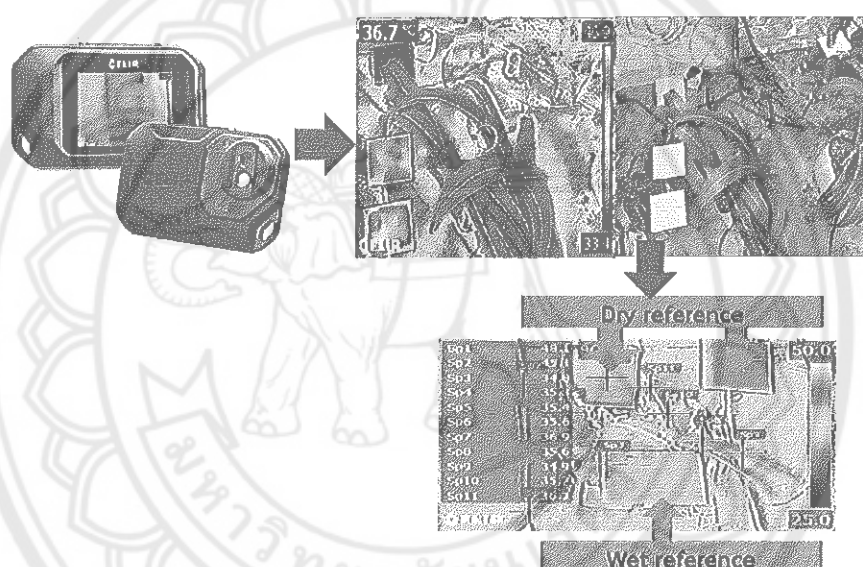
กลางแดดนาน 30 นาที หลังจากการถ่ายภาพความร้อน นำภาพได้ไปทำการแปลผลอุณหภูมิโดยใช้ซอฟต์แวร์ FLIR Tool 5.1 จากนั้น นำผลที่ได้มาไปใช้ในสมการคำนวณดัชนีความเครียดน้ำของพืช (Jones, H.G., 1999)

$$CWSI \text{ (ดัชนีความเครียดน้ำของพืช)} = \frac{(Tl - Twet)}{(Tdry - Twet)}$$

เมื่อ Tl คือ ค่าอุณหภูมิเรือนยอดพืชที่วัดได้ตามสภาพจริงของแต่ละกรรมวิธี

Twet คือ ค่าอุณหภูมิต่ำสุดของพืชที่เป็นไปได้

Tdry คือ ค่าอุณหภูมิสูงสุดของเรือนยอดเมื่อใบพืชไม่สามารถคายน้ำได้



ภาพ 3 Image processing by FLIR tool software

2. การวัดการชักนำการเปิดปิดปากใบด้วยเครื่อง Porometer รุ่น SC-1 leaf porometer ทำการเก็บข้อมูลหลังจากการเริ่มรดการให้น้ำแก่ข้าวโพด โดยการวัดพร้อมกับกล้องถ่ายภาพความร้อน ช่วงเวลา 08.00 น. - 10.00 น., 10.00 น. - 12.00 น. และ 12.00 น. - 14.00 น. โดยเก็บข้อมูลเมื่อข้าวโพดอายุ 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 วันหลังปลูก

3. การวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชด้วยเครื่อง FluorPen FP 100 (ManualsLib) ทำการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 11.00 น. - 13.00 น. โดยเก็บข้อมูลข้าวโพดทุกต้นในการทดลอง ทุกๆ 2 สัปดาห์

การวิเคราะห์ข้อมูล

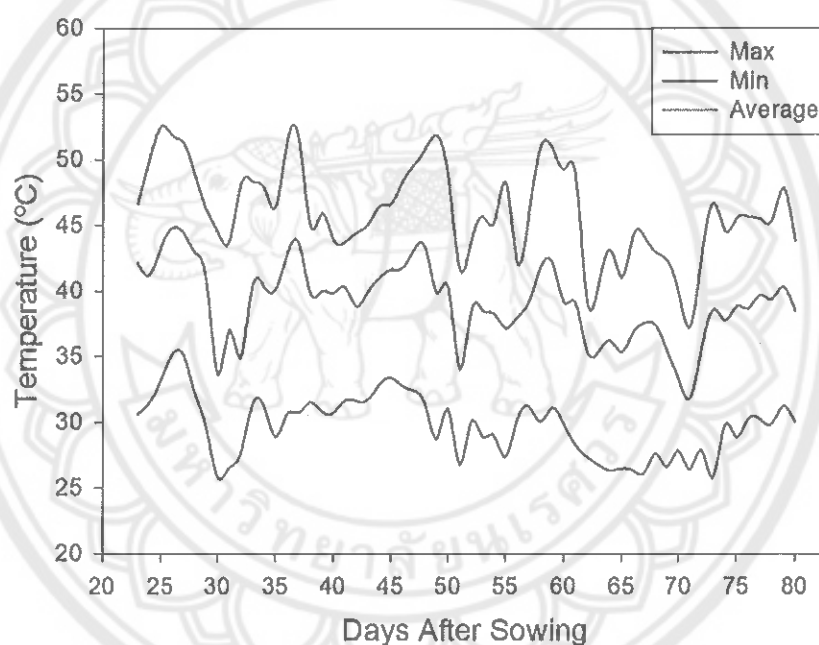
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของค่าดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำของข้าวโพด ลักษณะทางสรีรวิทยา องค์ประกอบผลผลิตและผลผลิตข้าวโพด โดยใช้โปรแกรม R (R-Language and environment for statistical computing and graphics version 3.5.2) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Least significant difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ โดยวิธีการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear correlation coefficients)



บทที่ 4

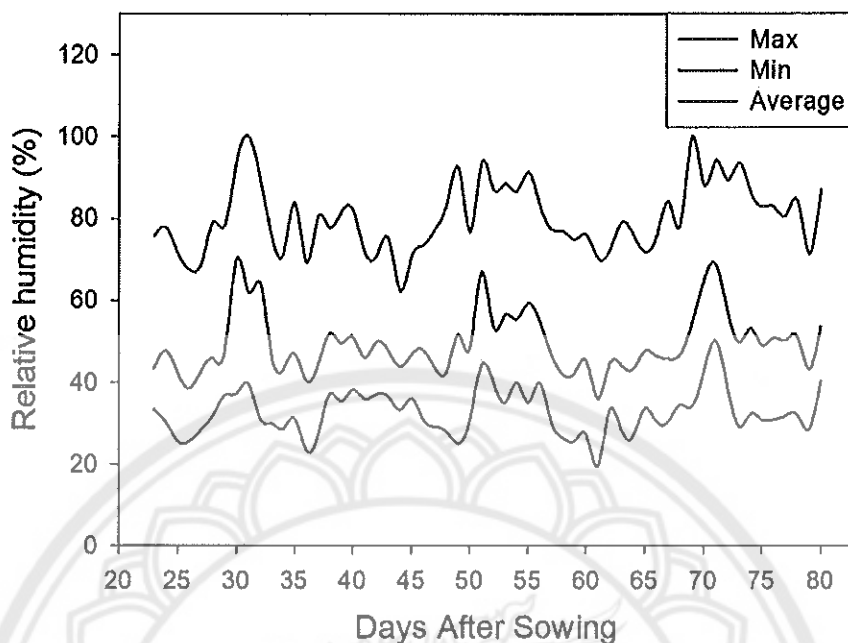
ผลการวิจัย

ภูมิอากาศในโรงเรือนระหว่างทำการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แสดงในภาพ 3 พบว่า ในช่วงเวลา 08.00 - 18.00 น. อุณหภูมิสูงสุดภายในโรงเรือนอยู่ที่ 37.28 - 52.55 องศาเซลเซียส อุณหภูมิต่ำสุดภายในโรงเรือนอยู่ที่ 25.83 - 35.13 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างวันอยู่ที่ 31.81 - 44.80 องศาเซลเซียส



ภาพ 4 Daily minimum, maximum and mean temperatures (°C) in a greenhouse during 08.-00 am. - 06.00 p.m.

ความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างการทดลอง พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างวันในช่วงเวลา 08.00 - 18.00 น. ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดภายในโรงเรือนอยู่ในช่วง 62.36 - 100.00 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดภายในโรงเรือนอยู่ในช่วง 19.58 - 50.15 เปอร์เซ็นต์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างวันอยู่ที่ 36.00 - 70.27 เปอร์เซ็นต์

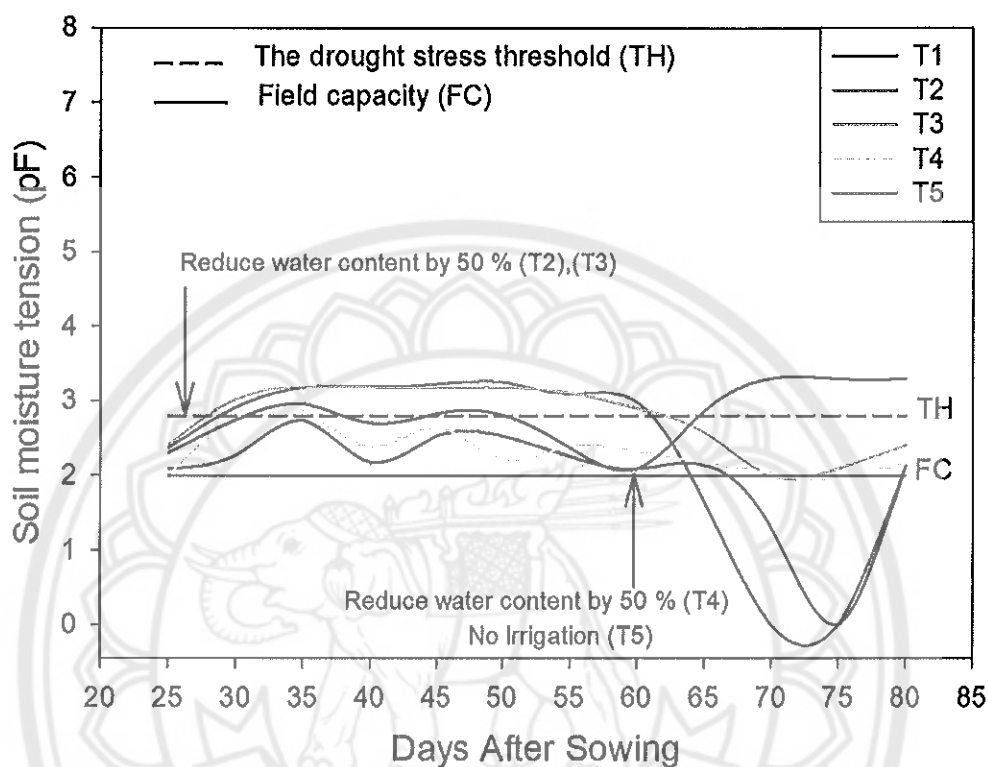


ภาพ 5 Daily minimum, maximum and mean relative humidity (%) in a greenhouse during 08.-00 am. - 06.00 p.m.

ความเคี้ยวของน้ำในดิน (ค่า pF)

จากผลการทดลอง พบว่าตั้งแต่เริ่มปลูกจนถึงข้าวโพดอายุ 20 วันหลังปลูก ดินมีความชื้นใกล้เคียงกันทั้งห้ากรรมวิธี (ค่า pF 2.0-2.5) โดยกรรมวิธีควบคุม (T1) ดินมีสภาพความชื้นเหมาะสมสำหรับข้าวโพดตลอดช่วงการทดลองปลูกข้าวโพด มีค่า pF เฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 2.0 ในขณะที่กรรมวิธี 2 ลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ถึงระยะออกดอก พบว่า 10 วันหลังจากลดการให้น้ำเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ของกรรมวิธีควบคุม สภาพความชื้นดินอยู่ในระดับดินแห้งเมื่อกลับมาให้น้ำในระดับปกติหลังการออกดอก (ข้าวโพดอายุ 55 วันหลังปลูก) สภาพความชื้นดินกลับมาอยู่ในสภาพเหมาะสมแต่มีช่วงสั้นๆ ที่ความชื้นดินอยู่สภาพค่อนข้างแห้ง และ กรรมวิธีที่ 3 ลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ถึงระยะเก็บเกี่ยว พบว่า สภาพความชื้นดินในระยะแรกอยู่ในระดับดินแห้ง และเมื่ออยู่ในระยะหลังการออกดอกความชื้นดินอยู่ในระดับค่อนข้างแห้ง กรรมวิธีที่ 4 ลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ในระยะออกดอกถึงระยะเก็บเกี่ยว ความชื้นดินอยู่ในระดับค่อนข้างแห้งช่วงแรก หลังจาก 45 วัน หลังปลูก ความชื้นดินอยู่ในระดับเหมาะสม และกรรมวิธีที่ 5 ลดการให้น้ำ เมื่ออยู่ในระยะออกดอกถึงระยะเก็บเกี่ยว สภาพความชื้นดินในระยะแรกอยู่ในระดับเหมาะสม และเมื่อลดการให้น้ำเมื่อข้าวโพด

อายุ 60 วันหลังปลูก ซึ่งอยู่ในระยะหลังการออกดอกเกษตรกรตัวผู้ พบว่า หลังจากมีการรดน้ำ 5 วัน ความชื้นดินอยู่ในระดับดินแห้งจนถึงช่วงเก็บเกี่ยว (ภาพ 5)

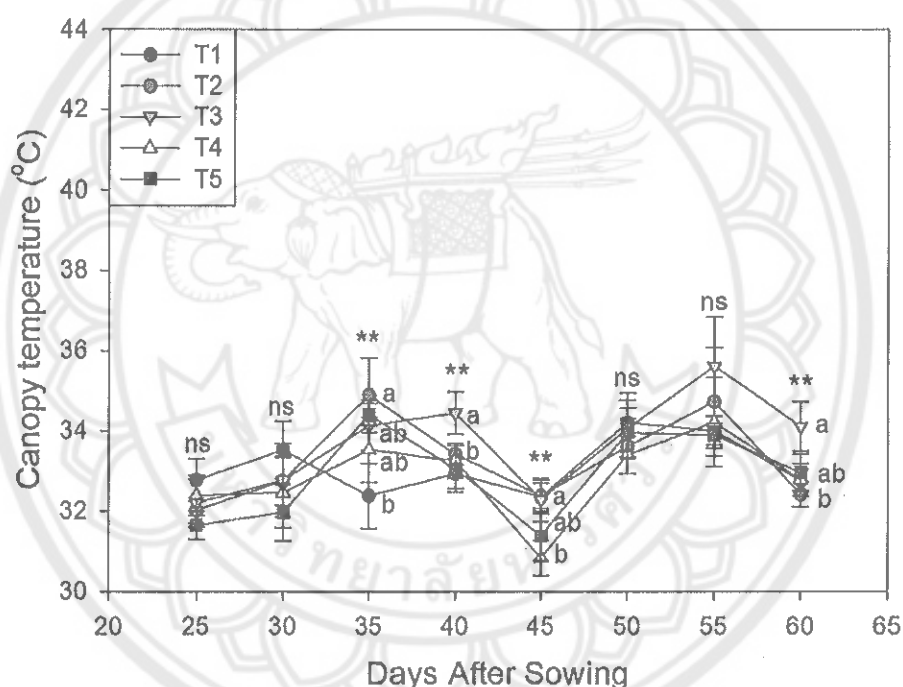


ภาพ 6 Curve of average change in pF value at 10 cm soil depth under different water deficit conditions

อุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพดภายใต้ภาวะขาดน้ำแตกต่างกัน

การวัดค่าอุณหภูมิเรือนยอดโดยการถ่ายภาพความร้อน ในช่วงเวลา 10.00 น. - 12.00 น. เมื่อข้าวโพดอายุ 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 วันหลังปลูกแสดงในภาพ 6 จากการศึกษา เมื่อข้าวโพดอายุ 20 วันหลังปลูกลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ของกรรมวิธีควบคุม ในกรรมวิธีที่ 2 และ 3 พบว่า หลังลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 5 และ 10 วันอุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพด ทั้งห้ากรรมวิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีอุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพด อยู่ในช่วง 32.2 - 32.7 องศาเซลเซียส เมื่อระยะเวลาผ่านไป 15, 20 และ 25 วันหลังลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพดของทั้งห้ากรรมวิธีมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ในขณะที่ช่วงข้าวโพดอายุ 50 และ 55 วันหลังปลูก เป็นช่วงที่อุณหภูมิเฉลี่ย

ของอากาศต่ำลง ทำให้อุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพดทั้งห้ากรรมวิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อข้าวโพดอายุ 60 วันหลังปลูก กรรมวิธีที่ 2 กลับมาให้น้ำในระดับปกติ คือระดับเดียวกับกรรมวิธีควบคุม พบว่า กรรมวิธีที่ 3 ที่ยังลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ มีอุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพดสูงที่สุด คือ 34.1 องศาเซลเซียส แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับกรรมวิธีที่ 2 เมื่อข้าวโพดมีพื้นที่ปกคลุมดิน 20 เปอร์เซ็นต์ (20 วันหลังปลูก) ถึงระยะออกดอก และกรรมวิธีที่ 3 ลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ของกรรมวิธีควบคุมเมื่อข้าวโพดมีพื้นที่ปกคลุมดิน 20 เปอร์เซ็นต์ ถึงระยะเก็บเกี่ยว มีค่าอุณหภูมิเรือนยอดเฉลี่ยอยู่ที่ 33.5 องศาเซลเซียส และกรรมวิธีอื่นมีค่าอุณหภูมิเรือนยอดเฉลี่ยอยู่ที่ 32.1 องศาเซลเซียส

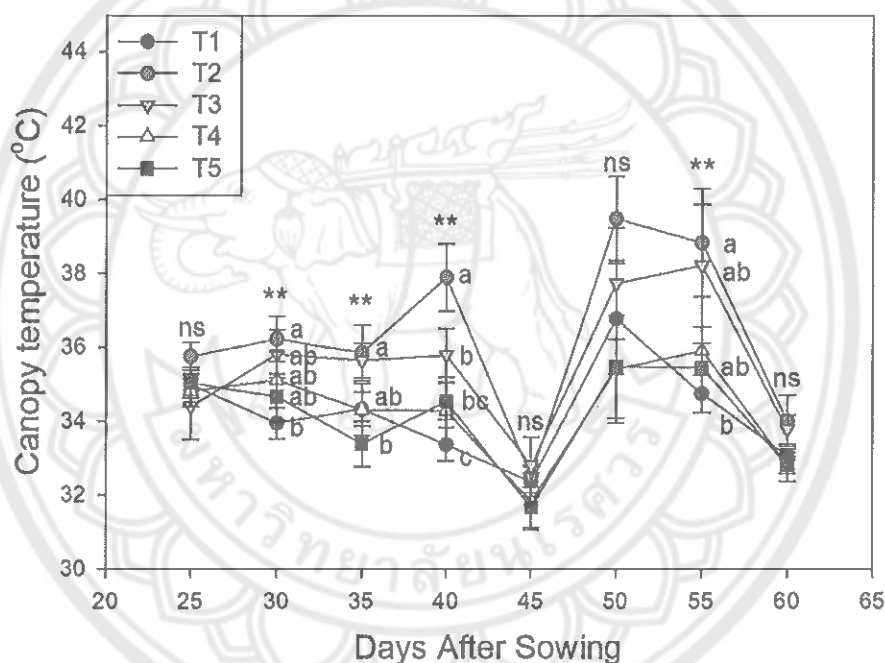


ภาพ 7 Canopy temperature during 10.00 a.m.-12.00 p.m. under different water deficit conditions

Note: Means with different letters are significantly different according to LSD at 95 %,

** ; significant level at $p < 0.01$, ns : non-significant

การวัดค่าอุณหภูมิเรือนยอดโดยการถ่ายภาพความร้อน ในช่วงเวลา 12.00 น. - 14.00 น. เมื่อข้าวโพดอายุ 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 วันหลังปลูกแสดงในภาพ 7 พบว่า ข้าวโพดอายุ 25 วันหลังปลูกหรือ 5 วันหลังลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ของกรรมวิธีควบคุม ค่าอุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพดช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. ของกรรมวิธีที่ 2 และกรรมวิธีที่ 3 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) กับกรรมวิธีที่ 1 (ควบคุม) กรรมวิธีที่ 4 และ 5 แต่ระยะแรกผ่านไป พบว่า กรรมวิธีที่ 2 มีค่าอุณหภูมิเรือนยอดเฉลี่ยสูงกว่ากรรมวิธีอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 36.4 องศาเซลเซียส เมื่อข้าวโพดอายุ 30, 35, 40 และ 55 วันหลังปลูก และรองลงมา ได้แก่ กรรมวิธีที่ 3 มีค่าอุณหภูมิเรือนยอดเฉลี่ยอยู่ที่ 35.7 องศาเซลเซียส



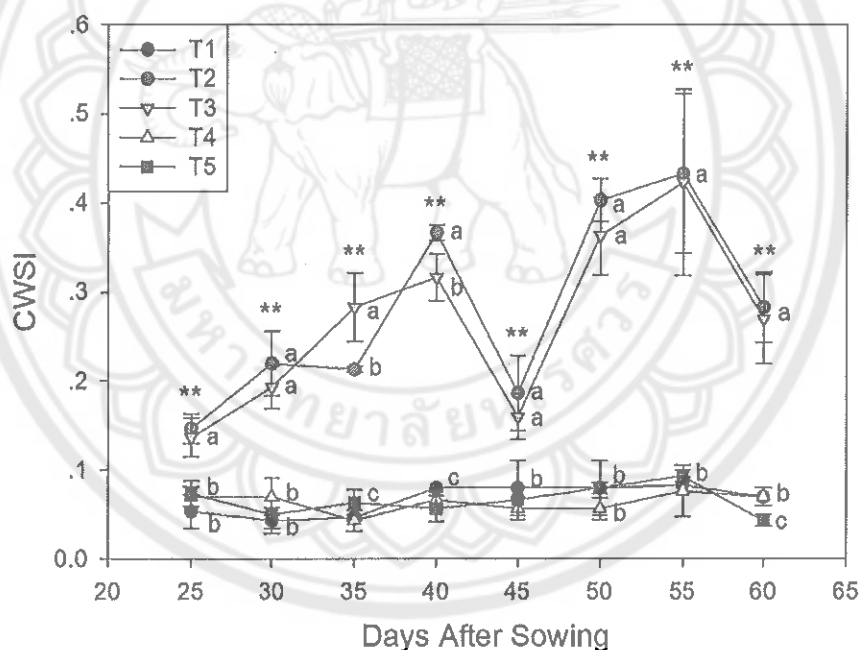
ภาพ 8 Canopy temperature during 12.00 - 02.00 p.m. under different water deficit conditions

Note: Means with different letters are significantly different according to LSD at 95 %,

** ; significant level at $p < 0.01$, ns : non-significant

ดัชนีความเครียดของข้าวโพด (CWSI) และการชักนำการเปิดปิดปากใบสัมพันธ์ภายใต้ภาวะขาดน้ำแตกต่างกัน

การวัดค่าดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำ (Crop water stress index: CWSI) โดยการถ่ายภาพความร้อน โดยถ่ายภาพความร้อนในช่วงเวลา 12.00 น. - 14.00 น. ที่ข้าวโพดอายุ 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 วันหลังปลูก ผลการทดลองดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำ พบว่า กรรมวิธีที่ 2 ลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ของกรรมวิธีควบคุม เมื่อข้าวโพดมีพื้นที่ปกคลุมดิน 20 เปอร์เซ็นต์ (20 วันหลังปลูก) ถึงระยะออกดอก และกรรมวิธีที่ 3 ลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ของกรรมวิธีควบคุม เมื่อข้าวโพดมีพื้นที่ปกคลุมดิน 20 เปอร์เซ็นต์ ถึงระยะเก็บเกี่ยว ให้ค่าดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำ สูงที่สุดแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีอื่น โดยให้ค่าเฉลี่ยของดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำอยู่ที่ 0.13 - 0.43 และกรรมวิธีอื่นให้ผลของค่าดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำอยู่ที่ 0.04 - 0.09 (ภาพ 8)

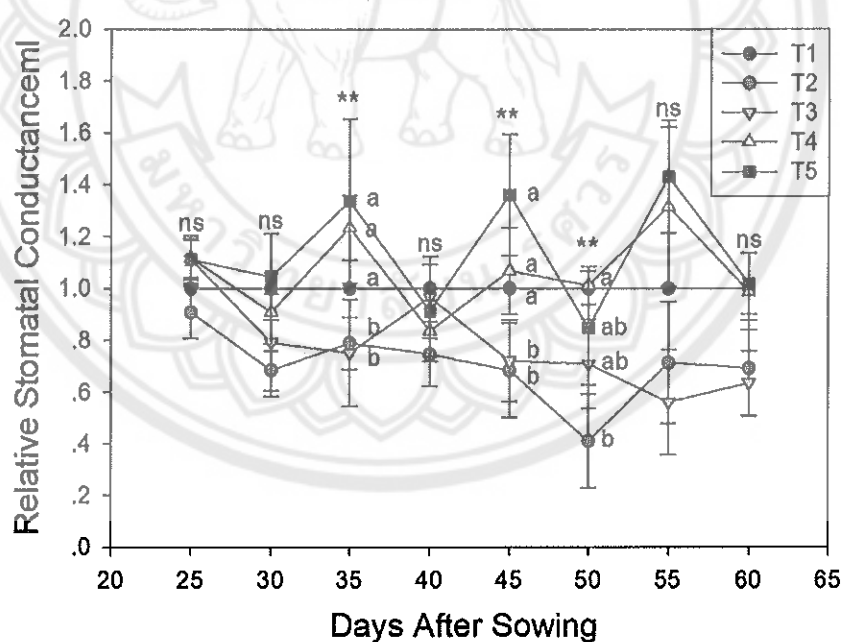


ภาพ 9 Crop water stress index during 12.00 - 02.00 p.m. under different water deficit conditions

Note: Means with different letters are significantly different according to LSD at 95 %,

** ; significant level at $p < 0.01$, ns : non-significant

การวัดสภาวะความเครียดจากการขาดน้ำของข้าวโพด โดยวัดการชักน้ำการเปิดปิดปากใบของข้าวโพดหลังจากลดการให้น้ำในกรรมวิธีที่ 2 และ 3 ด้วยเครื่อง Porometer รุ่น SC-1 leaf porometer ระหว่าง 12.00 น. - 14.00 น. เมื่อข้าวโพดอายุ 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 วันหลังปลูก จากการทดลองได้นำค่าการชักน้ำการเปิดปิดปากใบของข้าวโพดของกรรมวิธีที่ 2-5 มาคำนวณเป็นค่าดัชนีการชักน้ำการเปิดปิดปากใบสัมพัทธ์เทียบกับกรรมวิธีควบคุม พบว่า เมื่อข้าวโพดอายุ 25-50 วันหลังปลูก กรรมวิธีที่ 2 ลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ของกรรมวิธีควบคุม เมื่อข้าวโพดมีพื้นที่ปกคลุมดิน 20 เปอร์เซ็นต์ (20 วันหลังปลูก) ถึงระยะออกดอก มีค่าดัชนีการชักน้ำการเปิดปิดปากใบสัมพัทธ์แนวโน้มต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับกรรมวิธีอื่นๆ โดยค่าดัชนีการชักน้ำการเปิดปิดปากใบสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 0.70 - 0.84 และเมื่อข้าวโพดอายุ 55 และ 60 วันหลังปลูก พบว่า กรรมวิธีที่ 3 ลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ของกรรมวิธีควบคุมเมื่อข้าวโพดมีพื้นที่ปกคลุมดิน 20 เปอร์เซ็นต์ ถึงระยะเก็บเกี่ยว ให้ค่าดัชนีการชักน้ำการเปิดปิดปากใบสัมพัทธ์ต่ำที่สุดแต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับกรรมวิธีอื่นๆ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีที่ 1 โดยให้ค่าดัชนีการชักน้ำการเปิดปิดปากใบสัมพัทธ์อยู่ที่ 0.60 (ภาพ 9)



ภาพ 10 Relative stomatal conductance during 12.00 - 02.00 p.m. under different water deficit conditions

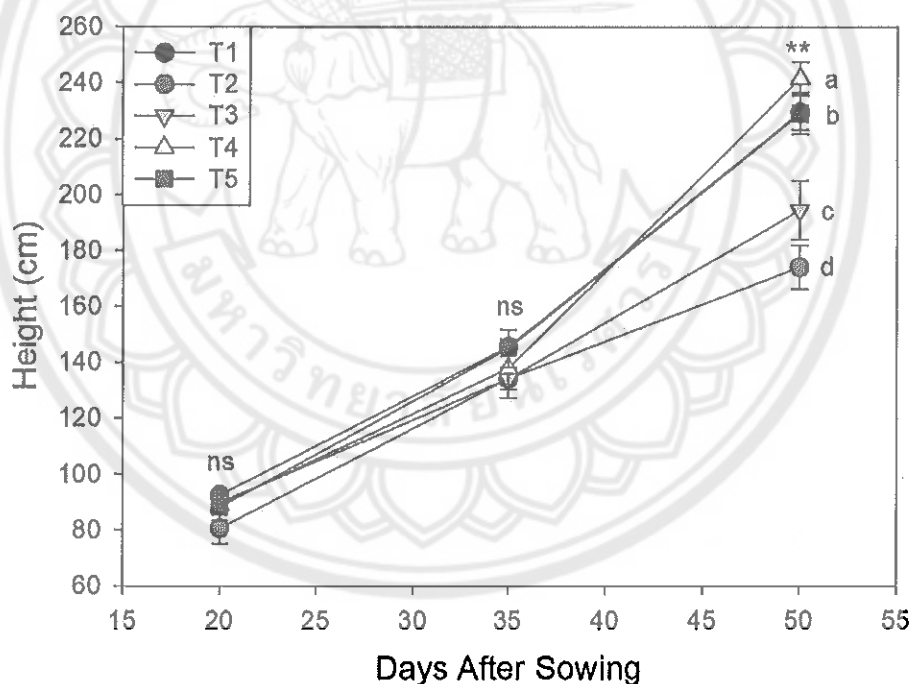
Note: Means with different letters are significantly different according to LSD at 95 %,

** ; significant level at $p < 0.01$, ns : non-significant

ลักษณะทางสรีรวิทยา องค์ประกอบผลผลิต และผลผลิตข้าวโพดภายใต้ภาวะขาดน้ำแตกต่างกัน

1. ลักษณะทางสรีรวิทยา

ลักษณะทางสรีรวิทยาด้านความสูงของต้นข้าวโพด จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อข้าวโพดอายุ 20 และ 35 วันหลังปลูก ความสูงของต้นข้าวโพดทั้งห้ากรรมวิธีไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ในขณะที่เมื่อข้าวโพดอายุ 50 วันหลังปลูก ซึ่งมีการเจริญเติบโตทางด้านความสูงต้นสมบูรณ์แล้ว กรรมวิธีที่ 2 มีการลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีพื้นที่การปกคลุม 20 เปอร์เซ็นต์จนถึงระยะออกดอก ให้ผลด้านการเจริญเติบโตทางด้านความสูงต้นข้าวโพดต่ำที่สุด คือ 181.5 เซนติเมตร รองลงมา คือ กรรมวิธีที่ 3 มีการลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์จนถึงระยะการเก็บเกี่ยว มีความสูงเท่ากับ 198.9 เซนติเมตร ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีอื่น และกรรมวิธีอื่นๆ ให้ค่าเฉลี่ยความสูงต้นระหว่าง 214.3 - 232.5 เซนติเมตร (ภาพ 10)

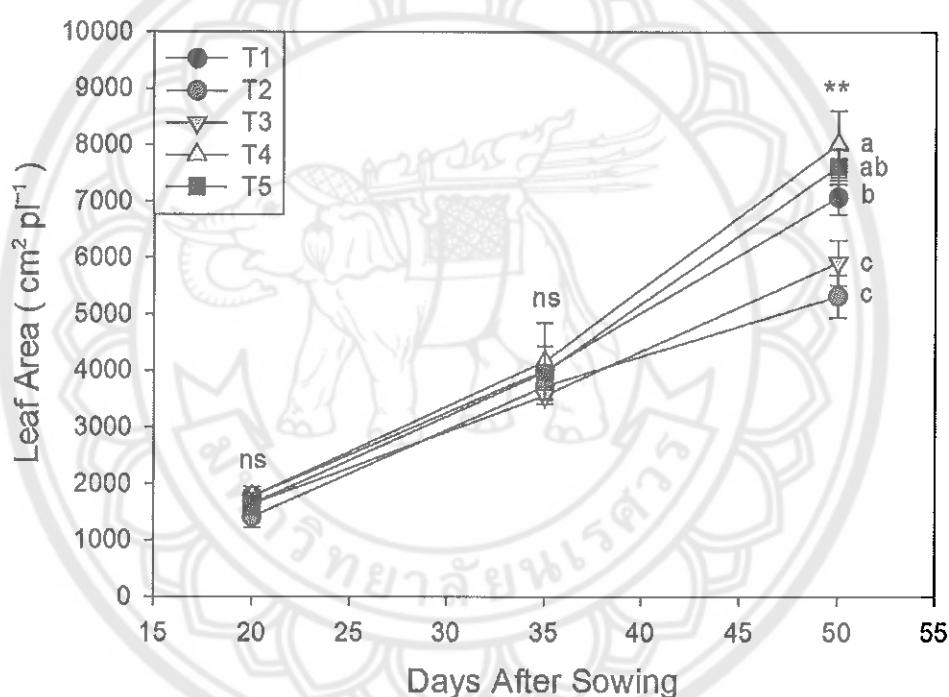


ภาพ 11 Maize height under different water deficit condition

Note: Means with different letters are significantly different according to LSD at 95 %,

** ; significant level at $p < 0.01$, ns : non-significant

ผลการเจริญเติบโตทางด้านพื้นที่ใบ พบว่า เมื่อข้าวโพดอายุ 20 และ 35 วันหลังปลูก พื้นที่ใบของต้นข้าวโพดทั้งห้ากรรมวิธีไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ในขณะที่เมื่อข้าวโพดอายุ 50 วันหลังปลูก กรรมวิธีที่มีการลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีพื้นที่การปกคลุม 20 เปอร์เซ็นต์จนถึงระยะหลังออกดอก และถึงระยะเก็บเกี่ยว (กรรมวิธีที่ 2 และ 3) ให้ผลการเจริญเติบโตทางด้านพื้นที่ใบต่ำที่สุด โดยให้ค่าเฉลี่ยพื้นที่ใบอยู่ที่ 5,613.5 และ 5,503.4 $\text{cm}^2\text{pl}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งค่าเฉลี่ยพื้นที่ใบของกรรมวิธีที่ 2 และ 3 มีค่าต่ำกว่าของกรรมวิธีควบคุม กรรมวิธีที่ 4 และ 5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และกรรมวิธีควบคุม กรรมวิธีที่ 4 และ 5 พบว่า ให้ผลการเจริญเติบโตทางด้านพื้นที่ใบอยู่ที่ 7,210.9 - 7,717.1 $\text{cm}^2\text{pl}^{-1}$ (ภาพ 11)

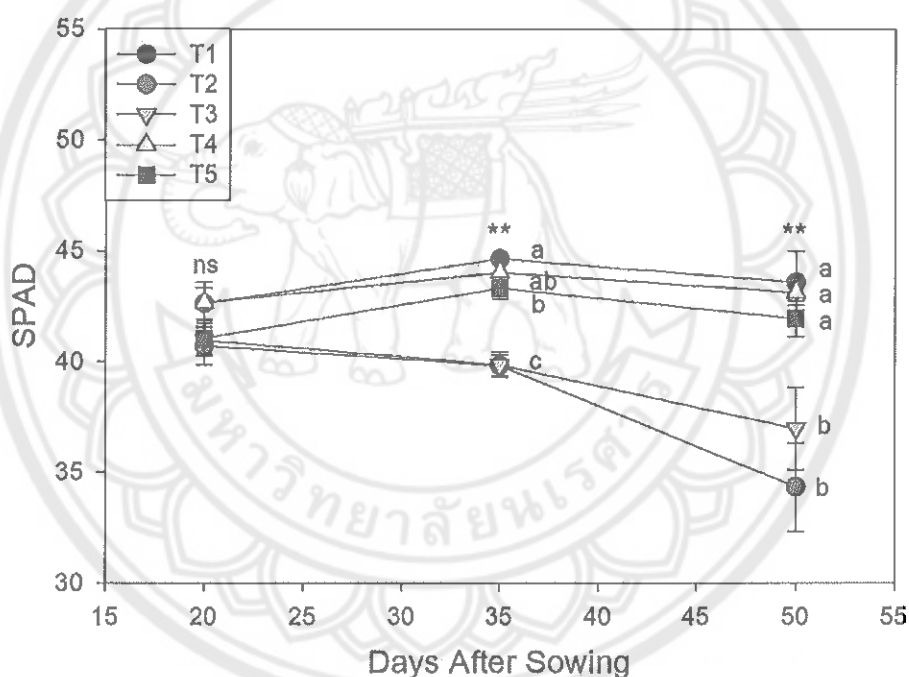


ภาพ 12 Maize leaf area under different water deficit conditions

Note: Means with different letters are significantly different according to LSD at 95 %,

** ; significant level at $p < 0.01$, ns : non-significant

ผลของดัชนีความเขียวใบ (SPAD) พบว่า เมื่อข้าวโพดอายุ 20 วันหลังปลูก ค่า SPAD ของใบข้าวโพดทั้งห้ากรรมวิธีไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) หลังการใส่ปุ๋ยสูตร 46-0-0 เมื่อข้าวโพดอายุ 30 วันหลังปลูก ส่งผลให้ค่า SPAD ของใบข้าวโพดเพิ่มสูงขึ้น และพบว่า กรรมวิธีที่ 2 และ 3 มีค่า SPAD ต่ำกว่า กรรมวิธีอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่า SPAD เท่ากับ 34.6 - 35.7 เมื่อข้าวโพดอายุ 50 วันหลังปลูก พบว่า กรรมวิธีที่มีการลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีพื้นที่การปกคลุม 20 เปอร์เซ็นต์ คือกรรมวิธีที่ 2 และ 3 ยังมีค่า SPAD ต่ำที่สุด โดยค่าดัชนีความเขียวใบเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 34.67 - 35.74 เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีควบคุม กรรมวิธีที่ 4 และ 5 ที่ยังให้น้ำอยู่ในระดับปกติ และกรรมวิธีที่มีการให้น้ำปกติให้ค่า SPAD อยู่ระหว่าง 42.29 - 43.46 (ภาพ 12)

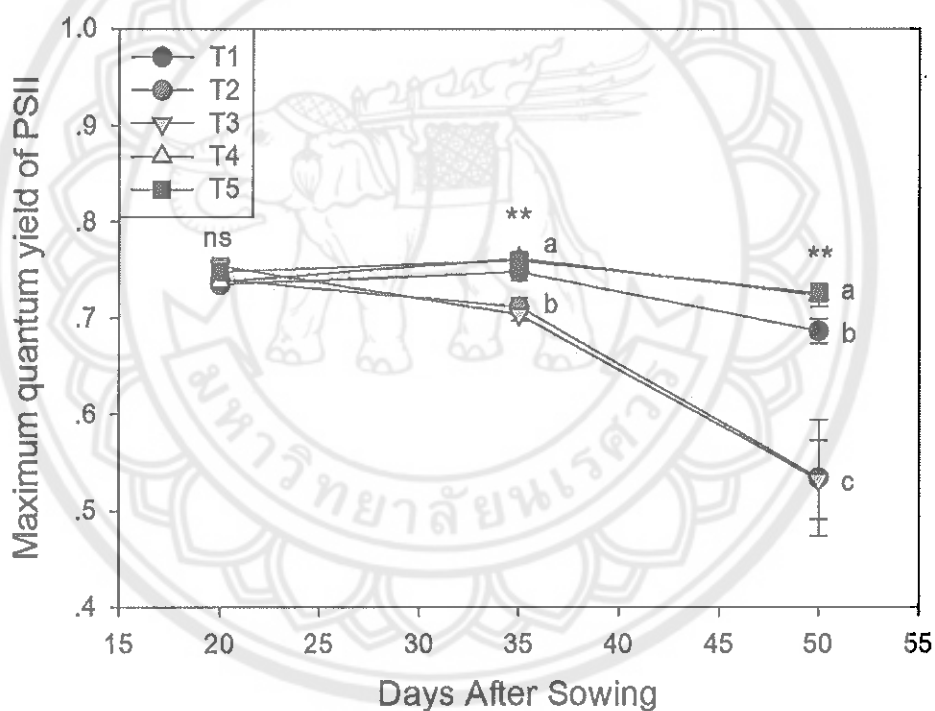


ภาพ 13 SPAD values under different water deficit conditions

Note: Means with different letters are significantly different according to LSD at 95 %,

** ; significant level at $p < 0.01$, ns : non-significant

ผลของประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง แสดงให้เห็นว่าเมื่อข้าวโพดอายุ 20 วันหลังปลูก ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของข้าวโพดทั้งห้ากรรมวิธีไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยทุกกรรมวิธีมีค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 0.74 - 0.75 และเมื่ออายุข้าวโพด 35 และ 50 วันหลังปลูก พบว่า กรรมวิธีที่ 2 และ 3 ที่มีการลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีพื้นที่การปกคลุม 20 เปอร์เซ็นต์จนถึงระยะออกดอก และจนถึงระยะการเก็บเกี่ยว มีแนวโน้มค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงลดลงมีค่า 0.71 และ 0.70 โดยทั้ง 2 กรรมวิธีให้ค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงต่ำสุดและแตกต่างกับ กรรมวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และกรรมวิธีอื่นๆ ที่ได้รับการให้น้ำในระดับปกติให้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงอยู่ระหว่าง 0.69 - 0.73 (ภาพ 13)



ภาพ 14 Maximum quantum yield of PSII under different water deficit conditions

Note: Means with different letters are significantly different according to LSD at 95 %,

** ; significant level at $p < 0.01$, ns : non-significant

2. องค์ประกอบผลผลิตและผลผลิตข้าวโพด

จากการทดลอง พบว่า ผลของมวลชีวภาพแห้ง กรรมวิธีที่ 2 และ 3 มีการลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีพื้นที่การปกคลุม 20 เปอร์เซ็นต์จนถึงระยะออกดอก และจนถึงระยะการเก็บเกี่ยว ให้ผลของมวลชีวภาพแห้งต่ำสุด และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีอื่น โดยให้ค่ามวลชีวภาพแห้งอยู่ระหว่าง 206.31 - 216.87 กรัมต่อต้น และกรรมวิธีอื่นให้ค่ามวลชีวภาพแห้งอยู่ระหว่าง 344.28 - 384.15 กรัมต่อต้น

ผลขององค์ประกอบผลผลิตทางด้านน้ำหนักแห้ง พบว่า กรรมวิธีที่ 2 และ 3 มีการลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีพื้นที่การปกคลุม 20 เปอร์เซ็นต์จนถึงระยะออกดอก และจนถึงระยะการเก็บเกี่ยว ให้ผลของค่าองค์ประกอบผลผลิตทางด้านน้ำหนักแห้งต่ำสุด โดยให้ค่าองค์ประกอบผลผลิตทางด้านน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 56.34 - 59.65 กรัมต่อต้น และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีอื่น และกรรมวิธีอื่นให้ค่าองค์ประกอบผลผลิตทางด้านน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 153.45 - 174.89 กรัมต่อต้น

ผลขององค์ประกอบผลผลิตทางด้านจำนวนเมล็ด พบว่า กรรมวิธีที่ 2 และ 3 มีการลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีพื้นที่การปกคลุม 20 เปอร์เซ็นต์จนถึงระยะออกดอก และจนถึงระยะการเก็บเกี่ยว ให้ผลค่าองค์ประกอบผลผลิตทางด้านจำนวนเมล็ดต่อต้นต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีอื่น โดยมีค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบผลผลิตทางด้านจำนวนเมล็ดต่อต้นอยู่ระหว่าง 125.1 - 129.6 เมล็ดต่อต้น และกรรมวิธีอื่นให้ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบผลผลิตทางด้านจำนวนเมล็ดต่อต้นอยู่ระหว่าง 428.2 - 464.2 เมล็ดต่อต้น

ผลของค่าดัชนีการเก็บเกี่ยว พบว่า กรรมวิธีที่ 2 และ 3 มีการลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีพื้นที่การปกคลุม 20 เปอร์เซ็นต์จนถึงระยะออกดอก และจนถึงระยะการเก็บเกี่ยว ให้ค่าดัชนีการเก็บเกี่ยวต่ำที่สุด โดยให้ผลของค่าดัชนีการเก็บเกี่ยวอยู่ที่ 0.22 - 0.24 และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีอื่น และกรรมวิธีอื่นให้ผลของค่าดัชนีการเก็บเกี่ยวอยู่ที่ 0.44

ผลการทดลองในด้านผลผลิตต่อต้น (น้ำหนักเมล็ดแห้ง) พบว่า กรรมวิธีที่ 2 และ 3 มีการลดการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีพื้นที่การปกคลุม 20 เปอร์เซ็นต์จนถึงระยะออกดอก และจนถึงระยะการเก็บเกี่ยว ให้ผลค่าผลผลิตต่อต้นต่ำสุด โดยให้ค่าเฉลี่ยของผลผลิตอยู่ที่ 40.25 - 41.23 กรัมต่อต้น และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีอื่น และกรรมวิธีอื่นให้ค่าเฉลี่ยของผลผลิตต่อต้นอยู่ที่ 133.16 - 148.99 กรัมต่อต้น

ตาราง 4 Yield and yield components under different water deficit conditions

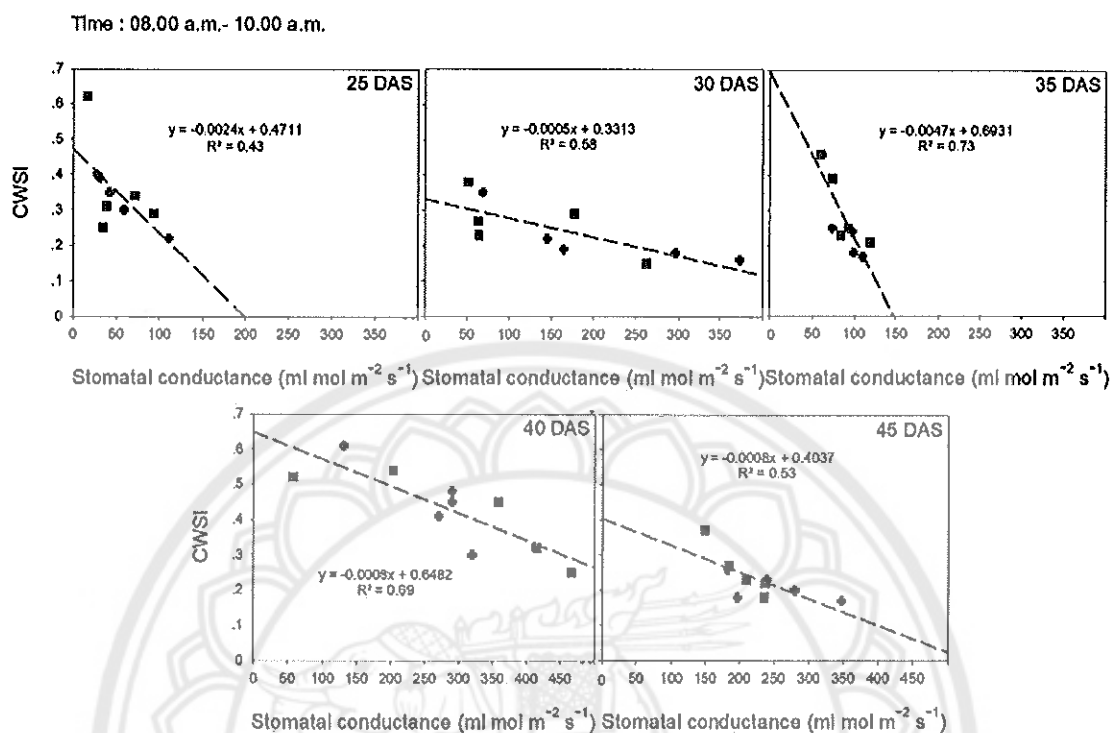
Treatment	Yield components			Yield (g/plant)	Harvest Index
	Dry pods weight (g/plant)	Number of seeds per plant	Dry biomass weight (g/plant)		
T1	166.14 ^{1/} ±14.31a	434.1±40.9a	227.68±13.85a	144.16±17.99a	0.44±0.02a
T2	56.34±16.01b	129.6±42.5b	170.44±10.98b	40.25±12.91b	0.24±0.05b
T3	59.65±18.33b	125.1±46.3b	177.69±10.49b	41.23±16.64b	0.22±0.06b
T4	174.89±20.83a	464.2±65.7a	229.74±15.81a	148.99±20.48a	0.44±0.03a
T5	153.45±16.33a	428.2±53.5a	211.30±15.47a	133.16±20.24a	0.44±0.04a
P<0.05	0.0000	0.0000	0.0012	0.0001	0.0001
F-test	**	**	**	**	**
CV	40.56	47.41	18.37	35.39	36.64

** indicate significant differences ($P < 0.05$) between the treatments by F test at 5% probability;

^{1/} represent mean $\pm$ standard error of the mean ($n=5$); CV: variance coefficient

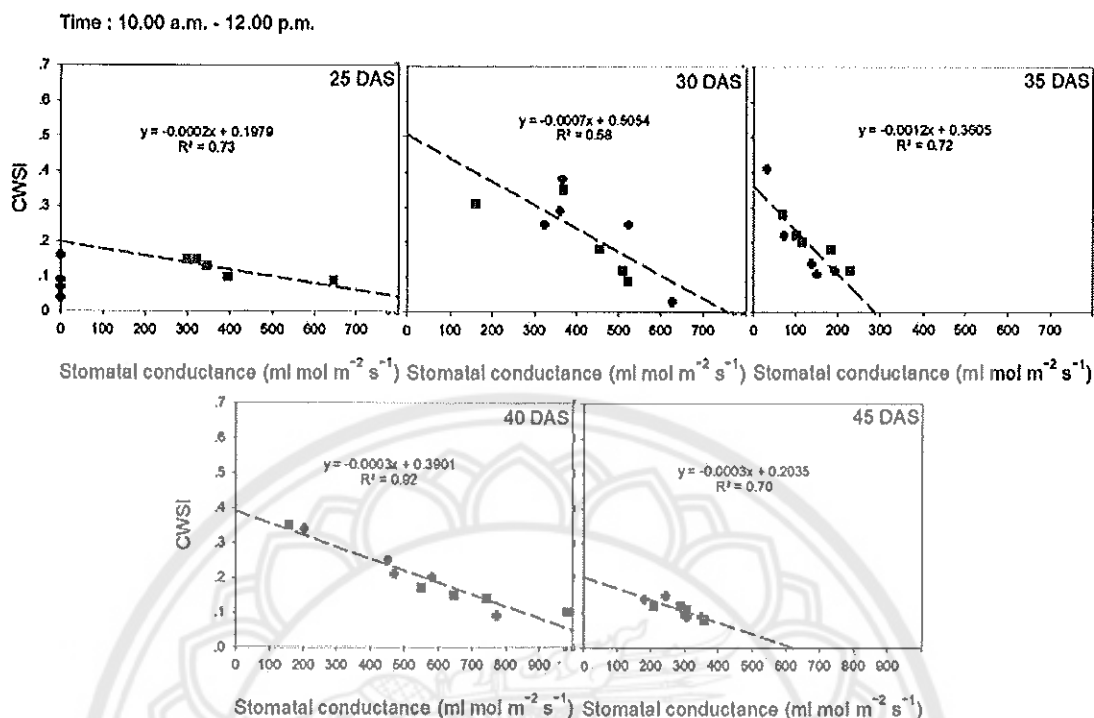
ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CWSI กับการชักนำการเปิดปิดปากใบ

การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า CWSI กับค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อายุ 25, 30, 35, 40 และ 45 วันหลังปลูก และถ่ายภาพความร้อนในช่วงเวลา 08.00 - 10.00 น. พบว่า กรรมวิธีที่ให้น้ำลดลงจากกรรมวิธีควบคุม ค่า CWSI มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบ คือ เมื่อค่า CWSI สูงขึ้นค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบต่ำลงโดยการถ่ายภาพความร้อนในช่วงเวลา 08.00 - 10.00 น. มีความสัมพันธ์ระหว่างค่า CWSI กับค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง มีค่า R^2 0.43 ถึง 0.73 (ภาพ 14)



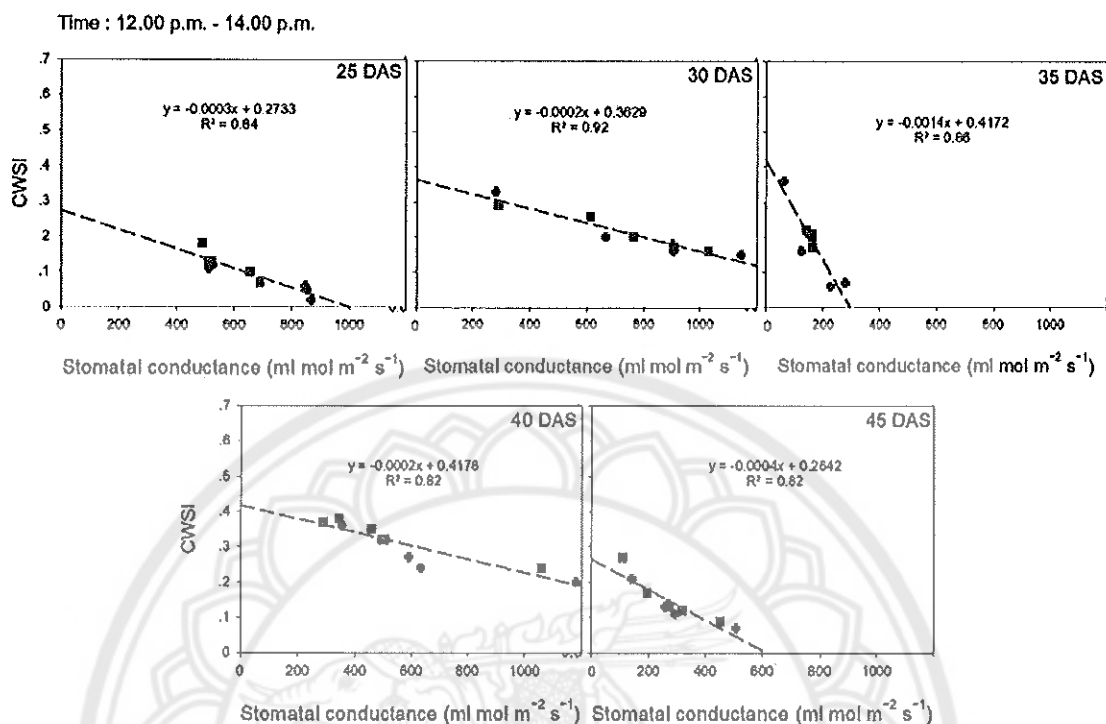
ภาพ 15 Relationship between CWSI and stomatal conductance during 08.00-10.00 a.m.

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า CWSI กับค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อายุ 25, 30, 35, 40 และ 45 วันหลังปลูก และถ่ายภาพความร้อนในช่วงเวลา 10.00 - 12.00 น. พบว่า กรรมวิธีที่ให้น้ำลดลงจากกรรมวิธีควบคุม 50 เปอร์เซ็นต์ได้แก่ กรรมวิธีที่ 2 และ 3 มีค่า CWSI มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบ คือ เมื่อค่า CWSI สูงขึ้นค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบต่ำลง โดยการถ่ายภาพความร้อนในช่วงเวลา 10.00 - 12.00 น. มีความสัมพันธ์ระหว่างค่า CWSI กับค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อยู่ในระดับปานกลาง ถึงสูงมาก มีค่า R^2 0.58 ถึง 0.92 (ภาพ 15)



ภาพ 16 Relationship between CWSI and stomatal conductance during 10.00-12.00 a.m.

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า CWSI กับค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ อายุ 25, 30, 35, 40 และ 45 วันหลังปลูก และถ่ายภาพความร้อนในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. พบว่า กรรมวิธีที่ให้น้ำลดลงจากกรรมวิธีควบคุม 50 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ กรรมวิธีที่ 2 และ 3 มีค่า CWSI มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบ คือ เมื่อค่า CWSI สูงขึ้นค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบต่ำลง โดยการถ่ายภาพความร้อนในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. เป็นช่วงเวลาที่ เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพความร้อนเพื่อวิเคราะห์ภาวะความเครียดจากการขาดน้ำของข้าวโพด เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า CWSI กับค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ อยู่ในระดับสูงถึงสูงมากอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) มีค่า R^2 0.82 ถึง 0.92 (ภาพ 16)

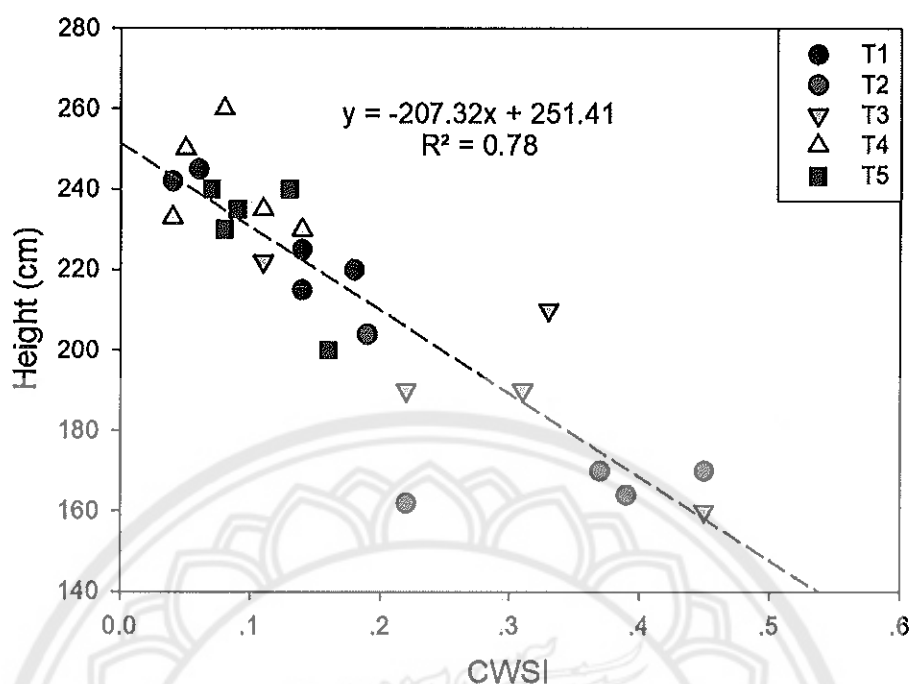


ภาพ 17 Relationship between CWSI and stomatal conductance during 12.00 -2.00 p.m.

ความสัมพันธ์ระหว่างสรีรวิทยา องค์ประกอบผลผลิต ผลผลิตข้าวโพดและค่า CWSI

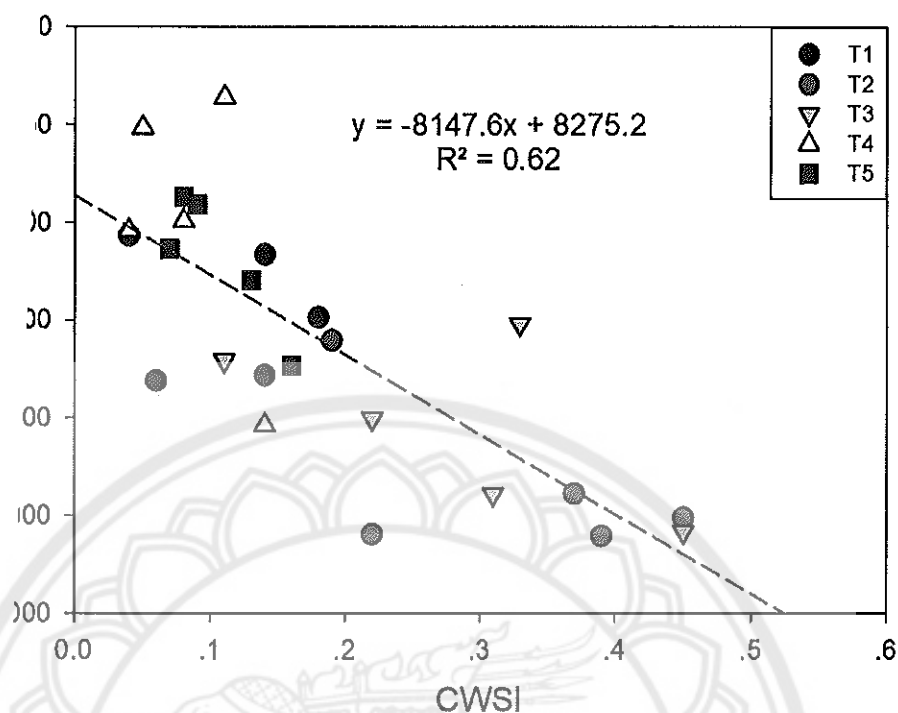
1. ความสัมพันธ์ระหว่างสรีรวิทยาและค่า CWSI

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างสรีรวิทยาทางด้านความสูงต้นข้าวโพดและค่า CWSI พบว่า ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความสูงข้าวโพดอายุ 50 วันหลังปลูก และค่า CWSI ที่ถ่ายภาพในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. มีค่าความสัมพันธ์ดีที่สุด โดยให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของต้นข้าวโพดและค่า CWSI ในรูปแบบของสมการเส้นตรงและมีความสัมพันธ์เชิงบวก มีค่า $R^2 = 0.78$ และมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพ 17)



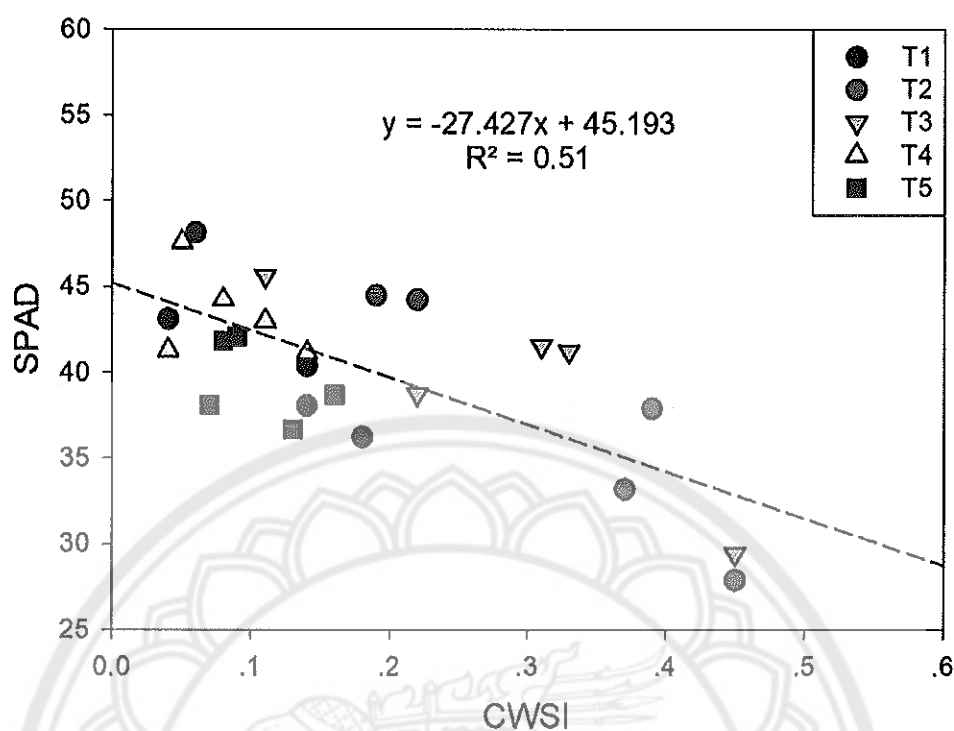
ภาพ 18 Relationship between CWSI and maize height

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างสรีรวิทยาทางด้านพื้นที่ใบและค่า CWSI พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเจริญเติบโตที่ข้าวโพดอายุ 50 วันหลังปลูก และค่า CWSI ที่ถ่ายภาพในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. มีค่าความสัมพันธ์ดีที่สุด โดยให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใบ และค่า CWSI อยู่ในระดับปานกลาง มีค่า $R^2 = 0.62$ โดยพบว่า พื้นที่ใบและค่า CWSI มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงว่าถ้าค่า CWSI เพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่ใบเพิ่มขึ้น (ภาพ 18)



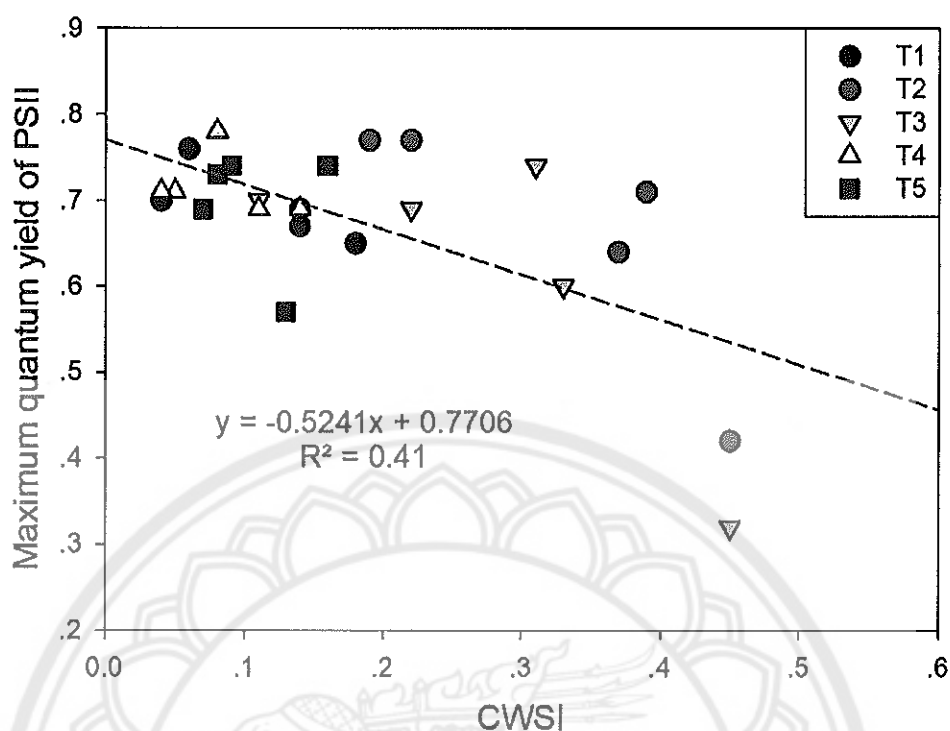
ภาพ 19 Relationship between CWSI and leaf area

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างสรีรวิทยาทางด้านดัชนีความเขียวใบ (SPAD) และค่า CWSI พบว่า ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเจริญเติบโตที่ข้าวโพดอายุ 50 วันหลังปลูก และค่า CWSI ที่ถ่ายภาพในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. มีค่าความสัมพันธ์ดีที่สุด โดยให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า SPAD และค่า CWSI อยู่ในระดับปานกลาง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น $R^2 = 0.51$ ซึ่งพบว่า ค่า SPAD มีความสัมพันธ์กับค่า CWSI แบบเชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพ 19)



ภาพ 20 Relationship between CWSI and SPAD values

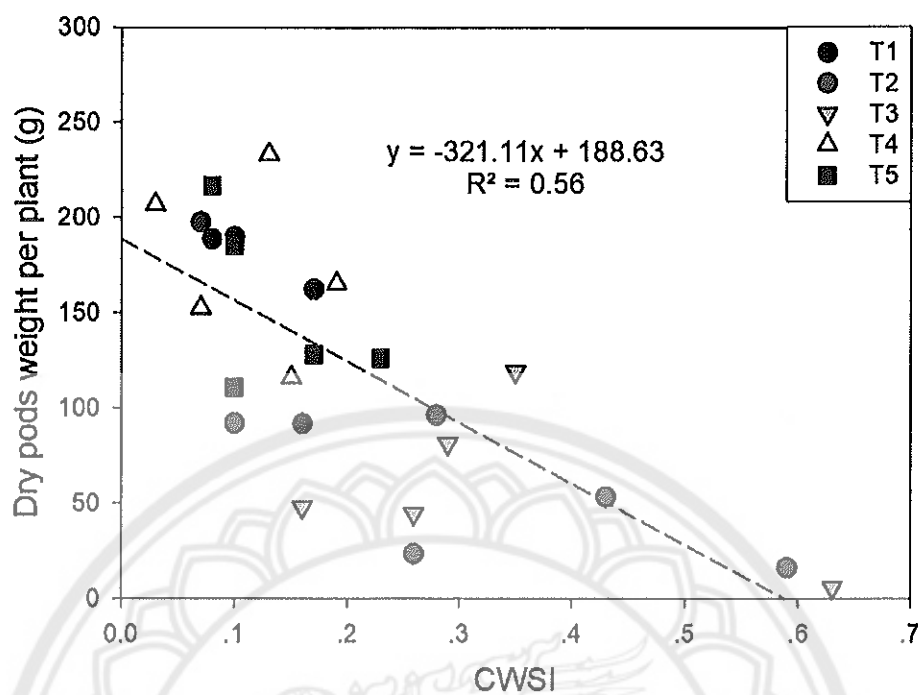
การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างสรีรวิทยาทางด้านประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง และค่า CWSI ที่ข้าวโพดอายุ 50 วันหลังปลูก พบว่า ค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงและ CWSI ที่ถ่ายภาพในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. มีค่าความสัมพันธ์ดีที่สุด โดยให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงและค่า CWSI อยู่ในระดับต่ำ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น $R^2 = 0.41$ ซึ่งพบว่า ค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงมีความสัมพันธ์กับค่า CWSI แบบเชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพ 20)



ภาพ 21 Relationship between CWSI and maximum quantum yield of PSII

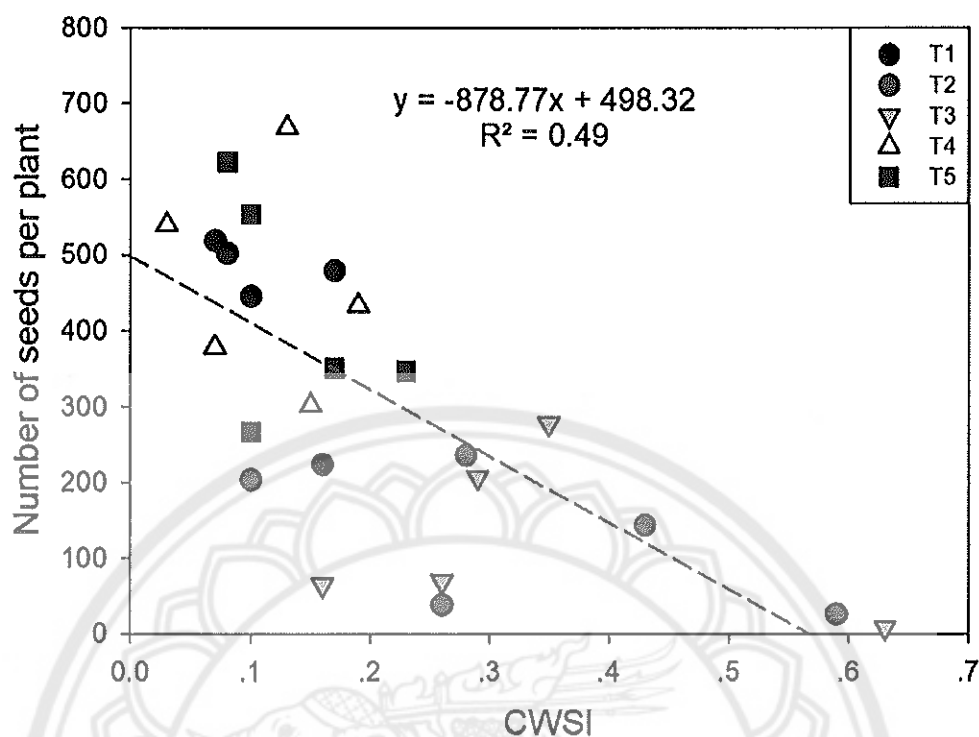
2. ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบผลผลิตและผลผลิตข้าวโพดกับค่า CWSI

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผักตบและค่า CWSI เมื่อนำผลการทดลองระหว่างองค์ประกอบผลผลิตและค่า CWSI เพื่อหาค่าความสัมพันธ์กัน พบว่า น้ำหนักผักตบมีความสัมพันธ์ระดับปานกลางกับค่า CWSI ที่ถ่ายภาพในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. เมื่อข้าวโพดอายุ 55 วันหลังปลูก โดยมีค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผักตบและค่า CWSI ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น $R^2 = 0.56$ ซึ่งพบว่า น้ำหนักผักตบมีความสัมพันธ์กับค่า CWSI แบบเชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพ 21)



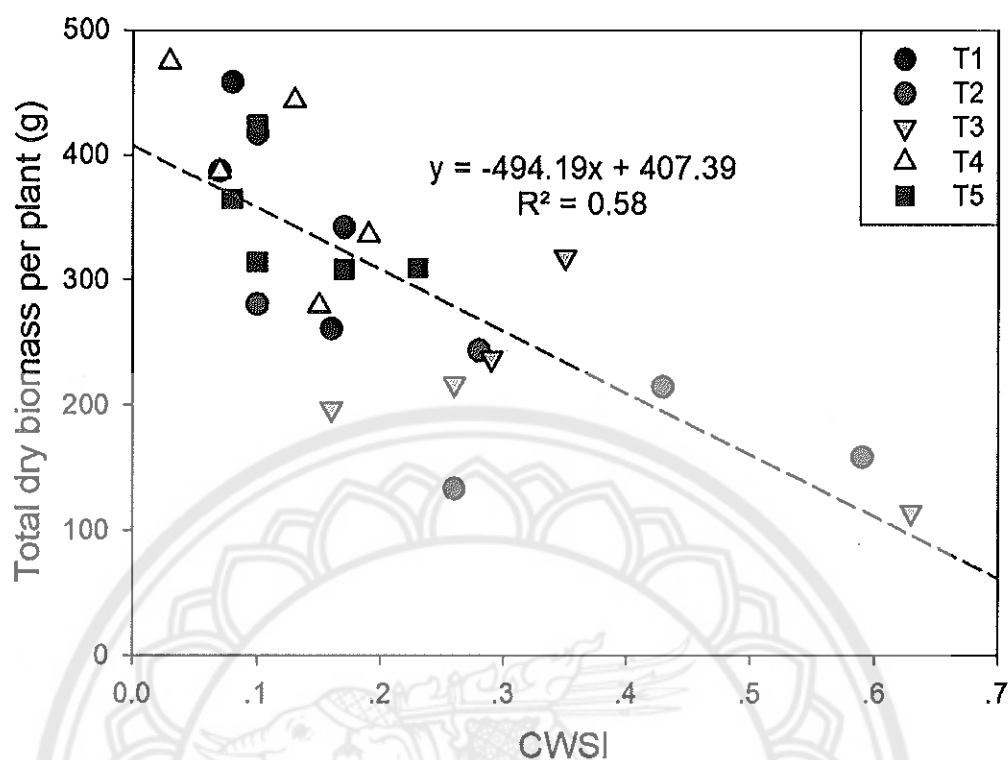
ภาพ 22 Relationship between CWSI and dry pods weight

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเมล็ดต่อต้นและค่า CWSI เมื่อนำผลการทดลองระหว่างองค์ประกอบผลผลิตและค่า CWSI เพื่อหาค่าความสัมพันธ์กัน พบว่า จำนวนเมล็ดต่อต้นมีความสัมพันธ์ระดับต่ำกับค่า CWSI ที่ถ่ายภาพในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. เมื่อข้าวโพดอายุ 55 วัน หลังปลูก โดยมีค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักฝักต่อต้นและค่า CWSI ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น $R^2 = 0.49$ ซึ่งพบว่า จำนวนเมล็ดต่อต้นมีความสัมพันธ์กับค่า CWSI แบบเชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพ 22)



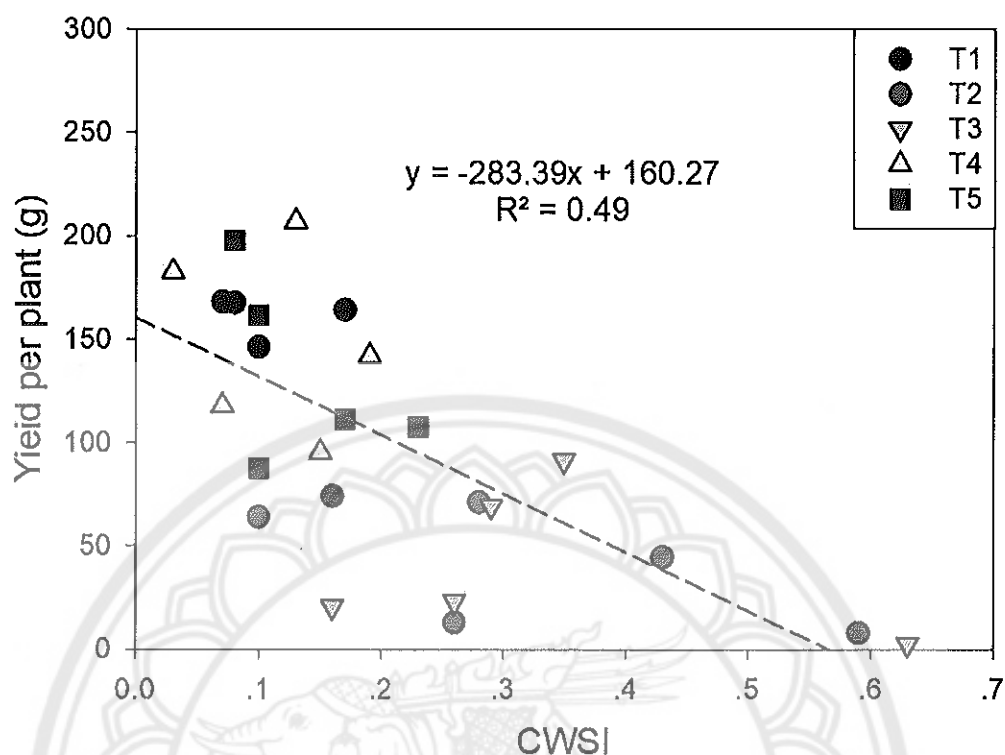
ภาพ 23 Relationship between CWSI and number of seeds

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพต่อต้นและค่า CWSI เมื่อนำผลการทดลองระหว่างองค์ประกอบผลผลิตและค่า CWSI เพื่อหาค่าความสัมพันธ์กัน พบว่า มวลชีวภาพต่อต้นมีความสัมพันธ์ระดับปานกลางกับค่า CWSI ที่ถ่ายภาพในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. เมื่อข้าวโพดอายุ 55 วันหลังปลูก โดยมีค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักฝักต่อต้นและค่า CWSI ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น $R^2 = 0.58$ ซึ่งพบว่า มวลชีวภาพต่อต้นมีความสัมพันธ์กับค่า CWSI แบบเชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพ 23)



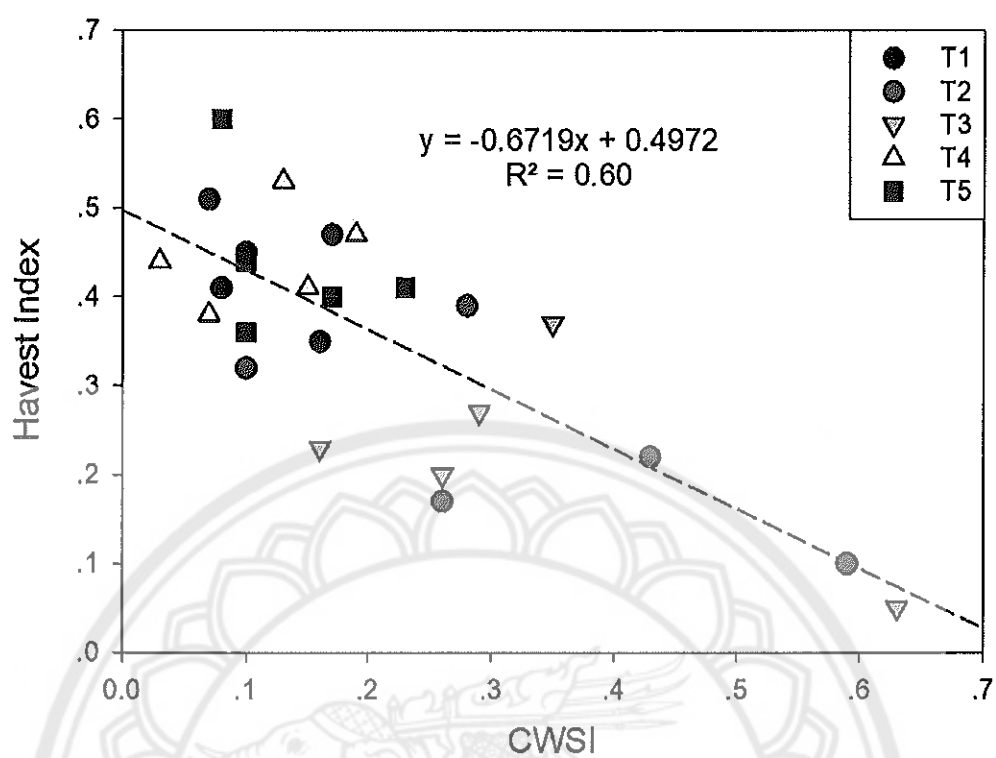
ภาพ 24 Relationship between CWSI and dry biomass weight

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตต่อต้นและค่า CWSI เมื่อนำผลการทดลองระหว่างองค์ประกอบผลผลิตและค่า CWSI เพื่อหาค่าความสัมพันธ์กัน พบว่า ผลผลิตต่อต้นมีความสัมพันธ์ระดับต่ำกับค่า CWSI ที่ถ่ายภาพในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. เมื่อข้าวโพดอายุ 55 วันหลังปลูก โดยมีค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักฝักต่อต้นและค่า CWSI ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น $R^2 = 0.49$ ซึ่งพบว่า ผลผลิตต่อต้นมีความสัมพันธ์กับค่า CWSI แบบเชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพ 24)



ภาพ 25 Relationship between CWSI and yield

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการเก็บเกี่ยวและค่า CWSI เมื่อนำผลการทดลองระหว่างองค์ประกอบผลผลิตและค่า CWSI เพื่อหาค่าความสัมพันธ์กัน พบว่า ดัชนีการเก็บเกี่ยวมีความสัมพันธ์ระดับต่ำกับค่า CWSI ที่ถ่ายภาพในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. เมื่อข้าวโพดอายุ 55 วัน หลังปลูก โดยมีค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักฝักต่อต้นและค่า CWSI ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น $R^2 = 0.60$ ซึ่งพบว่า ดัชนีการเก็บเกี่ยวมีความสัมพันธ์กับค่า CWSI แบบเชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพ 25)



ภาพ 26 Relationship between CWSI and harvest Index

บทที่ 5

บทสรุป

อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองการวิเคราะห์สภาวะความเครียดจากการขาดน้ำในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ภายใต้สภาวะการขาดน้ำในสภาพเรือนทดลอง อภิปรายผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ความเครียดของน้ำในดิน (ค่า pF)

สภาวะความเครียดของน้ำในดิน สามารถบ่งชี้ได้ด้วยค่า pF หากในดินมีค่า pF สูง ระดับความชื้นในดินจะน้อย และหากหากในดินมีค่า pF ต่ำ ระดับความชื้นในดินจะสูง จากการศึกษาของ Mashimo (1959) พบว่า สำหรับดินที่มีสภาพแห้งมากจะมีค่า pF ที่มากกว่า 3 สำหรับสถานะของน้ำที่มีความเหมาะสมสำหรับพืชจะมีค่า pF อยู่ระหว่าง 2.5-2.0 และสำหรับดินที่อยู่สภาพและน้ำจะมีค่า pF ที่น้อยกว่า 1.7

2. อุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพดภายใต้ภาวะขาดน้ำแตกต่างกัน

การวัดอุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพดภายใต้ภาวะขาดน้ำแตกต่างกันโดยการถ่ายภาพความร้อนในสภาพเรือนทดลอง พบว่าอุณหภูมิเรือนยอดของข้าวโพดในระยะแรกหลังรดน้ำ 5 และ 10 วัน (ข้าวโพดอายุ 25 และ 30 วันหลังปลูก) ของกรรมวิธีที่ 2 คือให้น้ำ 50% ของกรรมวิธีควบคุม เมื่อข้าวโพดมีพื้นที่การปกคลุมดิน 20% จนถึงเกษตรกรผู้ปลูกกลับมาให้น้ำระดับปกติ และกรรมวิธีที่ 3 ให้น้ำ 50% ของกรรมวิธีควบคุมเมื่อข้าวโพดมีพื้นที่การปกคลุมดิน 20% จนถึงอายุการเก็บเกี่ยว มีค่าอุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพดที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ อย่างมีนัยสำคัญกับกรรมวิธีควบคุม กรรมวิธีที่ 4 ให้น้ำ 50% ของกรรมวิธีควบคุม เมื่อพืชมีเกษตรกรผู้ถึงอายุการเก็บเกี่ยว และกรรมวิธีที่ 5 งดการให้น้ำเมื่อพืชมีเกษตรกรผู้ถึงอายุการเก็บเกี่ยว ทั้งนี้เนื่องจากดินที่นำมาทดลองเป็นดินเหนียว ทำให้ดินยังมีความชื้น โดยสภาวะความเครียดของน้ำในดิน (pF) อยู่ระหว่าง 2.0-3.0 หลังจากนั้น อุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะในกรรมวิธีที่ 2 และ 3 ที่มีการลดการให้น้ำ ครั้งหนึ่งของกรรมวิธีควบคุมมีแนวโน้มอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีที่มีการให้น้ำปกติ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Carroll (2017) พบว่า การวัดอุณหภูมิใบข้าวโพดในสภาพโรงเรือน ไม่มีความแตกต่างกันของอุณหภูมิเรือนยอดในระยะแรก หลังจากลดการให้น้ำแล้ว 7 วัน (26 วัน หลังปลูก) อุณหภูมิเรือนยอดจะสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญสำหรับกรรมวิธีที่มีการลดการให้น้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีที่มีการให้น้ำปกติ โดยอุณหภูมิใบเฉลี่ยตลอดวันที่ทำการวัดเท่ากับ 29.3°C สำหรับกรรมวิธีที่มีการให้น้ำปกติ และสำหรับกรรมวิธีที่มีการลดการให้น้ำมีอุณหภูมิใบ

เฉลี่ยเท่ากับ 29.9°C อุณหภูมิเรือนยอดมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลอง อุณหภูมิเรือนยอดมีความแตกต่างสูงขึ้นที่ 3.3°C (37 วันหลังปลูก) และจากการผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพดของ กรรมวิธีที่ 4 และ 5 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับ กรรมวิธีควบคุม เนื่องจากทั้งสองกรรมวิธีนี้ลดการให้น้ำและงดการให้น้ำเมื่อข้าวโพดอายุ 60 วัน หลังปลูก ประกอบต้นข้าวโพดสูงจนหลังคาโรงเรือนทำให้ไม่สามารถวัดอุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพด ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนหลังข้าวโพดอายุ 60 วันหลังปลูก นอกจากนี้อุณหภูมิเรือนยอด ยังขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการถ่ายภาพ (Zia et al., 2011) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการถ่ายภาพในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. จะมีอุณหภูมิเรือนยอดข้าวโพดสูงกว่าช่วงที่ถ่ายในเวลา 10.00 - 12.00 น. รวมถึง สภาพอากาศภายในโรงเรือน ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

3. ดัชนีความเครียดของข้าวโพด (CWSI) และการชักนำการเปิดปิดปากใบ สัมพัทธ์ภายใต้ภาวะขาดน้ำแตกต่างกัน

การวิเคราะห์สภาวะความเครียดจากการขาดน้ำด้วยการวัดอุณหภูมิเรือนยอด หรือ ใบบีซจากภาพถ่ายความร้อน (Thermal imaging) และใช้อุณหภูมิเรือนยอดเพื่อคำนวณหา ดัชนี ความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำของพืช (Crop Water Stress Index; CWSI) โดยที่ผ่านมามีค่า CWSI ได้ถูกนำไปใช้ในพืชหลายชนิด เช่น ข้าวสาลี ข้าวสาลี (Yuan et al., 2004; Gontia, & Tiwari, 2008) ฝ้าย (Silva et al., 2005; O'shaughnessy et al., 2011) ข้าวโพด (Anda, 2009; Li et al., 2010; Romano et al., 2011; Taghvaeian et al., 2012) ถั่ว (Erdem et al., 2006) และผักบางชนิด (Cremona et al., 2004; simsek et al., 2005; Erdem et al., 2010; Aladenola, & Madramootoo, 2014; Rud et al., 2014) หรือผลไม้ (Erdem et al., 2006; Paltineanu et al., 2009) ซึ่งค่า CWSI จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อใช้คู่กับการวัดการเปิด-ปิดของปากใบพืชโดยเครื่อง Porometer (Jones et al., 2002) โดยในการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าค่า CWSI มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการชักนำ ของปากใบ (Jones et al., 2002; Leinonen et al., 2006) จากผลการทดลองพบว่าค่า CWSI และ ค่าดัชนีการชักนำการเปิดปิดปากใบสัมพัทธ์ เป็นไปในทิศทางเดียวกับอุณหภูมิของเรือนยอดข้าวโพด คือ หลังรดน้ำ 5 และ 10 วัน (ข้าวโพดอายุ 25 และ 30 วันหลังปลูก) ของกรรมวิธีที่ 2 และ 3 ค่า CWSI และค่าดัชนีการชักนำการเปิดปิดปากใบสัมพัทธ์ ยังไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเวลาผ่านไปกรรมวิธีที่ 2 และ 3 ที่ลดการให้น้ำครั้งหนึ่งตั้งแต่ข้าวโพดอายุ 20 วันหลังปลูก มีค่า CWSI เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีที่มีการให้น้ำปกติ ได้แก่ กรรมวิธีควบคุม กรรมวิธีที่ 4 และ 5 ที่เริ่มลดและงดการให้น้ำเมื่อข้าวโพดอายุ 60 วันหลังปลูก โดยกรรมวิธีที่ลดการให้น้ำมีค่า CWSI เฉลี่ยเท่ากับ 0.13-0.43 และกรรมวิธีที่มีการให้น้ำปกติ CWSI เฉลี่ยเท่ากับ 0.04-0.09 ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาของ Carroll (2017) ที่พบว่า การทดลองในสภาพโรงเรือน ค่าดัชนีความเครียด

จากการขาดน้ำของข้าวโพดในกรรมวิธีที่มีการงดการให้น้ำมีค่า CWSI เท่ากับ 0.54 และในกรรมวิธีที่มีการให้น้ำปกติมีค่า CWSI เท่ากับ 0.37 สำหรับค่าดัชนีการชักนำการเปิดปิดปากใบสัมพัทธ์ทำการคำนวณโดยเทียบกับกรรมวิธีควบคุม ทำให้เมื่อพืชอยู่ในสภาวะปกติจะมีค่าดัชนีการชักนำการเปิดปิดปากใบสัมพัทธ์เท่ากับหรือสูงกว่า 1 และเมื่อพืชที่อยู่ในสภาวะการขาดน้ำค่าดัชนีการชักนำการเปิดปิดปากใบสัมพัทธ์ลดลงต่ำกว่า 1 จากการศึกษา พบว่า ในกรรมวิธีที่มีการลดการให้น้ำมีแนวโน้มทำให้ค่าดัชนีการชักนำการเปิดปิดปากใบสัมพัทธ์ลดลง ซึ่งจากการศึกษาของ Pipatsitee et al. (2018) พบว่า เมื่อพืชอยู่ในสภาวะเครียดจากการขาดน้ำค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบจะลดน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่อยู่ในสภาวะปกติ

การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า CWSI กับค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อายุ 25, 30, 35, 40 และ 45 วันหลังปลูก และถ่ายภาพความร้อนในช่วงเวลา 8.00 - 10.00 น., 10.00 - 12.00 น. และ 12.00 - 14.00 น. กรรมวิธีที่ให้น้ำลดลงจากกรรมวิธีควบคุม ค่า CWSI มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบ คือ เมื่อค่า CWSI สูงขึ้นค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบต่ำลง โดยการถ่ายภาพความร้อนในช่วงเวลา 8.00 - 10.00 น. มีความสัมพันธ์ระหว่างค่า CWSI กับค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง (R^2 0.43 ถึง 0.73) การถ่ายภาพความร้อนในช่วงเวลา 10.00 - 12.00 น. มีความสัมพันธ์ระหว่างค่า CWSI กับค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อยู่ในระดับต่ำถึงสูงมาก (R^2 0.58 ถึง 0.92) ในขณะที่การถ่ายภาพความร้อนในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพความร้อนเพื่อวิเคราะห์ภาวะความเครียดจากการขาดน้ำของข้าวโพด เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า CWSI กับค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อยู่ในระดับสูงถึงสูงมาก (R^2 0.82 ถึง 0.92) จากการศึกษาของ Zia et al. (2011) พบว่าช่วงเวลาที่ดีที่สุดการถ่ายภาพความร้อนเมื่อพืชอยู่ในสภาวะความเครียดจากการขาดน้ำ คือ 12.00 น. และ 15.00 น. เนื่องจากถ่ายภาพในช่วงบ่ายอาจจะประเมินค่าความเครียดจากการขาดน้ำสูงเกินไป และสิ่งสำคัญการถ่ายภาพความร้อนควรถ่ายในเวลาเดียวกันของวัน เนื่องจากค่าดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำ หรือ CWSI มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ถึงแม้ว่าการวัดดัชนีความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำของพืช (CWSI) ด้วยการถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดความเครียดจากสภาวะการขาดน้ำของพืช โดยไม่ทำลายตัวอย่างรวดเร็วแม่นยำ แต่ก็อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้จากปัจจัยแวดล้อมในการถ่ายภาพความร้อน เช่น การถ่ายภาพความร้อนขณะที่มีลมพัดพาอาจส่งผลให้อุณหภูมิใบลดต่ำลง และการถ่ายภาพความร้อนขณะที่มีความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิใบสูงขึ้นไปด้วย ทำให้

การประเมินดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำต่ำกว่าหรือสูงกว่าที่ควรจะเป็น (วันวิสาข์ จันทิกา, 2555) ดังนั้น ควรทำการบันทึกสภาพภูมิอากาศในช่วงเวลาถ่ายภาพความร้อนประกอบกับการวัดความชื้นดิน

4. ลักษณะทางสรีรวิทยา องค์ประกอบผลผลิต และผลผลิตข้าวโพดภายใต้ภาวะขาดน้ำแตกต่างกัน

ลักษณะทางสรีรวิทยาของข้าวโพด ได้แก่ ความสูงต้น พื้นที่ใบ ความเขียวใบ และประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือมีความแตกต่างระหว่างกรรมวิธี เมื่อข้าวโพดอายุ 35 วันหลังปลูก โดยกรรมวิธีที่ 2 และ 3 มีค่าความเขียวใบ และประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงต่ำกว่ากรรมวิธีอื่นๆ เนื่องจากการลดการให้น้ำ 50 % ในระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพด และส่วนขององค์ประกอบผลผลิตและผลผลิตของกรรมวิธีที่ 4 และ 5 ไม่แตกต่างจากกรรมวิธีควบคุม เนื่องมาจากกรรมวิธีควบคุมอาจได้รับผลกระทบจากช่วงที่มีอุณหภูมิระหว่างวันที่ร้อนเกิน 38 องศาเซลเซียสในช่วง reproductive และเห็นว่า ค่า pF ของกรรมวิธีที่ 4 แสดงการขาดน้ำในช่วงระยะเวลานั้นๆ ทำให้ไม่เห็นความแตกต่างกันในด้านสรีรวิทยา องค์ประกอบผลผลิต และผลผลิตต่อดัน ซึ่งการศึกษาของ Zia et al. (2011) พบว่า สภาวะเครียดจากการขาดน้ำส่งผลให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง การสังเคราะห์ด้วยแสง อัตราการดูดกลืนคาร์บอนและความสูงของพืชลดลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการถ่ายภาพความร้อนด้วยอินฟราเรดนั้นสามารถใช้ในการติดตามสภาวะเครียดทางสรีรวิทยาได้ และจากการศึกษาของ Cakir et al. (2004) พบว่า ผลกระทบจากสภาวะเครียดจากการขาดน้ำในระยะการเจริญเติบโต ส่งผลให้การเจริญเติบโตทางความสูงต้นลดลง สภาวะความเครียดจากการขาดน้ำในระยะการเจริญเติบโตและระยะ tasselling ส่งผลให้ค่าดัชนีพื้นที่ใบลดลง เนื่องจากขนาดใบลดลง สภาวะความเครียดจากการขาดน้ำในระยะนํ้านมทำให้สูญเสียใบล่างและลดน้ำหนักแห้ง

สภาวะความเครียดจากการขาดน้ำในข้าวโพดต่อผลผลิตข้าวโพด กรรมวิธีที่มีการลดการให้น้ำส่งผลให้ผลผลิตลด 71.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีที่มีการให้น้ำปกติจากการศึกษาที่ผ่านมาของ Cakir et al. (2004) พบว่า การขาดน้ำในระยะเวลานั้นๆ ในช่วงระยะเวลาการเจริญเติบโต ทำให้เกิดการสูญเสียผลผลิต 28 - 32% และกรรมวิธีที่มีการให้น้ำให้ผลผลิตสูงสุด การทำให้เกิดความเครียดจากน้ำในระยะการเจริญเติบโตของพืช (TCM) แม้แต่การละเว้นการชลประทานเพียงครั้งเดียวในช่วงระยะการเจริญเติบโตที่อ่อนไหวทำให้เกิดการสูญเสียผลผลิตข้าวได้ถึง 40% ในช่วงฤดูแล้งเช่นปี 1996

5. ความสัมพันธ์ระหว่างสรีรวิทยา องค์ประกอบผลผลิต ผลผลิตข้าวโพดและค่า CWSI

เพื่อตรวจสอบถึงผลกระทบของสภาวะความเครียดจากการขาดน้ำต่อผลผลิตข้าวโพด จึงใช้ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตข้าวโพดกับค่าดัชนีความเครียดจากการน้ำ โดยมีค่าความสัมพันธ์ของผลผลิตข้าวโพดกับค่าดัชนีความเครียดจากการน้ำเท่ากับ 0.49 และสำหรับกรรมวิธีที่มีการลดการให้น้ำมีค่าเฉลี่ยของค่าดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำตลอดการทดลองเท่ากับ 0.27 การเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องของค่าดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำ ทำให้ผลผลิตข้าวโพดลดลง ซึ่งจากการศึกษาของ Irmak (2000) พบว่า การคำนวณศักยภาพผลผลิตของข้าวโพดที่ปลูกในฤดูร้อนภายใต้ภูมิอากาศแบบเมดิเตอร์เรเนียนได้รับการพัฒนาโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตของเมล็ดข้าวโพดกับ CWSI เฉลี่ยตามฤดูกาล โดยให้ค่า CWSI เฉลี่ยตามฤดูกาลมีค่ามากกว่า 0.22 ส่งผลให้ผลผลิตของข้าวโพดลดลง CWSI จะลดลงเข้าใกล้ศูนย์ หลังจากมีการชลประทานและค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อน้ำในดินลดลง เราสรุปได้ว่า CWSI เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการตรวจสอบและวัดปริมาณน้ำในข้าวโพดภายใต้ภูมิอากาศแบบเมดิเตอร์เรเนียนได้ นอกจากนี้ การศึกษาของ Pipatsitee et al. (2018) พบว่า สภาวะการขาดน้ำทำให้ลักษณะทางสรีรวิทยาลดลง เช่น ความสูงต้น เส้นผ่านศูนย์กลางทรงพุ่ม อัตราการสังเคราะห์แสง การชักนำการเปิดปิดปากใบและอัตราการคายน้ำ และยังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ดีระหว่าง CWSI กับ อัตราการสังเคราะห์แสง การชักนำการเปิดปิดปากใบและอัตราการคายน้ำ และการศึกษาหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่า ดัชนีความเครียดของน้ำมีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช (Irmak et al., 2000; Nielsen, 1990; Smith et al., 1985; Taghvaeian et al., 2014; Walker, & Hatfield, 1983; Wanjura et al., 1990)

สรุปผลการวิจัย

1. ช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการวิเคราะห์ภาวะความเครียดจากการขาดน้ำในข้าวโพด คือ 12.00 - 14.00 น. เนื่องจากในช่วงเวลา 12.00 - 14.00 น. ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CWSI กับค่าชักนำการเปิด-ปิดปากใบมีความสัมพันธ์แบบสมการเชิงเส้นและความสัมพันธ์ระหว่างค่า CWSI กับค่าชักนำการเปิด-ปิดปากใบเป็นแบบเชิงลบในระดับสูง (R^2 0.82 ถึง 0.92) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในสภาพอุณหภูมิอยู่ในช่วง 40 - 55 °C และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศไม่ควรเกิน 50 % โดยค่า CWSI ของข้าวโพดที่อยู่ในสภาวะเครียดจากการขาดน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 0.20 - 0.43 ดังนั้น การใช้ภาพถ่ายความร้อนสามารถที่จะใช้เพื่อตรวจสอบความเครียดจากการขาดน้ำในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

2. กรรมวิธีที่ 2 ลดการให้น้ำ 50% ของกรรมวิธีที่ 1 เมื่อข้าวโพดมีพื้นที่การปกคลุมดิน 20% (20 วันหลังปลูก) และกลับมาให้น้ำเท่ากับกรรมวิธีที่ 1 เมื่อข้าวโพดมีเกสรตัวผู้ และกรรมวิธีที่ 3 ลดการให้น้ำ 50% ของกรรมวิธีที่ 1 เมื่อข้าวโพดมีพื้นที่การปกคลุมดิน 20% (20 วันหลังปลูก) ถึงอายุการเก็บเกี่ยว ที่อยู่ภายใต้สภาวะการขาดน้ำตั้งแต่ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ จนถึงระยะออกดอก และสะสมน้ำหนักเมล็ด ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง ค่าชักนำ การเปิด-ปิดปากใบ พื้นที่ใบ ค่าความเครียดใบ ดัชนีการเก็บเกี่ยว จำนวนเมล็ดต่อฝัก น้ำหนักฝักต่อต้น มวลชีวภาพแห้งต่อต้น ต่ำกว่ากรรมวิธีควบคุม กรรมวิธีที่ 4 และกรรมวิธีที่ 5 อย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติ ($p < 0.05$) และยังส่งผลให้ผลผลิตต่อต้นลดลงถึง 72 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธี ควบคุม

3. ความสัมพันธ์ระหว่าง CWSI กับค่าชักนำการเปิด-ปิดปากใบ ความสูงต้น พื้นที่ใบ ค่าความเครียด ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง ดัชนีการเก็บเกี่ยว จำนวนเมล็ดต่อฝัก น้ำหนักฝัก ต่อต้น มวลชีวภาพแห้งต่อต้น ผลผลิตต่อต้น สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้โดยสมการเชิงเส้น และพบว่า มีความสัมพันธ์กันในเชิงลบอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง ($R^2 = 0.49-0.72$)

ข้อเสนอแนะงานวิจัย

สำหรับการวิเคราะห์สภาวะความเครียดจากการขาดน้ำในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ภายใต้ สภาวะการขาดน้ำในสภาพเรือนทดลองในครั้งต่อไป เรือนทดลองควรมีขนาดของความสูงมากกว่า 6 เมตร เพื่อให้สามารถถ่ายภาพได้สะดวกและเพื่อไม่ให้ข้าวโพดอยู่ใกล้กับหลังคาเรือนทดลอง มากเกินไป การทำการทดลองในเรือนทดลองควรติดพัดลมระบายอากาศเพื่อลดอุณหภูมิในช่วงที่มี อุณหภูมิระหว่างวันร้อนเกินไป



บรรณานุกรม

- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2560). สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้มปี 2560. สืบค้น 5 มีนาคม 2561, จาก <http://www.oae.go.th/Journalpublishers.html>
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2561). ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่น: เนื้อที่เพาะปลูก เนื้อที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ รายอำเภอ ปี เพาะปลูก 2561/62. สืบค้น 20 กุมภาพันธ์ 2563, จาก <http://www.oae.go.th/>
- วันวิสาข์ จันทิกา. (2555). การพัฒนาดัชนีภาวะวิกฤติการขาดน้ำ และการควบคุมการให้น้ำอัตโนมัติ โดยเซ็นเซอร์ (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2558). ข้าวโพด: ความสำคัญทางเศรษฐกิจ ของข้าวโพด. สืบค้น 1 มีนาคม 2561, จาก <http://www3.rdi.ku.ac.th/?p=15990>
- สายัณห์ สดุดี. (2534). สภาพะขาดน้ำในการผลิตพืช. สงขลา: ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากร ธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สิทธิเดช พงศ์กิจวรสิน, และเขมรัฐ เถลิงศรี. (2558). ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์กับการสูญเสียพื้นที่ป่า: ปัญญาหาและทางออก. กรุงเทพฯ: สถาบันคลังสมองของชาติ.
- Aladenola, O., & Madramootoo, C. (2013). Response of greenhouse-grown bell pepper (*capsicum annuum* L.) to variable irrigation. *Canadian Journal of Plant Science*, 94(2), 303-310.
- Alchanatis, V., Cohen, Y., Cohen, S., Moller, M., Sprinstin, M., Meron, M., & Sela, E. (2010). Evaluation of different approaches for estimating and mapping crop water status in cotton with thermal imaging. *Precision Agriculture*, 11(1), 27-41.
- Anda, A. (2009). Irrigation timing in maize by using the crop water stress index (CWSI). *Cereal Research Communications*, 37(4), 603-610.
- Ben-Gal, A., Agam, N., Alchanatis, V., Cohen, Y., Yermiyahu, U., Zipori, I., & Dag, A. (2009). Evaluating water stress in irrigated olives: correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. *Irrigation Science*, 27(5), 367-376.
- Bulanon, D.M., Burks, T.F., & Alchanatis, V. (2008). Study on temporal variation in citrus canopy using thermal imaging for citrus fruit detection. *Biosystems Engineering*, 101(2), 161-171.

- Cakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89(1), 1-16.
- Carroll, D.A., Hansen, N.C., Hopkins, B.G., & DeJonge, K.C. (2017). Leaf temperature of maize and crop water stress index with variable irrigation and nitrogen supply. *Irrigation Science*, 35(6), 549-560.
- Cremona, M.V., Stützel, H., & Kage, H. (2004). Irrigation scheduling of kohlrabi (brassica oleracea var. gongylodes) using crop water stress index. *HortScience*, 39(2), 276-279.
- DeJonge, K.C., Taghvaeian, S., Trout, T.J., & Comas, L.H. (2015). Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. *Agricultural Water Management*, 156, 51-62.
- Erdem, Y., Arin, L., Erdem, T., Polat, S., Deveci, M., Okursoy, H., & Gultas, H.T. (2010). Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (brassica oleracea l. var. italica). *Agricultural Water Management*, 98(1), 148-156.
- Erdem, Y., Erdem, T., ORTA, A.H., & Okursoy, H. (2006). Irrigation scheduling for watermelon with crop water stress index (CWSI). *Journal of Central European Agriculture*, 6(4), 449-460.
- Erdem, Y., Sehirali, S., Erdem, T., & Kenar, D. (2006). Determination of crop water stress index for irrigation scheduling of bean (phaseolus vulgaris l.). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 30(3), 195-202.
- Gontia, N.K., & Tiwari, K.N. (2008). Development of crop water stress index of wheat crop for scheduling irrigation using infrared thermometry. *Agricultural Water Management*, 95(10), 1144-1152.
- Hatfield, J.L. (1990). Measuring plant stress with an infrared thermometer. *Hort Science*, 25(12), 1535-1538.
- Irmak, S., Haman, D.Z., & Bastug, R. (2000). Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agronomy Journal*, 92(6), 1221-1227.

- Jantika, W., Ongprasert, S., Spreer, W., & Inthasan, J. (2013). The study on crop water stress by two infrared thermo-cameras in comparison with a porometer. *Journal of Agricultural Research and Extension*, 30(2), 19-26.
- Jones, H.G. (1999). Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and forest meteorology*, 95(3), 139-149.
- Jones, H.G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427-2436.
- Jones, H.G., Serraj, R., Loveys, B.R., Xiong, L., Wheaton, A., & Price, A. H. (2009). Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology*, 36(11), 978-989.
- Jones, H.G., Stoll, M., Santos, T., De Sousa, C., Chaves, M.M., & Grant, O.M. (2002). Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: Application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 53(378), 2249-2260.
- Kang, S., Gu, B., Du, T., & Zhang, J. (2003). Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. *Agricultural water management*, 59(3), 239-254.
- Lal, R., & Shukla, M.K. (2004). Principles of soil physics. *European Journal of Soil Science*, 56(5), 683-684.
- Li, L., Nielsen, D.C., Yu, Q., Ma, L., & Ahuja, L.R. (2010). Evaluating the crop water stress index and its correlation with latent heat and CO₂ fluxes over winter wheat and maize in the North China plain. *Agricultural Water Management*, 97(8), 1146-1155.
- Meola, C., & Carlomagno, G.M. (2004). Recent advances in the use of infrared thermography. *Measurement science and technology*, 15(9), R27.
- Mihailovic, B., Cvijanovic, D., Milojevic, I., & Filipovic, M. (2014). The role of irrigation in development of agriculture in srem district 1. *Ekonomika Poljoprivrede*, 61(4), 989.

- Naeeni, A.E., Esfahani, E.M., Harchegani, M.B., Jafarpour, M.E., & Golabadi, M.A. (2014). Leaf temperature as an index to determine the irrigation interval. *Research On Crop Ecophysiology*, 9(1), 2.
- Nielsen, D.C. (1990). Scheduling irrigations for soybeans with the crop water stress index (CWSI). *Field Crops Research*, 23(2), 103-116.
- Ni, Z., Liu, Z., Huo, H., Li, Z.L., Nerry, F., Wang, Q., & Li, X. (2015). Early water stress detection using leaf-level measurements of chlorophyll fluorescence and temperature data. *Remote Sensing*, 7(3), 3232-3249.
- Oerke, E.C., Steiner, U., Dehne, H.W., & Lindenthal, M. (2006). Thermal imaging of cucumber leaves affected by downy mildew and environmental conditions. *Journal of experimental botany*, 57(9), 2121-2132.
- O'shaughnessy, S.A., Evett, S.R., Colaizzi, P.D., & Howell, T.A. (2011). Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton. *Agricultural Water Management*, 98(10), 1523-1535.
- Paltineanu, C., Chitu, E., & Tanasescu, N. (2009). Correlation between the crop water stress index and soil moisture content for apple in a loamy soil: a case study in southern Romania. *International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops*, 889, 257-264.
- Pipatsitee, P., Eiumnoh, A., Praseartkul, P., Taota, K., Kongpugdee, S., Sakulleerungroj, K., & Cha-um, S. (2018). Application of infrared thermography to assess cassava physiology under water deficit condition. *Plant Production Science*, 21(4), 398-406.
- Romano, G., Zia, S., Spreer, W., Sanchez, C., Cairns, J., Araus, J.L., & Muller, J. (2011). Use of thermography for high throughput phenotyping of tropical maize adaptation in water stress. *Computers and Electronics in Agriculture*, 79(1), 67-74.
- Rud, R., Cohen, Y., Alchanatis, V., Levi, A., Brikman, R., Shenderoy, C., & Mulla, D. (2014). Crop water stress index derived from multi-year ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status. *Precision agriculture*, 15(3), 273-289.

- Sela, E., Cohen, Y., Alchanatis, V., Saranga, Y., Cohen, S., Moller, M., & Orolov, V. (2007). Use of thermal imaging for estimating and mapping crop water stress in cotton. In J. Stafford (Ed.), *Proceeding of 6th European conference on precision agriculture, Skiathos, Greece* (pp. 365-371). The Netherlands: Wageningen Academic.
- Silva, M.D.A., Jifon, J.L., Da Silva, J.A., & Sharma, V. (2007). Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(3), 193-201.
- Simsek, M., Tonkaz, T., Kaçira, M., Comlekcioglu, N., & Dogan, Z. (2005). The effects of different irrigation regimes on cucumber (*Cucumis sativus* L.) yield and yield characteristics under open field conditions. *Agricultural Water Management*, 73(3), 173-191.
- Smith, R.C.G., Barrs, H.D., Steiner, J.L., & Stapper, M. (1985). Relationship between wheat yield and foliage temperature: Theory and its application to infrared measurements. *Agricultural and forest meteorology*, 36(2), 129-143.
- Sophanodora, P. (1993). *Techniques on photosynthesis measurement of para grass (Brachiaria mutica)*. Thailand: Nakhon Pathom.
- Stajniko, D., Lakota, M., & Hocevar, M. (2004). Estimation of number and diameter of apple fruits in an orchard during the growing season by thermal imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 42(1), 31-42.
- Stoll, M., Schultz, H.R., & Berkelmann-Loehnertz, B. (2008). Exploring the sensitivity of thermal imaging for *Plasmopara viticola* pathogen detection in grapevines under different water status. *Functional Plant Biology*, 35(4), 281-288.
- Stoll, M., & Jones, H.G. (2007). Thermal imaging as a viable tool for monitoring plant stress. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 41(2), 77.
- Supacharoenkun, P. (2008). *Comparison of anatomical characters, physiological responses and latex biochemical components among the RRIM 600 clone and high latex production clones of rubber trees* (Doctoral dissertation). Thailand: Prince of Songkla University.

- Taghvaeian, S., Chavez, J.L., Bausch, W.C., DeJonge, K.C., & Trout, T.J. (2014). Minimizing instrumentation requirement for estimating crop water stress index and transpiration of maize. *Irrigation science*, 32(1), 53-65.
- Taghvaeian, S., Chavez, J.L., & Hansen, N.C. (2012). Infrared thermometry to estimate crop water stress index and water use of irrigated maize in Northeastern Colorado. *Remote Sensing*, 4(11), 3619-3637.
- Walker, G.K., & Hatfield, J.L. (1983). Stress Measurement Using Foliage Temperatures 1. *Agronomy Journal*, 75(4), 623-629.
- Wanjura, D.F., Hatfield, J.L., & Upchurch, D.R. (1990). Crop water stress index relationships with crop productivity. *Irrigation Science*, 11(2), 93-99.
- Wiriya-Alongkron, W., Pankasemsuk, T., Ongprasert, S., & Spreer, W. (2013). Monitoring of drought stress on split root Longan trees under different irrigations methods using thermal imaging. *Journal of Agricultural Research and Extension*, 30(1), 1-13.
- Xu, J., Lv, Y., Liu, X., Dalson, T., Yang, S., & Wu, J. (2016). Diagnosing crop water stress of rice using infrared thermal imager under water deficit condition. *Journal of Agricultural & Biology*, 18, 565-572.
- Yuan, G., Luo, Y., Sun, X., & Tang, D. (2004). Evaluation of a crop water stress index for detecting water stress in winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 64(1), 29-40.
- Zhang, Q., Li, Q., & Zhang, G. (2012). Rapid determination of leaf water content using VIS/NIR spectroscopy analysis with wavelength selection. *Journal of Spectroscopy*, 27(2), 93-105.
- Zia, S., Du, W., Spreer, W., Spohrer, K., He, X., & Muller, J. (2012). Assessing crop water stress of winter wheat by thermography under different irrigation regimes in North China Plain. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 5(3), 24-34.