



กลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาและปริมาณสารที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพของต้นหนุมานประสาณ
กาย (*Heptapleurum leucanthum* (R.Vig.) Y.F.Deng) ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง

MECHANISMS OF PHYSIOLOGICAL RESPONSES AND BIOACTIVE
COMPOUND CONTENT OF *Heptapleurum leucanthum* (R.Vig.)
Y.F.Deng UNDER DROUGHT STRESS

วิภาณต์ สุริยะ

กลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาและปริมาณสารที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพของต้นหนุมานประสาน
กาย (*Heptapleurum leucanthum* (R.Vig.) Y.F.Deng) ภายใต้ความเครียดจากความแห้ง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยา

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

MECHANISMS OF PHYSIOLOGICAL RESPONSES AND BIOACTIVE
COMPOUND CONTENT OF *Heptapleurum leucanthum* (R.Vig.)
Y.F.Deng UNDER DROUGHT STRESS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF SCIENCE
(Biology)

Faculty of Science, Srinakharinwirot University

2024

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

กลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาและปริมาณสารที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพของต้นหนุมานประสาน

กาย (*Heptapleurum leucanthum* (R.Vig.) Y.F.Deng) ภายใต้ความเครียดจากความแห้ง

ของ

รวิกันต์ สุริยะ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยา

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชมาภรณ์ แสงงาม)

ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.วาสนี พงษ์ประยูร)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อัจฉริยา รังษิรุจิ)

ชื่อเรื่อง	กลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาและปริมาณสารที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพของต้น หนุมานประสานกาย (<i>Heptapleurum leucanthum</i> (R.Vig.) Y.F.Deng) ภายใต้ ความเครียดจากความแล้ง
ผู้วิจัย	รวิกันต์ สุริยะ
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2567
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชุมาภรณ์ แสงงาม

หนุมานประสานกาย *Heptapleurum leucanthum* (R.Vig.) Y.F. Deng เป็นพืชสมุนไพรที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ ซึ่งความเครียดจากความแล้งส่งผลต่อคุณภาพของพืชสมุนไพร งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาของต้นหนุมานประสานกายต่อความเครียดจากความแล้ง และปริมาณสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน โดยปลูกต้นพืชในสภาวะละลายธาตุอาหารพืชสูตร Hoagland ที่มีความเข้มข้นของ polyethylene glycol 6000 (PEG6000) แตกต่างกันได้แก่ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% (w/v) PEG6000 พบว่า ต้นหนุมานประสานกายมีความสามารถในการทนต่อความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 โดยพืชมีปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบลดลง พืชมีการปิดปากใบ ทำให้มีค่าการนำไหลของปากใบ อัตราการคายน้ำ และประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง ส่งผลให้การเจริญเติบโตทางลำต้นลดลง นอกจากนี้ ความเครียดจากความแล้งยังทำให้พืชได้รับความเครียดออกซิเดชัน โดยมีการสะสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.27 เท่า เมื่อเทียบกับต้นพืชในชุดควบคุม ทำให้ปริมาณมาลอนไดไฮดริสและารั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์รวมและแคโรทีนอยด์ในคลอโรพลาสต์ลดลง ในขณะที่พืชมีการสะสมโปรตีนและกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ catalase (CAT) และเอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 17.28, 2.20 และ 5.66 เท่า เมื่อเทียบกับต้นพืชในชุดควบคุม ตามลำดับ และความหนาแน่นของปากใบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.56 เท่า เมื่อเทียบกับต้นพืชในชุดควบคุม เพื่อรักษาประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนก๊าซ นอกจากนี้ ความเครียดจากความแล้งทำให้เกิดการสังเคราะห์สารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงวันที่ 6 ถึง 9 ของการทดลอง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายมีกลไกในการปรับตัวทางสรีรวิทยาต่อความเครียดจากความแล้งโดยการสะสมปริมาณโพรวิน การทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ความหนาแน่นของปากใบ และการสังเคราะห์สารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนินในปริมาณเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : สมุนไพร, ความเครียดจากความแล้ง, คลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์, ลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน, เอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ

Title	MECHANISMS OF PHYSIOLOGICAL RESPONSES AND BIOACTIVE COMPOUND CONTENT OF <i>Heptapleurum leucanthum</i> (R.Vig.) Y.F.Deng UNDER DROUGHT STRESS
Author	RAWIKARN SURIYA
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2024
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Sukhumaporn Saeng-Ngam

Heptapleurum leucanthum (R.Vig.) Y.F. Deng, commonly known as *Hanuman Prasankai*, is an economically valuable medicinal plant. Drought stress can affect the quality of medicinal plants. This study aimed to investigate the physiological response mechanisms of *H. leucanthum* under drought stress and to examine its triterpenoid saponin content. Plants were cultivated in Hoagland's nutrient solution supplemented with different concentrations of polyethylene glycol 6000 (PEG6000) at 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% (w/v). The results revealed that *H. leucanthum* exhibited drought tolerance at 20% (w/v) PEG6000. The plants exhibited reduced relative water content in the leaves, and stomatal closure occurred, leading to decreased stomatal conductance, transpiration rate, and photosynthetic efficiency, which ultimately resulted in reduced stem growth. In addition, drought stress induced oxidative stress in the plants, as evidenced by a significant increase in hydrogen peroxide accumulation, which was 1.27 times higher than in the control plants ($p<0.05$). This led to an increase in malondialdehyde content and electrolyte leakage, resulting in reduced total chlorophyll and carotenoid contents in the chloroplasts. Meanwhile, the plants showed significantly increased proline accumulation and enhanced activities of catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX), which were 17.28, 2.20, and 5.66 times higher, respectively, compared to the control plants ($p<0.05$). Additionally, stomatal density increased significantly by 1.56 times ($p<0.05$), helping to maintain gas exchange efficiency. Furthermore, drought stress induced an increasing trend in triterpenoid saponin synthesis between days 6 and 9 of the experiment. The results indicate that *H. leucanthum* exhibits physiological adaptation mechanisms to drought stress by enhancing proline accumulation, antioxidant enzyme activities, stomatal density, and triterpenoid saponin synthesis.

Keyword : Herb, Drought stress, Chlorophyll fluorescence, Lipid peroxidation, Antioxidant enzymes

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร. สุชมาภรณ์ แสงงาม อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ และช่วยจัดหาเครื่องมือวัดทาง สรีรวิทยาไปใช้ในการวิจัย รวมทั้งแนวทางการแก้ไขปัญหิต่าง ๆ ตลอดจนคำปรึกษาเกี่ยวกับการ วางแผนและใช้ชีวิตในการเรียนปริญญาโท อีกทั้งยังช่วยแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องเพื่อ ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบเค้าโครงปริญญานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการ แก้ไขเล่ม ตลอดจนกำลังใจ และแนวทางในการเริ่มต้นทำการทดลอง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วาสนี พงษ์ประยูร ประธานคณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ และ รศ.ดร.อัจฉริยา รัชชัญญิ กรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบความ ถูกต้องและให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ มอบโอกาส และประสบการณ์ในการทำวิจัยที่ดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ และฝ่ายบริหารภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือทั้งสถานที่การทำวิจัย อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือตรวจวัดวิเคราะห์ต่าง ๆ ที่มีความพร้อม และกำลังใจที่มอบให้ตลอดระยะเวลาที่ ดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณการสนับสนุน และกำลังใจจากทุกท่านในครอบครัวและคนรักที่มอบให้ ตลอดการเรียนและการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ให้มีกำลังใจฟันฝ่าอุปสรรคที่เกิดขึ้น

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการสรีรวิทยาพีช สำหรับ ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาที่เอื้อต่อการทำปริญญานิพนธ์ให้ผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

รวิگانต์ สุริยะะ

สารบัญ

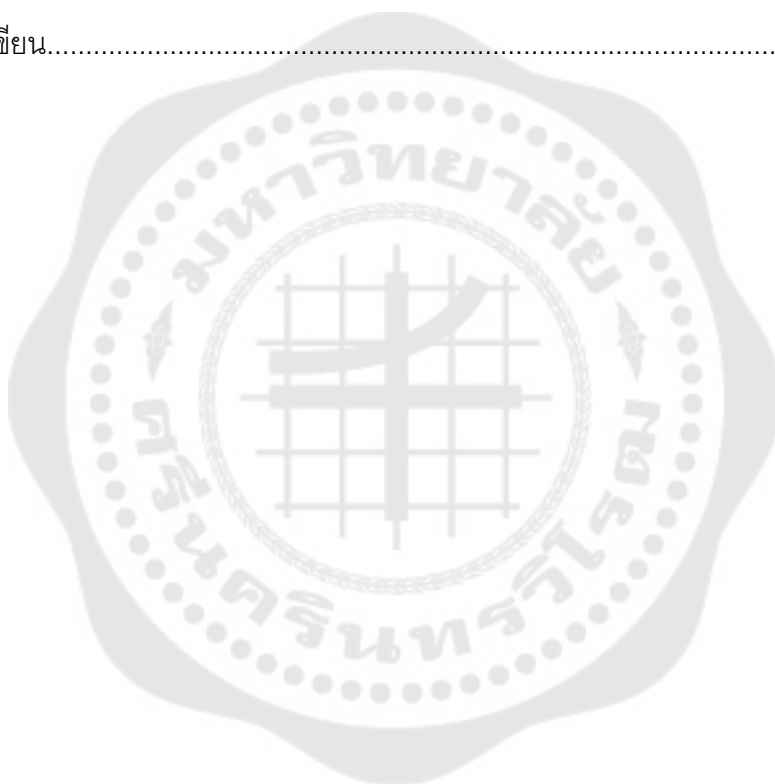
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	4
ความสำคัญของการวิจัย	4
ขอบเขตของการวิจัย	4
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	5
กรอบแนวคิดในงานวิจัย.....	7
สมมติฐานในการวิจัย.....	8
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	8
สถานที่ทำการวิจัย	8
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
1. หนุมานประสานกาย	9
1.1 ข้อมูลทางพฤกษศาสตร์ของหนุมานประสานกาย	9
1.2 การปลูกและดูแลต้นหนุมานประสานกาย	10
1.3 สารพฤกษเคมีที่สำคัญในหนุมานประสานกาย	12

2. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับพืช	14
2.1 ความสำคัญของน้ำที่มีต่อพืช	14
2.2 ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำในพืช	16
3. ความแล้ง	17
3.1 ภัยแล้งในประเทศไทย	17
3.2 สภาวะแล้ง	17
3.3 การจำลองสภาวะแล้งโดยการปลูกแบบไฮโดรโปนิกส์	18
4. สรีรวิทยาและการปรับตัวของพืชในสภาพเครียดจากความแล้ง	19
4.1 การตอบสนองทางสรีรวิทยาต่อความเครียดจากความแล้ง	19
4.2 ความต้านทานต่อความเครียดจากความแล้ง	34
5. ปริมาณของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในพืชภายใต้ความเครียดจากความแล้ง	35
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	38
วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี	40
วิธีการดำเนินการวิจัย.....	46
การเตรียมต้นหนุ่มาตรฐานปรสณกย	46
การทดลองที่ 1 การหาระดับความเข้มข้นของสาร PEG6000 ที่เหมาะสมในการจำลอง สภาวะแล้ง เพื่อประเมินความทนทานต่อความเครียดจากความแล้งที่ต้นหนุ่มาตรฐาน ปรสณกยสามารถเจริญเติบโตต่อไปได้	46
การทดลองที่ 2 การหาระดับความเข้มข้นของ PEG6000 ที่ต้นหนุ่มาตรฐานปรสณกยสามารถ ทนต่อความเครียดจากความแล้ง	47
การทดลองที่ 3 การศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งของต้นหนุ่มาตรฐานปรสณกยต่อ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการ และปริมาณสารออกฤทธิ์ทาง ชีวภาพที่สำคัญ	50
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	60

การทดลองที่ 1 การหาระดับความเข้มข้นของสาร PEG6000 ที่เหมาะสมในการจำลองสภาวะ แล้ง เพื่อประเมินความทนทานต่อความเครียดจากความแล้งที่ต้นหนุมานประสาน กายสามารถเจริญเติบโตต่อได้.....	60
1.1 ประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง	60
1.2 Performance index (Pi).....	62
1.3 ค่าดัชนีความเขียวของใบ (SPAD value)	64
การทดลองที่ 2 การหาระดับความเข้มข้นของ PEG6000 ที่ต้นหนุมานประสานกายสามารถทน ต่อความเครียดจากความแล้ง.....	69
2.1 ประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง	69
2.2 Performance index (Pi).....	69
2.3 Absorption flux per active reaction center of PSII (ABS/RC).....	70
2.4 Dissipated energy flux per active reaction center of PSII (Dio/RC)	71
2.5 Trapped energy flux per active reaction center (TRo/RC).....	72
2.6 Electron transport flux per active reaction center (ETo/RC)	73
2.7 Probability that a PSII trapped electron is transferred from Q_A to Q_B (1-Vj)	74
2.8 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ	74
2.9 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี.....	75
2.10 ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม	76
2.11 ปริมาณแคโรทีนอยด์	77
2.12 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ	78
การทดลองที่ 3 ผลของความเครียดจากความแล้งของต้นหนุมานประสานกายต่อลักษณะการ เปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการ และปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ.....	82
3.1 ความสูงของลำต้น.....	82
3.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น.....	82

3.3 พื้นที่ใบ.....	83
3.4 ประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง	84
3.5 Performance index (Pi).....	84
3.6 Absorption flux per active reaction center of PSII (ABS/RC).....	85
3.7 Dissipated energy flux per active reaction center of PSII (Dio/RC)	86
3.8 Trapped energy flux per active reaction center (TRo/RC)	86
3.9 Electron transport flux per active reaction center (ETo/RC)	87
3.10 Probability that a PSII trapped electron is transferred from Q_A to Q_B ($1-V_j$) ..	88
3.11 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ.....	88
3.12 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี.....	89
3.13 ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม	90
3.14 ปริมาณแคโรทีนอยด์	90
3.15 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ	91
3.16 อัตราการคายน้ำ	92
3.17 ค่าการนำไหลของปากใบ.....	92
3.18 ดัชนีของปากใบ	93
3.19 ความหนาแน่นของปากใบ	94
3.20 ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำ.....	96
3.21 ปริมาณโพสสิน.....	97
3.22 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	98
3.23 ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์.....	98
3.24 การรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์	99
3.25 เอนไซม์ superoxide dismutase (SOD)	100

3.26 เอนไซม์ catalase (CAT)	100
3.27 เอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX)	101
3.28 ปริมาณไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน.....	102
บทที่ 5 อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	106
บรรณานุกรม	130
ภาคผนวก.....	151
ประวัติผู้เขียน.....	158



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ตัวอย่างคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์พารามิเตอร์	25
ตาราง 2 ลักษณะการทำ gradient ของตัวชี้ที่ใช้ใน LC ในการตรวจสอบปริมาณไตรโทเฟนอยด์ ซาโปนิน	59



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์หนุ่มนานประสานกาย แสดงการจัดเรียงของใบ (a) ดอก (b) ผล (c)	10
ภาพประกอบ 2 อาการของโรคราสนิมในต้นหนุ่มนานประสานกาย (a-c) และ ลักษณะของสปอร์รา <i>Nyssopsora thwaitesii</i> บนผิวใบ (d-e)	12
ภาพประกอบ 3 ภาคตัดขวางของใบหนุ่มนานประสานกาย แสดงให้เห็นคลอโรพลาสต์ในเซลล์ใบปกติ ไม่ติดโรค (a) และ ใบที่ผิดปกติ ติดโรค (b)	12
ภาพประกอบ 4 กลไกการกำจัด $O_2^{\cdot -}$ ของเอนไซม์ superoxide dismutase (SOD)	32
ภาพประกอบ 5 กลไกการกำจัด H_2O_2 ของเอนไซม์ catalase (CAT)	32
ภาพประกอบ 6 กลไกการกำจัด H_2O_2 ของเอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX)	33
ภาพประกอบ 7 โครงสร้างทางเคมีของไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน	37
ภาพประกอบ 8 ประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (Chlorophyll fluorescence, Fv/Fm) ของต้นหนุ่มนานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น PEG6000 แตกต่างกัน ($n = 4$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ * แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นหนุ่มนานประสานกายตาย	62
ภาพประกอบ 9 ค่า Performance index (Pi) ของต้นหนุ่มนานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น PEG6000 แตกต่างกัน ($n = 4$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ * แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นหนุ่มนานประสานกายตาย	64
ภาพประกอบ 10 ค่าความเขียวของใบ (SPAD value) ของต้นหนุ่มนานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น PEG6000 แตกต่างกัน ($n = 4$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความ	

แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ * แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้
เนื่องจากต้นหนุมานประสานกายตาย..... 66

ภาพประกอบ 11 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจาก
ความแล้งที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% (w/v) PEG6000 โดย
เปรียบเทียบกับชุดควบคุม หลังจากต้นหนุมานประสานกายได้รับความเครียดจากความแล้งเป็น
เวลา 0 วัน (a) ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งเป็นเวลา 6 วัน (b) ต้น
หนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งเป็นเวลา 15 วัน (c) และต้นหนุมาน
ประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งเป็นเวลา 21 วัน (d)..... 68

ภาพประกอบ 12 ประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (Chlorophyll fluorescence, Fv/Fm) ของ
ต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40%
(w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษ
ตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) 69

ภาพประกอบ 13 ค่า Performance index (Pi) ของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียด
จากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาด
เคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความ
แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) 70

ภาพประกอบ 14 ค่า Absorption flux per active reaction center of PSII (ABS/RC) ของต้นหนุมาน
ประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v)
PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์
เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) 71

ภาพประกอบ 15 ค่า Dissipated energy flux per active reaction center of PSII (Dl_o/RC) ของต้น
หนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40%
(w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษ
ตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) 72

ภาพประกอบ 16 ค่า Trapped energy flux per active reaction center (TR_o/RC) ของต้นหนุมาน
ประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v)
PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์
เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) 73

ภาพประกอบ 17 ค่า Electron transport flux per active reaction center (ETo/RC) ของต้นหนุมาน ประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)	74
ภาพประกอบ 18 ค่า Probability that a PSII trapped electron is transferred from Q _A to Q _B (1-V _j) ของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษร ภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)	74
ภาพประกอบ 19 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจาก ความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05).....	75
ภาพประกอบ 20 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจาก ความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05).....	76
ภาพประกอบ 21 ปริมาณคลอโรฟิลล์รวมของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจาก ความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05).....	77
ภาพประกอบ 22 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจาก ความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05).....	78
ภาพประกอบ 23 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจาก ความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน	

(SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) 79

ภาพประกอบ 24 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมหลังได้รับสภาวะแล้งเป็นเวลา 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 วัน..... 81

ภาพประกอบ 25 ความสูงของลำต้นของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 82

ภาพประกอบ 26 เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 83

ภาพประกอบ 27 พื้นที่ใบของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 83

ภาพประกอบ 28 ประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (Chlorophyll fluorescence, Fv/Fm) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 84

ภาพประกอบ 29 ค่า Performance index (Pi) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test 85

ภาพประกอบ 30 ค่า Absorption flux per active reaction center of PSII (ABS/RC) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000

(n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 86

ภาพประกอบ 31 ค่า Dissipated energy flux per active reaction center of PSII (Dlo/RC) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v)

PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 86

ภาพประกอบ 32 ค่า Trapped energy flux per active reaction center (TRo/RC) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 87

ภาพประกอบ 33 ค่า Electron transport flux per active reaction center (ETo/RC) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) โดยเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 87

ภาพประกอบ 34 ค่า Probability that a PSII trapped electron is transferred from Q_A to Q_B (1-V_j) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test 88

ภาพประกอบ 35 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test 89

ภาพประกอบ 36 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test 89

ภาพประกอบ 37 ปริมาณคลอโรฟิลล์รวมของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE;

standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test	90
ภาพประกอบ 38 ปริมาณแคลอรีที่น้อยของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความ แล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อ เปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test	91
ภาพประกอบ 39 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจาก ความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อ เปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test	91
ภาพประกอบ 40 อัตราการคายน้ำของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test	92
ภาพประกอบ 41 ค่าการนำไหลของปากใบของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจาก ความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อ เปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test	93
ภาพประกอบ 42 ค่าดัชนีของปากใบของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test	93
ภาพประกอบ 43 ความหนาแน่นของปากใบของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจาก ความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อ เปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test	94

ภาพประกอบ 44 ความหนาแน่นและลักษณะของปากใบของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับ ความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 เมื่อเปรียบเทียบกับชุด ควบคุม หลังได้รับสภาวะแห้งเป็นเวลา 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 วัน ที่กำลังขยาย 100 เท่า (scale bar = 200 μ m).....	96
ภาพประกอบ 45 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับจากความเครียด จากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 (n = 5) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อ เปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test	97
ภาพประกอบ 46 ปริมาณโปรตีนของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับจากความเครียดจากความแห้งที่ ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 (n = 5) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test.....	97
ภาพประกอบ 47 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับจากความเครียด จากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 (n = 5) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อ เปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test	98
ภาพประกอบ 48 ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับจากความเครียดจาก ความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 (n = 5) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบ ด้วยวิธี Student's t-test	99
ภาพประกอบ 49 การร่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับจากความเครียด จากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 (n = 5) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อ เปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test	99
ภาพประกอบ 50 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) ของต้นหนุมาน ประสานกายที่ได้รับจากความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 (n = 5) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test.....	100

ภาพประกอบ 51 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ catalase (CAT) ของต้นหนุมานประสานกายที่ ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาด เคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test	101
ภาพประกอบ 52 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX) ของต้นหนุมาน ประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 (n = 5) ± ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบด้วย Student's t-test.....	102
ภาพประกอบ 53 พื้นที่ใต้กราฟของสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 1 (616.2859 m/z, Rt 9.77 min) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ในวันที่ 0, 3, 6, 9 และ 12 ของการทดลอง และ N/A หมายถึง ไม่มีข้อมูล	104
ภาพประกอบ 54 พื้นที่ใต้กราฟของสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 2 และ 3 (580.2737 m/z, Rt 9.77 min) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ในวันที่ 0, 3, 6, 9 และ 12 ของการทดลอง และ N/A หมายถึง ไม่มีข้อมูล	104
ภาพประกอบ 55 พื้นที่ใต้กราฟของสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 4 (939.4875 m/z, Rt 15.89 min) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ในวันที่ 0, 3, 6, 9 และ 12 ของการทดลอง	104
ภาพประกอบ 56 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจาก ความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ในวันที่ 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 ของการทดลอง ตามลำดับ	105
ภาพประกอบ 57 กลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับ ความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000.....	128
ภาพประกอบ 58 กราฟมาตรฐานของสารละลายกลูโคส	156
ภาพประกอบ 59 กราฟมาตรฐานของสารละลายโพรลิน	156
ภาพประกอบ 60 กราฟมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H ₂ O ₂)	156

ภาพประกอบ 61 สภาพอากาศในระหว่างการเก็บผลการทดลองตอนที่ 1 ข้อมูลที่ได้มาจากกรมอุตุนิยมวิทยา รหัสสถานี 455201.....	157
ภาพประกอบ 62 สภาพอากาศในระหว่างการเก็บผลการทดลองตอนที่ 2 ข้อมูลที่ได้มาจากกรมอุตุนิยมวิทยา รหัสสถานี 455201.....	157
ภาพประกอบ 63 สภาพอากาศในระหว่างการเก็บผลการทดลองตอนที่ 3 ข้อมูลที่ได้มาจากกรมอุตุนิยมวิทยา รหัสสถานี 455201	157



บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

หนุมานประสานกาย (*Heptapleurum leucanthum* (R.Vig.) Y.F.Deng) เป็นพืชสมุนไพรในวงศ์ Araliaceae ที่มีสรรพคุณในการรักษาบาดแผลและโรคหอบหืด พบได้ในป่าดิบเขาหรือพื้นที่สูงของประเทศไทย เช่น ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ลักษณะเด่นของต้นหนุมานประสานกายคือ ใบประกอบแบบนิ้วมือที่มีใบย่อยประมาณ 7-8 ใบ ใบมีสีเขียวเข้ม ขอบใบหยักเล็กน้อย และเรียงเป็นวงกลมรอบกึ่ง สามารถปลูกเลี้ยงได้ง่าย ไม่ต้องการการดูแลมากนัก สรรพคุณทางยาของใบหนุมานประสานกายได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะช่วยบรรเทาอาการทางระบบทางเดินหายใจและเสริมภูมิคุ้มกันในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (Covid-19) ที่ทั่วโลกต่างประสบกับปัญหาวิกฤตสุขภาพ ซึ่งสารสกัดจากหนุมานประสานกายมีบทบาทในการช่วยบรรเทาอาการในผู้ที่มีอาการเบื้องต้นได้ในระดับหนึ่ง (สารรังสีออนไลน์, 2563) นอกจากนี้ สารสกัดจากใบหนุมานประสานกายพบว่าสารส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารกลุ่มไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน (triterpenoid saponin) กรดโอลีอานอลิก (oleanolic acid) และกรดเบทูลินิก (betulinic acid) (Pancharoen, Tuntiwachwuttikul, Taylor, & Picker, 1994; Taesotikul, Panthong, & Kanjanapothi, 1980) ซึ่งมีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาหลายด้าน เช่น รักษาโรคหอบหืดเรื้อรัง ขยายหลอดลม (Panthong, Kanjanapothi, & Taylor, 1986a) มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย (Potduang et al., 2007) ลดระดับน้ำตาลในเลือด (Satayavivad, Bunyapraphatsara, Thantawanat, & Kositchaiwat, 1996) ลดการอักเสบ ช่วยสมานบาดแผลในสุนัขได้ (Pongchairerk, Chungsamarnyart, Chantakru, Pongket, & Saengprapaitip, 2009) และใช้เป็นสารช่วยไล่แมลง (Sinchaisri, Roongsook, & Areekul, 1988) เป็นต้น ในประเทศจีนได้มีการพัฒนาสารสกัดจากใบหนุมานประสานกายมาใช้เป็นยารักษาโรค และมีการขึ้นทะเบียนยาที่ได้รับการรับรอง เช่น ยา “Han Tao Ye Tablet” ถูกนำมาใช้ในการรักษาโรคเส้นประสาทใบหน้าอักเสบ (trigeminal neuralgia) อาการปวดสะโพกร้าวลงขา (sciatica) และโรคปวดข้อรูมาติก (rheumatic arthralgia) (Chinese Pharmacopoeia Commission, 2015) สำหรับในประเทศไทยได้มีการคิดค้นตำรับยาสมุนไพรในรูปแบบของยาเม็ดและยาแคปซูล ใช้รักษาอาการไอ อาการหวัด ภูมิแพ้ทางเดินหายใจ และโรคหอบหืด (Witthawaskul, Panthong, Kanjanapothi, Taesothikul, & Lertprasertsuke, 2003) และมีการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เช่น ชาชง ขี้ผึ้ง

หนุ่มนประสณกย และน้มนหนุ่มนประสณกย เป็นต้น จึงทำให้ปัจจุบันหนุ่มนประสณกยเป็นที่ยต้องการของตลาด และมีการปลูกในเชิงการค้าเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม คุณภาพของพืชสมุนไพรมีขึ้นอยู่กัหลายปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและปริมาณสารออกฤทธิ์ในพืช เช่น ชนิดของพืช เทคนิคการเพาะปลูก ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมทั้งอุณหภูมิ ความเข้มของแสง ธาตุอาหาร และความแล้ง รวมถึงระยะเวลาและช่วงเวลาการเก็บเกี่ยว และกระบวนการหลังเก็บเกี่ยว (Kleinwächter & Selmar, 2014; Mandoulakani, Eyvazpour, & Ghadimzadeh, 2017) การให้น้ในปริมาณที่เหมาะสมช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตและการสังเคราะห์สารสำคัญ ในขณะที่ความเครียดจากความแล้งอาจทำให้พืชสร้างสารทุติยภูมิบางชนิดเพิ่มขึ้นเพื่อกจัดการความเครียดนั้น ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้้อย่างเหมาะสมจะช่วยเพิ่มคุณภาพของสมุนไพรม ทำให้มีสรรพคุณทางยาสูงและมีประสิทธิภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านสุขภาพ จากรายงานผลการศึกษาศึกษาพืชสมุนไพรมหลายชนิด ที่มีการสร้างและสะสมสารทุติยภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อพืชได้รับความเครียดจากความแล้ง แต่การที่พืชได้รับความเครียดในระหว่างการเพาะปลูกเป็นเวลานาน ส่งผลให้พืชมีการเติบโตที่ช้าลง ทำให้มวลชีวภาพของพืชลดลงไปด้วย จึงใช้แนวทางในการจัดการปลูกพืชในระบบการปลูกเลี้ยงให้ได้รับความเครียดจากความแล้งในระยะเวลาสั้น ๆ เพื่อกกระตุ้นให้พืชเกิดกระบวนการตอบสนองทางสรีรวิทยา เพื่อกการเพิ่มปริมาณของสารทุติยภูมิในพืช และการนำมาใช้ประโยชน์ต่อไป (Selmar & Kleinwächter, 2013)

ในปัจจุบันพื้นที่ทำการเกษตรในประเทศไทยยังคงประสบกับปัญหากภัยแล้งในแทบทุกภูมิภาค โดยภัยแล้งที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากการที่ฝนแล้ง หรือฝนทิ้งช่วง ทำให้เกิดการขาดแคลนน้ในพื้นที่ยใดพื้นที่หนึ่งเป็นเวลานาน (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2565) พืชได้รับน้ในปริมาณที่ไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต ทำให้พืชต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมในบางช่วงอายุของการเจริญเติบโตหรือบางฤดูกาล จึงทำให้พืชได้รับความเครียดจากความแล้งในช่วงระยะเวลาดังกล่าว ซึ่งความแล้งส่งผลกระทบบให้ผลผลิตพืชลดลง เนื่องจากสภาพแวดล้อมโดยรอบรามีค่าศักย์ของน้ (water potential) ที่ต่ำมาก พืชไม่สามารถดึงน้ขึ้นจากช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดินมาใช้ในการเจริญเติบโตได้อย่างเพียงพอ ส่งผลให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง (Nguyen, Babu, & Blum, 1997) ดังนั้น พืชจึงมีกลไกในการปรับตัวทางสัณฐานวิทยา สรีรวิทยา และชีวเคมี เพื่อกลดการสูญเสียน้ให้ได้มากที่สุด และป้องกันอันตรายจากความเสียหายระดับเซลล์ เพื่อกให้สามารถอยู่รอดได้ภายใต้สภาวะแล้ง (Ansari et al., 2019; Gill & Tuteja, 2010) การศึกษากการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืชสมุนไพรมต่อความเครียดจากความแล้ง จึงมีประโยชน์ในการพัฒนาพืชสมุนไพรมให้มีความทนทานต่อสภาวะแล้ง ซึ่งจะช่วยเพิ่มผลผลิตและลดการสูญเสียน้ในช่วงที่มีการ

เพาะปลูกในช่วงฤดูที่มีปริมาณน้ำไม่เพียงพอ และเพื่อเป็นการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งต่อการสังเคราะห์สารพิษพิษเคมีที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญในพืชสมุนไพร ซึ่งจะช่วยให้ทราบแนวทางในการจัดการระบบการเพาะปลูกสมุนไพร โดยใช้กลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืชภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้ง ในการชักนำให้พืชมีการสะสมสารพิษพิษเคมีในปริมาณสูงขึ้น นอกจากนี้ ความเข้าใจในกลไกการใช้น้ำของพืชในช่วงที่พืชได้รับปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต ทำให้สามารถเลือกใช้วิธีการจัดการน้ำที่มีประสิทธิภาพ ลดการใช้น้ำ และส่งเสริมการเพาะปลูกอย่างยั่งยืนในพื้นที่แห้งแล้ง การจำลองสภาวะแล้งให้กับพืชสามารถทำได้หลายวิธี ส่วนใหญ่นิยมใช้สาร polyethylene glycol (PEG6000) ซึ่งเป็นสารลด osmotic potential เนื่องจากสาร PEG6000 เมื่อละลายน้ำแล้วไม่มีความเป็นพิษกับพืช ทำหน้าที่ขัดขวางการดูดซึมน้ำของรากพืช ชักนำให้พืชเกิดความเครียด และเกิดกระบวนการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืชเมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง (Osmolovskaya et al., 2018)

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาระดับความสามารถในการทนต่อความแล้ง กลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาต่อความเครียดจากความแล้ง และผลของการได้รับความเครียดจากความแล้งต่อการสะสมปริมาณสารที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพในใบของหนุมานประสานกาย โดยปลูกต้นหนุมานประสานกายในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่มีสาร PEG6000 เพื่อจำลองสภาวะแล้งให้กับต้นพืช ทำการประเมินประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงจากค่าคลอโรฟิลล์ ฟลูออเรสเซนซ์ ปริมาณรงควัตถุที่สำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ศึกษาการเติบโตของต้นหนุมานประสานกาย โดยวัดความสูงของลำต้น เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น และพื้นที่ใบ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา ได้แก่ ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ อัตราการคายน้ำ ค่าการนำไหลของปากใบ (stomatal conductance) ค่าดัชนีของปากใบ (stomatal index) ค่าความหนาแน่นของปากใบ (stomatal density) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำ และปริมาณโปรตีน ประเมินความเสียหายของเซลล์ที่เกิดจากการสะสมอนุมูลอิสระ โดยวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ และการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ วัดกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ เอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) เอนไซม์ catalase (CAT) และเอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX) และวิเคราะห์ปริมาณสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ในใบของหนุมานประสานกายด้วยเทคนิค liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS) เนื่องจากยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับกลไกการตอบสนองต่อความเครียดจากความแล้งของต้นหนุมานประสานกายมาก่อนหน้านี้ ซึ่งประโยชน์ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้จะทำให้ทราบองค์ความรู้ของกระบวนการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง และยังเป็นแนวทาง

ในการพัฒนากระบวนการปลูกพืชสมุนไพรให้มีความสามารถในการทนต่อความเครียดจากความแล้ง และเพิ่มคุณภาพของพืชสมุนไพรในการจัดการระบบการเพาะปลูกให้กับเกษตรกรและผู้ประกอบการในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารและยาหรือเวชสำอางในอนาคต

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อทราบระดับความแล้งสูงสุดที่ต้นหนุมานประสานกายสามารถทนต่อความเครียดจากความแล้งได้
2. เพื่อศึกษากลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาบางประการของต้นหนุมานประสานกายในการต้านทานต่อความเครียดจากความแล้ง
3. เพื่อศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งต่อปริมาณสารไตรเทอพีนอยด์ซาโปนินในใบของหนุมานประสานกาย

ความสำคัญของการวิจัย

หนุมานประสานกายเป็นพืชสมุนไพรที่มีการปลูกทั้งในเชิงการค้า ประดับตกแต่งสวน และใช้เป็นยารักษาโรค เนื่องจากมีรายงานเกี่ยวกับสรรพคุณและสารออกฤทธิ์ทางยาที่สำคัญจำนวนมาก แต่ยังไม่มียางานเกี่ยวกับระดับความสามารถในการทนต่อความเครียดจากความแล้งสูงสุดที่ต้นหนุมานประสานกายยังคงสามารถเติบโตได้ กลไกทางสรีรวิทยาที่ต้นหนุมานประสานกายใช้ในการตอบสนองเมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง รวมถึงปริมาณของสารไตรเทอพีนอยด์ซาโปนินที่เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญเพื่อนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะทำให้ทราบถึงระดับความสามารถในการทนแล้ง และกลไกทางสรีรวิทยาของต้นหนุมานประสานกายที่ตอบสนองต่อความเครียดจากความแล้ง อีกทั้งเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการเพาะปลูกต้นหนุมานประสานกาย เพื่อเพิ่มคุณภาพและปริมาณสารพฤษเคมีที่สำคัญเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งการจัดการระบบการให้น้ำที่เหมาะสมจะช่วยลดต้นทุนในการเพาะปลูกและตรงตามความต้องการของตลาดในอนาคต นอกจากนี้ยังเป็นการเตรียมความพร้อมในการรับมือกับปัญหาภัยแล้งที่ทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นในอนาคต

ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษากลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาบางประการ และปริมาณสารไตรเทอพีนอยด์ซาโปนิน ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง ระยะเวลาที่ใช้ในการ

ดำเนินงานวิจัย เริ่มตั้งแต่เดือนกันยายน 2565 ถึงเดือนพฤศจิกายน 2567 ได้กำหนดขอบเขตการวิจัยดังต่อไปนี้

1. การเตรียมต้นพืชที่ใช้ในการทดลอง ใช้ต้นหนุมานประสานกายจากเกษตรกรที่ทำการเพาะปลูกและจำหน่ายพืชสมุนไพร โดยต้นพืชที่ใช้ในการวิจัยมาจากการปักชำกิ่งจากต้นแม่พันธุ์เดียวกัน มีอายุเท่ากัน และมีขนาดของต้นใกล้เคียงกัน จำนวน 147 ต้น ทำการปลูกและบำรุงรักษาต้นหนุมานประสานกายในดินผสมสัดส่วน ดิน : ปุ๋ยคอก : กาบมะพร้าวสับ เท่ากับ 1 : 1 : 1 ตั้งแต่เริ่มปักชำไปจนถึงระยะที่เก็บเกี่ยวผลผลิตได้ (ประมาณอายุ 6 เดือน) ก่อนนำมาใช้ในการทดลอง
2. การประเมินหาระดับความเข้มข้นของ PEG6000 ที่แตกต่างกัน เพื่อประเมินความทนทานต่อความเครียดจากความแล้งที่ต้นหนุมานประสานกายยังคงสามารถเจริญเติบโตต่อไปได้
3. การศึกษาผลของความเข้มข้น PEG6000 ที่ชักนำให้เกิดความเครียดจากความแล้งในระดับปานกลาง และระดับรุนแรงต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงและปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง
4. การศึกษาการเติบโตทางลำต้น ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง และกลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาบางประการของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งในระดับที่สามารถเจริญเติบโตต่อไปได้
5. การศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งต่อการสะสมปริมาณไตรเทอพินอยด์ซาโปนินในใบหนุมานประสานกาย

นิยามศัพท์เฉพาะ

ความเครียดจากความแล้ง (drought stress) หมายถึง สภาวะหนึ่งที่พืชได้รับปริมาณน้ำที่น้อยเกินไปเป็นระยะเวลาานาน ไม่เพียงพอที่พืชจะนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ส่งผลให้พืชเกิดการตอบสนองต่อการขาดน้ำ และเกิดการสะสมอนุมูลอิสระในพืชเพิ่มมากขึ้น นำไปสู่การเกิดความเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) ที่ทำให้พืชเกิดความเสียหายและตายได้

การต้านทานต่อความเครียด (stress resistance) หมายถึง การปรับตัวของพืชให้สามารถทนต่อความเครียดนั้นได้ เพื่อทำให้ความเครียดมีผลต่อพืชน้อยที่สุด แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ 1) การหลบหลีก (avoidance) เป็นการปรับตัวของพืชทางด้านสัณฐานและกายวิภาคของพืช เช่น พืชที่อยู่ในสภาวะแล้งต้องมีการปรับตัวเพื่อลดการสูญเสียน้ำ โดยการม้วนใบเพื่อลดขนาดพื้นที่ของใบที่มีใบที่หนาขึ้น หรือเซลล์มีการเรียงตัวอัดกันแน่นในชั้นมิโซฟิลล์ 2) การทนทาน (tolerance) เป็นการปรับตัวของพืชทางด้านสรีรวิทยาและชีวเคมี เช่น พืชที่อยู่ในสภาวะแล้งจะมีการปรับเปลี่ยนกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง หรือมีการสร้างสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) เช่น เอนไซม์

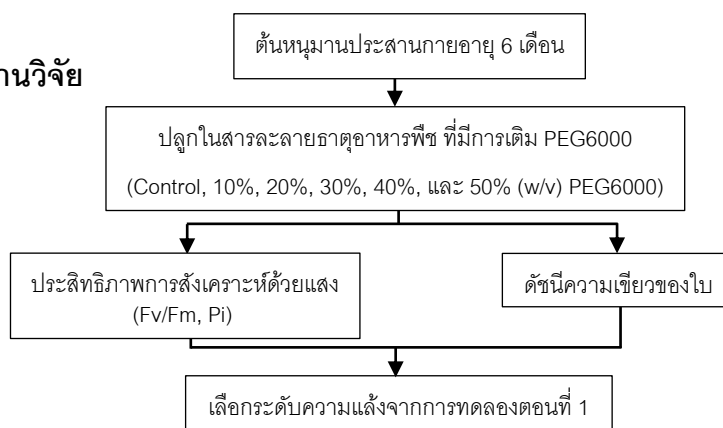
superoxide dismutase (SOD) เอนไซม์ catalase (CAT) และ เอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX) เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเครียดชักนำให้พืชมีการสร้างอนุมูลอิสระเพิ่มมากขึ้น

สารทุติยภูมิ (secondary metabolites) หมายถึง สารที่พืชสังเคราะห์ขึ้น ไม่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่มีบทบาทสำคัญในกลไกการปรับตัวและการป้องกันของพืชต่อสิ่งแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ในพืชชั้นสูง สารทุติยภูมิหลายชนิดเกิดจากการนำสารปฐมภูมิ เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และกรดอะมิโน เข้าสู่กระบวนการชีวสังเคราะห์ เพื่อสร้างสารทุติยภูมิชนิดต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตของพืช เช่น อัลคาลอยด์ (alkaloids) ฟีนอลิก (phenolics) และเทอร์พีนอยด์ (terpenoids) เป็นต้น

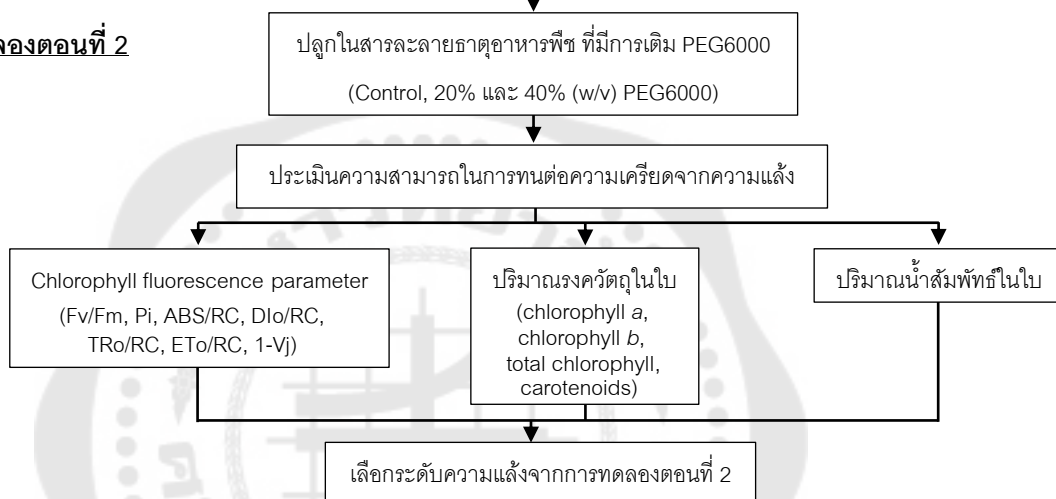


กรอบแนวคิดในงานวิจัย

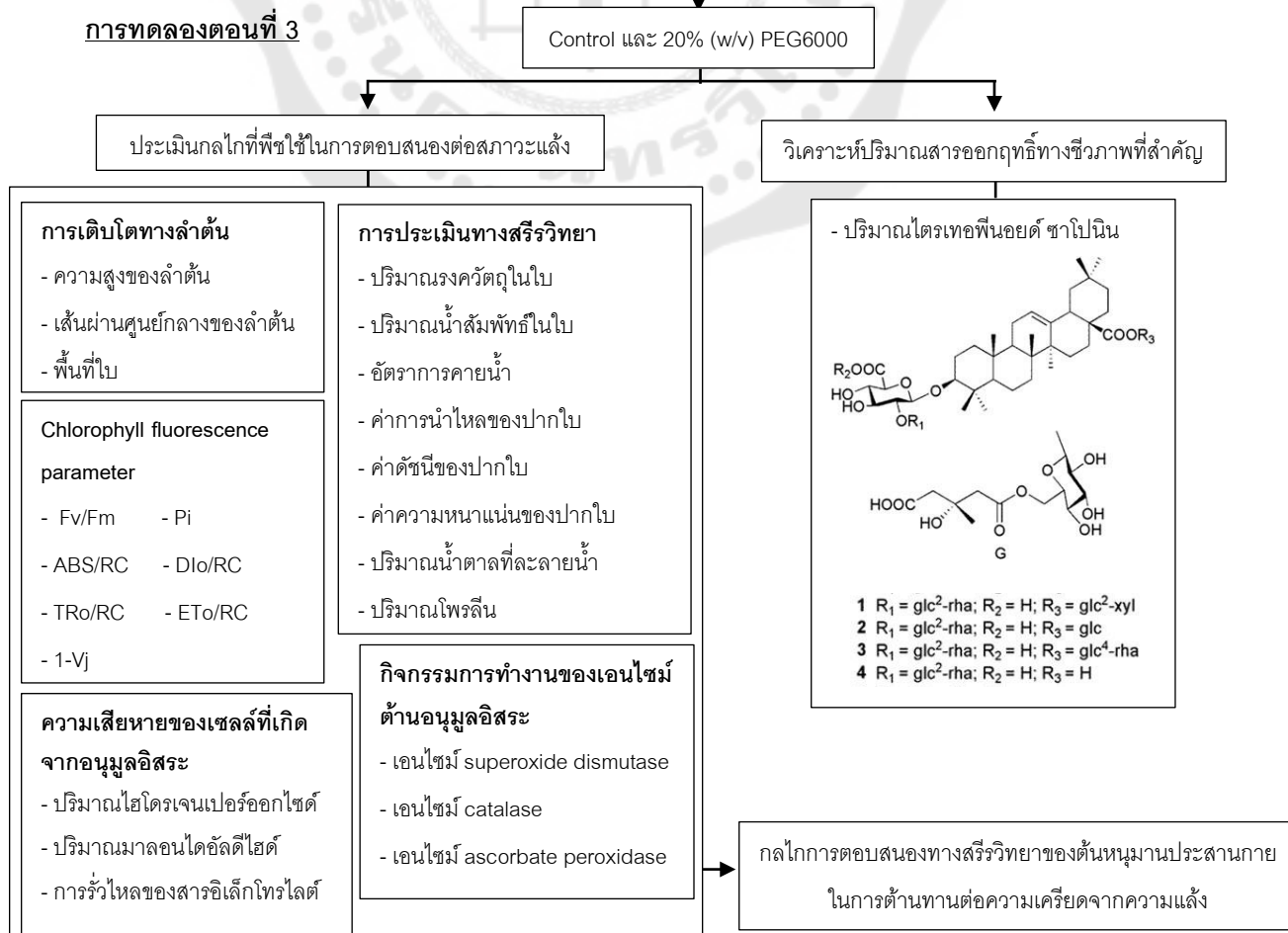
การทดลองตอนที่ 1



การทดลองตอนที่ 2



การทดลองตอนที่ 3



สมมติฐานในการวิจัย

1. ต้นหนุমানประสานกายน่าจะมีกลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยา โดยมีค่าดัชนีของปากใบ ความหนาแน่นของปากใบ ปริมาณโพรงเส้น ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ การรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ และกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ เอนไซม์ SOD เอนไซม์ CAT และเอนไซม์ APX เพิ่มขึ้น แต่การเจริญเติบโตทางลำต้น พื้นที่ใบ ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ปริมาณรงควัตถุในใบ ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ อัตราการคายน้ำ และค่าการนำไหลของปากใบลดลง เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง

2. การให้ความเครียดจากความแล้งกับต้นหนุমানประสานกายน่าจะชักนำให้เกิดการสะสมปริมาณไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ที่มีประโยชน์ในเชิงพาณิชย์เพิ่มขึ้น

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ทราบถึงองค์ความรู้เกี่ยวกับกลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาบางประการของต้นหนุমানประสานกายที่ใช้ในการต้านทานต่อความเครียดจากความแล้ง

2. สามารถใช้เป็นแนวทางในการจัดการระบบการเพาะปลูกต้นหนุমানประสานกายของเกษตรกร โดยใช้ประโยชน์จากความเครียดจากความแล้งที่ควบคุมได้ชักนำให้พืชเกิดการสร้างสารสำคัญที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการสรีรวิทยาของพืช ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. หนุมานประสานกาย
2. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับพืช
3. ความแล้ง
4. สรีรวิทยาและการปรับตัวของพืชในสภาพเครียดจากความแล้ง
5. ปริมาณของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในพืชภายใต้ความเครียดจากความแล้ง

1. หนุมานประสานกาย

หนุมานประสานกาย มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Heptapleurum leucanthum* (R.Vig.) Y.F.Deng (ชื่อพ้องวิทยาศาสตร์ ได้แก่ *Schefflera leucantha* R.Vig *S. kwangsiensis* Merr. ex H.L.Li *S. tamdaoensis* Grushv. & Skvortsova *S. tenuis* H.L.Li และ *S. yunnanensis* H.L.Li) เป็นพรรณไม้กลางแจ้งที่อยู่ในวงศ์ *Araliaceae* มีถิ่นกำเนิดทางตอนใต้ และตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศจีน รวมถึงทางตอนเหนือของประเทศเวียดนาม และมีการแพร่กระจายพันธุ์ในประเทศลาว พม่า ไทย และกัมพูชา (Brummitt, 2001) ในประเทศไทยสามารถพบได้มากทางภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จัดเป็นพรรณไม้กลางแจ้งที่มักพบขึ้นตามป่าเขา เกาะตามซอกหินผา หรือที่รกร้างที่มีความสูง 1,200-1,700 เมตรจากระดับน้ำทะเล (ราชันย์ ภูมา และสมราน สุดดี, 2557) ปัจจุบันต้นหนุมานประสานกายนิยมปลูกตามอาคารบ้านเรือน เพื่อใช้เป็นไม้ประดับตกแต่งแนวรั้ว เนื่องจากมีทรงพุ่มที่กว้าง ใบประกอบแบบนิ้วมือที่มีใบย่อยประมาณ 7-8 ใบ ใบมีสีเขียวเข้ม ขอบใบหยักเล็กน้อยและเรียงเป็นวงกลมรอบกิ่ง ออกเรียงสลับกัน หรือปลูกไว้ใช้ประโยชน์ทางยา ซึ่งใบหนุมานประสานกายที่ปลูกตามบ้านจะมีรสเผ็ดปร่า ขม และฝาดน้อยกว่าใบจากต้นที่เกิดตามป่าเขา นอกจากนี้ยังมีการปลูกในเชิงพาณิชย์ เพื่อสกัดสารทางยา หรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ชาชง ขี้ผึ้งหนุมานประสานกาย น้ำมันหนุมานประสานกาย เป็นต้น (มหาวิทยาลัยมหิดล คณะทันตแพทยศาสตร์, 2551)

1.1 ข้อมูลทางพฤกษศาสตร์ของหนุมานประสานกาย

หนุมานประสานกายเป็นพรรณไม้พุ่มขนาดเล็กถึงกลาง สูงประมาณ 1-2 เมตร มีการแตกกิ่งก้านในระดับต่ำใกล้พื้นดิน ผิวของลำต้นค่อนข้างเรียบเกลี้ยงมีสีน้ำตาล ใบเป็นใบประกอบ

แบบนี้มีมือ มีใบย่อยประมาณ 7-8 ใบ ออกเรียงเป็นวงรอบก้านใบหลัก ลักษณะของใบย่อยเป็นรูปยาวรี หรือรูปใบหอก ปลายใบและโคนใบเรียวแหลม ขอบใบเป็นคลื่นเล็กน้อย ใบมีขนาดกว้างประมาณ 1.5-3 เซนติเมตร และยาวประมาณ 5-8 เซนติเมตร พื้นผิวใบเรียบเป็นมัน ก้านใบย่อยสั้น ก้านช่อใบยาว ดอกออกเป็นช่อตรงบริเวณปลายกิ่ง ลักษณะของดอกย่อยเป็นดอกสีขาวนวล หรือสีเหลืองแกมเขียว ดอกมีขนาดเล็ก ก้านช่อดอกยาวประมาณ 3-7 มิลลิเมตร ผลมีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเล็ก อวบน้ำ ขนาดของผลเท่าเมล็ดพิริกไทย โดยมีความกว้างประมาณ 4-5 มิลลิเมตร และยาวประมาณ 5-6 มิลลิเมตร ผลอ่อนเป็นสีเขียว เมื่อแก่เต็มที่หรือสุกแล้วจะเปลี่ยนเป็นสีส้ม-แดง ภายในผลมีเมล็ดเล็ก ๆ ซึ่งสามารถขยายพันธุ์ได้จากเมล็ด (ฐานข้อมูลสมุนไพรไทย, 2553; วิทย์เที่ยงนุรณธรรม, 2542) (ภาพประกอบ 1)



ภาพประกอบ 1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์หนุมานประสานกาย

แสดงการจัดเรียงของใบ (a) ดอก (b) ผล (c)

ที่มา : เกษวิทย์ (2564)

1.2 การปลูกและดูแลต้นหนุมานประสานกาย

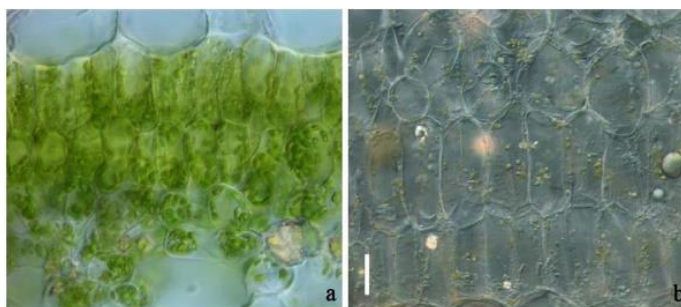
หนุมานประสานกายเป็นพืชที่ปลูกง่าย เจริญเติบโตได้ดี และแตกกิ่งก้านได้เร็ว สามารถปลูกได้ดีในดินเกือบทุกชนิด โดยเฉพาะดินร่วนที่มีอนุภาคของเม็ดดินเรียงตัวอย่างหลวม ๆ อากาศถ่ายเทได้สะดวก และสามารถระบายน้ำได้ดี หรือดินร่วนปนทรายที่มีลักษณะร่วนซุยและมีอินทรีย์วัตถุผสมอยู่มาก ควรหลีกเลี่ยงการปลูกในดินที่ชุ่มน้ำหรือมีน้ำขังมากเกินไป เนื่องจากรากของต้นหนุมานประสานกายไวต่อการเกิดรากเน่าได้ง่าย (Lagattuta, 2022) และการได้รับน้ำที่มากเกินไปไปพืชจะแสดงอาการใบเหลือง และเกิดการหลุดร่วงของใบได้ (ภาวนา อัคระประภา, 2560) การขยายพันธุ์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเพาะเมล็ด การปักชำกิ่ง โดยใช้กิ่งพันธุ์ขนาด 6-8 นิ้ว ปักลงดินลึกประมาณ 2-3 นิ้ว ประมาณ 45 วัน จึงจะเริ่มแตกยอดใหม่ หรือใช้วิธีการตอนกิ่ง ซึ่งการปลูกต้นหนุมานประสานกายจะใช้ระยะเวลาประมาณ 4 เดือนขึ้นไป จึงจะสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ โดยการตัดทั้งกิ่งแล้วริดใบออก เลือกเฉพาะใบที่ไม่แก่หรืออ่อนเกินไปนำไปใช้ทำยา (สำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร, 2555; แสนสุข รัตนผล และคณะ, 2556) นอกจากนี้ต้นหนุมานประสานกายยังสามารถขยายพันธุ์ด้วยวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ซึ่งเป็น

วิธีการที่ทำให้ได้ปริมาณมากในเวลาอันรวดเร็ว และไม่กลายพันธุ์ จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการขยายพันธุ์พืชสมุนไพร เพื่อให้มีคุณภาพและสรรพคุณทางยาที่ดีต่อไป (เยาวพา จิระเกียรติกุล, 2546; ศราวุฒิ ทับช่วยขวา, วณิชชา บันฟ้า, จักรกฤษณ์ คณารีย์, กันยานุช เทาประเสริฐ, และยิ่งยง เทาประเสริฐ, 2564) โรคและแมลงที่พบได้ในการปลูกหนุมานประสานกาย เช่น 1) โรคราสนิมที่เกิดจากเชื้อราก่อโรคคือ *Nyssopsora thwaitesii* อาการที่พบคือ มีจุดสีดำที่ใบอ่อนจำนวนมาก หากสังเกตภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอจะเห็นเป็นลักษณะของสปอร์ราสีดำนูนพื้นผิวใบทั้งด้านบนและด้านล่าง (ภาพประกอบ 2) ซึ่งการติดเชื้อราก่อโรสดังกล่าวส่งผลให้ปริมาณของคลอโรพลาสต์ในพาลิเซด (palisade) ลดลง ทำให้ใบเหี่ยวแห้งและตายในที่สุด (Phetruang, Haituk, Kankavee, & Cheewangkoon, 2019) (ภาพประกอบ 3) 2) แมลงศัตรูพืชจำพวกเพลี้ยได้แก่ เพลี้ยแป้ง เพลี้ยหอยเกล็ด และเพลี้ยอ่อน ทำลายพืชโดยการใช้ส่วนของปากที่เป็นท่อยาวดูดกินน้ำเลี้ยงจากส่วนยอด ใบ ตา และลำต้น และขับถ่ายมูลที่มีลักษณะเป็นของเหลวข้นเหนียวมีรสหวาน เรียกว่า มูลหวาน (honeydew) ทำให้เกิดราดำปกคลุมใบพืช ทำให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชลดลง หากมีการระบาดที่รุนแรงจะทำให้พืชมีใบเหลือง มีการหลุดร่วงของใบ ลำต้นแคระแกร็น และพืชอาจแห้งตายไปในที่สุด ซึ่งสามารถพบการระบาดและทำลายได้ในทุกระยะการเจริญเติบโตของพืช โดยส่วนใหญ่การกระจายตัวของเพลี้ยเป็นแบบรวมกลุ่ม ซึ่งปกติจะไม่เกิดการระบาด เพราะธรรมชาติคอยควบคุม เช่น ปริมาณน้ำฝน ศัตรูธรรมชาติ แต่ถ้าฝนทิ้งช่วงหรือในฤดูแล้ง อากาศร้อน มักเกิดการระบาดของเพลี้ยได้ (บุปผา เหล่าสินชัย และชลิดา อุณหวุฒิ, 2543; ศูนย์วิจัยพืชไร่นครสวรรค์, 2563; สุเทพ สหยา, 2555) 3) โรแดง หรือโรแมงมุม เข้าทำลายพืชด้วยการดูดกินน้ำเลี้ยงของพืช โดยใช้ส่วนปากที่มีลักษณะเป็นเข็มแหลมแทงเข้าไปในเนื้อเยื่อของพืช ซึ่งในขณะที่โรแดงกำลังดูดทำลายพืชอยู่นั้น จะปล่อยสารพิษที่เรียกว่า toxin ออกมาด้วย ทำให้เกิดแผลที่ผิวของพืชในบริเวณนั้น พืชเกิดการสูญเสียคลอโรฟิลล์ ทำให้ใบและส่วนต่าง ๆ ของพืชที่ถูกทำลายมีลักษณะเป็นจุดเล็ก ๆ สีขาวซีด หากมีการทำลายหรือแพร่ระบาดอย่างรุนแรง จุดเล็ก ๆ นี้จะแพร่ขยายติดต่อกันเป็นวงกว้าง ใบจะค่อย ๆ เปลี่ยนจากสีเขียวซีดเป็นสีน้ำตาล และเกิดการแห้ง (Westover, 2020)



ภาพประกอบ 2 อาการของโรคราสนิมในต้นหนุมานประสานกาย (a-c) และ
ลักษณะของสปอร์รา *Nyssopsora thwaitesii* บนผิวใบ (d-e)

ที่มา : Phetruang et al. (2019)



ภาพประกอบ 3 ภาคตัดขวางของใบหนุมานประสานกาย แสดงให้เห็นคลอโรพลาสต์ในเซลล์
ใบปกติ ไม่ติดโรค (a) และ ใบที่ผิดปกติ ติดโรค (b)

ที่มา : Phetruang et al. (2019)

1.3 สารพฤษเคมีที่สำคัญในหนุมานประสานกาย

พฤษเคมีพื้นฐาน หรือสารเคมีที่พบได้ในพืช สามารถแบ่งตามลักษณะความจำเป็น
ที่พืชสร้างขึ้นได้เป็น 2 กลุ่ม คือ 1) สารปฐมภูมิ (primary metabolites) เป็นสารเคมีที่พบได้ในพืช
ชั้นสูงทุกชนิด ทำหน้าที่เกี่ยวกับเมแทบอลิซึม (metabolism) ที่จำเป็นต่อวัฏจักรของพืช เช่น การ
เจริญเติบโต การสังเคราะห์ด้วยแสง การสะสมอาหารและพลังงาน การสืบพันธุ์ เป็นต้น สารในกลุ่มนี้
เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน และกรดอะมิโน 2) สารทุติยภูมิ (secondary metabolites)
เป็นสารเคมีที่เกิดจากเมแทบอลิซึมของพืช ซึ่งไม่ได้มีความจำเป็นโดยตรงต่อกระบวนการ
เจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ แต่มีบทบาทสำคัญในการป้องกันพืชจากศัตรูพืชและโรคพืช ช่วยให้
พืชสามารถปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมทางกายภาพที่มีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้สารเหล่านี้มักมี
ฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางยา ผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร หรือมีคุณสมบัติเป็น
สารพิษ สารต้านจุลชีพ เป็นต้น สามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มหลัก ตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีและ
กระบวนการทางชีวสังเคราะห์ของสาร ได้แก่ อัลคาลอยด์ (alkaloids) ฟีนอลิก (phenolic
compounds) สารเทอร์พีนอยด์และสเตียรอยด์ (terpenoids and steroids) และกลัยโคไซด์
ชนิดอื่น ๆ (other glycosides) (วันดี กฤษณพันธ์, 2536; อ๋อมบุญ วัลลิสุต และปองทิพย์ สิทธิสาร
, 2556)

หนุมานประสานกายเป็นพืชสมุนไพรที่มีการสกัดสารออกมาเพื่อผลิตเป็นยารักษา
โรค ซึ่งการสะสมสารออกฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา พบได้ในส่วนของลำต้นเหนือดิน (aerial part)
โดยเฉพาะส่วนของใบหนุมานประสานกาย จากการศึกษาสารทุติยภูมิในใบของหนุมานประสานกาย

ที่สกัดด้วย 95% เอทานอล พบว่า มีกรดเบทูลินิก (Taesotikul et al., 1980) กรดโอเลอิกในลิค (Panthong, Kanjanapothi, & Taylor, 1986b) และไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ซึ่งมีการค้นพบ โครงสร้างและอนุพันธ์ที่แตกต่างกันถึง 85 ชนิด (Pancharoen et al., 1994; Wang et al., 2014a, b, c; Wang et al., 2016a; Yang et al., 2019; Zhang, Wang, & Yu, 2015) นอกจากนี้ ยังพบ สารเซสควิเทอร์พีน (sesquiterpenes) และนอร์เซสควิเทอร์พีน (nor-sesquiterpenes) ที่สามารถ นำไปใช้ประโยชน์ในทางเภสัชกรรมได้ (Wang et al., 2019) ในปัจจุบันได้มีการศึกษาสารทุติยภูมิ ในใบของหนุมานประสานกายอย่างต่อเนื่อง และมีการค้นพบองค์ประกอบทางเคมีของใบหนุมาน ประสานกายเพิ่มเติมอีก 15 ชนิด (Wang et al., 2020) และมีการตรวจสอบโครงสร้างของ สารประกอบ พบว่า เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีฤทธิ์ลดระดับน้ำตาลในเลือด ป้องกันระบบ ประสาท และเป็นสารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์อัลโดสรีดักเทส (aldose reductase) ที่ช่วยรักษา โรคประสาทส่วนปลายในผู้ป่วยเบาหวาน (Liang et al., 2015) นอกจากนี้ สารทุติยภูมิที่พบในต้น หนุมานประสานกายมีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาอื่น ๆ อีกหลายด้าน เช่น รักษาโรคหอบหืดเรื้อรัง (Panthong et al., 1986a) ต้านเชื้อแบคทีเรีย (Laopaksa, Umnouypol, & Jongbunpasert, 1988) รักษาภาวะน้ำตาลในเลือดต่ำ (Satayavivad et al., 1996; Wang et al., 2016a) ใช้เป็น สารช่วยไล่แมลง (Sinchaisri et al., 1988; Tawatsin et al., 2005) มีฤทธิ์ยับยั้งสารก่อภูมิแพ้ (Matsui, Wirotasangthong, Thanakijcharoenpath, Mungmee, & Nishikawa, 2010) และมีฤทธิ์ป้องกัน ตับ (Wang et al., 2014) เป็นต้น

นอกจากนี้ มีรายงานเกี่ยวกับพืชสมุนไพรที่คนไทยในชนบทใช้รักษาโรคไม่ติดต่อ พบว่า ต้นหนุมานประสานกายเป็นพืชสมุนไพร 10 อันดับแรก ที่ถูกใช้รักษาโรคทางเดินหายใจ เรื้อรัง เสมหะ โรคหอบหืด โรคปอด และหลอดลมอักเสบอีกด้วย (Nguanchoo, Balslev, Sadgrove, & Phumthum, 2023) ซึ่งจากสรรพคุณของสารสกัดที่ได้จากหนุมานประสานกายทำให้ เห็นถึงความสำคัญของสารทุติยภูมิที่พืชมีการสังเคราะห์ขึ้นมา นำไปสู่การคิดค้นตำรับยาสมุนไพร ที่มีส่วนผสมทั้งหมดมาจากธรรมชาติ 100% มีการผลิตภายใต้มาตรฐาน Good Manufacturing Practice (GMP) และผ่านการพิสูจน์ตำรับยาจากองค์การอาหารและยา (อย.) เป็นผลิตภัณฑ์แรก ในประเทศไทย ตัวยามีสรรพคุณช่วยบรรเทาโรคหืด เจ็บคอ ไอ นอกจากนี้จะมีส่วนผสมของสาร สกัดจากใบหนุมานประสานกายแล้ว ยังมีสมุนไพรอื่น ๆ อีกหลายชนิด เช่น ชะเอมเทศ (*Glycyrrhiza glabra* L.) และลูกมะแว้ง (*Solanum indicum* L.) เป็นต้น หนุมานประสานกายจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือก ในการช่วยแก้ไขปัญหาโรคหืดของคนไทย และทดแทนการนำเข้ายาจากต่างประเทศที่ประเทศไทย ต้องเสียดุลการค้าหลายหมื่นล้านบาทต่อปี (เทียนชัย ศิริเสน, 2552) จากสถานการณ์การแพร่

ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (Covid-19) ทั่วโลกประสบกับปัญหาวิกฤตสุขภาพ ประชากรโลกต้องเสียชีวิตเนื่องจากการขาดแคลนยาในการรักษา สมุนไพรไทยจึงเป็นที่ต้องการของตลาดโลกเป็นอย่างมาก และมีแนวโน้มทางการตลาดสูงขึ้น โดยเฉพาะกลุ่มยาบำรุงร่างกาย และป้องกันไม่ให้เชื้อเข้าสู่ปอด เช่น สารสกัดจากใบหนุมานประสานกายที่ช่วยรักษาอาการไอแห้ง ตลอดเวลา จึงมีบทบาทสำคัญในการช่วยรักษาผู้ป่วยโควิดที่มีอาการไม่รุนแรงมาก (สารรังสิตออนไลน์, 2563) การพัฒนาสมุนไพรไทยเพื่อการส่งออก และการส่งเสริมระบบการเพาะปลูกพืช ให้กับกลุ่มเกษตรกรหรือผู้ประกอบการให้มีมาตรฐานและควบคุมคุณภาพของผลผลิตให้เป็นที่ต้องการทางการตลาด จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สำคัญในการขับเคลื่อนประเทศไทย โดยการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจ และเป็นการส่งเสริมมูลค่าทางการตลาดให้กับสมุนไพรไทยทั้งในตลาดภายในประเทศและต่างประเทศได้ในอนาคต

2. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับพืช

2.1 ความสำคัญของน้ำที่มีต่อพืช

น้ำเป็นองค์ประกอบที่มีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของพืช เนื่องจากเป็นสารที่มีมากที่สุดภายในพืช และพบได้ในทุกส่วนของพืช โดยน้ำช่วยรักษาสภาพของสารประกอบอินทรีย์ และออร์แกเนลล์ต่าง ๆ ภายในโพรโทพลาสซึมให้อยู่ในสภาพปกติ ช่วยรักษาสภาพความเต่งของเซลล์ (cell turgidity) และของพืชทั้งต้น ซึ่งมีผลต่อการเจริญและการขยายขนาดของเซลล์พืช การคายน้ำหรือการระเหยของน้ำช่วยรักษาอุณหภูมิของพืชในช่วงเวลากลางวันที่พืชได้รับแสง น้ำมีแรงยึดกับโมเลกุลของสารอื่น (adhesive force) และแรงยึดกับโมเลกุลของน้ำด้วยกัน (cohesive force) สูง ทำให้น้ำสามารถเคลื่อนที่ไปในพืช และลำเลียงไปยังส่วนต่าง ๆ ได้อย่างต่อเนื่อง (ลิลลี่ กาวีติ๊ะ, มาลี ณ นคร, ศรีสม สุวรรณวงศ์, สุรียา ตันติวิวัฒน์, และณรงค์ วงศ์กันทรากกร, 2560) น้ำยังเป็นตัวช่วยในการลำเลียงธาตุอาหารต่าง ๆ จากภายนอกเข้าสู่พืช เมื่อความชื้นในดินเพียงพอที่จะสามารถละลายธาตุอาหารในดินได้ รากพืชจะดูดซึมน้ำและแร่ธาตุที่อยู่ในรูปของสารละลายเข้าสู่พืช นอกจากนี้ปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่าง ๆ ในพืชเกิดได้ในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย และในบางปฏิกิริยามีน้ำเป็นสารร่วมทำปฏิกิริยาด้วย ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์ด้วยแสง น้ำเป็นสารที่ให้ไฮโดรเจนและไฮโดรเจนไอออนที่จำเป็นต่อการสร้างอาหารในรูปของกลูโคส หากพืชขาดน้ำก็จะทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง และในสภาพขาดน้ำปากใบของพืชจะปิด เพื่อลดการคายน้ำ และป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับเอนไซม์ ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปากใบเกิดได้ไม่ดี มีผลทำให้พืชได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงจึงลดลง (ชวนพิศ แดงสวัสดิ์, 2544) การศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งในระดับความรุนแรงเล็กน้อย (mild stress) และความเครียดในระดับรุนแรง (severe stress) ต่อ

ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare* L.) สองพันธุ์ปลูก ได้แก่ 'Yousof' ที่ทนแล้งได้ดี และ 'Morocco' ที่ไวต่อความแล้ง พบว่าความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ข้าวบาร์เลย์ทั้งสองพันธุ์ปลูกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ ค่าการนำไหลของปากใบซึ่งบ่งบอกการเปิด-ปิดของปากใบ และอัตราการดูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลง แสดงว่าพืชเกิดการปิดปากใบมีผลทำให้พืชได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง จึงทำให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง นอกจากนี้ ความเครียดจากความแล้งยังทำให้ปริมาณของโปรตีน D1 ที่อยู่ในศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยา (reaction center) ของระบบแสง II ลดลง เกิดปรากฏการณ์ยับยั้งแสง (photoinhibition) ทำให้ศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II เกิดความเสียหาย และไม่สามารถทำงานได้ กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงจึงลดลง (Ghotbi-Ravandi, Shahbazi, Shariati, & Mulo, 2014) เช่นเดียวกับการศึกษาการตอบสนองต่อความเครียดจากความแล้งที่แตกต่างกันของต้นอัลฟาฟ่า (*Medicago sativa* L.) พืชตระกูลถั่วที่มีการปลูกเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ จำนวน 3 พันธุ์ปลูก ได้แก่ 'Longzhong' ที่ทนแล้งได้ดี 'Longdong' ที่ทนต่อความเครียดจากความแล้งในระดับปานกลาง (moderate stress) และ 'Gannong No. 3' ที่ไวต่อความเครียดจากความแล้ง พบว่าความเครียดจากความแล้งที่ยาวนานทำให้การเจริญเติบโตและความสามารถในการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้นอัลฟาฟ่าทั้ง 3 พันธุ์ปลูกลดลง โดยพันธุ์ 'Longzhong' ที่ทนแล้งได้ดีมีความสามารถในการรักษาปริมาณน้ำในใบ และประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสงได้สูงที่สุด (Zhang, Shi, Liu, & Yang, 2019) และการศึกษาความเครียดจากความแล้งต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงในต้นแตงไทย (*Cucumis melo* L.) พันธุ์พื้นเมือง ทั้ง 8 พันธุ์ พบว่าพันธุ์ MM-6 ที่มีความสามารถในการทนแล้งได้ดีจะมีความสามารถรักษาปริมาณน้ำในใบได้ดีกว่าพันธุ์อื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ความเครียดจากความแล้งส่งผลให้พันธุ์ MM-2 และ MM-5 มีปริมาณน้ำสัมพันธ์ในใบ อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง ปริมาณรงควัตถุลดลง และผลการทดลองบ่งบอกว่าพืชเกิดความเครียดออกซิเดชันที่เกิดจากการสะสมของอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น เนื่องจากกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระลดลง (Ansari, Atri, Singh, Kumar, & Pandey, 2018) ในทางกลับกัน กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ทั้งเอนไซม์ catalase (CAT) เอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) และเอนไซม์ peroxidase (POD) เพิ่มขึ้นในใบของต้นแอปเปิ้ล (*Malus domestica* Borkh.) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง แต่ต้นแอปเปิ้ลยังเกิดความเครียดออกซิเดชันและมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิลดลง เนื่องจากกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระไม่เพียงพอที่จะกำจัด reactive oxygen species (ROS) ได้ ผลที่ตามมาคือการสะสมของ ROS ทำให้ปริมาณโปรตีน D1 ลดลง การสังเคราะห์ด้วยแสงจึง

ลดลง (Wang et al., 2018) นอกจากนี้ ความเครียดจากความแล้งยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสงอย่างชัดเจนในต้นโกศเขมา (*Atractylodes lancea* (Thunb.) DC.) (Zhang et al., 2021) ต้นมะเขือเทศ (*Solanum lycopersicum* L. cv. Jinpeng No. 10) (Liang, Liu, Zhang, & Guo, 2020) และต้นถั่วแขก (*Phaseolus vulgaris* L.) โดยความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ค่าการนำไหลของปากใบ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างเซลล์ ปริมาณคลอโรฟิลล์ และอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิลดลง (Mathobo, Marais, & Steyn, 2017)

2.2 ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำในพืช

การเคลื่อนที่ของสารเกิดจากความแตกต่างของระดับพลังงานอิสระ (free energy) ที่สามารถเปลี่ยนเป็นงานได้ โดยพลังงานอิสระของสารในระบบใด ๆ จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนโมเลกุลของสารในระบบนั้น นอกจากนี้หากสารมีจำนวนโมเลกุลเท่ากัน แต่มีความดัน และอุณหภูมิแตกต่างกัน พลังงานอิสระของระบบอาจแตกต่างกันได้ ค่าพลังงานอิสระต่อจำนวนโมลของสารในระบบเรียกว่า ศักย์เคมี (chemical potential; μ) ซึ่งผลต่างระหว่างค่า μ ของน้ำที่มีสารอื่นเจือปนกับน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน เรียกว่า ค่าศักย์ของน้ำ (water potential) ใช้สัญลักษณ์ว่า Ψ (psi เป็นอักษรกรีก) เป็นค่าพลังงานที่สะสมในมวลของน้ำและเป็นปัจจัยสำคัญที่บ่งบอกทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำและสารต่าง ๆ ภายในพืช ว่าเซลล์นั้นจะได้รับน้ำเข้าไปหรือสูญเสียน้ำออกมา มีหน่วยเป็นบาร์ (bar) หรือพาสคาล (Pascal) หรือบรรยากาศ (atmosphere) ดังสมการ (1)

$$\Psi = \mu_{(\text{น้ำที่มีสารอื่นเจือปน})} - \mu_{(\text{น้ำบริสุทธิ์})} \dots \dots \dots (1)$$

ซึ่งค่า Ψ จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกละลาย ในน้ำบริสุทธิ์ค่า Ψ มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0 และน้ำที่มีสารอื่นเจือปนค่า Ψ มีค่าเป็นลบ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ โดยน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีค่า Ψ สูง ไปสู่บริเวณที่มีค่า Ψ ต่ำ และถึงจุดสมดุล เมื่อค่า Ψ ของทั้ง 2 บริเวณมีค่าเท่ากัน ค่า Ψ ของสารละลายภายในเซลล์พืชจะขึ้นอยู่กับผลรวมระหว่าง osmotic potential (Ψ_{π}) และ pressure potential (Ψ_p) ดังสมการ (2)

$$\Psi_{\text{cell}} = \Psi_{\pi} + \Psi_p \dots \dots \dots (2)$$

โดยค่า Ψ_{π} คือ ค่า Ψ ของสารละลายที่ลดลง เมื่อมีตัวถูกละลายในสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของน้ำลดลง จึงมีค่าติดลบเสมอ และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0 เมื่อเป็นน้ำบริสุทธิ์ ส่วนค่า Ψ_p คือค่า Ψ ของน้ำในเซลล์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดแรงดันน้ำสถิต (hydrostatic pressure) หรือแรงดันเต่ง (turgor pressure) ค่า Ψ_p จะมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ เช่น เซลล์ที่อยู่ในสภาพเต่งจะมีค่าเป็นบวก พืชที่คายน้ำมากจนรากดูดน้ำไม่ทัน ค่า Ψ_p ในไซเลม (xylem) จะเป็นลบ ในสถานะที่พืชได้รับน้ำเพียงพอ ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำในพืชเริ่มต้นจากการดูดซึม

น้ำในดินเข้าสู่รากด้วยวิธีออสโมซิส (osmosis) เมื่อเข้าสู่เซลล์ขนราก น้ำจะเคลื่อนที่ผ่านเซลล์ต่าง ๆ ของรากจนถึงท่อลำเลียงไซเลม และถูกลำเลียงขึ้นไปยังลำต้น ใบ และส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยอาศัยแรงดึงจากการคายน้ำที่ใบ (transpiration pull) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการระเหยของน้ำออกจากใบผ่านทางปากใบ และแรงดันราก (root pressure) ช่วยผลักดันน้ำขึ้นไปในกรณีที่มีการดูดน้ำมากในช่วงที่การคายน้ำลดลง เช่น ตอนกลางคืน (ลิลลี่ กาวีต๊ะ และคณะ, 2560; วิไลภรณ์ บุญญกิจจินดา, 2556)

3. ความแล้ง

3.1 ภัยแล้งในประเทศไทย

ปัจจุบันประเทศไทยต้องเผชิญกับสถานการณ์ภัยแล้งและการขาดแคลนน้ำมาอย่างต่อเนื่องในหลายพื้นที่ ซึ่งสาเหตุมาจากฝนแล้งและฝนทิ้งช่วงเป็นระยะเวลานาน ประกอบกับความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ การขยายพื้นที่ทำการเกษตรและอุตสาหกรรม และความต้องการใช้น้ำที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปัญหาภัยแล้งมีแนวโน้มที่จะทวีความรุนแรงมากขึ้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) ภัยแล้งที่เกิดจากฝนแล้งและฝนทิ้งช่วงเป็นเวลานาน มักเกิดในช่วงฤดูฝน โดยในแต่ละปีจะเกิดขึ้นได้ 2 ช่วง คือ 1) ช่วงฤดูหนาวต่อเนื่องถึงฤดูร้อน มักเกิดขึ้นเป็นประจำทุกปี ซึ่งพื้นที่ทำการเกษตรที่ได้รับผลกระทบ ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกของประเทศไทยมีปริมาณฝนลดลงเป็นลำดับ สถานการณ์ภัยแล้งจะยาวนานจนกว่าจะเข้าสู่ฤดูฝนในช่วงกลางเดือนพฤษภาคมของปีถัดไป 2) ช่วงกลางฤดูฝน ประมาณปลายเดือนมิถุนายนถึงเดือนกรกฎาคมจะมีฝนทิ้งช่วงเกิดขึ้น อาจเกิดขึ้นในบางบริเวณ หรืออาจครอบคลุมพื้นที่กว้างเกือบทั่วทั้งประเทศไทย ปริมาณฝนที่ลดลงส่งผลกระทบต่อการเกษตรเป็นอย่างมาก เนื่องจากทำให้พืชขาดน้ำ ส่งผลให้พืชเกิดการชะงักการเจริญเติบโต ทำให้ได้ผลผลิตพืชที่ไม่สมบูรณ์ เกิดการเหี่ยวเฉา และตายไปในที่สุด ส่งผลให้เกิดความเสียหายทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทยเป็นอย่างมาก (สาธิต สื่อประเสริฐสุข และชนาวีธร อรุณรัตน์, 2558; อัจฉรี สิงห์โต, 2562)

3.2 สภาวะแล้ง

สภาวะแล้ง (drought) หมายถึง สภาวะที่พื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งเกิดการขาดน้ำเป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้เกิดความแห้งแล้ง การขาดแคลนน้ำในดินทำให้พืชได้รับน้ำไม่เพียงพอ ส่งผลให้พืชเกิดสภาพเครียดจากสภาวะแล้ง (drought stress) ซึ่งมีผลยับยั้งการเติบโต การพัฒนา และการอยู่รอดของพืช ทำให้ผลผลิตพืชมีปริมาณลดลง คุณภาพต่ำ และมีผลชักนำให้พืชบางชนิดเกิดการปรับตัว โดยการปรับเปลี่ยนกลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยา สันฐาน กายวิภาค ทำให้พืช

สามารถอยู่รอดได้ภายใต้สภาวะแล้ง ซึ่งสภาวะแล้งมี 2 แบบ (วิไลภรณ์ บุญญกิจจินดา, 2556) ได้แก่

1) True drought เป็นสภาวะแล้งที่ดินขาดแคลนน้ำเนื่องจากฝนแล้งหรือฝนทิ้งช่วง หรือการชลประทานที่ไม่ดี ทำให้ระดับน้ำผิวดินและใต้ดินลดลง

2) Physiological drought เป็นสภาวะแล้งที่ดินยังมีน้ำมากเพียงพอ แต่รากพืชไม่สามารถดูดน้ำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ เนื่องจากน้ำในดินมีสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ทำให้ค่า Ψ ของบริเวณโดยรอบรากพืชมีค่าต่ำ จึงทำให้น้ำไม่สามารถออสโมซิสเข้าสู่เซลล์ของรากพืชได้ พืชจึงปรับตัวโดยสะสมตัวถูกละลายไว้ที่บริเวณราก เพื่อให้เซลล์รากมีค่า Ψ ต่ำกว่าสารละลายในดิน น้ำจึงจะออสโมซิสเข้าสู่รากพืชได้

3.3 การจำลองสภาวะแล้งโดยการปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์

ความเครียดของพืชที่เกิดจากสภาวะแล้งเป็นความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพประเภทหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเจริญเติบโตและการพัฒนาของพืช การศึกษาการตอบสนองของพืชภายใต้สภาวะแล้งมีการศึกษาอย่างกว้างขวาง ซึ่งมีความสำคัญในด้านการจัดการน้ำเพื่อการผลิตพืช การจำลองสภาวะแล้งเพื่อศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยามีหลายรูปแบบ แต่ละรูปแบบมีหลักสำคัญคือการทำให้ค่า Ψ ของน้ำในดินหรือสารละลายธาตุอาหารที่อยู่บริเวณโดยรอบของรากพืชมีค่าลดลง (Osmolovskaya et al., 2018) การเลือกใช้รูปแบบการจำลองสภาวะแล้งจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและวัตถุประสงค์ของการศึกษาสภาวะแล้งนั้น ปัจจุบันการใช้สาร PEG6000 ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 6000 ดาลตันขึ้นไป เพื่อจำลองสภาวะแล้งในงานวิจัยทางพืชศาสตร์เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นสารสังเคราะห์ที่ไม่สามารถซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของพืช ทำให้ไม่เป็นพิษต่อพืช และสามารถขัดขวางการดูดซึมน้ำของรากได้ โดยสาร PEG6000 มีบทบาททำให้ค่า Ψ ของสารละลายที่อยู่ล้อมรอบเซลล์รากพืชลดลง (สุภาพร ภัสสร, 2561) จึงเหมาะที่จะใช้ในการจำลองสภาวะแล้งในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ เนื่องจากสามารถควบคุมค่า Ψ ของสารละลายตลอดการทดลองได้อย่างคงที่ มากกว่าการจำลองสภาวะแล้งโดยการปลูกลงดินและลดปริมาณการให้น้ำหรือหยุดการให้น้ำแก่พืช เหมาะสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาและกลไกการตอบสนองของพืชในสภาวะแล้งในห้องปฏิบัติการที่ต้องการทำซ้ำหลาย ๆ ครั้ง การศึกษาความเข้มข้นของ PEG6000 ในสารละลายธาตุอาหารประมาณ 5%-20% (w/v) PEG6000 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงและการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืชได้ ซึ่งพืชแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการทนต่อระดับความเข้มข้นของสารละลาย PEG ในระดับที่แตกต่างกัน เช่น พืชบางชนิดสามารถทนต่อระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 ได้ดี (Bressan, Hasegawa,

& Handa, 1981) วิธีการจำลองสภาวะแล้งดังกล่าวมีการศึกษาลักษณะทางสรีรวิทยาและชีวเคมีของต้นถั่วดำ (*Vigna mungo* L. Hepper) ในการตอบสนองต่อสภาวะแล้งที่ความเข้มข้น 5%, 10% และ 20% (w/v) PEG6000 ผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของ PEG6000 เพิ่มขึ้น ความเครียดจากความแล้งชักนำให้ต้นถั่วดำมีมวลชีวภาพ อัตราการเติบโต และปริมาณน้ำสัมพันธ์ในใบลดลง แต่พบการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ ระดับการสะสมของ reactive oxygen species (ROS) ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และ superoxide anion (O_2^-) เพิ่มขึ้น บ่งบอกว่าพืชได้รับความเครียดที่เกิดจากความแล้ง และเซลล์พืชเกิดความเสียหายจากการสะสมของสารอนุมูลอิสระ แม้ว่าต้นถั่วดำจะเกิดความเครียดจากความแล้ง แต่ต้นถั่วดำมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ เอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) เอนไซม์ catalase (CAT) และเอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX) เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นการปรับตัวและการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและทางชีวเคมีของต้นถั่วดำในการตอบสนองต่อสภาวะแล้ง (Jothimani & Arulbalachandran, 2020) แบบจำลองความเครียดจากสภาวะแล้งในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีสาร PEG6000 จึงเป็นตัวเลือกหนึ่งในการศึกษาทางชีววิทยาระดับโมเลกุล การศึกษาสารป้องกันแรงดันออสโมติก (osmoprotectant) และการทดลองเพื่อคัดเลือกพืชที่มีความสามารถในการทนแล้งได้

4. สรีรวิทยาและการปรับตัวของพืชในสภาพเครียดจากความแล้ง

4.1 การตอบสนองทางสรีรวิทยาต่อความเครียดจากความแล้ง

พืชที่มีการเจริญเติบโตในธรรมชาติมักได้รับความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพและปัจจัยทางชีวภาพ ความเครียดจากความแล้งเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชมากที่สุด ความเครียดจากความแล้งทำให้พืชเกิดการตอบสนองทั้งการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา สรีรวิทยา ชีวเคมีในพืช เมแทบอลิซึมของเซลล์ การเปลี่ยนแปลงของอัตราการเติบโตและผลผลิตพืช ทั้งนี้พืชที่สามารถทนต่อความเครียดจากความแล้งได้จะมีกลไกการปรับตัวทางสรีรวิทยาเพื่อให้ทนต่อปัจจัยดังกล่าวได้ (Shakeel et al., 2011) กระบวนการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืชเมื่อพืชได้รับความเครียดจากความแล้งมีกลไกการตอบสนองและเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

4.1.1 การเติบโตและผลผลิตลดลง

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการเจริญเติบโตของพืช เมื่อพืชเกิดการขาดน้ำในระยะการงอกของเมล็ดจะทำให้เปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดพืชลดลง การงอกเกิดได้ไม่สมบูรณ์ และมีการเจริญเติบโตที่ไม่สมบูรณ์ (Harris, Tripathi, & Joshi, 2002) นอกจากนี้ ความแล้งทำให้การแบ่งเซลล์ การยืดตัว และการขยายขนาดของเซลล์ลดลง ส่งผลให้ความสูง พื้นที่ใบ และการ

เจริญเติบโตในส่วนต่าง ๆ ของพืชลดลงตามไปด้วย ความเครียดจากความแล้งของพืชจำกัดการสร้างผลผลิต ซึ่งระดับความรุนแรงขึ้นอยู่กับสถานะแล้งที่พืชได้รับในระยะใดของการเจริญเติบโต เช่น ในข้าวโพด (*Zea Mays* L.) ช่วงผสมเกสรหรือที่เรียกว่าช่วงออกไหมเป็นช่วงวิกฤติของการขาดน้ำ หากเกิดการขาดน้ำขึ้นในช่วงนี้จะทำให้ผสมเกสรไม่ติด ผลผลิตจะลดลงอย่างมากเพราะได้ข้าวโพดที่ไม่ติดเมล็ด หรือที่เรียกว่า ข้าวโพดพันหลอ (เกษตรก้าวหน้า, 2563)

4.1.2 การสะสมกรดแอบไซซิก (abscisic acid) ทำให้ปากใบปิด

เมื่อพืชมีพื้นที่ใบที่ขยายขนาดเต็มที่แล้วก่อนที่จะได้รับสถานะแล้ง พืชจะมีการตอบสนองที่ช่วยปกป้องพืชจากการสูญเสียน้ำ โดยการปิดปากใบเพื่อลดการคายน้ำ การสังเคราะห์และการสะสมกรดแอบไซซิกมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการเปิด-ปิดของปากใบ ในสภาวะปกติกรดแอบไซซิกจะถูกสังเคราะห์ขึ้นมาในปริมาณต่ำอย่างต่อเนื่องในเซลล์ของมีโซฟิลล์ และสะสมในคลอโรพลาสต์ เมื่อพืชได้รับความเครียดจากความแล้ง พืชจะมีการตอบสนองทางสรีรวิทยา ดังนี้ 1) กรดแอบไซซิกบางส่วนที่สะสมในเซลล์ของมีโซฟิลล์ จะถูกปล่อยออกไปสู่ช่องว่างของผนังเซลล์ที่อยู่ด้านนอกของเยื่อหุ้มเซลล์ (apoplast) และถูกเคลื่อนย้ายไปสู่เซลล์คุม (guard cells) โดยอาศัยแรงดึงจากการคายน้ำ 2) รากเป็นส่วนที่สัมผัสกับดินที่แห้งแล้ง ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณเพื่อให้เกิดการสังเคราะห์กรดแอบไซซิกเพิ่มขึ้นหลังจากเริ่มมีการปิดปากใบ และมีผลทำให้เกิดการปิดปากใบเพิ่มขึ้นและยาวนานขึ้น การเคลื่อนย้ายกรดแอบไซซิกจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งต้องอาศัยความแตกต่างของค่า pH ภายในใบ ซึ่งสถานะแล้งทำให้ค่า pH ในไซเลมมีค่าสูงขึ้น จาก 6.3 เป็น 7.2 ส่งผลให้กรดแอบไซซิกในรูป $\text{ABA} \cdot \text{H}$ เกิดการแตกตัวได้ H^+ และ ABA^- ซึ่งไม่สามารถผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าสู่เซลล์ในชั้นมีโซฟิลล์ได้ จึงถูกลำเลียงไปตามแรงดึงจากการคายน้ำไปในไซเลมไปยังเซลล์คุมและชักนำให้ปากใบปิด (สุนทรี ยิ่งชัชวาลย์, 2535)

ค่าการนำไหลของปากใบ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเปิดและปิดของปากใบในการนำก๊าซ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำให้ผ่านเข้าและออกจากใบพืช สามารถวัดค่าโดยใช้เครื่อง Porometer หรือ Gas exchange analyzer ที่จะวัดความเร็วในการนำก๊าซเข้าและออกจากปากใบ มีหน่วยเป็น $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ หรือ $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ซึ่งแสดงปริมาณการแลกเปลี่ยนก๊าซต่อตารางเมตรของใบต่อหน่วยเวลา ค่าการนำไหลของปากใบที่สูงแสดงถึงการเปิดปากใบกว้างซึ่งทำให้มีอัตราการคายน้ำสูงและมีการนำคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ใบมากขึ้น ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์ด้วยแสง เมื่อพืชได้รับความแล้ง ค่าการนำไหลของปากใบจะลดลง แสดงถึงการปิดปากใบเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำมากเกินไป นอกจากนี้พืชที่สามารถลดค่าการนำไหลของ

ปากใบได้ในสภาวะแล้งจะช่วยให้พืชรักษาปริมาณน้ำภายในเซลล์และทนทานต่อสภาวะแล้งได้ดีขึ้น (Xiong & Flexas, 2020)

ค่าดัชนีของปากใบ คืออัตราส่วนของจำนวนปากใบต่อจำนวนเซลล์ผิวใบทั้งหมดในพื้นที่เดียวกัน มักคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ ใช้เป็นตัวชี้วัดปริมาณปากใบที่สัมพันธ์กับโครงสร้างเซลล์บนผิวใบ ซึ่งช่วยให้เข้าใจกลไกการทำงานของปากใบพืชในการปรับตัวต่อสภาพแวดล้อม โดยจำนวนของปากใบมีผลต่ออัตราการคายน้ำและการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมักมีค่าดัชนีของปากใบคงที่หรือมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับต้นพืชที่ได้น้ำเพียงพอ เนื่องจากเป็นกลไกที่ช่วยให้พืชสามารถรักษาสมดุลน้ำในสภาวะแล้งได้อย่างก็ตาม พืชบางชนิดมีค่าดัชนีของปากใบเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง เช่น ในต้นฝ้ายพันธุ์ทนแล้ง (LRA-5166) มีการตอบสนองโดยสร้างปากใบเพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนก๊าซ แต่ในขณะเดียวกันปากใบมีการปิดแคบลง และมีขนาดของปากใบลดลงเพื่อลดการสูญเสีย (Dubey, Pandey, Sawant, & Shirke, 2023)

ค่าความหนาแน่นของปากใบ หมายถึงจำนวนปากใบต่อหน่วยพื้นที่ของผิวใบ มีหน่วยเป็น pores/mm² หรือ pores/cm² ความหนาแน่นของปากใบสามารถปรับเปลี่ยนตามสิ่งแวดล้อมได้ โดยความหนาแน่นของปากใบมากจะช่วยให้พืชสามารถคายน้ำและแลกเปลี่ยนก๊าซได้ดี แต่ในสภาวะแล้งพืชบางชนิดอาจปรับลดความหนาแน่นของปากใบเพื่อลดการสูญเสีย (Haworth et al., 2024) เช่น การศึกษาลักษณะของปากใบเมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งของพันธุ์ต้นฝ้าย (*Gossypium hirsutum*) ได้แก่ พันธุ์ฝ้ายที่ไวต่อความแล้ง 'NBRI-67' และพันธุ์ฝ้ายที่ทนแล้งได้ดี 'LRA-5166' พบว่า ความแล้งส่งผลให้ต้นฝ้ายทั้งสองพันธุ์มีค่าดัชนีของปากใบ ความหนาแน่นของปากใบ และค่าการนำไหลของปากใบลดลง เมื่อเทียบกับชุดควบคุม โดยพันธุ์ฝ้ายที่ทนแล้งได้ดีมีค่าดัชนีของปากใบ และความหนาแน่นของปากใบสูงกว่าพันธุ์ฝ้ายที่ไวต่อความแล้ง (Dubey, Pandey, Sawant, & Shirke, 2023) ปัจจุบันมีการศึกษาการปรับปรุงพันธุ์ข้าว (*Oryza sativa* L.) เพื่อให้ใบข้าวมีความหนาแน่นของปากใบต่ำ ช่วยเพิ่มความสามารถให้ต้นข้าวรักษาปริมาณน้ำได้ดีขึ้น เมื่อปลูกข้าวในพื้นที่ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศสูง ต้นข้าวที่มีความหนาแน่นของปากใบต่ำ ทำให้ค่าการนำไหลของปากใบ และอัตราการคายน้ำลดลง ต้นข้าวสามารถเจริญเติบโตในสภาวะแล้งและพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูง (40°C) ได้นานกว่าต้นควบคุม แม้ว่าในบางสภาวะจะมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ลดลง (Caine et al., 2019) อย่างไรก็ตาม การศึกษาในต้นสาหลี่ (*Pyrus* spp.) พบว่าความเครียดจากความแล้ง ส่งผลให้ความหนาแน่นของปากใบเพิ่มขึ้น (Babaei, Sharifani, Darvishzadeh, & Abbaspour, 2021) และ

การศึกษาในต้นกัญชา (*Cannabis sativa* L.) ที่ปลูกในสภาพไร่ เมื่อได้รับความแล้ง พืชมีการปรับตัวโดยการลดขนาดของพื้นที่ใบและขนาดของปากใบ และมีความหนาแน่นของปากใบเพิ่มขึ้น (Haworth et al., 2024) ในทางกลับกัน การศึกษาลักษณะของปากใบในต้นอัลมอนด์ (*Prunus dulcis*) 6 จีโนไทป์ที่ได้รับความแล้งเป็นเวลา 35 วัน พบว่า ไม่มีการตอบสนองทั้งในด้านขนาดหรือความหนาแน่นของปากใบ ดังนั้น ความหนาแน่นของปากใบจึงไม่สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินความสามารถในการต้านทานต่อความแล้งในต้นอัลมอนด์ได้ (Yadollahi, Arzani, Ebadi, Wirthensohn, & Karimi, 2011)

4.1.3 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ

การวัดปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบเป็นการเปรียบเทียบปริมาณน้ำในช่วงเวลาหนึ่งเพื่อบ่งบอกปริมาณน้ำในใบพืชเมื่อพืชขาดน้ำ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ที่สามารถตรวจสอบได้อย่างชัดเจนเนื่องจากการเปรียบเทียบปริมาณน้ำในช่วงเวลาหนึ่งกับใบที่อิ่มตัวด้วยน้ำและใบที่ถูกดึงน้ำออก แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกักเก็บน้ำและการคงสภาพของพืชเมื่อพืชได้รับความเครียดจากความแล้ง ซึ่งสอดคล้องและสัมพันธ์กับการวัดศักยภาพของน้ำในใบพืช (เฉลิมพล แซมเพชร, 2535) เมื่อพืชอยู่ในสภาวะปกติที่มีน้ำเพียงพอ ใบจะมีค่าปริมาณน้ำสัมพัทธ์สูงประมาณ 80-90% บ่งบอกถึงการกักเก็บน้ำอย่างเต็มที่ แต่ในสภาวะแล้ง ปริมาณน้ำในใบลดลงส่งผลให้ค่าปริมาณน้ำสัมพัทธ์ลดลงตามไปด้วย อาจอยู่ในช่วง 40-60% หรือต่ำกว่านั้นในพืชที่ขาดน้ำอย่างรุนแรง ซึ่งค่าปริมาณน้ำสัมพัทธ์ที่ต่ำแสดงถึงความเครียดและการขาดน้ำในระดับที่พืชเริ่มมีการเหี่ยวเกิดขึ้น การตรวจวัดปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบในทางสรีรวิทยาช่วยให้ประเมินความสามารถในการทนทานต่อความแล้งของพืช และการคัดเลือกพันธุ์พืชที่ทนต่อความแล้งโดยพืชที่สามารถรักษาระดับปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบไว้ได้สูงในสภาวะแล้งมักเป็นพันธุ์ที่ทนทานและเหมาะสมกับพื้นที่แล้ง การศึกษาผลของสาร PEG6000 ที่ทำให้เกิดความเครียดจากความแล้งต่อปริมาณ RNA ทั้งหมด (total RNA) ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ และปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบและรากของต้นถั่วลิสง (*Arachis hypogaea*) พบว่า ความเข้มข้นของ PEG6000 ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณ RNA ทั้งหมด ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ และปริมาณคลอโรฟิลล์ภายในใบลดลง แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและชีวเคมีที่สำคัญในต้นถั่วลิสงเมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ความเข้มข้นของ PEG6000 แตกต่างกัน และยังสามารถใช้พารามิเตอร์เหล่านี้ในการคัดเลือกระดับความทนแล้งของต้นถั่วลิสงพันธุ์อื่นได้ (Meher, Shivakrishna, Ashok Reddy, & Manohar Rao, 2018) นอกจากนี้ มีการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยา โดยวัดความสูงลำต้น น้ำหนักสดของส่วนเหนือดิน ปริมาณน้ำในเนื้อเยื่อใบ และปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ เพื่อเป็นดัชนี

ในการคัดเลือกพันธุ์ต้นฝรั่งทนแล้ง (*Psidium guajava*) 4 พันธุ์ปลูก ได้แก่ ‘ซันกเนื้อแดง’ ‘พื้นเมืองเพชรบูรณ์’ ‘KU Guard no.1’ และ ‘Yellow Bhutan’ พบว่า ฝรั่งพันธุ์ ‘พื้นเมืองเพชรบูรณ์’ มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาน้อยที่สุดเมื่ออยู่ในสภาวะแล้ง ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบมีความใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่มีการให้น้ำปกติ แสดงให้เห็นถึงความทนทานต่อสภาวะแล้งได้ดีที่สุด (นมัสการ เสงี่ยมศรี และอุณารุจ บุญประกอบ, 2563)

4.1.4 สภาวะแล้งยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสงภายในคลอโรพลาสต์

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เป็นกระบวนการที่ไวต่อสภาวะแล้ง เนื่องจากในสภาวะแล้งพืชจะมีการปรับตัวโดยการปิดปากใบลงเพื่อลดการคายน้ำและช่วยรักษาปริมาณน้ำในพืช ปากใบเป็นโครงสร้างสำคัญในการคายน้ำและการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศเข้ามาสู่ใบพืช ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การที่ปากใบของพืชปิดลง ทำให้พืชขาดสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ส่งผลให้อัตราการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ของใบพืชและของพืชทั้งต้นลดลง (ลิลลี่ กาวิตะ และคณะ, 2560) ในการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และการขนส่งอิเล็กตรอน (electron transport chain) ในใบของต้นแอปเปิล (*Malus domestica* Borkn. cv. Red Fuji) โดยการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงด้วยคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ และศึกษาค่าการนำไหลของปากใบ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างเซลล์ อัตราการคายน้ำ โปรตีน D1 การสะสมของอนุมูลอิสระ และกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ พบว่า ในสภาวะที่พืชได้รับความเครียดจากความแล้ง พืชมีการปิดปากใบทำให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างเซลล์ในช่วงแรกที่ได้รับสภาวะแล้งลดลง ซึ่งส่งผลทำให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง และหลังจากที่พืชได้รับสภาวะแล้งเป็นเวลา 5 วัน ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและคงที่หลังจากได้รับสภาวะแล้งเป็นเวลา 14 วัน แต่การสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชยังคงลดลงต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากการสะสมของสารอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นมีผลทำลายโครงสร้างของโปรตีน ทำให้ปริมาณของโปรตีน D1 ซึ่งมีหน้าที่สำคัญในการขนส่งอิเล็กตรอน ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงจากพลาสโตควิโนน เอ (plastoquinone A; PQ-A) ไปยังพลาสโตควิโนน บี (plastoquinone B; PQ-B) ลดลง (Wang et al., 2018)

การใช้คลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ในการประเมินสภาพเครียดในพืช เป็นหนึ่งในวิธีการศึกษาด้านสรีรวิทยาที่ได้รับความนิยมในการประเมินสภาพเครียดของพืช โดยศึกษาจากการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาแสงของพืช (light reaction) ในระบบแสง II (PSII) เมื่อคลอโรฟิลล์ ซึ่งเป็น

รงควัตถุที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุล และเกิดการเปลี่ยนสภาพจากสภาวะพื้น (ground state) เข้าสู่สภาวะกระตุ้นแบบซิงเกิลต (singlet excited state) ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เสถียร และจะอยู่ในสภาพดังกล่าวเป็นระยะเวลาสั้น ๆ แล้วกลับเข้าสู่สภาวะพื้น โดยปลดปล่อยพลังงานออกมา 3 รูปแบบ คือ 1) พลังงานที่นำไปใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง (photochemistry) 2) พลังงานในรูปของความร้อน (heat) ซึ่งไม่มีประโยชน์ต่อการสังเคราะห์ด้วยแสง และ 3) พลังงานในรูปของการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ (chlorophyll fluorescence) ซึ่งเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่าเดิม และมีพลังงานที่ต่ำกว่า ทั้ง 3 กระบวนการจะเกิดแบบแข่งขันกัน เช่น หากมีการเพิ่มประสิทธิภาพของพลังงานที่นำไปใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง จะทำให้การปลดปล่อยพลังงานความร้อน และการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์เกิดได้ลดลง (นงลักษณ์ พยัคฆศิรินาวัน, อุบล ชินวัง, และสุวัฒน์ ธีระพงษ์นกร, 2557; ปิยะดา ธีระกุลพิศุทธิ์, 2559) ลักษณะการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์ของใบพืช สามารถวัดได้จากเครื่องคลอโรฟิลล์ฟลูออโรมิเตอร์ โดยนำใบพืชที่ต้องการศึกษามาทำให้ได้รับความมืดเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที (dark-adapted leaf) แล้ววัดค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ โดยให้แสงที่มีความเข้มต่ำมากประมาณ $0.1 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ การวัดในสภาพดังกล่าวจะทำให้คลอโรฟิลล์มีการสูญเสียพลังงานในรูปของการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ออกมาได้ต่ำสุด (minimum fluorescence; F_0) ทันทีที่ใบได้รับพลังงานแสงในปริมาณต่ำ ๆ เพียงพอที่รงควัตถุเก็บเกี่ยวแสงทั้งหมดจะรับแสงแล้วเกิดการถ่ายทอดพลังงานเข้าสู่ศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II พลังงานเกือบทั้งหมดจะถูกใช้ในการผลักดันให้เกิดการถ่ายทอดอิเล็กตรอน การสูญเสียพลังงานในรูปของฟลูออเรสเซนซ์จึงมีค่าต่ำมาก เนื่องจากพลังงานแสงทั้งหมดที่คลอโรฟิลล์ดูดกลืนเข้าไปถูกส่งต่อไปยังศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II ทั้งหมดอยู่ในสภาพเปิด (open system) เพราะในขณะที่ใบอยู่ในที่มืด ศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดที่ได้รับพลังงานจากรงควัตถุจะเก็บเกี่ยวพลังงานแสง จะเสียอิเล็กตรอนออกไปให้ quinone A (Q_A) ต่อด้วย quinone B (Q_B) ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกไปจากระบบแสง ส่วนศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II ที่เสียอิเล็กตรอนไปแล้ว จะได้รับอิเล็กตรอนมาจากการแตกตัวของน้ำ และพร้อมที่จะรับพลังงานจากรงควัตถุเก็บเกี่ยวแสงเมื่อได้รับแสงในรอบถัดไป หลังจากที่ได้ค่า F_0 แล้ว เครื่องคลอโรฟิลล์ฟลูออโรมิเตอร์จะปล่อยแสงสีขาวที่มีความเข้มแสงสูงมากเป็นระยะเวลาสั้น ๆ ทำให้การปลดปล่อยฟลูออเรสเซนซ์มีค่าสูงสุด (maximum fluorescence; F_m) เนื่องจากอัตราการถ่ายทอดพลังงานจากรงควัตถุเก็บเกี่ยวแสงเข้าสู่ศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II และอัตราการ

ถ่ายทอดพลังงานจากศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II ให้ Q_A ไม่สัมพันธ์กัน รังควัตถุเก็บเกี่ยวแสงไม่สามารถถ่ายทอดพลังงานเข้าสู่ศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II ได้ เนื่องจากศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II อยู่ในสภาพปิด (closed system) ทั้งหมด ใบพืชจึงปล่อยฟลูออเรสเซนซ์ออกมาได้สูงสุด ความแตกต่างระหว่างค่า F_m และ F_0 (variable fluorescence; F_v) ซึ่งอัตราส่วนของ F_v/F_m แสดงถึงความสามารถของระบบแสง II ในการรับพลังงานแสง และถ่ายทอดไปสู่ระบบแสง I ซึ่งค่านี้มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเคมีของการใช้แสงในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (quantum yield) (สุกัญญา สุวรรณระ, 2543) นอกจากนี้ เครื่องคลอโรฟิลล์ฟลูออโรมิเตอร์ยังสามารถวัดพารามิเตอร์อื่น ๆ เพื่อบ่งบอกประสิทธิภาพการทำงานของกิจกรรมในระบบแสง II ที่จำเพาะได้ (ตารางที่ 1)

ตาราง 1 ตัวอย่างคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์พารามิเตอร์

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
F_v/F_m (The maximum quantum efficiency of PSII photochemistry)	ใช้วัดประสิทธิภาพสูงสุดที่พืชสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมีผ่านระบบแสง II ค่า F_v/F_m ในพืชที่ไม่มีความเครียดมักมีค่าอยู่ระหว่าง 0.78-0.85 (หรือ 78-85%) ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบแสง II ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ค่า F_v/F_m ที่ต่ำกว่า 0.75 บ่งบอกว่าพืชประสบกับปัญหาความเสียหายจากความเครียดอย่างรุนแรง
P_i (Performance index)	ค่าที่บ่งบอกความสามารถในการรับโฟตอนของระบบแสง II เพื่อนำไปใช้ในการกระตุ้นให้เกิดการขนส่งอิเล็กตรอนออกจากศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยา เพื่อส่งต่อไปยัง Q_B โดยค่า P_i สูง บ่งบอกถึงการสังเคราะห์ด้วยแสงมีประสิทธิภาพดี และพืชมีสุขภาพแข็งแรง ค่า P_i ต่ำ บ่งบอกถึงผลกระทบจากความเครียด เช่น การขาดน้ำ
$1-V_j$ (Probability that a PSII trapped electron is transferred from Q_A to Q_B)	ค่าที่สะท้อนถึงแนวโน้มจะเป็นของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากระบบแสง II ไปยังตัวรับอิเล็กตรอนถัดไป ค่า $1-V_j$ สูง (ใกล้ 1) แสดงว่าระบบแสง II ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่มีอุปสรรคในการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ค่า $1-V_j$ ต่ำ (ใกล้ 0) บ่งบอกถึงข้อจำกัดในการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ซึ่งอาจเกิดจากความเสียหายหรือความเครียดในพืช เช่น ความเครียดจากความแล้ง หรือความเครียดจากความเค็ม
ABS/RC (Absorption flux per	อัตราส่วนที่แสดงถึงความเข้มข้นของพลังงานแสงที่ถูกดูดซับโดยคลอโรฟิลล์ต่อจำนวนศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II ค่า

active reaction center of PSII)	ABS/RC ต่ำ บ่งบอกถึงพลังงานแสงที่ดูดซับสมดุลกับจำนวนศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยา และระบบแสง II ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่า ABS/RC สูง อาจเกิดจากการลดลงของศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาที่ทำงานได้ เนื่องจากพืชเกิดความเครียด พลังงานแสงที่ดูดซับส่วนใหญ่ไม่ถูกนำไปใช้ในกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอน อาจเกิดการสะสมพลังงานส่วนเกินที่เป็นอันตราย
Dlo/RC (Dissipated energy flux per active reaction center of PSII)	ปริมาณพลังงานแสงที่สูญเสียไปในรูปของการเรืองแสง ความร้อน ที่ไม่ก่อให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในระบบแสง II ต่อจำนวนศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยา หากค่า Dlo/RC สูงในสภาพแวดล้อมที่มีความเครียด เช่น ความแล้ง ความเค็ม หรือความเข้มข้นแสงมากเกินไป แสดงว่าศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II บางส่วนไม่สามารถใช้พลังงานแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เกิดความเสียหายของระบบแสง II ค่า Dlo/RC ต่ำ บ่งบอกว่าพืชสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนหรือการเรืองแสงน้อย ระบบแสง II ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
TRo/RC (Trapped energy flux per active reaction center of PSII)	ปริมาณพลังงานที่ถูกดักจับได้ (trapped energy) และถูกใช้ในกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในระบบแสง II ต่อจำนวนศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยา ค่า TRo/RC สูงในพืชที่แข็งแรง บ่งบอกว่าศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาสามารถดักจับพลังงานได้ดีและใช้สำหรับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่า TRo/RC ต่ำ บ่งบอกว่าพลังงานแสงที่ดักจับได้ลดลง อาจเกิดจากความเสียหายหรือข้อจำกัดในการทำงานของศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาในระบบแสง II เช่น การที่พืชอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม
ETo/RC (Electron transport flux per active reaction center of PSII)	ปริมาณพลังงานเฉลี่ยที่ถูกใช้สำหรับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนต่อจำนวนศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาในระบบแสง II ค่า ETo/RC สูง บ่งบอกถึงการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในระบบแสง II ที่มีประสิทธิภาพ กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชทำงานได้ดี ไม่มีความเครียดรุนแรง ค่า ETo/RC ต่ำ บ่งบอกถึงความผิดปกติในกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอน อาจเกิดจากการเสียสมดุลของระบบ เช่น การลดลงของจำนวนศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาที่ทำงานได้ หรือผลกระทบจากความเครียดในพืช

ที่มา : Kalaji & Guo (2008)

ดังนั้น การวัดค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ด้วยเครื่องคลอโรฟิลล์ฟลูออโรมิเตอร์ จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง นอกจากนี้ ยังเป็นการวัดที่ไม่ได้รับกวนหรือทำลายกิจกรรมการทำงานของระบบแสง II ในพืช ซึ่งปัจจุบันมีการนำเทคนิคการวัดนี้มาใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืชต่อสภาพเครียดของสิ่งแวดล้อม เพื่อติดตามว่าพืชมีความบกพร่องหรือการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเมแทบอลิซึมในระหว่างการเพาะปลูกหรือไม่ (Murchie & Lawson, 2013)

4.1.5 ความเครียดจากความแล้งต่อปริมาณรงควัตถุที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

ในพืชชั้นสูง ออร์แกเนลล์ภายในเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง คือ คลอโรพลาสต์ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยรงควัตถุที่มีหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงเพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์ ATP และ NADPH ที่จะถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์น้ำตาลจากการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป รงควัตถุหลักที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ และ คลอโรฟิลล์ บี ซึ่งการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์สามารถบ่งบอกถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงภายในพืชได้ โดยพบว่าเมื่อพืชได้รับความเครียดจากความแล้งจะทำให้ปริมาณรงควัตถุภายในใบพืชลดลง เนื่องจากความเครียดจากความแล้งส่งเสริมการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสลายคลอโรฟิลล์ ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง ซึ่งจะส่งผลให้การสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชลดลง และส่งผลทำให้พืชมีการเจริญเติบโตลดลงในที่สุด พืชจึงมีการสร้างแคโรทีนอยด์ ซึ่งเป็นรงควัตถุเสริม เพื่อทำหน้าที่รับและส่งพลังงานแสงแทนคลอโรฟิลล์ที่สลายไป (Farooq, Wahid, Kobayashi, Fujita, & Basra, 2009) การศึกษาผลกระทบของความเครียดจากความแล้งต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบของต้นข้าวโพด (*Zea mays* L.) โดยทำการทดลองในข้าวโพด 10 พันธุ์ปลูก พบว่าความเครียดจากความแล้งทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบของข้าวโพดลดลง และข้าวโพดพันธุ์ปลูกที่ 6 (BC678) และ 8 (BC404) มีความสามารถในการต้านทานต่อความเครียดจากความแล้ง เนื่องจากมีปริมาณคลอโรฟิลล์และผลผลิตสูงสุด (Majid & Roza, 2012)

4.1.6 บทบาทของสาร compatible solutes ที่พบในพืช

สาร compatible solutes เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กที่พืชสร้างขึ้นมาในช่วงที่ได้รับความเครียดออสโมติก (osmotic stress) ในสภาวะที่ดินขาดน้ำ สารละลายภายในดินจะมีตัวถูกละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า ทำให้บริเวณโดยรอบรากพืชมีค่า Ψ เป็นลบมากขึ้น พืชจะออสโมซิสน้ำเข้าไปได้ก็ต่อเมื่อมีค่า Ψ ภายในพืชต่ำกว่าค่า Ψ ของสารละลายโดยรอบรากพืช

การปรับค่าออสโมติก (osmotic adjustment) หรือการที่เซลล์สะสมสารบางชนิด ได้แก่ น้ำตาล ซูโครส กรดแอมิโน โพรลีน โพลีเอมีน ไกลซีนเบตาอิน และน้ำตาลแอลกอฮอล์ เช่น ซอร์บิทอล และ แมนนิทอล จะช่วยทำให้ค่า Ψ_{π} เป็นลบมากขึ้น และมีค่า Ψ ของสารละลายภายในพืชลดลงได้ ซึ่งสารสะสมเหล่านี้ไม่เป็นพิษต่อพืชและไม่มีผลกระทบต่อเมแทบอลิซึมของพืช แต่ช่วยทำให้พืชมีค่า Ψ ที่ลดลง ประมาณ 0.2-0.8 MPa ในการปรับค่าออสโมติกเป็นการเพิ่มปริมาณสารทั้งหมดต่อเซลล์โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเซลล์ มีผลควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำในพืช แต่ออสโมซิส แต่ไม่มีผลไปรบกวนการทำงานของเอนไซม์ พืชที่สามารถปรับค่าออสโมติกได้จึงสามารถรักษาแรงเต่งที่ Ψ ต่ำได้ดีกว่าพืชที่ไม่สามารถปรับค่าออสโมติกได้ การปรับค่าออสโมติกด้วยการสะสมสาร compatible solutes จึงช่วยเพิ่มความทนทานให้แก่พืชในการต้านทานต่อความแล้งได้ (นวรรัตน์ อุดมประเสริฐ, 2558; วิไลภรณ์ บุญญกิจจินดา, 2556) การศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งต่อผลผลิต ปริมาณโพรลีน และปริมาณคลอโรฟิลล์ในต้นถั่วลูกไก่ (*Cicer arietinum* L.) 3 พันธุ์ปลูก ได้แก่ 'Bivaniej', 'ILC482' และ 'Pirouz' โดยศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งในแต่ละระยะของการเจริญเติบโต ได้แก่ ระยะที่พืชมีการเจริญทางกิ่งใบ (vegetative stage) ระยะที่พืชมีการเจริญของดอกเต็มที (anthesis stage) และระยะที่พืชมีการเจริญทางกิ่งใบกับระยะที่พืชมีการเจริญของดอกเต็มที พบว่าความเครียดจากความแล้งทำให้พืชมีการสะสมปริมาณโพรลีนเพิ่มขึ้นทั้งสองระยะการเจริญเติบโต และความเครียดจากความแล้งในระดับที่รุนแรง ทำให้พืชที่มีการออกดอกเต็มทีที่มีปริมาณโพรลีนมากกว่า ดังนั้น การเพิ่มปริมาณโพรลีนขึ้นอยู่กับอายุพืช อายุใบ ตำแหน่งใบหรือส่วนของใบด้วย (Mafakheri, Siosemardeh, Bahramnejad, Struik, & Sohrabi, 2010) การศึกษาความเครียดจากความแล้งชักนำให้เกิดการสะสมของน้ำตาลที่ละลายน้ำและโพรลีน ในต้นข้าวโพด 2 พันธุ์ (*Zea mays* L.) ได้แก่ var.704 และ var.301 ที่ได้รับการจำลองสภาวะแล้งโดยใช้ PEG6000 ที่ความเข้มข้น 10%, 20%, 30% และ 40% (w/v) PEG6000 พบว่าในสภาวะที่พืชได้รับความเครียดจากความแล้ง ต้นข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์มีการสะสมปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น และมีปริมาณของแป้งลดลง แสดงให้เห็นว่าน้ำตาลมีบทบาทสำคัญในการปรับค่าออสโมติกในข้าวโพด นอกจากนี้ พืชมีการสะสมปริมาณโพรลีนเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งในระดับที่สูงขึ้น (Mohammadkhani & Heidari, 2008)

4.1.7 ความเครียดจากความแล้งชักนำให้เกิดความเครียดออกซิเดชัน

เมื่อพืชได้รับสภาวะแล้ง ความเครียดจากความแล้งจะชักนำให้เกิดการสร้าง reactive oxygen species (ROS) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ มีศักยภาพในการออกซิไดซ์สารอื่น โดยเฉพาะสารสำคัญในกระบวนการเมแทบอลิซึมของพืช ทำให้สารเหล่านั้น

สูญเสียสภาพและโครงสร้างไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ตามปกติ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณ และช่วยรักษาดุลยภาพของไอออนหรือสารละลายต่าง ๆ ภายในเซลล์ โดย ROS สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) โมเลกุลที่เป็นอนุมูลอิสระ เช่น superoxide anion ($O_2^{\cdot-}$) hydroxyl radical ($\cdot OH$) peroxy radical ($ROO\cdot$) alkoxy radical ($RO\cdot$) และ hydroperoxy radical ($HO_2^{\cdot-}$) 2) โมเลกุลที่ไม่ได้เป็นอนุมูลอิสระ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) singlet oxygen (1O_2) และ organic hydroperoxide ($ROOH\cdot$) (Hasanuzzaman et al., 2019; Mehla, Sindhi, Josula, Bisht, & Wani, 2017) หากมีการสร้างและการสะสม ROS ภายในเซลล์ที่มากเกินไป จะส่งผลให้พืชเกิดความเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (lipid peroxidation) เกิดการสลายตัวของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เซลล์เกิดการสูญเสียสภาพในที่สุด เกิดการทำลายกรดนิวคลีอิกและโปรตีน และเปลี่ยนแปลงเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต เกิดการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ และการเปลี่ยนแปลงระดับการแสดงออกของยีน ทำให้เซลล์พืชทำงานผิดปกติและตายในที่สุด (Osakabe, Osakabe, Shinozaki, & Tran, 2014) การศึกษาความเครียดจากความแล้งทำให้เกิดความเครียดออกซิเดชัน และกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นในการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าว (*Oryza sativa* L.) พบว่า เมื่อต้นกล้าข้าวที่ได้รับความเครียดจากความแล้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีปริมาณของ superoxide anion เพิ่มขึ้น ระดับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณของโปรตีนที่ละลายน้ำ ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ ascorbic acid ลดลง นอกจากนี้ ความเข้มข้นของ glutathione reductase (GSH) จะลดลงเฉพาะเมื่อเกิดความเครียดจากความแล้งที่รุนแรงเท่านั้น กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) และเอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX) เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตามระดับความเครียดจากความแล้งที่เพิ่มขึ้น แต่กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ catalase (CAT) ลดลง พืชที่เกิดความเครียดจากความแล้งในระดับต่ำจะมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ guaiacol peroxidase (GPX) และ chloroplastic ascorbate peroxidase (c-APX) สูงกว่าพืชที่ไม่ได้รับความแล้ง แต่ลดลงเมื่อความเครียดจากความแล้งในระดับที่เพิ่มขึ้น กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ ascorbate เช่น monodehydroascorbate reductase (MDHAR), dehydroascorbate reductase (DHAR) และ glutathione reductase (GR) มีปริมาณสูงกว่าในพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง แสดงให้เห็นว่าความเครียดจากความแล้งทำให้เกิดความเครียดออกซิเดชันในต้นข้าว นอกจากกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) ยังมีเอนไซม์ในวัฏจักร ascorbate-glutathione ที่มีบทบาทสำคัญในระบบต่อต้านอนุมูลอิสระภายใต้ความเครียดจากความแล้ง (Sharma & Dubey, 2005)

4.1.8 กลไกการเกิดมาลอนไดอัลดีไฮด์ในพืช

ความเครียดจากความแห้ง ทำให้เกิดการสะสมของสารกลุ่ม ROS ที่มากเกินไป ชักนำให้เกิดความเครียดออกซิเดชัน ซึ่งความเสียหายที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันสามารถวัดได้จากปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งปฏิกิริยานี้เป็นกระบวนการที่อนุมูลอิสระเข้าไปทำลายไขมันที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบ ส่งผลให้ไขมันที่เป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์เกิดความเสียหาย นอกจากนี้ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ยังบ่งบอกถึงความรุนแรงที่เกิดจากความเครียดออกซิเดชันได้อีกด้วย (Moller, Jensen, & Hansson, 2007) จากการศึกษาพบว่าความเครียดจากความแห้งส่งผลให้ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ในต้นถั่วเหลือง (*Glycine max* L. Merrill) (Wang, Wu, Zhou, Wang, & Song, 2022) ชะเอมเทศ (*Glycyrrhiza glabra* L.) (Hosseini, Samsampour, Ebrahimi, Abadía, & Khanahmadi, 2018) ฝ้าย (*Gossypium herbaceum* L.) (Yi et al., 2016) คำฝอย (*Carthamus tinctorius* L.) (Hojati, Modarres-Sanavy, Karimi, & Ghanati, 2011) และส้ม (*Citrus* spp.) (Hussain et al., 2018) เพิ่มขึ้น เมื่อพืชได้รับความเครียดจากความแห้งเป็นเวลานานหรือมีระดับความรุนแรงเพิ่มขึ้น เกิดการสะสมของ ROS เพิ่มขึ้น เยื่อหุ้มเซลล์เกิดความเสียหาย ทำให้ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์เพิ่มขึ้นด้วย พืชที่ทนแล้งได้ดีจะมีระบบการป้องกันเพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้น เช่น การสะสมเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระหรือสารต้านอนุมูลอิสระ ทำให้ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่วนพืชที่ไวต่อความแห้งจะมีระบบป้องกัน ROS ที่มีประสิทธิภาพต่ำ ทำให้เกิดการสะสมปริมาณของมาลอนไดอัลดีไฮด์ในระดับที่สูงกว่าเมื่อได้รับความเครียดจากความแห้ง

4.1.9 การรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์

ความเครียดจากความแห้งที่รุนแรงสามารถชักนำให้พืชเกิดความเครียดออกซิเดชันได้ เมื่อพืชมีการสะสมของสารอนุมูลอิสระที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดความเสียหายของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์สูญเสียความสามารถในการเป็นเยื่อเลือกผ่าน และเกิดการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์จากภายในเซลล์ การวัดการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์จึงบ่งบอกสภาพความเสียหายของเยื่อหุ้มเซลล์ภายในพืชที่ได้รับความเครียดจากความแห้งได้ ซึ่งพบว่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ภายในใบเพิ่มขึ้นตามระดับความรุนแรงของความเครียดจากความแห้งที่พืชได้รับ (คงเอก ศิริงาม, 2564) ในการศึกษาการประเมินระดับมาลอนไดอัลดีไฮด์ และการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ของใบอ้อย (*Saccharum officinarum* L.) 10 พันธุ์ ภายใต้สภาวะขาดน้ำ พบว่า เมื่ออ้อยขาดน้ำทำให้ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบลดลง และปริมาณการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออ้อยขาดน้ำ นอกจากนี้ปริมาณการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ที่ต่ำของ

อ้อยพันธุ์ 'LF82-2122', 'K86-161' และ 'Khon Kaen 3' แสดงให้เห็นว่าอ้อยทั้ง 3 พันธุ์นั้นมีความคงทนของเยื่อหุ้มเซลล์สูงที่สุดเมื่อต้นอ้อยได้รับความแล้ง การร่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์สามารถใช้ในการประเมินความเสียหายของเยื่อหุ้มเซลล์ที่เกิดจากความเครียดจากความแล้ง นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกพันธุ์อ้อยทนแล้งได้อีกด้วย (นิศาชล แจ่มพรมมา และคณะ, 2555) จากการศึกษาพบว่าความเครียดจากความแล้งทำให้ปริมาณของมาลอนไดอัลดีไฮด์และการร่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ในต้นบักวีท (*Fagopyrum tataricum* L.) (Wan et al., 2023) ผักโขม (*Amaranthus tricolor*) (Sarker & Oba, 2018) หญ้าหวาน (*Stevia rebaudiana*) (Hajihashemi & Sofo, 2018) และแบล็คเบอร์รี่ (*Rubus fruticosus* cv. 'Kiowa') (Zhang, Yang, Wu, & Li, 2017) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ความเครียดจากความแล้งในระดับรุนแรงส่งผลให้จีโนไทป์ของต้นงา (*Sesamum indicum* L.) ที่สามารถทนแล้งได้ดี มีปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ และการร่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์น้อยกว่าจีโนไทป์ของต้นงาที่ไวต่อความแล้ง (Bagheri, Kazemitabar, Dehestani, & Mehrabanjoubani, 2023)

4.1.10 ระบบต่อต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant defense system)

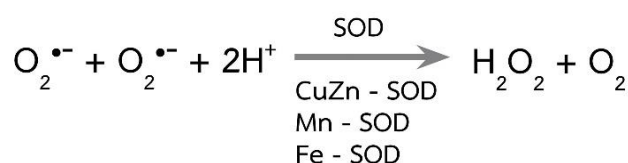
ระบบต่อต้านอนุมูลอิสระทำหน้าที่ควบคุมและกำจัดปริมาณ ROS ภายในเซลล์ที่มากกว่าระดับปกติ เพื่อให้เกิดภาวะสมดุลระหว่างการเกิด ROS กับกลไกการทำลาย ROS ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม และทำหน้าที่ส่งสัญญาณภายในพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเกิด ROS ในเซลล์พืชเมื่อพืชได้รับความเครียดจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม พืชจะมีการควบคุมปริมาณ ROS เกิดขึ้น โดยใช้กระบวนการทำงานของสารต้านออกซิเดชันที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ เพื่อลดเขยอิเล็กตรอนส่วนที่ขาดหายไป เรียกว่า “สารต้านอนุมูลอิสระ” (Hasanuzzaman et al., 2020) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1) สารต้านอนุมูลอิสระในรูปของเอนไซม์ (enzymatic antioxidants) เช่น เอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) เอนไซม์ glutathione peroxidase (GHS) เอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX) และเอนไซม์ catalase (CAT)

2) สารต้านอนุมูลอิสระที่ไม่ได้อยู่ในรูปของเอนไซม์ (non-enzymatic antioxidants) เช่น วิตามินซี วิตามินอี กลูตาไธโอน แคโรทีนอยด์ ฟลาโวนอยด์ และสารประกอบฟีนอลิก

เอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) (EC 1.15.1.1) เป็นเอนไซม์ในกลุ่ม oxidoreductase ที่เป็นโปรตีนโมเลกุลขนาดเล็ก ประกอบด้วยกรดอะมิโน 153 ตัว ทำหน้าที่สลาย superoxide anion ($O_2^{\cdot-}$) ให้เป็น hydrogen peroxide (H_2O_2) ซึ่งเอนไซม์นี้มี 3 ไอโซไซม์ จำแนกตามชนิดของโลหะที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ไอโซไซม์แบบที่ 1) Fe-SOD พบอยู่ในคลอโรพลาสต์

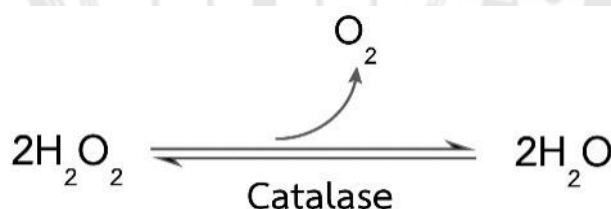
ไอโซไซม์แบบที่ 2) Mn-SOD พบอยู่ในไมโทคอนเดรีย ไอโซไซม์แบบที่ 3) Cu/Zn-SOD พบอยู่ในไซโทซอล คลอโรพลาสต์ ไมโทคอนเดรีย และเพอรอกซิโซม เนื่องจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนอนุมูลอิสระ $O_2^{\bullet -}$ ให้ได้ H_2O_2 เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ดังนั้น โคแฟกเตอร์ของ SOD จึงเป็นโลหะที่มีเวเลนซ์ 2 ค่า คือ เหล็ก แมงกานีส หรือทองแดง ขึ้นอยู่กับว่าเป็น SOD ไอโซไซม์แบบใด แต่ทั้งสามธาตุมีได้ 2 รูป คือ รูปออกซิไดส์ (Fe^{3+} Mn^{3+} หรือ Cu^{2+}) และรูปรีดิวซ์ (Fe^{2+} Mn^{2+} หรือ Cu^+) (ภาพประกอบ 4)



ภาพประกอบ 4 กลไกการกำจัด $O_2^{\bullet -}$ ของเอนไซม์ superoxide dismutase (SOD)

ที่มา : <https://antioxidantsgroup.wordpress.com/2013/07/12/antioxidant-defense-mechanisms-ii-enzymatic-mechanisms/>

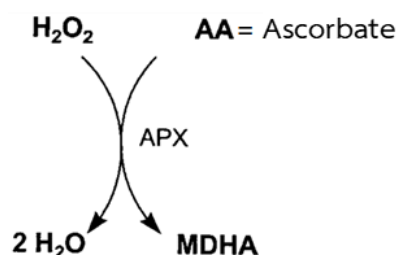
เอนไซม์ catalase (CAT) (EC 1.11.1.6) เป็นเอนไซม์ในกลุ่ม oxidoreductase มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยน H_2O_2 ที่มีความเป็นพิษต่อพืช ให้กลายเป็นน้ำ (H_2O) กับออกซิเจน (O_2) (ภาพประกอบ 5)



ภาพประกอบ 5 กลไกการกำจัด H_2O_2 ของเอนไซม์ catalase (CAT)

ที่มา : ยงยุทธ โสภธสภ. (2559)

เอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX) (EC 1.11.1.1) เป็นเอนไซม์ในกลุ่ม oxidoreductase ที่มีบทบาทสำคัญในการเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของ H_2O_2 โดยใช้ ascorbate เป็นตัวให้อิเล็กตรอนจำเพาะ (specific electron donor) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ (H_2O) กับ monodehydroascorbate (MDHA) (ภาพประกอบ 6)



ภาพประกอบ 6 กลไกการกำจัด H_2O_2 ของเอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX)

ที่มา : Caverzan et al. (2012)

จากการศึกษากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในต้นสตอเบอรี่ (*Fragaria x ananassa* Duch.) 2 พันธุ์ปลูกที่มีการปลูกในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ 'Camarosa' และ 'Gaviota' พบว่า ต้นสตอเบอรี่พันธุ์ 'Camarosa' สามารถต้านทานต่อความแล้งได้ดีกว่าเมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งระดับรุนแรง เนื่องจากมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ เอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) เอนไซม์ catalase (CAT) และเอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX) ปริมาณฟีนอลิก และปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ต้นสตอเบอรี่พันธุ์ 'Gaviota' มีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระที่น้อยกว่าทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และการร่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น ความสามารถในการทนแล้งจึงต่ำกว่า (Zahedi, Hosseini, Fahadi Hoveizeh, Kadkhodaei, & Vaculík, 2023) เช่นเดียวกับการศึกษาในต้นคาโนลา (*Brassica napus* L.) 2 พันธุ์ปลูก ได้แก่ 'Ks7' ที่ไวต่อความแล้ง และ 'NIMA' ที่ทนแล้งได้ดี พบว่า ต้นคาโนลาพันธุ์ 'NIMA' มีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้นภายใต้ความเครียดจากความแล้ง จึงสามารถต้านทานต่อความเครียดจากความแล้งได้ดีกว่า (Khodabin, Tahmasebi-Sarvestani, Rad, & Modarres-Sanavy, 2020) และจากการศึกษาในต้นแตงโม (*Citrullus lunatus* Thunb.) (Rouen, Baghizadeh, & Roghami, 2023) และต้นตำบักขจร (*Artemisia dracunculus* L.) (Mumivand, Ebrahimi, Morshedloo, & Shayganfar, 2021) พบว่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ เอนไซม์ catalase (CAT) เอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX) และเอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) เพิ่มขึ้น เพื่อตอบสนองต่อความเครียดจากความแล้ง อย่างไรก็ตาม กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในใบของต้นแอปเปิล (*Malus domestica* Borkh.) ได้แก่ เอนไซม์ catalase (CAT) เอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) และเอนไซม์ peroxidase (POD) เพิ่มขึ้น แต่เอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX) ในใบแอปเปิลที่ได้รับความเครียดจากความแล้งลดลง (Wang et al., 2018)

4.2 ความต้านทานต่อความเครียดจากความแล้ง

ความต้านทานต่อความแล้งเป็นความสามารถในการปรับตัวของพืช ซึ่งกลไกความต้านทานในการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแล้งแบ่งออกเป็น 4 แบบ ดังนี้ (Taiz & Zeiger, 1991; Zhang et al., 2001)

1) การหนีแล้ง (drought escape) หมายถึง พืชที่มีความสามารถเจริญครบวงจรชีวิต (life cycle) ในช่วงที่พืชได้รับน้ำอย่างเพียงพอก่อนที่จะเกิดสภาวะแล้ง เช่น ต้นอ่อนที่เกิดในฤดูใบไม้ผลิมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ทำให้พืชมีพื้นที่ใบขนาดใหญ่ มีการใช้น้ำมาก ปริมาณน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว และพืชจะตายไปก่อนที่จะถึงช่วงฤดูแล้งหรือเมื่อเข้าสู่ฤดูร้อน ซึ่งกระบวนการในการปรับตัวของพืชภายใต้สภาวะที่พืชได้รับความเครียดจากความแล้ง เช่น การที่พืชมีพื้นที่ใบขนาดใหญ่ หรือพืชมีความสามารถในการพัฒนาพื้นที่ใบได้อย่างรวดเร็ว การมีความสามารถในการเจริญเติบโตทางลำต้น และการออกดอกในระยะเวลายาวนานขึ้น พืชที่มีการปรับตัวเพื่อให้ทนต่อความเครียดจากความแล้งจะช่วยให้พืชสามารถเจริญเติบโตภายใต้สภาพภูมิอากาศที่แปรปรวนได้

2) การเลี่ยงแล้ง (drought avoidance) หมายถึง พืชที่มีความสามารถอยู่รอดได้โดยเพิ่มความสามารถในการดูดซึมน้ำ และลดการสูญเสียน้ำภายในต้นพืช เพื่อรักษาสภาพให้น้ำในปริมาณที่เหมาะสมในเนื้อเยื่อเมื่อได้รับสภาวะแล้ง เช่น การที่พืชปิดปากใบอย่างรวดเร็ว การม้วนของใบเพื่อช่วยเก็บความชื้นภายในใบและช่วยลดการคายน้ำ การจัดเรียงตัวของใบในตำแหน่งที่ขนานกับแสงอาทิตย์เพื่อรับแสงแดดให้น้อยลง การสะสมสารคิวตินเคลือบเป็นไขหนาที่บริเวณผิวใบ และการขยายขนาดของระบบรากให้หนาแน่นและหยั่งลึกลงไปในพื้นที่ที่มีความชื้นเป็นต้น

3) การทนแล้ง (drought tolerance) หมายถึง พืชที่ทนทานต่อสภาวะแล้ง ในกรณีที่พืชได้รับความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพนั้นมาก่อน พืชจะมีกลไกการปรับตัวทางสรีรวิทยาเพื่อให้มีความสามารถในการทนทานต่อความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพต่าง ๆ ได้ เช่น การปรับแรงดันออสโมซิส (osmotic adjustment) เพื่อทำให้ค่าศักย์ของน้ำลดลง โดยการปรับระดับความเข้มข้นของตัวถูกละลายภายในเซลล์ เพื่อทำให้เซลล์เต่ง การยืดหยุ่นของผนังเซลล์ หรือการลดขนาดของเซลล์ เป็นต้น

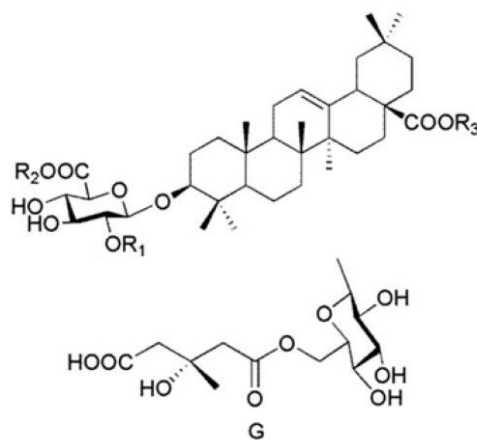
4) การฟื้นตัวจากแล้ง (drought recovery) หมายถึง พืชที่มีความสามารถฟื้นตัวได้ใหม่หลังจากที่ได้รับสภาวะแล้ง ซึ่งอาจทำให้เนื้อเยื่อพืชส่วนใดส่วนหนึ่งเหี่ยวแห้งไป แต่เมื่อพืชได้รับน้ำใหม่ก็สามารถฟื้นตัว แตกกิ่งก้าน แตกหน่อใหม่ และเจริญเติบโตต่อไปได้

5. ปริมาณของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในพืชภายใต้ความเครียดจากความแล้ง

ความเครียดจากความแล้งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อทางด้านลบโดยตรงกับการทำเกษตร ทำให้พื้นดินขาดความชุ่มชื้น พืชขาดน้ำ ทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง ผลผลิตที่ได้มีปริมาณลดลงและมีคุณภาพต่ำ อย่างไรก็ตาม ความเครียดจากความแล้งส่งผลให้พืชสมุนไพรที่ปลูกในเขตภูมิอากาศกึ่งแห้งแล้งมักจะสร้างสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นสูงกว่าพืชชนิดเดียวกันที่ปลูกในเขตภูมิอากาศชุ่มชื้น (Selmar & Kleinwächter, 2013) งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเพิ่มคุณภาพสมุนไพรโดยใช้ความเครียดจากความแล้ง เช่น การศึกษาในต้นเสจ (*Salvia officinalis*) เมื่อต้นเสจได้รับความเครียดจากความแล้งในระดับความรุนแรงปานกลางในระหว่างการเพาะปลูก ความเครียดจากความแล้งจะชักนำไปอ่อน ใบเพสลาด (ใบที่ไม่อ่อนและไม่แก่) และใบแก่ของต้นเสจ มีการสะสมปริมาณสารกลุ่ม monoterpene สูงกว่าใบของต้นเสจที่ได้รับน้ำปกติ (Nowak, Manderscheid, Weigel, Kleinwächter, & Selmar, 2010) และการศึกษาในต้นโดโลไมต์เสจ (*S. dolomitica* Codd) ซึ่งเป็นพืชสมุนไพรที่มีกลิ่นหอม มีฤทธิ์ด้านการอักเสบ ได้มีการศึกษาการเจริญเติบโต กลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยา ปริมาณของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และปริมาณของสารหอมระเหยเมื่อพืชได้รับความเครียดจากความแล้งในระดับความรุนแรงปานกลาง และความเครียดจากความแล้งในระดับรุนแรง โดยทำการเปรียบเทียบกับพืชที่มีการให้น้ำปกติ พบว่า ความเครียดจากความแล้งในระดับความรุนแรงปานกลางทำให้การเจริญเติบโต ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ และค่าการนำไหลปากใบลดลง และความเครียดจากความแล้งในระดับที่รุนแรงทำให้พืชมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ และอัตราการคายน้ำลดลง แต่มีการสังเคราะห์กรดอะมิโนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งจะมีการสังเคราะห์สาร sesquiterpene ซึ่งเป็นสารกลุ่มเทอร์พีนอยด์ (terpenoids) ที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอางและยาเพิ่มขึ้น (Caser et al., 2019) และการศึกษาในชะเอมเทศ (*Glycyrrhiza glabra*) ซึ่งเป็นพืชสมุนไพรที่มีสรรพคุณทางยาช่วยรักษาอาการไอ โดยสารสกัดที่ได้จากลำต้นใต้ดินของชะเอมเทศมักถูกใช้เป็นส่วนผสมทางยาร่วมกับสารสกัดจากใบหนุมานประสานกาย เพื่อใช้ทำเป็นยาแก้ไอ สารออกฤทธิ์ทางเภสัชส่วนใหญ่คือ สารกลุ่มไตรเทอร์พีนอยด์ ซาโปนิน และกลุ่มฟลาโวนอยด์ (นพมาศ สุนทรเจริญนนท์, 2554) จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งต่อการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารในกลุ่มไตรเทอร์พีนอยด์ ซาโปนิน ในลำต้นใต้ดินของชะเอมเทศ โดยใช้สาร PEG6000 ในการจำลองสภาวะแล้ง พบว่า ความเครียดจากความแล้งชักนำให้ระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ squalene synthase (SQS) และ β -amyrin synthase (bAS) เพิ่มขึ้น และมีปริมาณของ

สาร glycyrrhizin ในลำต้นใต้ดินของต้นชะเอมเทศเพิ่มขึ้น (Nasrollahi, Mirzaie-asl, Piri, Nazeri, & Mehrabi, 2014)

การตรวจสอบคุณภาพของพืชสมุนไพรจากปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเป็นกระบวนการวิเคราะห์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของสมุนไพร โดยใช้สารเคมีที่มีอยู่ในพืชนั้น ๆ เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพ (chemical marker) เช่น อัลคาลอยด์ ฟลาโวนอยด์ ซาโปนิน กรดฟีนอลิก เป็นต้น การตรวจคุณภาพนี้ช่วยรับรองว่าสมุนไพรมีสารออกฤทธิ์ในปริมาณที่เหมาะสมและตรงตามมาตรฐาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์สมุนไพร เนื่องจากการศึกษาเกี่ยวกับต้นหนุมานประสานกายจากrayงานก่อนหน้านี้ยังมีการศึกษาไม่มากนัก การตรวจสอบคุณภาพของสมุนไพรจึงประเมินจากปริมาณของกรดฟูมาริก (fumaric acid) ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในพืชและมีอยู่ในยาสมุนไพรเป็นส่วนใหญ่ แต่การตรวจสอบด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากหลักฐานที่พิสูจน์ได้ว่ากรดฟูมาริกเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลักที่มีฤทธิ์ด้านการอักเสบและแก้ปวดในต้นหนุมานประสานกายยังมีการศึกษาไม่มาก ต่อมาได้มีการศึกษาและพบว่าสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ที่สกัดได้จากใบหนุมานประสานกายเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและทางเภสัชวิทยาที่สำคัญ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากลักษณะเฉพาะของสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน เช่น ความมีขั้วสูง โครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน ไม่มีสี และมีปริมาณน้อยในพืช จึงยากที่จะหาปริมาณด้วยเทคนิค high-performance liquid chromatography-UV-visible Spectrophotometry (HPLC-UV) และ high-performance liquid chromatography-evaporative light scattering detector (HPLC-ELSD) (Oliveira, Santos, & Espíndola, 2002; Wang, Gao, Zhu, & Yu, 2007) การศึกษาของ Zhang et al. (2015) จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคการหาปริมาณของสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน 6 ชนิด พร้อมกัน (ภาพประกอบ 7) โดยใช้เทคนิค high performance liquid chromatography - mass spectrometry (HPLC-MS) เนื่องจากมีความไว และมีความจำเพาะที่ดีกว่า เพื่อใช้เป็นสารบ่งชี้คุณภาพของต้นหนุมานประสานกายและเป็นเครื่องมือในการคัดเลือกต้นหนุมานประสานกายที่มีคุณภาพในการนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ต่อไป



- 1 $R_1 = \text{glc}^2\text{-rha}$; $R_2 = \text{H}$; $R_3 = \text{G}$
- 2 $R_1 = \text{glc}^2\text{-rha}$; $R_2 = \text{H}$; $R_3 = \text{glc}^2\text{-xyl}$
- 3 $R_1 = \text{glc}^2\text{-rha}$; $R_2 = \text{H}$; $R_3 = \text{glc}$
- 4 $R_1 = \text{glc}^2\text{-rha}$; $R_2 = \text{H}$; $R_3 = \text{glc}^4\text{-rha}$
- 5 $R_1 = \text{glc}^2\text{-rha}$; $R_2 = \text{H}$; $R_3 = \text{H}$
- 6 $R_1 = R_2 = R_3 = \text{H}$

ภาพประกอบ 7 โครงสร้างทางเคมีของไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน

ทั้ง 6 ชนิด ของต้นหนุมานประสานกาย

ที่มา : Zhang et al. (2015)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมต้นหนุมานประสานกายในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland (Hoagland & Arnon, 1950) เพื่อทำการปรับสภาพพืชให้เข้ากับสารละลายธาตุอาหารก่อนที่จะเริ่มการจำลองสภาวะแล้งให้กับพืชในขั้นตอนต่อไป

2. การทดลองที่ 1 การหาระดับความเข้มข้นของสาร PEG6000 ที่เหมาะสมในการชักนำต้นหนุมานประสานกายให้เกิดความเครียดจากความแล้ง โดยกำหนดค่าความเข้มข้นของ PEG6000 ใน 6 ระดับ 6 สิ่งทดลอง ๆ ละ 4 ซ้ำ ๆ ละ 3 ต้น เพื่อหาระดับความเครียดจากความแล้งที่ต้นหนุมานประสานกายสามารถเติบโตต่อไปได้ โดยทำการวัดค่าและประเมินค่า ดังนี้

1) ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่

- ค่าประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (Fv/Fm)
- ค่า performance index (Pi)

2) ดัชนีความเขียวของใบ (leaf greenness index; SPAD value)

3. การทดลองที่ 2 การหาระดับความเข้มข้นของ PEG6000 ที่ต้นหนุมานประสานกายมีแนวโน้มต้านทานความเครียดจากความแล้ง โดยกำหนดค่าความเข้มข้นของ PEG6000 ใน 3 ระดับ 3 สิ่งทดลอง ๆ ละ 5 ซ้ำ ๆ ละ 3 ต้น ทำการเก็บตัวอย่างและประเมินค่า ดังนี้

1) ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่

- ค่าประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (Fv/Fm)
- ค่า performance index (Pi)
- ค่า ABS/RC
- ค่า Dlo/RC
- ค่า TRO/RC
- ค่า ETo/RC
- ค่า 1-Vj

2) ปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่

- คลอโรฟิลล์ เอ
- คลอโรฟิลล์ บี
- คลอโรฟิลล์รวม

- แครอทินอยด์

3) ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ

จากนั้นความเข้มข้นของ PEG6000 ที่เหมาะสมจะถูกนำไปใช้ในการจำลองสภาวะแล้งให้กับต้นหนุมานประสานกายในการทดลองตอนที่ 3 เพื่อศึกษากลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาบางประการที่ใช้ในการต้านทานต่อความเครียดจากความแล้ง และปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของต้นหนุมานประสานกาย

4. การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งของต้นหนุมานประสานกายต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการ และปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ดังนี้

1) การเติบโต ได้แก่

- ความสูงของลำต้น
- เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น
- พื้นที่ใบ

2) ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่

- ค่าประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (F_v/F_m)
- ค่า performance index (P_i)
- ค่า ABS/RC
- ค่า DIO/RC
- ค่า TRo/RC
- ค่า ETo/RC
- ค่า $1-V_j$

3) ปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่

- คลอโรฟิลล์ เอ
- คลอโรฟิลล์ บี
- คลอโรฟิลล์รวม
- แครอทินอยด์

4) ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบพืช

5) อัตราการคายน้ำ

6) ค่าการนำไหลของปากใบ

7) ค่าดัชนีของปากใบ

- 8) ค่าความหนาแน่นของปากใบ
- 9) ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำ
- 10) ปริมาณโพรลิน
- 11) ความเสียหายของเยื่อหุ้มเซลล์ที่เกิดจากการสะสมอนุมูลอิสระในใบ ได้แก่
 - ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
 - ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์
 - การรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์
- 12) กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่
 - เอนไซม์ superoxide dismutase (SOD)
 - เอนไซม์ catalase (CAT)
 - เอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX)
- 13) ปริมาณสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน 4 ชนิด ในใบพืช

วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

1. การเตรียมต้นพืช และการจำลองสภาวะแล้ง ได้แก่
 - ต้นหนุมานประสานกาย
 - กระถางพลาสติกขนาด 8 นิ้ว
 - ดินผสม (ประกอบด้วย ดินร่วน กาบมะพร้าวสับ และปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 1 : 1 : 1)
 - ถังพลาสติกพร้อมฝาปิด ขนาดบรรจุ 10 ลิตร
 - ฟองน้ำเกษตร
 - เม็ดดินเผามวลเบา
 - เครื่องปั๊มลม รุ่น ACO-002 (Shanghai Pretty Industries Co., Ltd., China)
 - เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวัดค่า EC และ pH สารละลายธาตุอาหาร ได้แก่ เครื่อง pH/EC/TDS meter waterproof รุ่น AMT03 (AMTAST, USA)
 - สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland
 - polyethylene glycol 6000 (PEG6000) (บริษัทรวมเคมี 1986)
2. การวัดประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่
 - เครื่องคลอโรฟิลล์ฟลูออโรมิเตอร์ (Pocket PEA, Hansatech Instruments Ltd, King's Lynn, Norfolk, UK)
3. การวัดดัชนีความเขียวของใบ ได้แก่

- เครื่องคลอโรฟิลล์มิเตอร์ (SPAD-502, Konica Minolta Co., Ltd., Japan)

4. การวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่

- กรรไกรตัดตัวอย่างพืช
- ชองเก็บตัวอย่างพืช
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น BSA2245-CW (Sartorius, Japan)
- เครื่องเขย่าสาร รุ่น G560E (Scientific Industries, USA)
- เครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี (UV-VIS Spectrophotometer) รุ่น UV-1800 (Shimadzu Scientific Instruments, Japan)
- อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) รุ่น WB-22 (DAIHAN Scientific Co., Ltd., Korea)
- dimethyl sulfoxide (DMSO) (Rci Labscan, Ireland)

5. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ ได้แก่

- กรรไกรตัดตัวอย่างพืช
- กระดาษทิชชู
- ชองเก็บตัวอย่างพืช
- ตู้อบลมร้อน แบบมีพัดลม (Drying oven) รุ่น SOV70B (KWF, China)
- น้ำกลั่น

6. การวัดการเติบโตทางลำต้น และพื้นที่ใบ ได้แก่

- ฉากฟิวเจอร์บอร์ดสีขาว
- กล้องถ่ายรูป
- เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier calipers)
- สายวัด

7. การวัดค่าการนำไหลของปากใบ และอัตราการคายน้ำ ได้แก่

- เครื่องวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (Portable Photosynthesis System) รุ่น Licor-6800 (Licor Inc., USA)

8. การวิเคราะห์ความหนาแน่นของปากใบ และค่าดัชนีของปากใบ ได้แก่

- กรรไกรตัดตัวอย่างพืช
- ปากคีบสแตนเลส
- แผ่นสไลด์กล้องจุลทรรศน์ พร้อมกระจกปิดสไลด์
- กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Leica DM2500 & DM2500 LED, Leica Microsystems)

(SEA) Pte Ltd., Singapore)

- น้ำยาทาเล็บ แบบใส ยี่ห้อ Golden Rose

9. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำ ได้แก่

- กรรไกรตัดตัวอย่างพืช
- โกร่งบดตัวอย่างพร้อมที่บด
- ชองเก็บตัวอย่างพืช
- ไมโครปิเปต (micropipette) (Labnet, UK)
- อลูมิเนียมฟอยล์
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น BSA2245-CW (Sartorius, Japan)
- เครื่องเขย่าสาร รุ่น G560E (Scientific Industries, USA)
- เครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี รุ่น UV-1800 (Shimadzu Scientific Instruments, Japan)
- อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น WB-22 (DAIHAN Scientific Co., Ltd., Korea)
- ไนโตรเจนเหลว (บริษัทลินด์)
- น้ำกลั่น
- Anthrone (Lobal Chemie, India)
- 80% (v/v) ethanol (Sigma-Aldrich, Germany)
- 70% (v/v) Sulfuric acid (Sigma-Aldrich, Germany)

10. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

- กรรไกรตัดตัวอย่างพืช
- โกร่งบดตัวอย่างพร้อมที่บด
- ชองเก็บตัวอย่างพืช
- ไมโครปิเปต (Labnet, UK)
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น BSA2245-CW (Sartorius, Japan)
- เครื่องเขย่าสาร รุ่น G560E (Scientific Industries, USA)
- เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) รุ่น TD3 (Cence, China)
- เครื่องกวนสารให้ความร้อน รุ่น MSH-20D (DAIHAN Scientific Co., Ltd., Korea)
- เครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี รุ่น UV-1800 (Shimadzu Scientific Instruments, Japan)
- อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น WB-22 (DAIHAN Scientific Co., Ltd., Korea)
- ไนโตรเจนเหลว (บริษัทลินด์)

- น้ำกลั่น
- acid ninhydrin (Sigma-Aldrich, Germany)
- glacial acetic acid (J.T. Baker, China)
- 6M phosphoric acid (J.T. Baker, China)
- 3% (w/v) sulfosalicylic acid (Loba Chemie, India)
- toluene (Merck, Germany)

11. การวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

- กรรไกรตัดตัวอย่างพืช
- โกร่งบดตัวอย่างพร้อมที่บด
- ซองเก็บตัวอย่างพืช
- ไมโครปิเปต (Labnet, UK)
- อลูมิเนียมฟอยล์
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น BSA2245-CW (Sartorius, Japan)
- เครื่องเขย่าสาร รุ่น G560E (Scientific Industries, USA)
- เครื่องปั่นเหวี่ยง รุ่น TD3 (Cence, China)
- เครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี รุ่น UV-1800 (Shimadzu Scientific Instruments, Japan)
- ไนโตรเจนเหลว (บริษัทลินด์)
- น้ำกลั่น
- 1 M potassium iodide
- 10 mM potassium phosphate buffer (pH 7.0)
- 0.1% (w/v) trichloroacetic acid (TCA) (Carlo Erbo, UN)

12. การวิเคราะห์ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์

- กรรไกรตัดตัวอย่างพืช
- โกร่งบดตัวอย่างพร้อมที่บด
- ซองเก็บตัวอย่างพืช
- ไมโครปิเปต (Labnet, UK)
- อลูมิเนียมฟอยล์
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น BSA2245-CW (Sartorius, Japan)
- เครื่องเขย่าสาร รุ่น G560E (Scientific Industries, USA)

- เครื่องปั่นเหวี่ยง รุ่น TD3 (Cence, China)
- เครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี รุ่น UV-1800 (Shimadzu Scientific Instruments, Japan)
- อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น WB-22 (DAIHAN Scientific Co., Ltd., Korea)
- ไนโตรเจนเหลว (บริษัทลินด์)
- น้ำกลั่น
- 0.5% (w/v) triobarbitulic acid (TBA) (Sigma-Aldrich, Germany)
- 0.1% (w/v) trichloroacetic acid (TCA) (Carlo Erbo, UN)
- 20% (w/v) trichloroacetic acid (TCA) (Carlo Erbo, UN)

13. การวัดการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์

- กรรไกรตัดตัวอย่างพืช
- ซองเก็บตัวอย่างพืช
- ที่เจาะจุกคอร์ก (Cork borer)
- เครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity meter; EC meter) ได้แก่ pH/EC/TDS meter waterproof รุ่น AMT03 (AMTAST, USA)
- อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น WB-22 (DAIHAN Scientific Co., Ltd., Korea)
- น้ำกลั่น

14. การวิเคราะห์กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ

- กรรไกรตัดตัวอย่างพืช
- โกร่งบดตัวอย่างพร้อมที่บด
- ซองเก็บตัวอย่างพืช
- ไมโครปิเปต (Labnet, UK)
- หลอดไฟฟลูออเรสเซนซ์ขนาด 18 วัตต์
- อลูมิเนียมฟอยล์
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น BSA2245-CW (Sartorius, Japan)
- เครื่องปั่นเหวี่ยงขนาดเล็ก รุ่น MINI-6KS (Chincan, China)
- เครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี รุ่น UV-1800 (Shimadzu Scientific Instruments, Japan)
- ไนโตรเจนเหลว (บริษัทลินด์)
- น้ำกลั่น
- 0.5 mM ascorbic acid

- 0.1 mM ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA)
- 0.03% (v/v) hydrogen peroxide
- 50 mM hydrogen peroxide
- 13 mM methionine
- 4% (w/v) polyvinylpyrrolidone (PVP)
- 10 mM potassium phosphate buffer (pH 7.0)
- 50 mM potassium phosphate buffer (pH 7.0)
- 75 μ M nitroblue tetrazolium (NBT)
- 2 μ M riboflavin

15. การวิเคราะห์ปริมาณไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน

- กรรไกรตัดตัวอย่างพืช
- กระดาษกรอง (Whatman No.1)
- กระดาษกรองเมมเบรน ขนาดรูพรุน 0.45 μ m
- ซองเก็บตัวอย่างพืช
- ตู้อบลมร้อน แบบมีพัดลม รุ่น SOV70B (KWF, China)
- ไมโครปีเปต (Labnet, UK)
- อลูมิเนียมฟอยล์
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น BSA2245-CW (Sartorius, Japan)
- เครื่องบดตัวอย่าง
- เครื่องปั่นเหวี่ยง
- เครื่องแยกสารอย่างรวดเร็วและวิเคราะห์มวล (LC/MS/MS Q-TOF) รุ่น LC-QTOF 6545XT (Agilent technologies, USA)
- คอลัมน์ที่ใช้ในการทำให้สารบริสุทธิ์ Poroshell 120 EC- C18 column (2.1 mm x 100 mm, 2.7 μ m) (Agilent technologies, USA)
- acetonitrile (Sigma-Aldrich, Germany)
- 10 mM ammonium acetate
- 70% (v/v) methanol (Sigma-Aldrich, Germany)
- 99.9% (v/v) methanol (Sigma-Aldrich, Germany)

วิธีการดำเนินการวิจัย

การเตรียมต้นหนุมานประสานกาย

ต้นหนุมานประสานกายที่ได้จากการชำกิ่งจากต้นแม่พันธุ์จนออกรากเป็นระยะเวลา 30 วัน ก่อนนำมาปลูกลงในกระถางพลาสติกขนาด 8 นิ้ว ที่ภายในบรรจุวัสดุปลูกเป็นดินผสมจำนวน 147 ต้น ทำการดูแลและบำรุงต้นหนุมานประสานกายในสภาพโรงเรือนทดลอง ณ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ($13^{\circ}44'46.8''\text{N}$ $100^{\circ}34'00.1''\text{E}$) ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ได้รับแสงจากธรรมชาติตลอดระยะเวลาทำการทดลอง เป็นระยะเวลา 150 วัน นับจากวันที่ลงปลูกในกระถาง จากนั้นทำการคัดเลือกต้นที่มีสภาพสมบูรณ์ เพื่อย้ายลงปลูกในถังพลาสติกที่มีสารละลายธาตุอาหารครึ่งสูตร Hoagland ปริมาตร 5 ลิตร จำนวนถังละ 1 ต้น ซึ่งแต่ละถังมีการเชื่อมต่อกับเครื่องปั๊มลม ควบคุมระดับของสารละลายธาตุอาหารด้วยการเติมน้ำกรอง รวมถึงควบคุมค่า pH ของสารละลายให้มีค่าระหว่าง 5.8-6.5 และค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายธาตุอาหารให้อยู่ในระดับเดียวกันกับตอนเริ่มต้น ทำการปรับสภาพพืชในสารละลายธาตุอาหารเป็นเวลา 14 วัน หลังจากนั้นทำการย้ายลงปลูกในถังพลาสติกที่มีสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ปริมาตร 5 ลิตร เป็นเวลา 14 วัน ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

การทดลองที่ 1 การหาระดับความเข้มข้นของสาร PEG6000 ที่เหมาะสมในการจำลองสภาวะแล้ง เพื่อประเมินความทนทานต่อความเครียดจากความแล้งที่ต้นหนุมานประสานกายสามารถเจริญเติบโตต่อได้

ศึกษาระดับความเครียดจากความแล้งสูงสุดที่ต้นหนุมานประสานกายสามารถทนได้จากระดับความเข้มข้นของสาร PEG6000 ที่ใช้ในการจำลองสภาวะแล้ง จำนวน 6 ระดับ โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) จำนวน 6 สิ่งทดลอง ๆ ละ 4 ซ้ำ ๆ ละ 3 ต้น

1.1 การจำลองสภาวะแล้งให้กับต้นหนุมานประสานกาย

คัดเลือกต้นหนุมานประสานกายที่ทำการปรับสภาพในสารละลายธาตุอาหารเรียบร้อยแล้ว ที่มีสภาพต้นสมบูรณ์ มีขนาดและความสูงใกล้เคียงกัน จำนวน 72 ต้น แบ่งออกเป็น 6 ชุดการทดลอง เพื่อให้ได้รับสิ่งทดลองจำนวน 6 สิ่งทดลอง ทำการปลูกในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่มี PEG6000 ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland (ชุดควบคุม)

ชุดการทดลองที่ 2 สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่มีความเข้มข้น 10% (w/v) PEG6000

ชุดการทดลองที่ 3 สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่มีความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000

ชุดการทดลองที่ 4 สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่มีความเข้มข้น 30% (w/v) PEG6000

ชุดการทดลองที่ 5 สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่มีความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000
ชุดการทดลองที่ 6 สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่มีความเข้มข้น 50% (w/v) PEG6000

1.2 เก็บผลการทดลองในแต่ละชุดการทดลองทุก ๆ 3 วัน เป็นเวลา 24 วัน นับจากวันที่ต้นหนุমানประสาณกายได้รับการจำลองสภาวะแล้ง ช่วงเวลาในการเก็บผลการทดลองคือ 9.00-10.30 น. ทำการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยบันทึกค่าประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (F_v/F_m) และค่า performance index (P_i) และทำการวัดดัชนีความเขียวของใบ ทำการทดลองเพื่อหาระดับความเครียดจากความแล้งสูงสุดที่พืชสามารถเจริญเติบโตได้ เพื่อนำไปใช้ในการทดลองที่ 2 ต่อไป

1.3 การประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

สุ่มเลือกใบย่อยที่อยู่ในตำแหน่งของใบประกอบที่ 3-5 โดยนับลงมาจากบริเวณปลายยอด จากนั้นทำการเตรียมใบในที่มืด (dark-adapted) ด้วยการใช้อุปกรณ์สำหรับหนีบใบเพื่อไม่ให้ใบได้รับแสงเป็นระยะเวลา 30 นาที ก่อนทำการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงด้วยเครื่องคลอโรฟิลล์ฟลูออโรมิเตอร์ในแต่ละชุดการทดลอง จำนวน 4 ซ้ำ ๆ ละ 3 ต้น แล้วนำแต่ละค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

1.4 การวัดดัชนีความเขียวของใบ (SPAD value)

สุ่มเลือกใบย่อยที่อยู่ในตำแหน่งของใบประกอบที่ 3-5 โดยนับลงมาจากบริเวณปลายยอด ทำการวัดดัชนีความเขียวของใบ (SPAD value) ด้วยเครื่องคลอโรฟิลล์มิเตอร์ในแต่ละชุดการทดลอง วัดใบจำนวน 4 ซ้ำ ๆ ละ 3 ต้น โดยวัด 3 ตำแหน่งของแต่ละใบย่อย นำแต่ละค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

1.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติทางเดียว (One Way Analysis of Variance, One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan' multiple range test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม SPSS for windows version 23.0 (SPSS: An IBM Company)

การทดลองที่ 2 การหาระดับความเข้มข้นของ PEG6000 ที่ต้นหนุমানประสาณกายสามารถทนต่อความเครียดจากความแล้ง

จากผลการทดลองที่ 1 เพื่อหาระดับความเข้มข้นของสาร PEG6000 ที่เหมาะสมต่อการจำลองสภาวะแล้ง ทำการเลือกระดับความเข้มข้นของสาร PEG6000 ที่เป็นระดับความเครียดจากความแล้งสูงสุดที่ต้นหนุমানประสาณกายสามารถเจริญเติบโตได้ และระดับความเครียดจากความแล้งที่ต้นหนุমানประสาณกายมีแนวโน้มต้านทานต่อความเครียดจากความแล้ง โดยเลือก

ระดับความเข้มข้นของสาร PEG6000 ดังกล่าวมาใช้ในการทดลองตอนที่ 2 เพื่อทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสาร PEG6000 ที่ชักนำให้ต้นหนุมานประสานกายเกิดความเครียดจากความแล้งในระดับปานกลาง (20% (w/v) PEG6000) และระดับรุนแรง (40% (w/v) PEG6000) ต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงและปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ จำนวน 3 สิ่งทดลอง ๆ ละ 5 ซ้ำ ๆ ละ 3 ต้น

2.1 การจำลองสภาวะแล้งให้กับต้นหนุมานประสานกาย

คัดเลือกต้นหนุมานประสานกายที่ทำการปรับสภาพในสารละลายธาตุอาหารเรียบร้อยแล้ว ที่มีสภาพต้นสมบูรณ์ มีขนาดและความสูงใกล้เคียงกัน จำนวน 45 ต้น แบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดลอง เพื่อให้ได้รับสิ่งทดลองจำนวน 3 สิ่งทดลอง ทำการปลูกในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่มี PEG6000 ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland (ชุดควบคุม)

ชุดการทดลองที่ 2 สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่มีความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000

ชุดการทดลองที่ 3 สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่มีความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000

2.2 เก็บผลการทดลองในแต่ละชุดการทดลองทุก ๆ 3 วัน เป็นเวลา 21 วัน นับจากวันที่ต้นหนุมานประสานกายได้รับการจำลองสภาวะแล้ง ช่วงเวลาในการเก็บผลการทดลอง คือ 9.00-10.30 น. ทำการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยบันทึกค่าประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (F_v/F_m) ค่า performance index (Pi) และคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์พารามิเตอร์ ได้แก่ ABS/RC, DIO/RC, TRO/RC, ETO/RC และ 1-Vj ทำการเก็บตัวอย่างใบหนุมานประสานกายเพื่อวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และวิเคราะห์ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ ทำการทดลองเพื่อหาระดับความเข้มข้นของสาร PEG6000 ที่ต้นหนุมานประสานกายสามารถต้านทานต่อความเครียดจากความแล้ง เพื่อนำไปใช้ในการทดลองที่ 3 เพื่อศึกษากลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาของต้นหนุมานประสานกายต่อไป

2.3 การประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

ทำการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง จากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (F_v/F_m) ค่า performance index (Pi) และค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์พารามิเตอร์ของต้นหนุมานประสานกายในแต่ละชุดการทดลองตามวิธีการดำเนินการวิจัยในข้อ 1.3

2.4 การศึกษาปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

การวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุในใบพืช ดัดแปลงวิธีการของ (Hiscox & Israelstam, 1979) โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี คลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์ โดยสุ่มเก็บตัวอย่างใบย่อยของต้นหนุมานประสานกายที่มีความสมบูรณ์ และขยายขนาดเต็มที่ ในตำแหน่งใบประกอบที่ 3-5 นับจากบริเวณปลายยอด นำมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ซึ่งน้ำหนักใบ 0.02 กรัม ทำการสกัดโดยแช่ในสารละลาย Dimethyl sulfoxide (DMSO) ปริมาตร 8 มิลลิลิตร วางไว้ในอุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารสกัดที่ได้มาบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง และทำการเขย่าสารสกัดด้วยเครื่องเขย่าสาร จากนั้นนำสารสกัดที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 480 649 และ 665 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี คลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์ ตามสมการของ (Sumanta, Haque, Nishika, & Suprakash, 2014) ดังต่อไปนี้

$$\text{Chlorophyll } a \text{ content (mg/g leaf F.W.)} = (12.47A_{665} - 3.62A_{649}) (V/1000W)$$

$$\text{Chlorophyll } b \text{ content (mg/g leaf F.W.)} = (25.06A_{649} - 6.50A_{665}) (V/1000W)$$

$$\text{Total chlorophyll (mg/g leaf F.W.)} = \text{Chlorophyll } a + \text{Chlorophyll } b$$

$$\text{Carotenoid content (mg/g leaf F.W.)} = [(1000A_{480} - 1.29C_a - 53.78C_b)/220] (V/1000W)$$

เมื่อ A_{480} = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 480 นาโนเมตร

A_{649} = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 649 นาโนเมตร

A_{665} = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร

V = ปริมาตรของ DMSO ที่ใช้สกัด หรือปริมาตรสุดท้ายที่ปรับ (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักตัวอย่างพืช (กรัม)

2.5 การศึกษาปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ

วิเคราะห์ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ เพื่อบันทึกข้อมูลสถานะของน้ำภายในใบหนุมานประสานกาย โดยดัดแปลงวิธีการของ (Schonfeld, Johnson, Carver, & Mornhiweg, 1988) ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างใบช่วงเวลา 10.00-10.30 น. ตัดชิ้นส่วนใบหนุมานประสานกายน้ำหนัก 0.04 กรัม จากนั้นนำชิ้นส่วนใบที่ได้ไปชั่งน้ำหนักใบ (leaf fresh weight; F.W.) แล้วนำชิ้นส่วนใบแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำชิ้นส่วนใบที่แช่ในน้ำกลั่นมาซับน้ำส่วนเกินออกด้วยกระดาษทิชชู แล้วนำมาชั่งน้ำหนักใบหลังจากการแช่ในน้ำกลั่น (leaf turgid weight; T.W.) เพื่อวัดค่าน้ำหนักที่เซลล์เต่งเต็มที่ จากนั้นนำไปทำให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ

60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง นำชิ้นส่วนใบที่ได้มาชั่งน้ำหนักแห้ง (leaf dry weight; D.W.) แล้วนำค่าที่วัดได้ทั้งหมดมาคำนวณโดยใช้สูตร ดังนี้

$$\text{ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ (\%)} = [(F.W. - D.W.) / (T.W. - D.W.)] \times 100$$

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติทางเดียว (One Way Analysis of Variance, One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan' multiple range test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม SPSS for windows version 23.0 (SPSS: An IBM Company)

การทดลองที่ 3 การศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งของต้นหนุมานประสาณกาย ต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการ และปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ

จากผลการทดลองที่ 2 การศึกษาระดับความเข้มข้นของสาร PEG6000 ที่ต้นหนุมานประสาณกายมีความสามารถต้านทานต่อความเครียดจากความแล้ง พบว่าหลังจากต้นหนุมานประสาณกายได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 เป็นเวลา 9 วัน ต้นหนุมานประสาณกายมีการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง และปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงน้อยที่สุด ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับชุดการทดลองควบคุม แสดงถึงความสามารถในการทนต่อความเครียดจากความแล้งได้ดีที่สุด ดังนั้น จึงทำการเลือกระดับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มาใช้ในการทดลองที่ 3 เพื่อศึกษาการเติบโตทางลำต้นและพื้นที่ใบ ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง กลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาบางประการ และการสะสมปริมาณไตรเทอพีนอยด์ซาโปนินในใบหนุมานประสาณกายภายใต้ความเครียดจากความแล้ง โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ จำนวน 2 สิ่งทดลอง ๆ ละ 5 ซ้ำ ๆ ละ 3 ต้น

3.1 การจำลองสภาวะแล้งให้กับต้นหนุมานประสาณกาย

คัดเลือกต้นหนุมานประสาณกายที่ทำการปรับสภาพในสารละลายธาตุอาหารเรียบร้อยแล้ว ที่มีสภาพต้นสมบูรณ์ มีขนาดและความสูงใกล้เคียงกัน จำนวน 30 ต้น แบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง เพื่อให้ได้รับสิ่งทดลองจำนวน 2 สิ่งทดลอง ทำการปลูกในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่มี PEG6000 ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland (ชุดควบคุม)

ชุดการทดลองที่ 2 สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่มีความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000

3.2 เก็บผลการทดลองในแต่ละชุดการทดลองทุก ๆ 3 วัน เป็นเวลา 21 วัน นับจากวันที่ต้นหนุमानประสานกายได้รับการจำลองสภาวะแล้ง ช่วงเวลาในการเก็บผลการทดลองคือ 9.00-10.30 น. ทำการวัดการเติบโตทางลำต้นและพื้นที่ใบ ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยบันทึกค่าประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (F_v/F_m) ค่า performance index (Pi) และคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์พารามิเตอร์ ได้แก่ ABS/RC, DIO/RC, TRO/RC, ETO/RC และ 1-Vj ทำการเก็บตัวอย่างใบหนุमानประสานกายเพื่อศึกษากลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาบางประการ ได้แก่ ปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ อัตราการคายน้ำ ค่าการนำไหลของปากใบ ความหนาแน่นของปากใบ ค่าดัชนีของปากใบ ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำ และปริมาณโปรตีน ทำการประเมินความเสียหายของเซลล์ที่เกิดจากการสะสมปริมาณอนุมูลอิสระในใบ โดยการวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ และการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ ศึกษากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ เอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) เอนไซม์ catalase (CAT) และเอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX) และศึกษาการสะสมปริมาณสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน 4 ชนิด ในใบพืช

3.3 การศึกษาการเติบโตทางลำต้นและพื้นที่ใบ

ทำการบันทึกการเติบโตทางลำต้น ได้แก่ ความสูงของลำต้น เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น และพื้นที่ใบ โดยทำการวัดความสูงของลำต้นด้วยสายวัด วัดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น (stem diameter) ที่ความสูงของลำต้นถัดจากราก 10 เซนติเมตร ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ และคำนวณพื้นที่ของใบในตำแหน่งใบเดิม โดยถ่ายภาพใบบนพื้นหลังสีขาวที่มีการทำสเกลไว้ จากนั้นใช้โปรแกรม image J (NIH image analysis software, USA) คำนวณพื้นที่ใบหนุमानประสานกายครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร ตามวิธีการของ (เบญจมาศ จันทะภา ไพบุลย์กิจกุล, เบญจพร ชุติยศรี, และชลิ ไพบุลย์กิจกุล, 2555)

3.4 การประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

ทำการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง จากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (F_v/F_m) ค่า performance index (Pi) และค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์พารามิเตอร์ของต้นหนุमानประสานกายในแต่ละชุดการทดลองตามวิธีการดำเนินการวิจัยในข้อ 1.3

3.5 การศึกษาปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

ทำการวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุในใบหนุมานประสานกาย ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี คลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์ ในแต่ละชุดการทดลองตามวิธีการดำเนินการวิจัย ในข้อ 2.4

3.6 การศึกษาปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ

วิเคราะห์ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ภายในใบพืช เพื่อบันทึกข้อมูลสถานะของน้ำภายใน ใบหนุมานประสานกายในแต่ละชุดการทดลอง ตามวิธีการดำเนินการวิจัยในข้อ 2.5

3.7 การศึกษาอัตราการคายน้ำ และค่าการนำไหลของปากใบ

สุ่มเลือกใบในตำแหน่งใบที่ 3-5 นับจากปลายยอด ทำการวัดอัตราการคายน้ำ และค่าการนำไหลของปากใบในแต่ละชุดการทดลอง ด้วยเครื่องวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง รุ่น Licor-6800 ตั้งค่าสภาพกล่องบรรจุใบ โดยกำหนดความเข้มแสง $1,500 \mu\text{molPPF m}^{-2}\text{s}^{-1}$ จาก LED light source ซึ่งติดอยู่ด้านบน leaf chamber ของเครื่อง กำหนดความเข้มของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ผ่านใบ $700 \mu\text{molCO}_2 \text{ mol}^{-1}$ และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วง 70-75% ทำการบันทึกค่า ซึ่งเครื่องจะอ่านและบันทึกค่าอัตโนมัติ วัดในช่วงเวลา 9.30-10.30 น. ของแต่ละวัน เนื่องจาก เป็นช่วงเวลาที่ใบหนุมานประสานกายแสดงค่าการนำไหลของปากใบได้ดีที่สุด ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวได้มาจากการทำการทดลองเบื้องต้น ทำการวัดซ้ำใบเดิมทุกครั้งเพื่อบันทึกข้อมูลนี้ตลอดการทดลอง

3.8 การศึกษาความหนาแน่นของปากใบ และดัชนีของปากใบ

การตรวจสอบความหนาแน่นของปากใบ และดัชนีของปากใบใช้วิธีการลอกเยื่อ บุปผิวด้านท้องใบ (ventral side of leaf) ตามวิธีการของ (อนุสิทธิ์ ชีช่วง และจรัล ลีรติวงศ์, 2562) ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างใบย่อยในตำแหน่งใบที่ 3-5 นับจากปลายยอด ใช้น้ำยาทาเล็บแบบใส ทาบนผิวใบด้านท้องใบ ตรงตำแหน่งกึ่งกลางใบ จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งและทำการลอกน้ำยาทาเล็บ จากผิวใบมาวางบนแผ่นสไลด์ ปิดด้วยกระจกปิดสไลด์ แล้วตรวจสอบข้อมูลภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยใช้กำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ 10X ทำการบันทึกภาพเนื้อเยื่อแบบสุ่ม 3 ตำแหน่ง ด้วยกล้องที่เชื่อมต่อกับกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง นำภาพที่ได้มาวัดพื้นที่ใบ นับจำนวนปากใบ และนับจำนวนเนื้อเยื่อผิวใบ ด้วยโปรแกรม image J จากนั้น คำนวณความหนาแน่นของปากใบ จากจำนวนปากใบต่อหน่วยพื้นที่ใบ 1 ตารางมิลลิเมตร มีหน่วยเป็น pores/mm² และคำนวณดัชนีของปากใบ (%) จากสูตร $[S/(S+E)] \times 100$ โดยที่ S คือ จำนวนปากใบในพื้นที่ที่ศึกษา E คือ จำนวนเนื้อเยื่อผิวทั้งหมดในพื้นที่ที่ศึกษา

3.9 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำ

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำใช้หลักการของ Anthrone method โดยน้ำตาลในตัวอย่างพืชจะทำปฏิกิริยากับสาร anthrone ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น เมื่อให้ความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสารประกอบที่มีสีเขียวเข้มที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างพืช ซึ่งการทดลองนี้ดัดแปลงวิธีการของ (Yemm & Willis, 1954) กับวิธีการของ (Turakainen, Hartikainen, & Seppanen, 2004) โดยเก็บตัวอย่างใบหนุมานประสานกายในตำแหน่งใบที่ 3-5 นับจากบริเวณปลายยอด โดยเลือกใบที่มีความสมบูรณ์ และขยายขนาดเต็มที่ซึ่งน้ำหนัก 0.2 กรัม บดด้วยไนโตรเจนเหลว แล้วเติม ethanol ความเข้มข้น 80% (v/v) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร บ่มในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที นำสารสกัดที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 x g เป็นระยะเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำสารละลายส่วนใสด้านบน (supernatant) ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร มาทำปฏิกิริยากับสารละลาย anthrone โดยการเติม anthrone reagent ปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร ผสมสารละลายให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที หยุดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วในน้ำอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และนำสารละลายที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร คำนวณหาปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำในรูปมิลลิกรัมต่อกรัมของน้ำหนักสดตัวอย่างใบพืช (mg/g F.W.) โดยนำค่าที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคส (ภาพประกอบ 58)

3.10 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนใช้หลักการของ Acid-ninhydrin method โดยโปรตีนในตัวอย่างพืชจะทำปฏิกิริยากับสารนินไฮดริน (ninhydrin) ในกรดอะซิติก (acetic acid) และกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) เมื่อให้ความร้อนจะเกิดเป็นสารประกอบสีชมพู-แดง ซึ่งการทดลองนี้ทำตามวิธีการของ (Bates, Waldren, & Teare, 1973) โดยเก็บตัวอย่างใบที่มีความสมบูรณ์ และขยายขนาดเต็มที่จากต้นพืชที่ตำแหน่งใบที่ 3-5 นับจากบริเวณปลายยอด ซึ่งน้ำหนักใบ 0.2 กรัม บดให้ละเอียดด้วยไนโตรเจนเหลว และเติม sulfosalicylic acid ความเข้มข้น 3% (w/v) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 x g เป็นระยะเวลา 20 นาที แล้วนำสารละลายส่วนใสที่อยู่ด้านบน ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง ทำการเติมสารละลาย glacial acetic acid ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารผสมนินไฮดริน ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วหยุดปฏิกิริยาโดยการแช่ในกระบอกน้ำแข็งทันที เติมสารละลาย toluene ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมสารละลายให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้นของสารละลาย toluene แล้วดูดสารละลายบริเวณด้านบนที่มี chromophore สีชมพูอ่อนหรือสีแดง มาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น

520 นาโนเมตร โดยใช้ toluene เป็น blank และนำค่าที่ได้เทียบกับกราฟมาตรฐานของโพรลิน (ภาพประกอบ 59) จากนั้นคำนวณหาปริมาณโพรลินในรูปไมโครกรัมต่อกรัมของน้ำหนักสด ตัวอย่างใบพืช ($\mu\text{g/g F.W.}$)

3.11 การศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใช้หลักการของ Colorimetric method โดยวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากการเกิดปฏิกิริยากับสารโพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium Iodide, KI) ในสารละลาย trichloroacetic acid (TCA) ทำให้ได้สารไอโอดีน (I_2) ที่มีสีเหลือง-น้ำตาลเกิดขึ้นในปฏิกิริยา ซึ่งความเข้มของสีที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีอยู่ในตัวอย่างพืช การทดลองนี้ดัดแปลงวิธีการของ (Velikova, Yordanov, & Edreva, 2000) โดยเก็บตัวอย่างใบหนุมานประสานกายหนัก 0.2 กรัม บดด้วยไนโตรเจนเหลว และทำการสกัดโดยการเติมสารละลาย TCA ความเข้มข้น 0.1% (w/v) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารสกัดที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ $12,000 \times g$ เป็นระยะเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำสารละลายส่วนใสที่อยู่บริเวณด้านบน ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย potassium phosphate buffer (pH 7.0) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติมสารละลาย KI ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน บ่มในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 390 นาโนเมตร และนำค่าที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ภาพประกอบ 60) คำนวณหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในรูปไมโครกรัมต่อกรัมของน้ำหนักสดตัวอย่างใบพืช ($\mu\text{g/g F.W.}$)

3.12 ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ (MDA)

การวิเคราะห์ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ใช้หลักการของ Thiobarbituric acid reactive substances assay (TBARS) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างมาลอนไดอัลดีไฮด์ในตัวอย่างพืชกับสารละลาย thiobarbituric acid (TBA) ภายใต้สภาวะที่ได้รับความร้อนและมีสภาพเป็นกรดทำให้เกิดสารประกอบ MDA-TBA complex ที่มีสีชมพู การทดลองนี้ดัดแปลงวิธีการของ (Velikova et al., 2000) โดยเก็บตัวอย่างใบในตำแหน่งใบที่ 3-5 นับจากบริเวณปลายยอด ชั่งน้ำหนักใบ 0.2 กรัม บดตัวอย่างให้ละเอียดในโถงบดด้วยไนโตรเจนเหลว จากนั้นเติมสารละลาย TCA ความเข้มข้น 0.1% (w/v) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน บ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ $10,000 \times g$ เป็นระยะเวลา 20 นาที จากนั้นนำสารสกัดส่วนใสด้านบน ปริมาตร 1 มิลลิลิตร มาเติมสารผสมระหว่าง TBA ความเข้มข้น 0.5%

(w/v) ใน TCA ความเข้มข้น 20% (w/v) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร จากนั้นผสมสารละลายให้เข้ากัน ด้วยเครื่องเขย่าสาร แล้วนำไปปั่นในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หยุดปฏิกิริยาโดยการนำไปแช่ในน้ำแข็ง นำสารละลายมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 532 และ 600 นาโนเมตร และคำนวณปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ ดังสมการ

$$\text{MDA } (\mu\text{mol/g F.W.}) = [(A_{532} - A_{600}) / (155 \times 1)] \times V_f \times (V_e / V_a)] / W$$

เมื่อ A_{532} = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร
 A_{600} = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร
 V_f = ปริมาตรสุดท้าย (มิลลิลิตร)
 V_e = ปริมาตร TCA ที่ใช้ในการสกัด (มิลลิลิตร)
 V_a = ปริมาตรสารสกัดพืชที่ใช้ในการวิเคราะห์ (มิลลิลิตร)
 W = น้ำหนักตัวอย่างพืช (กรัม)

3.13 การวิเคราะห์การร่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์

วิเคราะห์การร่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์โดยการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้า ก่อนและหลังจากการทำลายเซลล์พืชด้วยความร้อน เพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การร่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งการทดลองนี้ดัดแปลงวิธีการของ (Jiang & Huang, 2002) โดยเก็บตัวอย่างใบพืชตำแหน่งใบที่ 3-5 นับจากบริเวณปลายยอด ตัดตัวอย่างใบด้วยที่เจาะจุกคอร์กให้ได้จำนวน 8 leaf disks นำชิ้นส่วนใบแช่ในน้ำกลั่น ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเฉพาะน้ำที่ใช้แช่ชิ้นส่วนใบมาวัดค่าการนำไฟฟ้า (โดยกำหนดให้เป็น electric conductivity; C_1) ด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity meter) หลังจากนั้นเทน้ำคั้นลงไป ในหลอดทดลองเดิมที่มีชิ้นส่วนใบ แล้วนำไปปั่นในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วเทเฉพาะน้ำที่ใช้แช่ชิ้นส่วนใบมาวัดค่าการนำไฟฟ้า (last electric conductivity; C_2) อีกครั้ง นำค่าที่วัดได้มาคำนวณปริมาณสารอิเล็กโทรไลต์ (EL) จากสูตร $\text{EL } (\%) = (C_1/C_2) \times 100$

3.14 การวิเคราะห์กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ

3.14.1 การสกัดเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ

การสกัดเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระตามวิธีการของ (Velikova et al., 2000) ทำได้โดยนำตัวอย่างใบหนุมานประสานกายหนัก 0.2 กรัม บดด้วยไนโตรเจนเหลว แล้วเติม extraction buffer หรือสารละลาย I (solution I) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 6,000 x g ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นทำการเก็บ

สารสกัดเอนไซม์ (enzyme extract) จากสารละลายส่วนบน ใส่ในหลอดไมโครเซนตริฟูก (microcentrifuge tube) แล้วทำการเก็บรักษาสารสกัดเอนไซม์ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการวัดกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) เอนไซม์ catalase (CAT) และเอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX) เมื่อต้องการวัดกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ ควรวางหลอดไมโครเซนตริฟูก ในกล่องควบคุมอุณหภูมิ (cryobox) จนกระทั่งสารสกัดเอนไซม์เริ่มละลาย จึงจะนำมาศึกษากิจกรรมของเอนไซม์ตามวิธีการดำเนินการวิจัยในข้อที่ 3.14.2-3.14.4 ต่อไป

3.14.2 การวัดกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD

การวัดกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD ใช้หลักการของ Nitroblue tetrazolium (NBT) reduction assay โดยปฏิกิริยาของสาร Riboflavin เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงในสภาวะที่มีออกซิเจนจะทำให้เกิด superoxide anion (O_2^-) และทำให้ NBT ถูกรีดิวซ์เป็นสาร Formazan ที่มีสีฟ้าเข้ม ซึ่งกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD ในตัวอย่างพืช จะทำหน้าที่กำจัด O_2^- โดยเปลี่ยนเป็น H_2O_2 และ O_2 ส่งผลให้การสร้างสารสีฟ้าของ Formazan ลดลง การทดลองนี้ดัดแปลงวิธีการของ (Velikova et al., 2000) โดยเติมสารสกัดเอนไซม์ 50 ไมโครลิตร ลงในสารผสมสำหรับปฏิกิริยา (reaction mixture) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ผสมสารให้เข้ากัน จากนั้นนำหลอดสารละลายวางไว้ภายใต้แสงฟลูออเรสเซนซ์ขนาด 18 วัตต์ ระยะห่าง 5 เซนติเมตร เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นหยุดปฏิกิริยาโดยการเก็บหลอดสารละลายไว้ในที่มืด และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร คำนวณกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ โดยกำหนดให้ 1 หน่วยเอนไซม์ (unit enzyme) เท่ากับร้อยละ 50 ของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตรของหลอดควบคุม โดยหลอดควบคุมปฏิกิริยาคือหลอดที่ไม่ได้ใส่สารสกัดเอนไซม์ ส่วนหลอดผสมสารละลายสำหรับปฏิกิริยาร่วมกับเอนไซม์ที่ไม่ได้รับแสงจะเป็นหลอดที่ไม่เกิดปฏิกิริยา (blank) คำนวณหากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD ในรูป Units/min/g F.W.

3.14.3 การวัดกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ CAT

วัดกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ CAT โดยติดตามการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 240 นาโนเมตรลดลง ตามวิธีการของ (Nakano & Asada, 1981) และดัดแปลงวิธีการของ (Velikova et al., 2000) ทำได้โดยการนำสารผสมระหว่าง potassium phosphate buffer (pH 7) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.8 มิลลิลิตร และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 0.03% (v/v) ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร เริ่มปฏิกิริยาโดยการเติมสารสกัดเอนไซม์ ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร วัดกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์

ของเอนไซม์ CAT จากอัตราการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 240 นาโนเมตร โดยบันทึกค่าทุก ๆ 10 วินาที เป็นระยะเวลา 5 นาที คำนวณกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ มีหน่วยเป็น Units/min/g F.W. โดยใช้ค่า extinction coefficient เท่ากับ $40 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$

3.14.4 การวัดกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ APX

วัดกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ APX โดยศึกษาจากอัตราการลดลงของสาร ascorbate ที่ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นสาร dehydroascorbate ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 290 นาโนเมตร ลดลง ซึ่งการทำงานของเอนไซม์ APX ในตัวอย่างพืช ทำหน้าที่กำจัด H_2O_2 โดยใช้ ascorbate เป็นสารให้โฟตอน (electron donor) และเปลี่ยน H_2O_2 ให้เป็น H_2O การทดลองนี้ทำตามวิธีการของ (Nakano & Asada, 1981) ทำได้โดยเตรียมสารผสมระหว่าง potassium phosphate buffer (pH 7) ความเข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.7 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย ascorbic acid ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร นำส่วนผสมที่ได้ 0.9 มิลลิลิตร ไปผสมกับสารสกัดเอนไซม์ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 290 นาโนเมตร บันทึกค่าการดูดกลืนแสง เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ APX โดยกำหนดให้ 1 หน่วยเอนไซม์ คือปริมาณเอนไซม์ที่ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายลดลง 0.01 ที่ความยาวคลื่น 290 นาโนเมตรต่อนาที คำนวณกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ มีหน่วยเป็น Units/min/g F.W. โดยใช้ค่า extinction coefficient เท่ากับ $2.8 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$

3.15 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ 3.2-3.14 มาวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองกลุ่มที่เป็นอิสระต่อกันโดยใช้ Independent t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม SPSS for windows version 23.0 (SPSS: An IBM Company)

3.16 ปริมาณไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน 4 ชนิด ในใบหนุมานประสานกาย

การสกัดสารและวิเคราะห์ปริมาณไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ในใบหนุมานประสานกาย ดัดแปลงวิธีการของ (Zhang et al., 2015)

3.16.1 การสกัดสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน

นำตัวอย่างใบหนุมานประสานกายที่ทำการสุ่มเก็บในวันที่ 0, 3, 6, 9 และ 12 มาล้างทำความสะอาด เช็ดให้แห้ง จากนั้นนำไปอบในตู้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนด นำตัวอย่างใบแห้ง ตั่งตั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำ

การบดให้ละเอียดจนมีลักษณะเป็นผงแป้ง ชั่งผงตัวอย่าง 0.2 กรัม ทำการสกัดด้วย methanol ความเข้มข้น 70% (v/v) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร บ่มในที่มืดอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman filter paper No.1 บรรจุสารสกัดที่ได้ลงในขวดสีชา เก็บรักษาในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ทำการกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน สำหรับ HPLC ขนาดรูพรุน 0.45 μm ก่อนนำสารสกัดส่งตรวจวิเคราะห์ที่บริษัท ไบยา ไฟโตฟาร์ม จำกัด เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน

3.16.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน

นำสารสกัดตัวอย่างมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 14,000 x g ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำ supernatant ใส่ในหลอด LC-MS vial ขนาด 1 มิลลิลิตร ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแยกสารอย่างรวดเร็วและวิเคราะห์มวล (LC-MS/MS Q-TOF) รุ่น LC-QTOF 6545XT คอลัมน์ที่ใช้ในการทำให้อาร์บิตรี คือ Poroshell 120 EC-C18 (2.1 × 100 mm; 2.7 μm), 50°C ทำการฉีดตัวอย่างเข้าไปในระบบ LC ปริมาตร 10 μL การตั้งค่าสำหรับ LC ใช้ gradient ของ mobile phases A และ B ที่ประกอบด้วย (A) ได้แก่ 10 mM ammonium acetate in water และ (B) ได้แก่ acetonitrile/methanol อัตราส่วน 1:1 โดยคงอัตราการไหล 0.4 mL/min (ตาราง 2) การตั้งค่าสำหรับ MS : ใช้โหมด high resolution (negative) และได้ทำการตั้งค่าดังนี้ Drying gas temperature: 325°C, Drying gas flow: 13 L/h, Sheath gas temperature: 275°C, Sheath gas flow: 12 L/h, Nebulizer: 45 psi, Capillary voltage: 3000 V, Isotope width: 1.3 m/z, MS1 mass range: 40-1700 m/z, MS2 mass range: 25-1000 m/z, Collision energy: neg 10 eV, Acquisition rate: 3.35 spectra/s, Max precursor per cycle: 10, Precursor threshold: 5000 counts, Retention time threshold: 0.001%, Reference mass: 112.9856 m/z 1033.9881 m/z ใช้โปรแกรม Agilent MassHunter Qualitative analysis 10.0 ในการวิเคราะห์โครมาโทแกรม และทำการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟของสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน 4 ชนิด โดยมีมวลต่อประจุ ดังนี้ ชนิดที่ 1) 616.2859 m/z (M-2H)⁻² ชนิดที่ 2,3) 580.2737 m/z (M-CH₃COOH-H)⁻² สารประกอบ 2 ชนิดจะถูกชะออกมาพร้อมกัน ชนิดที่ 4) 939.4875 m/z (M-H)⁻ และ internal standard คือ 630.3022 m/z (M-H)⁻

ตาราง 2 ลักษณะการทำ gradient ของตัวชี้ที่ใช้ใน LC ในการตรวจสอบปริมาณไตรเทอพีนอยด์
ซาโปนิน

เวลา (นาที)	สารละลาย A (%)	สารละลาย B (%)
0.0	100	0
1.0	10	90
14.5	50	50
16.0	0	100
18.0	0	100
18.5	100	0
20.0	100	0

บทที่ 4

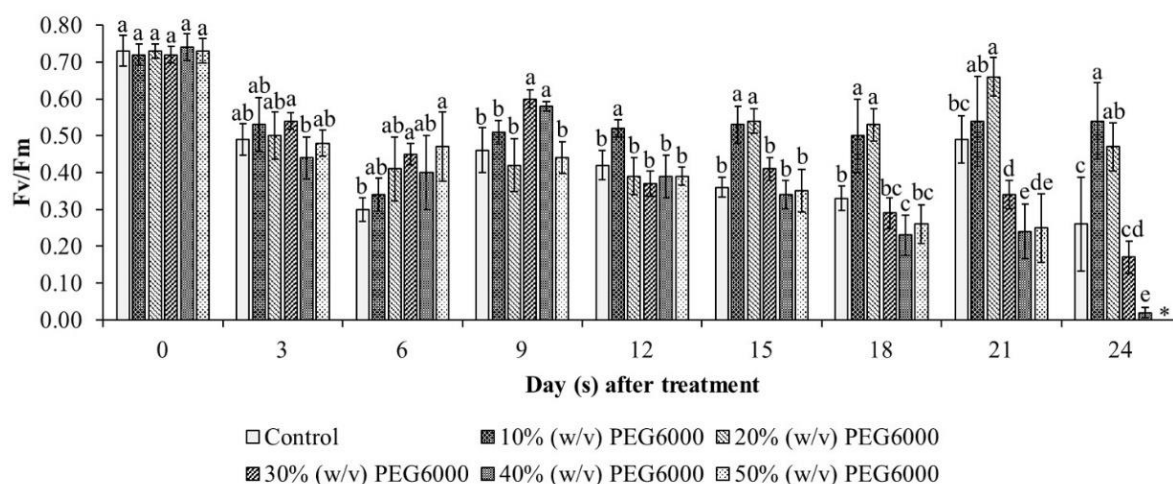
ผลการดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยโดยการศึกษามากตามกระบวนการและขั้นตอนต่าง ๆ เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งผลการดำเนินงานวิจัย มีดังนี้

การทดลองที่ 1 การหาระดับความเข้มข้นของสาร PEG6000 ที่เหมาะสมในการจำลองสถานะแล้ง เพื่อประเมินความทนทานต่อความเครียดจากความแล้งที่ต้นหนุมานประสานกายสามารถเจริญเติบโตต่อได้

1.1 ประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง

จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (maximum quantum efficiency of PSII photochemistry, F_v/F_m) ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% (w/v) PEG6000 มีค่า F_v/F_m ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม ในวันที่ 6 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10%, 20% และ 40% (w/v) PEG6000 มีค่า F_v/F_m ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 30% และ 50% (w/v) PEG6000 มีค่า F_v/F_m มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.50 และ 1.57 เท่า ตามลำดับ ในวันที่ 9 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10%, 20% และ 50% (w/v) PEG6000 มีค่า F_v/F_m ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 30% และ 40% (w/v) PEG6000 มีค่า F_v/F_m มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.30 และ 1.26 เท่า ตามลำดับ ในวันที่ 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20%, 30%, 40% และ 50% (w/v) PEG6000 มีค่า F_v/F_m ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10% (w/v) PEG6000 มีค่า F_v/F_m มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.10 เท่า ในวันที่ 15 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น

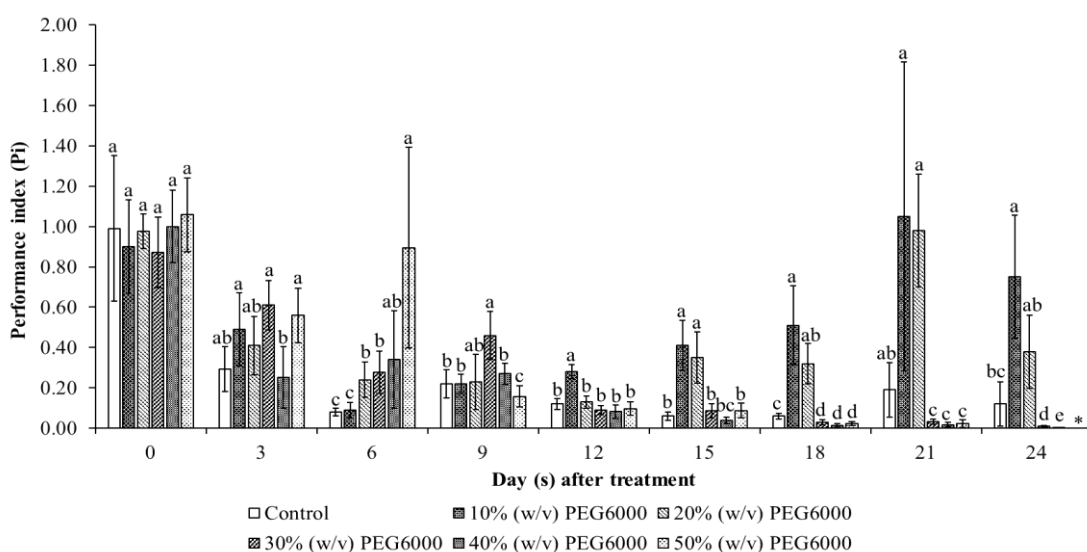


ภาพประกอบ 8 ประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (Chlorophyll fluorescence, Fv/Fm) ของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น PEG6000 แตกต่างกัน ($n = 4$) $\pm$ ค่าความคาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ * แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นหนุมานประสานกายตาย

1.2 Performance index (Pi)

จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อค่า Performance index (Pi) ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% (w/v) PEG6000 มีค่า Pi ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม ในวันที่ 6 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10% (w/v) PEG6000 มีค่า Pi ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20%, 30%, 40% และ 50% (w/v) PEG6000 มีค่า Pi มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 3.00, 3.50, 4.25 และ 11.25 เท่า ตามลำดับ ในวันที่ 9 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10%, 20% และ 40% (w/v) PEG6000 มีค่า Pi ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 30% (w/v) PEG6000 มีค่า Pi มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 2.09 เท่า และต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 50% (w/v) PEG6000

[illegible]

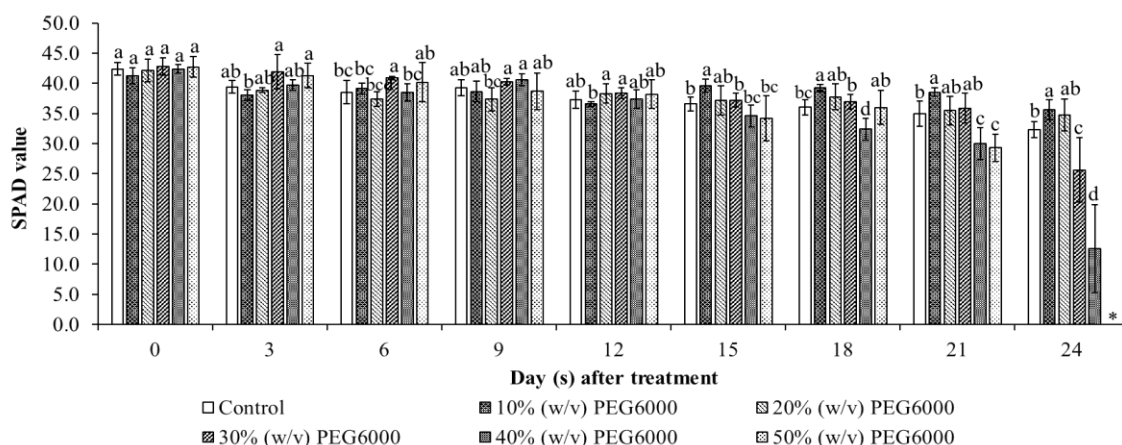


ภาพประกอบ 9 ค่า Performance index (Pi) ของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น PEG6000 แตกต่างกัน ($n = 4$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ * แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นหนุมานประสานกายตาย

1.3 ค่าดัชนีความเขียวของใบ (SPAD value)

จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อดัชนีความเขียวของใบของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% (w/v) PEG6000 มีค่าดัชนีความเขียวของใบไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม ในวันที่ 6 ของการทดลอง ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10%, 20%, 40% และ 50% (w/v) PEG6000 มีค่าดัชนีความเขียวของใบไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 30% (w/v) PEG6000 มีค่าดัชนีความเขียวของใบมากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.06 เท่า ในวันที่ 9 และวันที่ 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% (w/v) PEG6000 มีค่าดัชนีความเขียวของใบไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม ในวันที่ 15 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20%, 30%, 40% และ 50% (w/v)

[illegible]



ภาพประกอบ 10 ค่าความเขียวของใบ (SPAD value) ของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น PEG6000 แตกต่างกัน ($n = 4$) $\pm$ ค่าความคาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ * แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้

เนื่องจากต้นหนุมานประสานกายตาย

จากผลการทดลองที่ 1 และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของต้นหนุมานประสานกาย ที่ได้รับความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน (ภาพประกอบ 11) พบว่าที่ 24 วันหลังจากต้นหนุมานประสานกายได้รับความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 50% (w/v) PEG6000 ต้นพืชไม่สามารถเจริญเติบโตได้ และช่วงวันที่ 18 ถึง 24 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 30% และ 40% (w/v) PEG6000 มีประสิทธิภาพของการสังเคราะห์ด้วยแสงและมีค่าดัชนีความเขียวของใบลดลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม อย่างไรก็ตาม ในวันที่ 6 และ 9 ต้นหนุมานประสานกายมีค่า Fv/Fm และ Pi มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และในช่วงวันที่ 3 ถึง 15 ของการทดลองมีค่าดัชนีความเขียวของใบไม่แตกต่างกับชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกของการได้รับความเครียดจากความแห้งต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 30% และ 40% (w/v) PEG6000 มีความสามารถในการรักษาความเขียวของใบและประสิทธิภาพของการสังเคราะห์ด้วยแสง ในขณะที่ต้นพืชมีสภาพเครียดสูง นอกจากนี้ ต้นหนุมานประสานกายสามารถทนต่อความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 10% และ 20% (w/v) PEG6000 ได้ดี เนื่องจากในช่วงวันที่ 3 ถึง 12 ของการทดลองมีประสิทธิภาพของการสังเคราะห์ด้วยแสงไม่แตกต่างกับต้นพืชในชุดควบคุม และในช่วงวันที่ 15 ถึง 24 ของการทดลองกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดได้ดีกว่าต้นพืชใน

ชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และจากการประเมินค่าดัชนีความเขียวของใบพบว่าที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต้นหนุมานประสานกายมีค่าดัชนีความเขียวของใบไม่แตกต่างกับชุดควบคุม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับผลกระทบจากความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ดี และมีความสามารถในการรักษาความเขียวของใบได้ดี ภายใต้ความเครียดจากความแห้งที่สูงกว่าระดับความเข้มข้น 10% (w/v) PEG6000 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงกำหนดให้สารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 เป็นระดับความเครียดจากความแห้งปานกลาง และระดับความเครียดจากความแห้งรุนแรง ตามลำดับ มาใช้ในการทดลองต่อไป



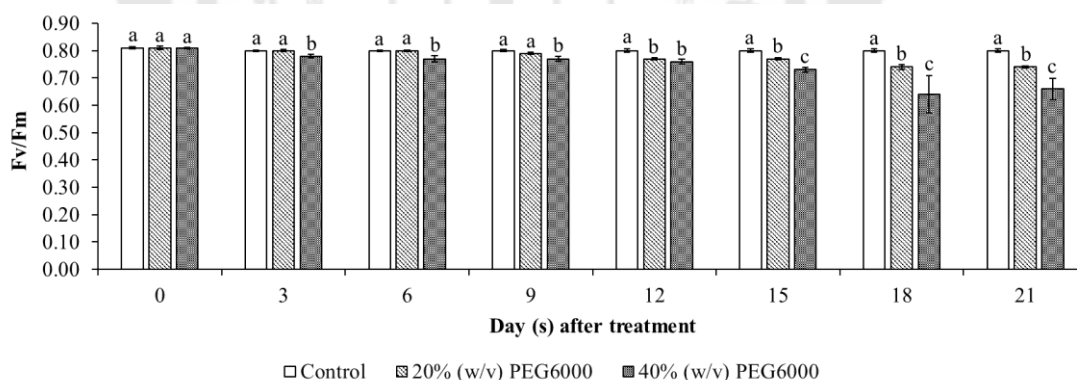


ภาพประกอบ 11 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% (w/v) PEG6000 โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุม หลังจากต้นหนุมานประสาณกายได้รับความเครียดจากความแล้งเป็นเวลา 0 วัน (a) ต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งเป็นเวลา 6 วัน (b) ต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งเป็นเวลา 15 วัน (c) และต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งเป็นเวลา 21 วัน (d)

การทดลองที่ 2 การหาระดับความเข้มข้นของ PEG6000 ที่ต้นหนุมานประสานกายสามารถทนต่อความเครียดจากความแล้ง

2.1 ประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง

จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสงของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ถึง 9 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีค่า F_v/F_m ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 12 ถึง 21 ของการทดลองมีค่า F_v/F_m น้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.96, 0.96, 0.93 และ 0.93 เท่า ตามลำดับ และในวันที่ 3 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า F_v/F_m ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม นอกจากนี้ ในวันที่ 15 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีค่า F_v/F_m มากกว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพประกอบ 12)

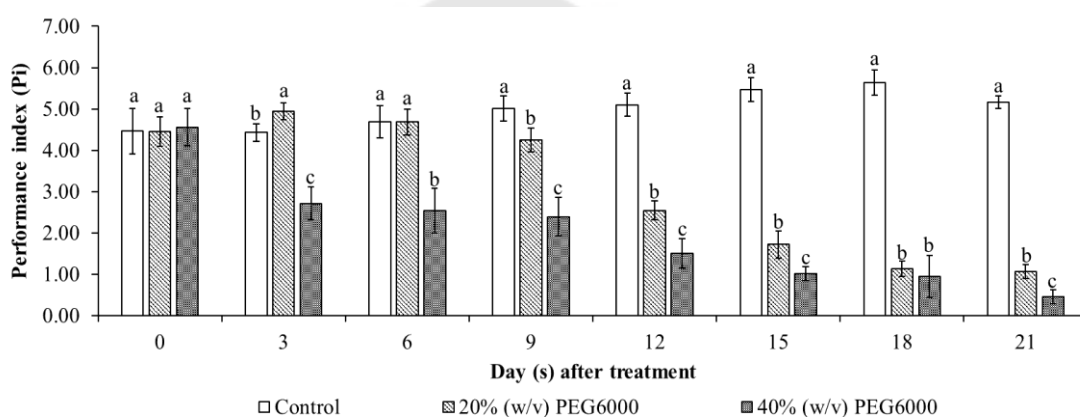


ภาพประกอบ 12 ประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (Chlorophyll fluorescence, F_v/F_m) ของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.2 Performance index (Pi)

จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อค่า Performance index (Pi) ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีค่า Pi มากกว่าต้นหนุมาน

ประสาณภายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.16 เท่า วันที่ 6 ของการทดลองพบว่าต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุมมีค่า P_i ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุม ในวันที่ 9, 12, 15, 18 และ 21 ของการทดลองพบว่า ต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุมมีค่า P_i น้อยกว่าต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.85, 0.50, 0.31, 0.20 และ 0.21 เท่า ตามลำดับ และในวันที่ 3 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุมได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า P_i ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุม (ภาพประกอบ 13)

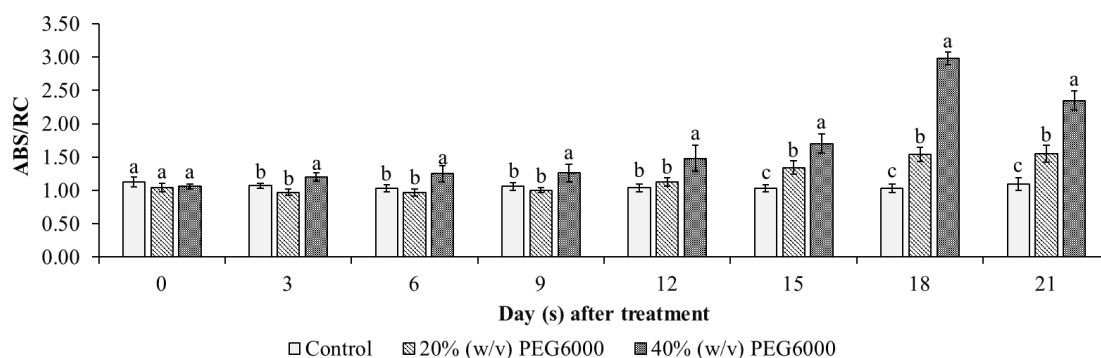


ภาพประกอบ 13 ค่า Performance index (P_i) ของต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุม เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.3 Absorption flux per active reaction center of PSII (ABS/RC)

จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อค่า ABS/RC ของต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุม พบว่า ในวันที่ 3 ถึง 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุมได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีค่า ABS/RC ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุม และในวันที่ 15 ถึง 21 ของการทดลองพบว่า ต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุมมีค่า ABS/RC มากกว่าต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.30, 1.50 และ 1.42 เท่า ตามลำดับ ในวันที่ 3 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุมได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า ABS/RC เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุม โดยมีค่า ABS/RC มากที่สุดในวันที่ 18 คิดเป็น 2.89 เท่า นอกจากนี้ ในวันที่ 3 ถึง 21

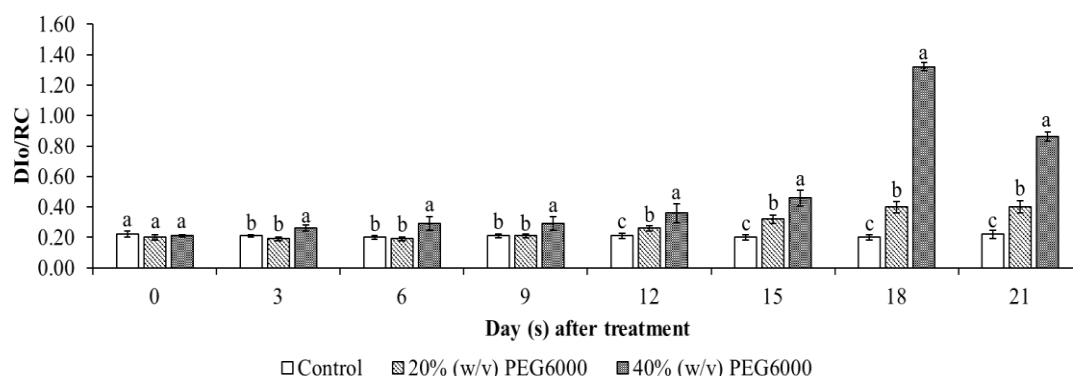
ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า ABS/RC มากกว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพประกอบ 14)



ภาพประกอบ 14 ค่า Absorption flux per active reaction center of PSII (ABS/RC) ของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.4 Dissipated energy flux per active reaction center of PSII (Dio/RC)

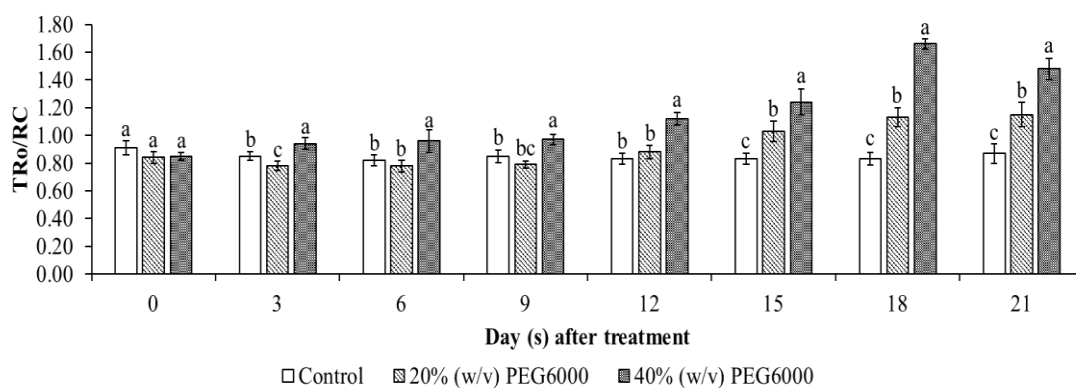
จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อค่า Dio/RC ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ถึง 9 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีค่า Dio/RC ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 12 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายมีค่า Dio/RC มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.24, 1.60, 2.00 และ 1.82 เท่า ตามลำดับ ในวันที่ 3 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า Dio/RC เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่า Dio /RC มากที่สุดในวันที่ 18 คิดเป็น 6.60 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม นอกจากนี้ ในวันที่ 3 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า Dio/RC มากกว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพประกอบ 15)



ภาพประกอบ 15 ค่า Dissipated energy flux per active reaction center of PSII (Dlo/RC) ของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.5 Trapped energy flux per active reaction center (TRo/RC)

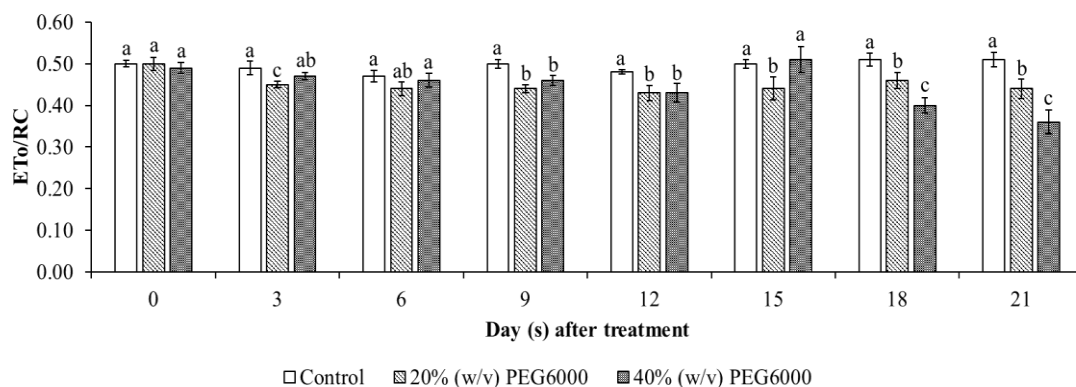
จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อค่า TRo/RC ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีค่า TRo/RC น้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.92 เท่า และในวันที่ 6 ถึง 12 ของการทดลอง พบว่า ต้นหนุมานประสานกายมีค่า TRo/RC ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 15 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายมีค่า TRo/RC มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.24, 1.36 และ 1.32 เท่า ตามลำดับ ในวันที่ 3 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า TRo/RC มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่า TRo/RC มากที่สุดในวันที่ 18 คิดเป็น 2.00 เท่า นอกจากนี้ ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า TRo/RC มากกว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพประกอบ 16)



ภาพประกอบ 16 ค่า Trapped energy flux per active reaction center (TRo/RC) ของต้นหนุมาน ประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.6 Electron transport flux per active reaction center (ETo/RC)

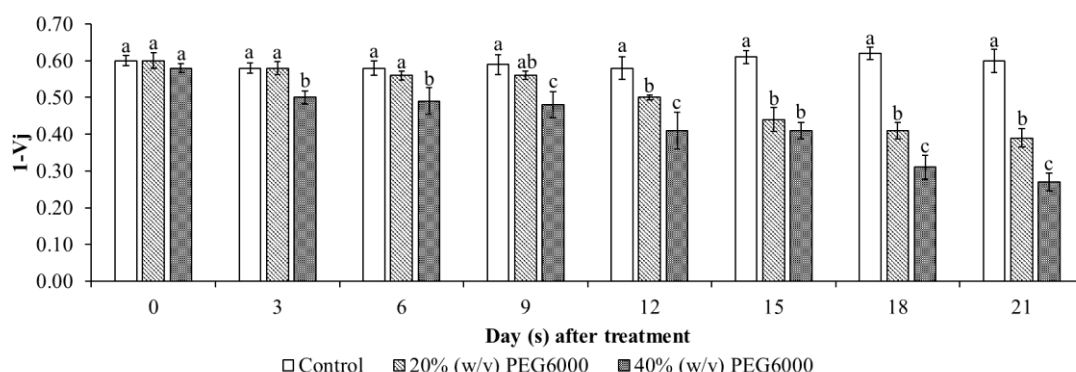
จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อค่า ETo/RC ของต้นหนุมาน ประสานกาย พบว่า ในวันที่ 6 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายในสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นของ 20% (w/v) PEG6000 มีค่า ETo/RC ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกาย ในชุดควบคุม และในวันที่ 3, 9, 12, 15, 18 และ 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายมีค่า ETo/RC น้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.92, 0.88, 0.90, 0.88, 0.90 และ 0.86 เท่า ตามลำดับ ในวันที่ 3, 6 และ 15 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า ETo/RC ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 9, 12, 18 และ 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายมีค่า ETo/RC น้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.92, 0.90, 0.78 และ 0.71 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 17)



ภาพประกอบ 17 ค่า Electron transport flux per active reaction center (ETo/RC) ของต้นหนุมานประสาณกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.7 Probability that a PSII trapped electron is transferred from Q_A to Q_B (1-Vj)

จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อค่า 1-Vj ของต้นหนุมานประสาณกาย พบว่า ในวันที่ 3 ถึง 9 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีค่า 1-Vj ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุม และในวันที่ 12 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายมีค่า 1-Vj ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุม โดยมีค่า 1-Vj น้อยที่สุดในวันที่ 21 คิดเป็น 0.65 เท่า ในวันที่ 3 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า 1-Vj ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุม โดยมีค่า 1-Vj น้อยที่สุดในวันที่ 21 คิดเป็น 0.45 เท่า (ภาพประกอบ 18)

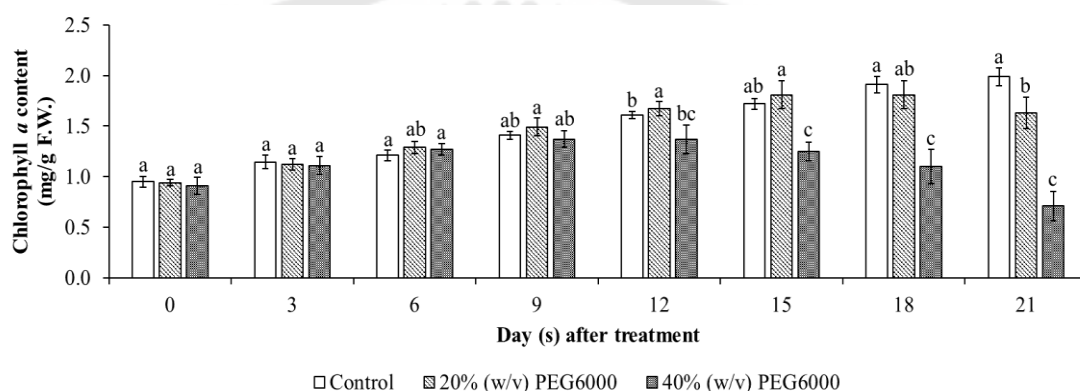


ภาพประกอบ 18 ค่า Probability that a PSII trapped electron is transferred from Q_A to Q_B (1-Vj) ของต้นหนุมานประสาณกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.8 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ

จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นหนุมานประสาณกาย พบว่า ในวันที่ 3, 6, 9, 15 และ 18 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุม ในวันที่ 12 ต้นหนุมาน

ประสาณกายมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มากกว่าต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) คิดเป็น 1.04 เท่า และในวันที่ 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยกว่าต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) คิดเป็น 0.82 เท่า ในวันที่ 3 ถึง 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุม และในวันที่ 15 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุม โดยมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยที่สุดในวันที่ 21 คิดเป็น 0.36 เท่า (ภาพประกอบ 19)

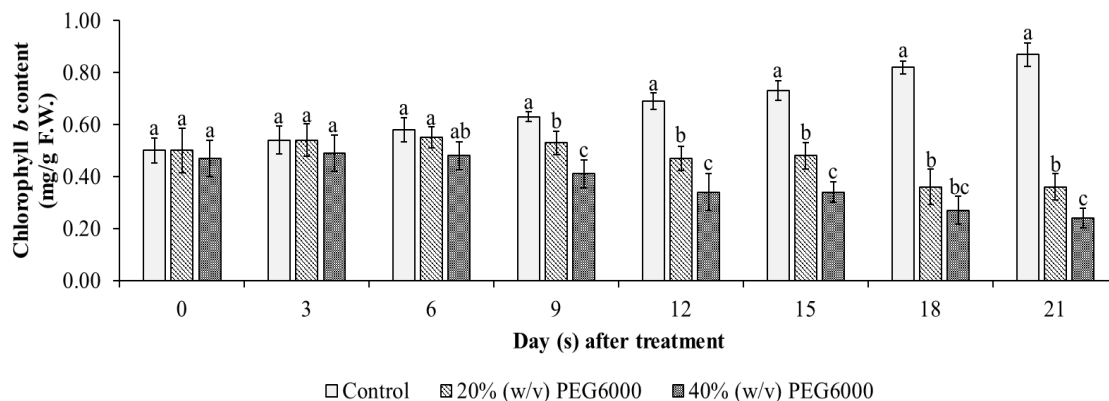


ภาพประกอบ 19 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นหนุมานประสาณกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

2.9 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี

จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของต้นหนุมานประสาณกาย พบว่า ในวันที่ 3 ถึง 6 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุม และในวันที่ 9 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี น้อยกว่าต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) นอกจากนี้ ในวันที่ 9, 12, 15 และ 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี น้อยกว่าต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจาก

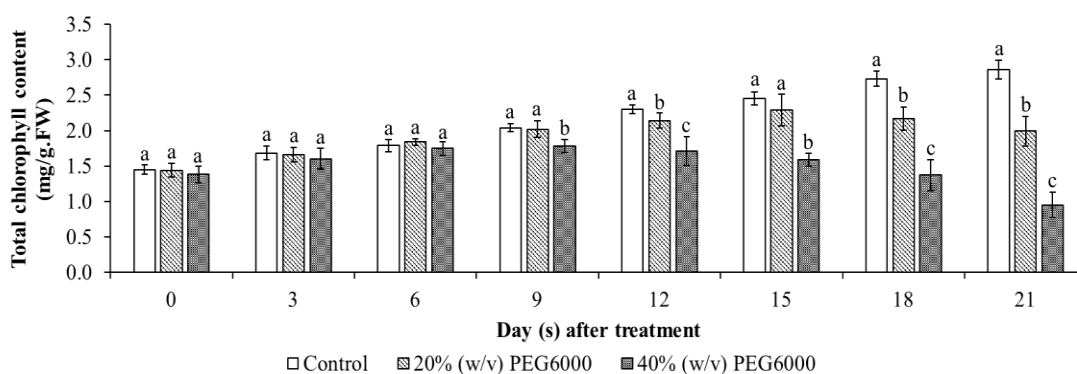
ความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพประกอบ 20)



ภาพประกอบ 20 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.10 ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม

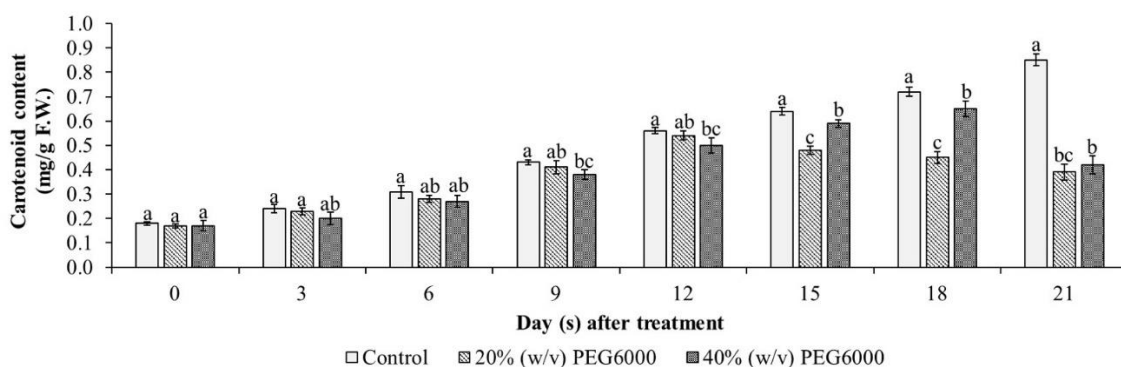
จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อปริมาณคลอโรฟิลล์รวมของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3, 6, 9 และ 15 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 12, 18 และ 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมน้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.93, 0.79 และ 0.70 เท่า ตามลำดับ ในวันที่ 3 และ 6 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 9 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม โดยมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมน้อยที่สุดในวันที่ 21 คิดเป็น 0.33 เท่า (ภาพประกอบ 21)



ภาพประกอบ 21 ปริมาณคลอโรฟิลล์รวมของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.11 ปริมาณแคโรทีนอยด์

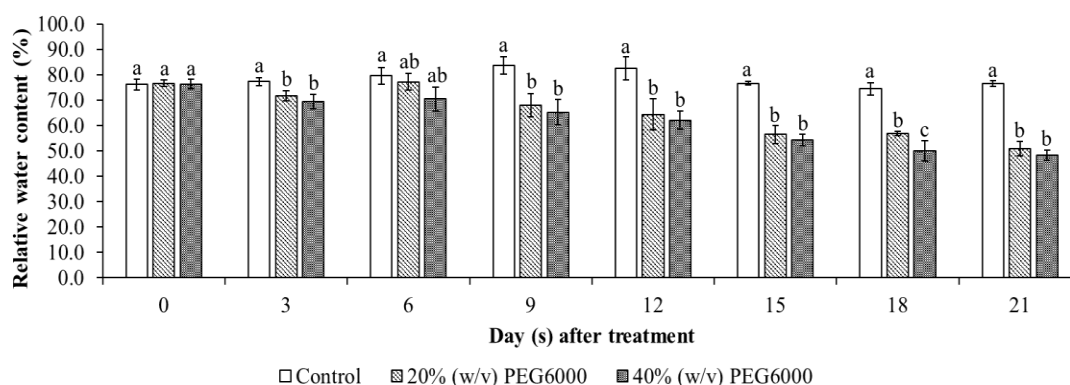
จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อปริมาณแคโรทีนอยด์ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ถึง 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีปริมาณแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 15 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายมีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.75, 0.63 และ 0.46 เท่า ตามลำดับ ในวันที่ 3 และ 6 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีปริมาณแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 9 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยที่ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีปริมาณแคโรทีนอยด์มากที่สุดในวันที่ 18 คิดเป็น 0.90 เท่า นอกจากนี้ ในวันที่ 15 และ 18 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีปริมาณแคโรทีนอยด์มากกว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพประกอบ 22)



ภาพประกอบ 22 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของต้นหนุ่มาประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.12 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ

จากการศึกษาผลของระดับความเครียดจากความแล้งต่อปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบของต้นหนุ่มาประสานกาย พบว่า ในวันที่ 6 ของการทดลองต้นหนุ่มาประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบไม่แตกต่างกับต้นหนุ่มาประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 3, 9, 12, 15, 18 และ 21 ของการทดลองต้นหนุ่มาประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุ่มาประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ ในวันที่ 18 ของการทดลองต้นหนุ่มาประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์มากกว่าต้นหนุ่มาประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพประกอบ 23)



ภาพประกอบ 23 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบของต้นหนุมานประสานกาย เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากผลการทดลองที่ 2 การหาระดับความเข้มข้นของ PEG6000 ที่ต้นหนุมานประสานกายมีความสามารถในการทนต่อระดับความเครียดจากความแล้ง และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 (ภาพประกอบ 24) พบว่า ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีประสิทธิภาพของการใช้แสงที่ดีกว่า เนื่องจากในวันที่ 3 ถึง 9 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายมีค่า F_v/F_m ไม่แตกต่างกับชุดควบคุม และในวันที่ 15 ถึง 21 ของการทดลอง มีค่า F_v/F_m มากกว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และระบบแสง II ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีความสามารถในการรับโฟตอนได้ดีกว่า โดยในวันที่ 3 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายมีค่า P_i มากกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และช่วงวันที่ 3 ถึง 15 และวันที่ 21 ของการทดลองมีค่า P_i มากกว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากการวัดค่า ABS/RC พบว่า ในวันที่ 3 ถึง 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีค่า ABS/RC ไม่แตกต่างกับชุดควบคุม และต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า ABS/RC มากกว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าพลังงานแสงที่ดูดซับส่วนใหญ่ไม่ถูกนำไปใช้ในกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน จากการวัดค่า Dio/RC พบว่า ในวันที่ 3 ถึง 9 ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีค่า Dio/RC ไม่แตกต่างกับชุดควบคุม และต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า Dio/RC สูงที่สุด ตั้งแต่วันที่ 3 ถึง 21 แสดงให้เห็นว่าศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II บางส่วนไม่สามารถใช้พลังงานแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจาก

ความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า TRo/RC เพิ่มขึ้น แต่มีค่า ETo/RC ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาสามารถดักจับพลังงานได้ดี แต่ไม่สามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนในระบบแสง II ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการวัดค่า 1-Vj พบว่า ในวันที่ 3 ถึง 9 ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีค่า 1-Vj ไม่แตกต่างกับชุดควบคุม และต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า 1-Vj ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 เกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้ดีกว่า นอกจากนี้ ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีการสะสมปริมาณคลอโรฟิลล์รวมในวันที่ 9 ถึง 21 ของการทดลองมากกว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และในวันที่ 18 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีการรักษาปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม ความเครียดจากความแล้งในระดับที่รุนแรงส่งผลให้ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีการสะสมปริมาณแคโรทีนอยด์มากกว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ในวันที่ 15 และ 18 จากผลการทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งในระดับปานกลางที่ความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีศักยภาพในการทนต่อความแล้ง โดยมีความสามารถในการรักษาประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้นาน 9 วัน และมีการสะสมปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ซึ่งเป็นรงควัตถุที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกระดับความเข้มข้นที่ 20% (w/v) PEG6000 นำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษากลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาและปริมาณสารออกฤทธิ์ภายใต้สภาวะแล้งในการทดลองขั้นต่อไป

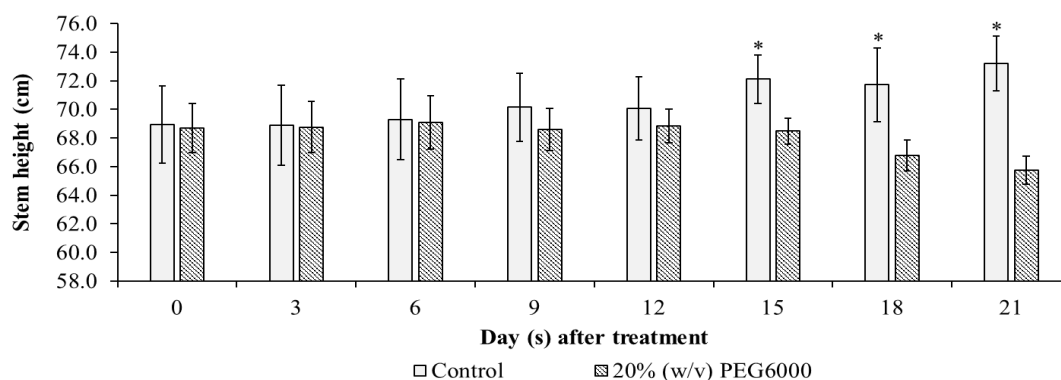


ภาพประกอบ 24 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม หลังได้รับสภาวะแล้งเป็นเวลา 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 วัน

การทดลองที่ 3 ผลของความเครียดจากความแล้งของต้นหนุมานประสานกายต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการ และปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

3.1 ความสูงของลำต้น

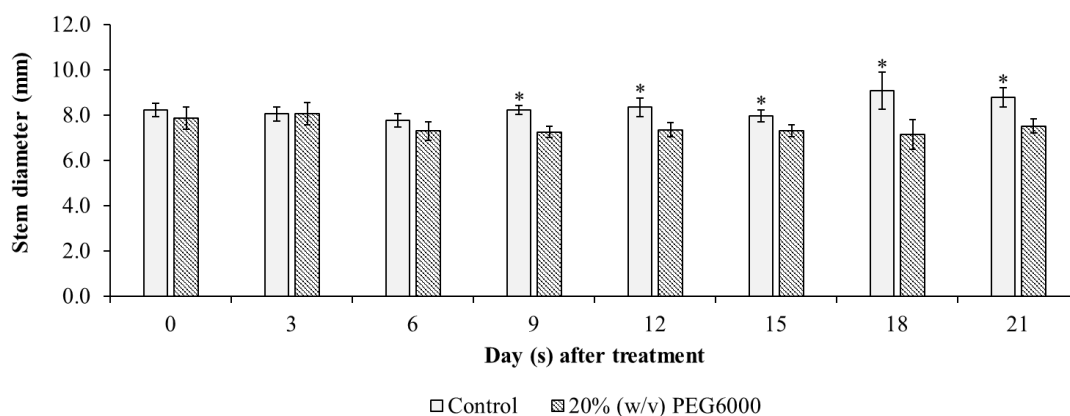
จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อความสูงของลำต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ถึง 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีความสูงของลำต้นไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 15 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีความสูงของลำต้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม คิดเป็น 0.95, 0.93 และ 0.90 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 25)



ภาพประกอบ 25 ความสูงของลำต้นของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Student's t-test

3.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 และ 6 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 9 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นน้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.88, 0.88, 0.92, 0.79 และ 0.86 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 26)

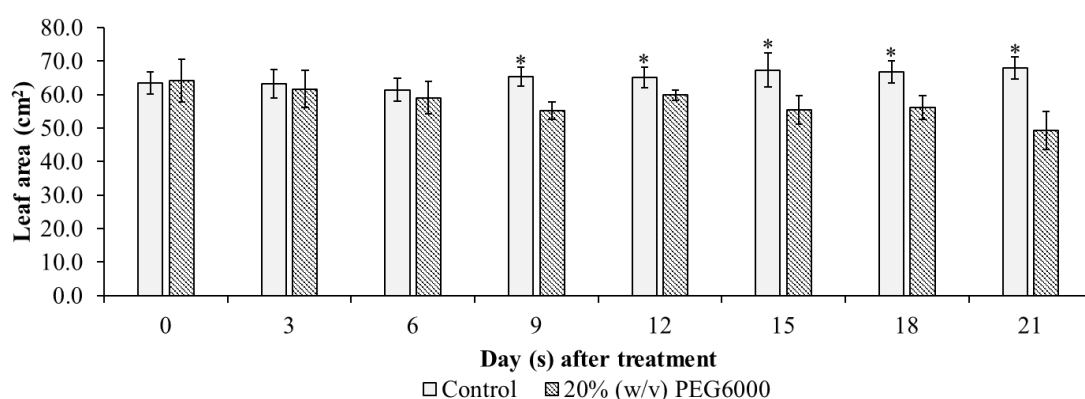


ภาพประกอบ 26 เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Student's t-test

3.3 พื้นที่ใบ

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อพื้นที่ใบของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 และ 6 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีพื้นที่ใบไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 9 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีพื้นที่ใบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม คิดเป็น 0.84, 0.92, 0.82, 0.84 และ 0.73 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 27)



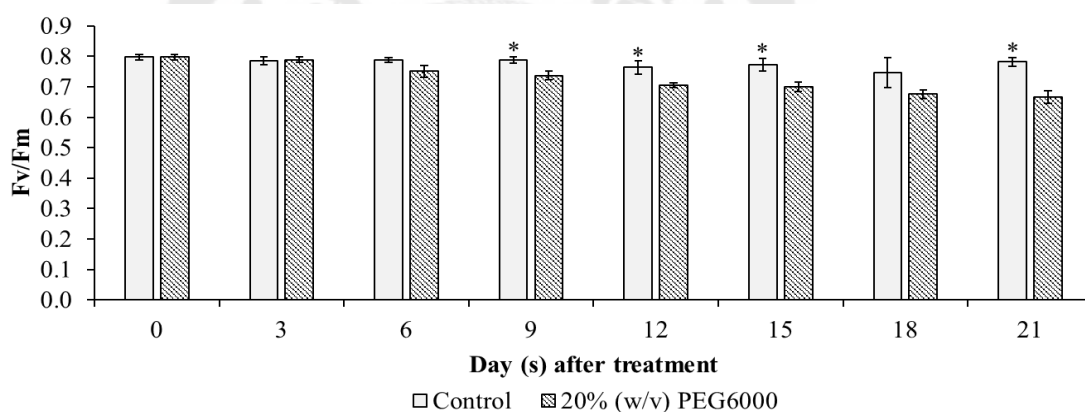
ภาพประกอบ 27 พื้นที่ใบของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error)

เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี

Student's t-test

3.4 ประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสงของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3, 6 และ 18 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสงไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 9, 12, 15 และ 21 ของการทดลอง ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสงลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม คิดเป็น 0.93, 0.92, 0.91 และ 0.85 เท่าตามลำดับ (ภาพประกอบ 28)

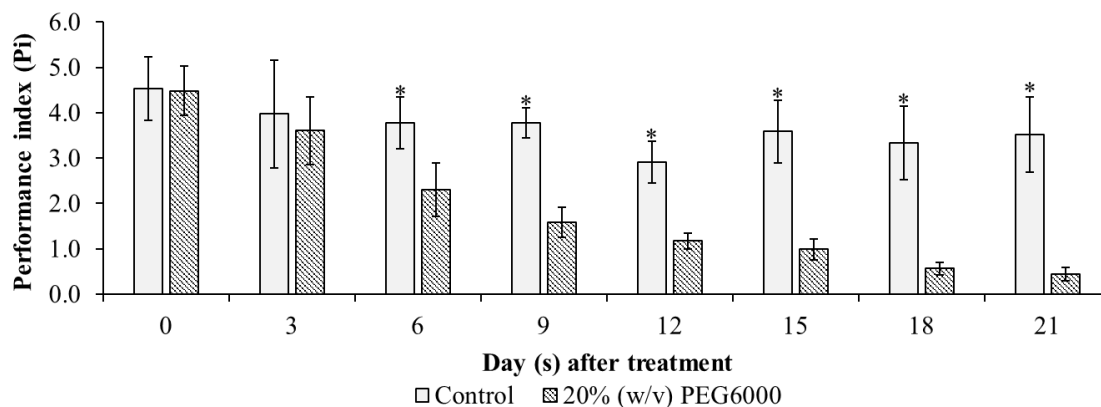


ภาพประกอบ 28 ประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสง (Chlorophyll fluorescence, Fv/Fm) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Student's t-test

3.5 Performance index (Pi)

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อค่า Pi ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่า Pi ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 6 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่า Pi ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมาน

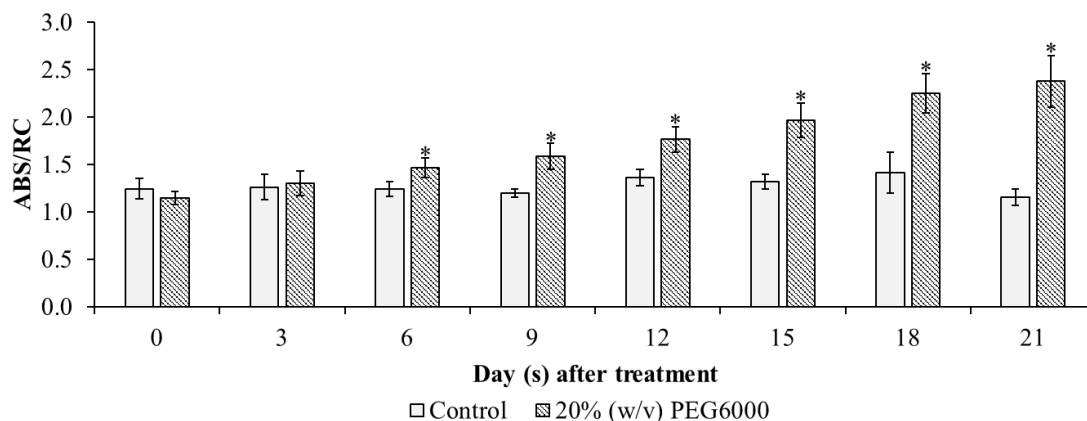
ประสาณภายในชุดควบคุม คิดเป็น 0.61, 0.42, 0.40, 0.28, 0.17 และ 0.12 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 29)



ภาพประกอบ 29 ค่า Performance index (Pi) ของต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุมที่ได้รับผลกระทบจากความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.6 Absorption flux per active reaction center of PSII (ABS/RC)

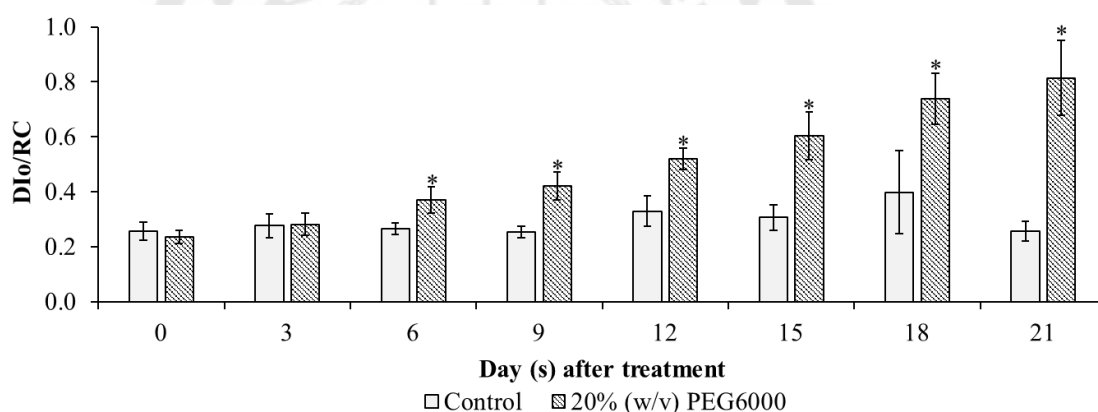
จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อค่า ABS/RC ของต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุม พบว่า ในวันที่ 3 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุมที่ได้รับผลกระทบจากความเครียดจากความแห้งมีค่า ABS/RC ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุม และในวันที่ 6 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุมที่ได้รับผลกระทบจากความเครียดจากความแห้งมีค่า ABS/RC เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสาณภายในชุดควบคุม คิดเป็น 1.18, 1.33, 1.30, 1.50, 1.59 และ 2.06 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 30)



ภาพประกอบ 30 ค่า Absorption flux per active reaction center of PSII (ABS/RC) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.7 Dissipated energy flux per active reaction center of PSII (Dlo/RC)

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อค่า Dlo/RC ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่า Dlo/RC ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 6 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่า Dlo/RC เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม คิดเป็น 1.40, 1.65, 1.58, 1.97, 1.85 และ 3.18 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 31)

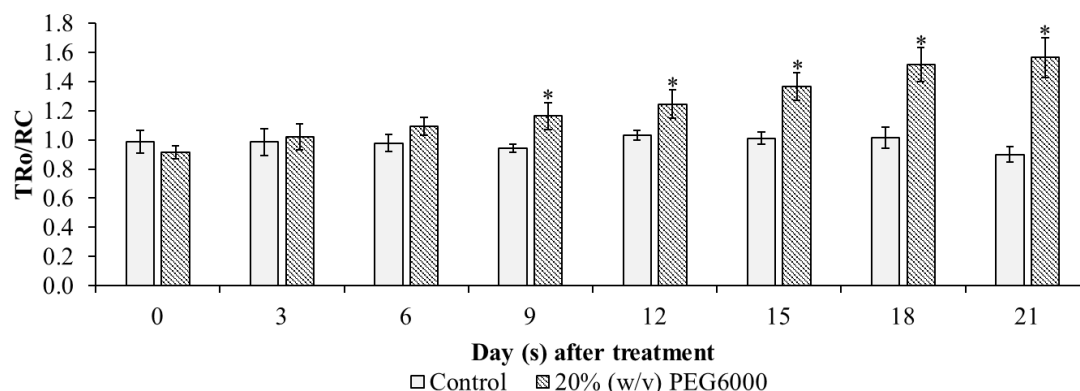


ภาพประกอบ 31 ค่า Dissipated energy flux per active reaction center of PSII (Dlo/RC) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.8 Trapped energy flux per active reaction center (TRo/RC)

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อค่า TRo/RC ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 และ 6 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่า TRo/RC ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 9 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่า TRo/RC เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อ

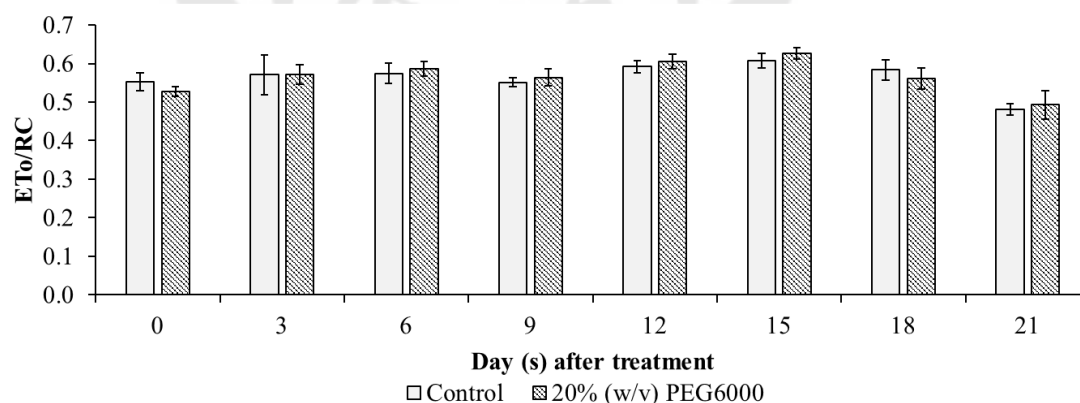
เปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานภายในชุดควบคุม คิดเป็น 1.24, 1.21, 1.35, 1.49 และ 1.74 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 32)



ภาพประกอบ 32 ค่า Trapped energy flux per active reaction center (TRo/RC) ของต้นหนุมานประสานภายในชุดควบคุมที่ได้รับผลกระทบจากความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.9 Electron transport flux per active reaction center (ETo/RC)

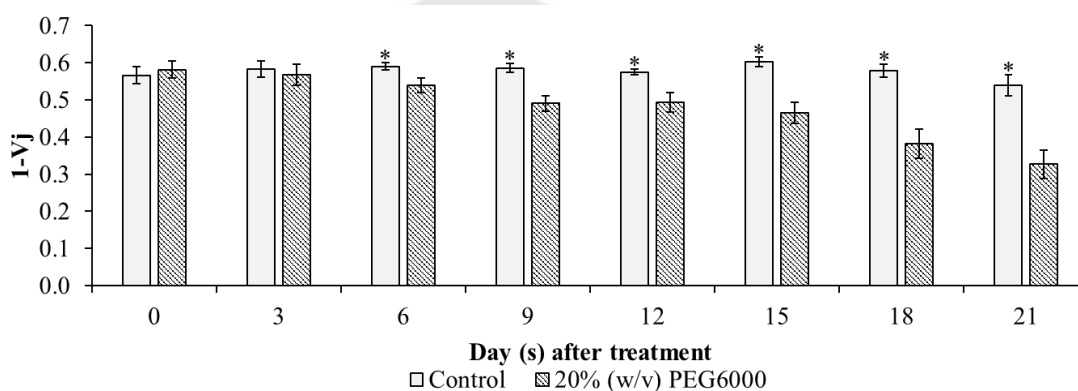
จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อค่า ETo/RC ของต้นหนุมานประสานภายในชุดควบคุม พบว่า ต้นหนุมานประสานภายในชุดควบคุมที่ได้รับผลกระทบจากความเครียดจากความแห้งมีค่า ETo/RC ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานภายในชุดควบคุม (ภาพประกอบ 33)



ภาพประกอบ 33 ค่า Electron transport flux per active reaction center (ETo/RC) ของต้นหนุมานประสานภายในชุดควบคุมที่ได้รับผลกระทบจากความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) โดยเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.10 Probability that a PSII trapped electron is transferred from Q_A to Q_B ($1-V_j$)

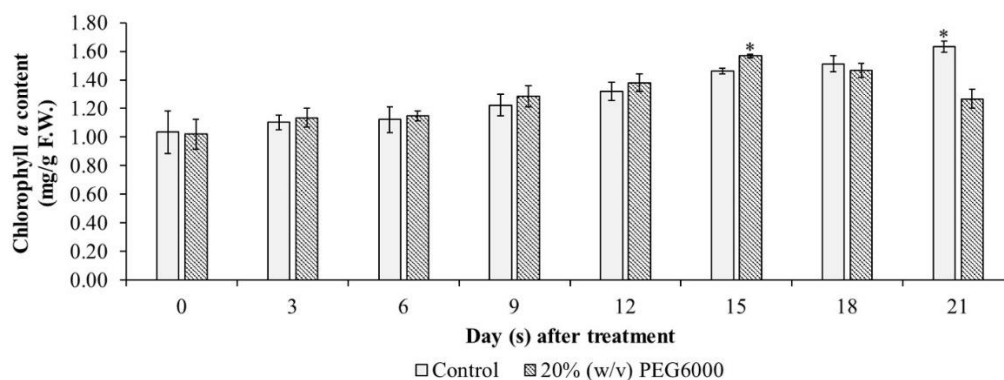
จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อค่า $1-V_j$ ของต้นหนุมานประสาณกาย พบว่า ในวันที่ 3 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่า $1-V_j$ ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุม และในวันที่ 6 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่า $1-V_j$ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุม คิดเป็น 0.91, 0.84, 0.86, 0.77, 0.66 และ 0.61 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 34)



ภาพประกอบ 34 ค่า Probability that a PSII trapped electron is transferred from Q_A to Q_B ($1-V_j$) ของต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.11 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ

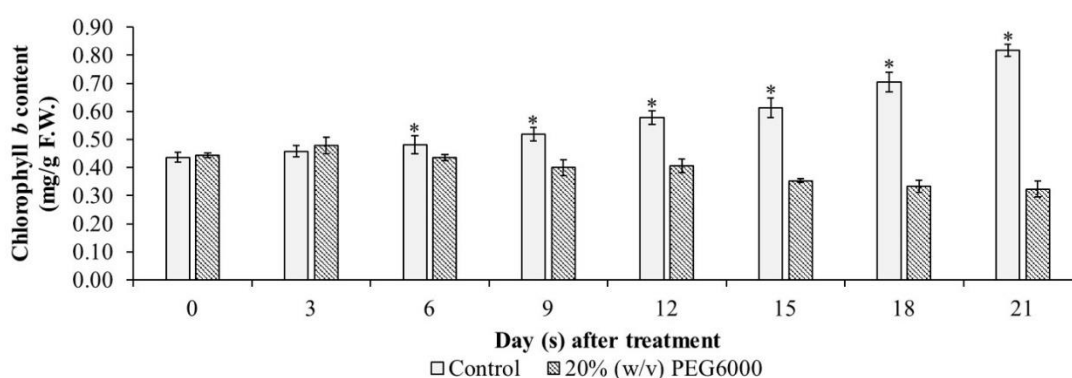
จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นหนุมานประสาณกาย พบว่า ในวันที่ 3, 6, 9, 12 และ 18 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุม และในวันที่ 15 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มากกว่าต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.07 เท่า และในวันที่ 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยกว่าต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.78 เท่า (ภาพประกอบ 35)



ภาพประกอบ 35 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.12 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี

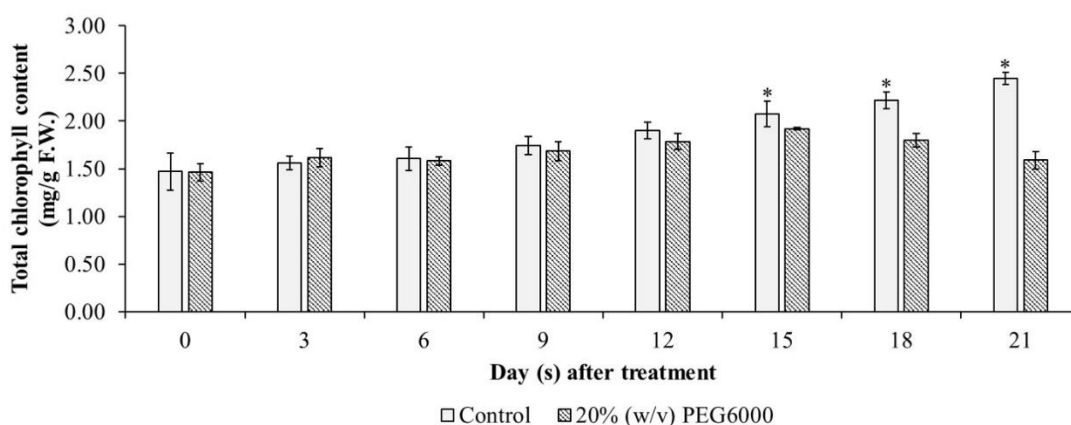
จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 6 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม คิดเป็น 0.90, 0.77, 0.70, 0.57, 0.47 และ 0.40 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 36)



ภาพประกอบ 36 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.13 ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม

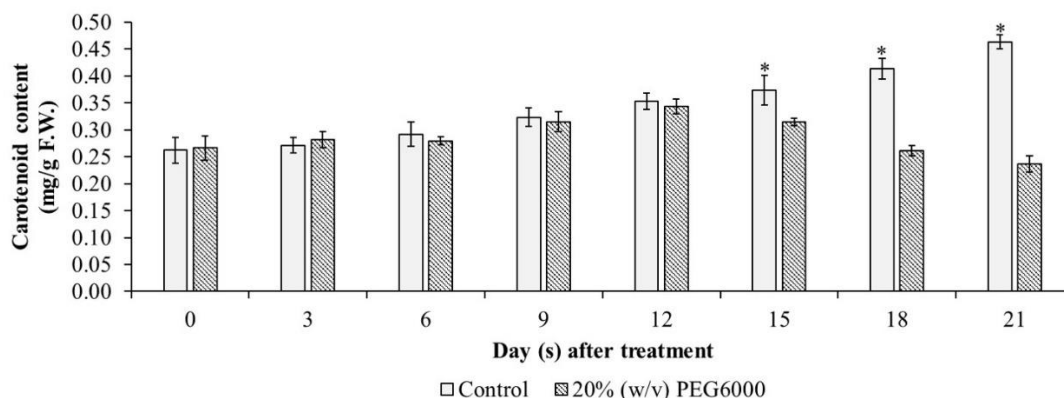
จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์รวมของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ถึง 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 15 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม คิดเป็น 0.92, 0.81 และ 0.65 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 37)



ภาพประกอบ 37 ปริมาณคลอโรฟิลล์รวมของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Student's t-test

3.14 ปริมาณแคโรทีนอยด์

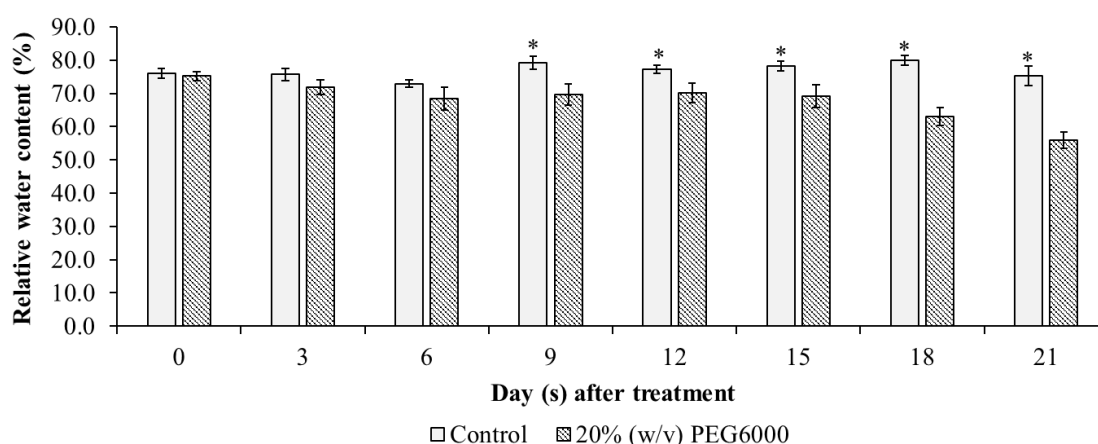
จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อปริมาณแคโรทีนอยด์ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ถึง 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 15 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณแคโรทีนอยด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม คิดเป็น 0.84, 0.63 และ 0.51 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 38)



ภาพประกอบ 38 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.15 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 และ 6 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 9 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม คิดเป็น 0.88, 0.91, 0.88, 0.79 และ 0.74 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 39)

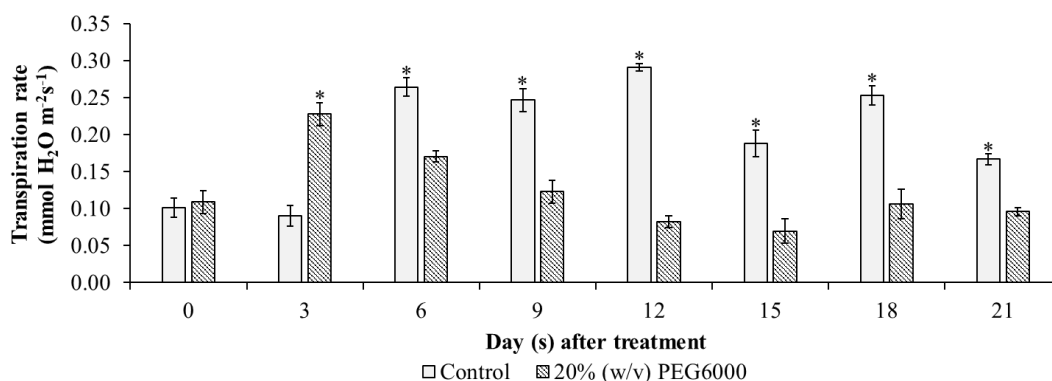


ภาพประกอบ 39 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE;

standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.16 อัตราการคายน้ำ

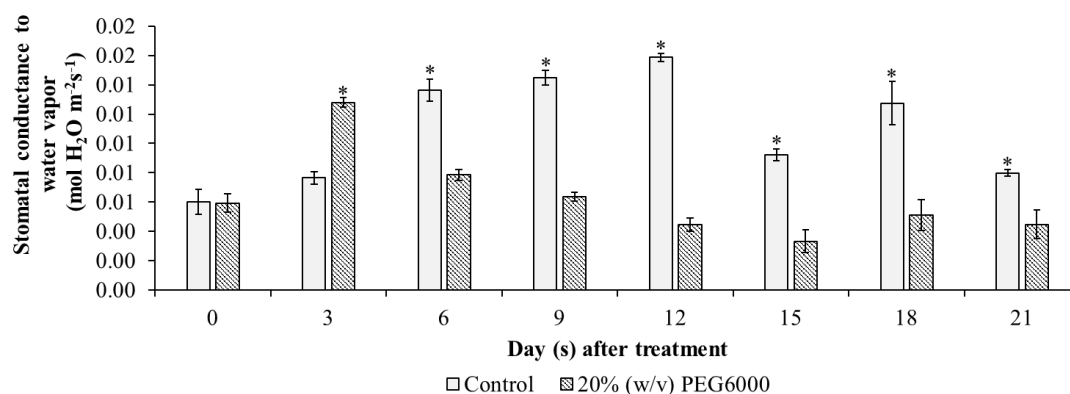
จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่ออัตราการคายน้ำของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีอัตราการคายน้ำมากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 2.51 เท่า และในวันที่ 6 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีอัตราการคายน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม คิดเป็น 0.64, 0.50, 0.28, 0.37, 0.42 และ 0.57 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 40)



ภาพประกอบ 40 อัตราการคายน้ำของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.17 ค่าการนำไหลของปากใบ

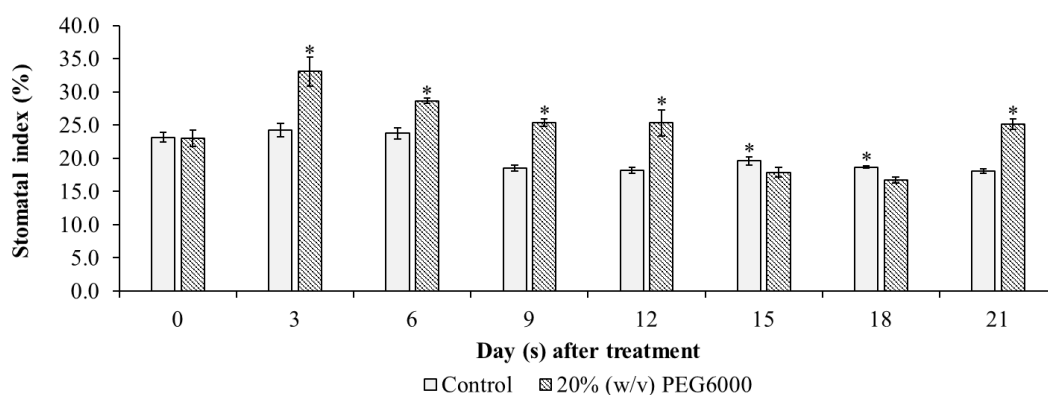
จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อค่าการนำไหลของปากใบของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่าการนำไหลของปากใบมากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.67 เท่า และในวันที่ 6 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่าการนำไหลของปากใบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม คิดเป็น 0.58, 0.44, 0.28, 0.36, 0.40 และ 0.56 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 41)



ภาพประกอบ 41 ค่าการนำไหลดของปากใบของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.18 ดัชนีของปากใบ

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อค่าดัชนีของปากใบของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3, 6, 9, 12 และ 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่าดัชนีของปากใบมากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.37, 1.21, 1.37, 1.40 และ 1.39 เท่า ตามลำดับ และในวันที่ 15 และ 18 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่าดัชนีของปากใบน้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.91 และ 0.90 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 42)



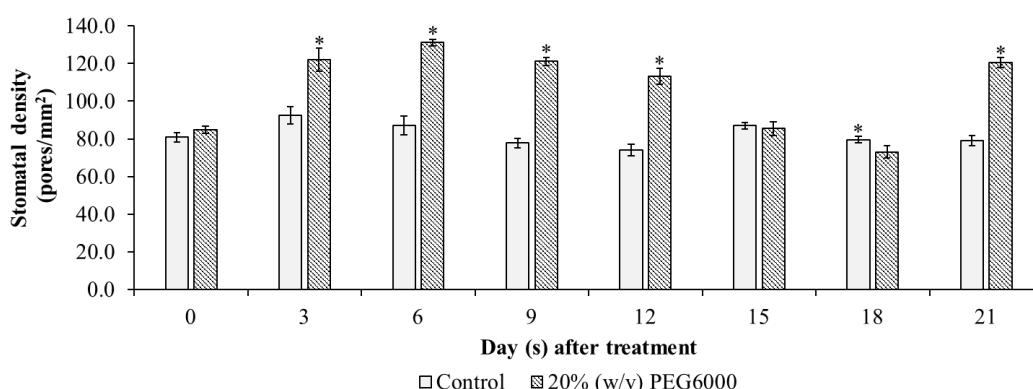
ภาพประกอบ 42 ค่าดัชนีของปากใบของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error)

เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี

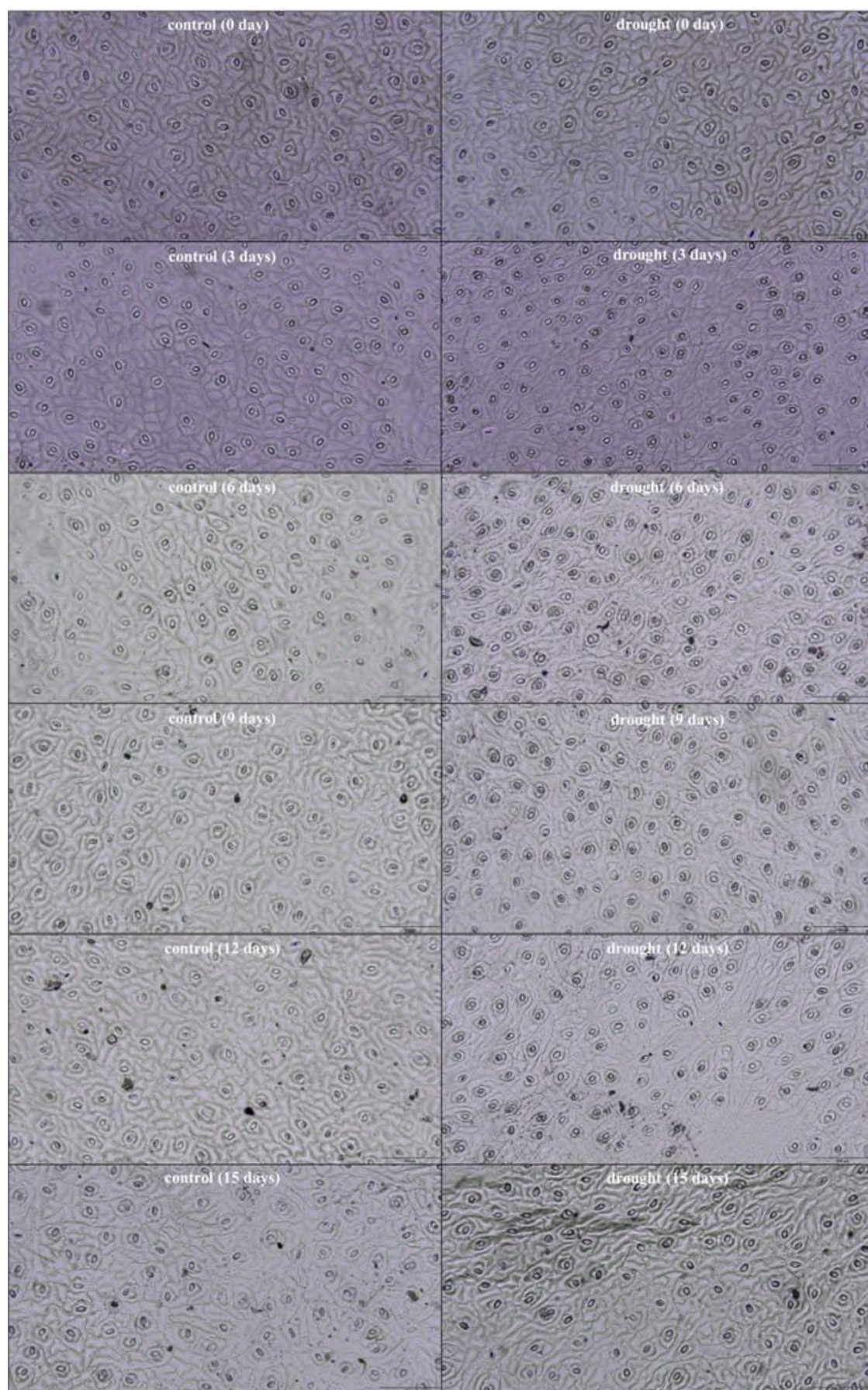
Student's t-test

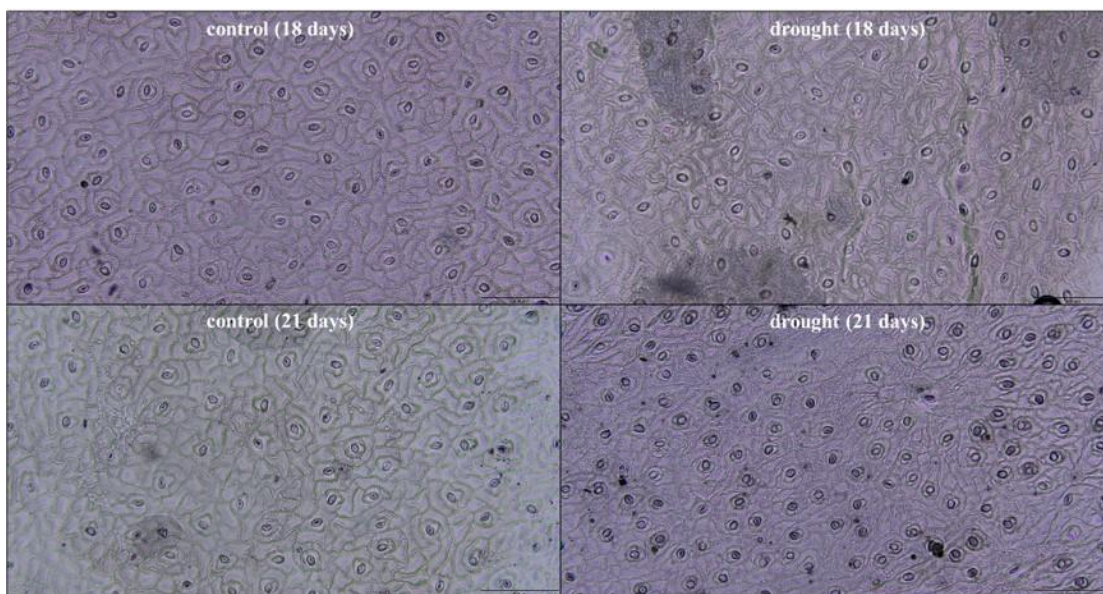
3.19 ความหนาแน่นของปากใบ

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อความหนาแน่นของปากใบของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 15 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีความหนาแน่นของปากใบไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 3, 6, 9, 12 และ 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีความหนาแน่นของปากใบมากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.32, 1.51, 1.56, 1.53 และ 1.53 เท่า ตามลำดับ และในวันที่ 18 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีความหนาแน่นของปากใบน้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.92 เท่า (ภาพประกอบ 43 และ 44)



ภาพประกอบ 43 ความหนาแน่นของปากใบของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

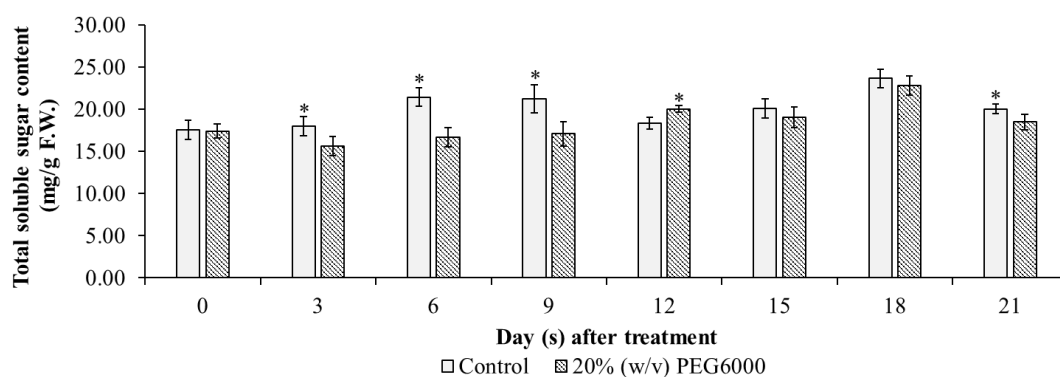




ภาพประกอบ 44 ความหนาแน่นและลักษณะของปากใบของต้นหนุมานประสานภายใต้การได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม หลังได้รับสภาวะแล้งเป็นเวลา 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 วัน ที่กำลังขยาย 100 เท่า (scale bar = 200 μ m)

3.20 ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำ

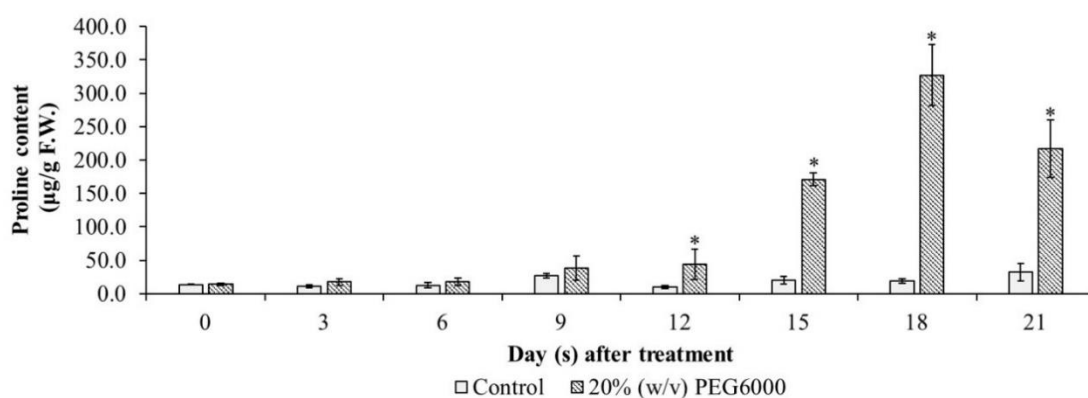
จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำของต้นหนุมานประสาน พบว่า ในวันที่ 15 และ 18 ของการทดลองต้นหนุมานประสานภายใต้การได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานภายในชุดควบคุม ในวันที่ 3, 6, 9 และ 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานภายใต้การได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำน้อยกว่าต้นหนุมานประสานภายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.87, 0.78, 0.81 และ 0.92 เท่า ตามลำดับ และในวันที่ 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานภายใต้การได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำมากกว่าต้นหนุมานประสานภายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.09 เท่า (ภาพประกอบ 45)



ภาพประกอบ 45 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.21 ปริมาณโพรลีน

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อปริมาณโพรลีนของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ถึง 9 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณโพรลีนไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 12 ถึง 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณโพรลีนมากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 4.36, 8.54, 17.28 และ 6.78 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 46)



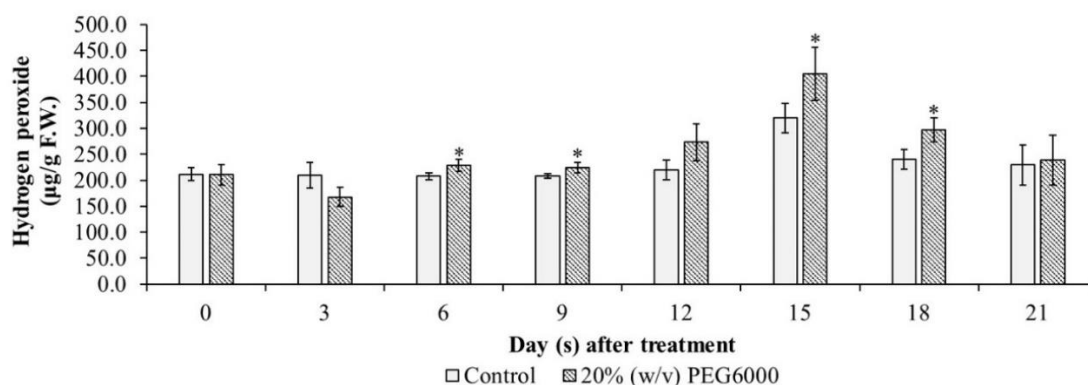
ภาพประกอบ 46 ปริมาณโพรลีนของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error)

เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี

Student's t-test

3.22 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

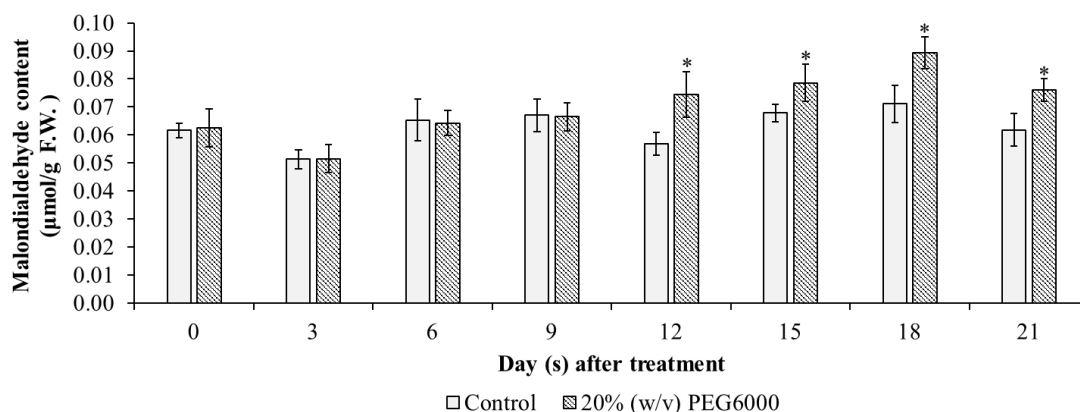
จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3, 12 และ 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 6, 9, 15 และ 18 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.10, 1.08, 1.27 และ 1.23 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 47)



ภาพประกอบ 47 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.23 ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์

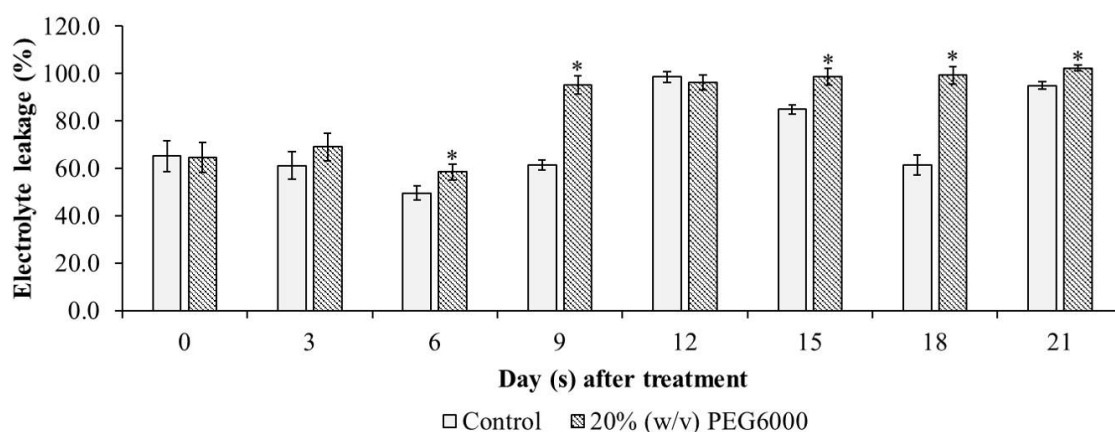
จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 ถึง 9 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 12 ถึง 21 ของการทดลอง ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.31, 1.16, 1.26 และ 1.23 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 48)



ภาพประกอบ 48 ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.24 การรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 และ 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 6, 9, 15, 18 และ 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.18, 1.55, 1.16, 1.61 และ 1.08 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 49)

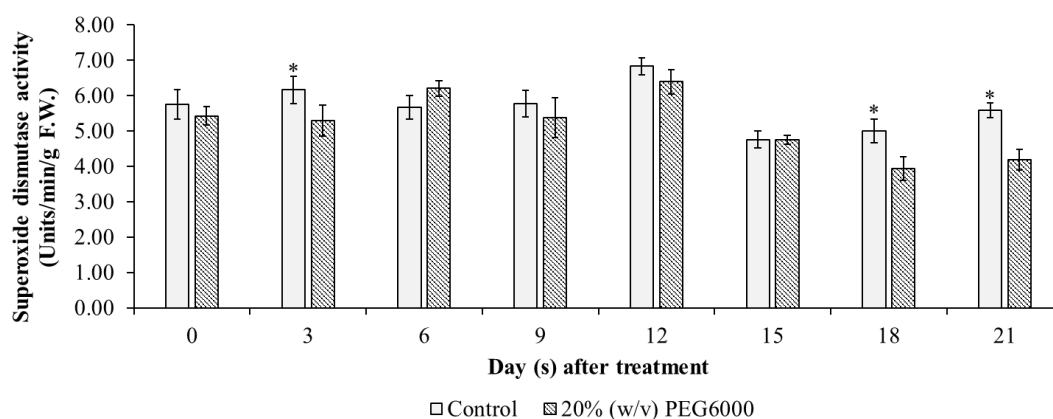


ภาพประกอบ 49 การรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE;

standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.25 เอนไซม์ superoxide dismutase (SOD)

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 6, 9, 12 และ 15 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแห้งมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 3, 18 และ 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแห้งมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD น้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.86, 0.79 และ 0.75 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 50)

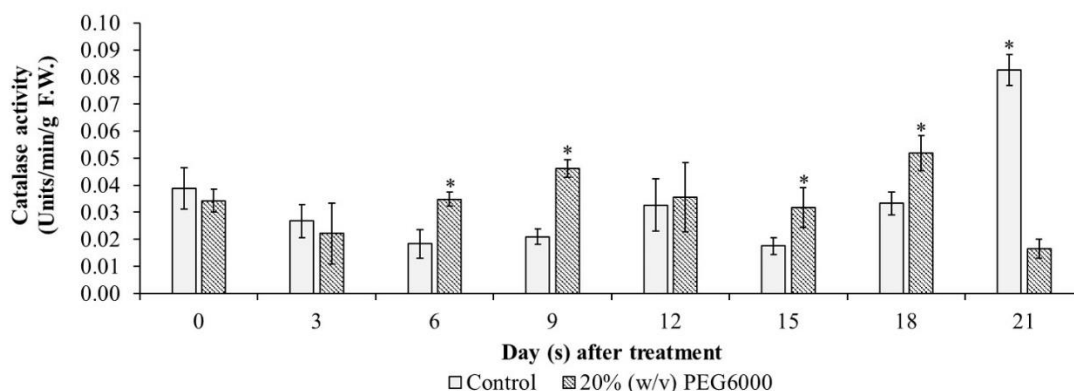


ภาพประกอบ 50 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.26 เอนไซม์ catalase (CAT)

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแห้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ CAT ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 และ 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแห้งมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ CAT ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 6, 9, 15 และ 18 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแห้งมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ CAT มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.90, 2.20, 1.81 และ 1.56 เท่า ตามลำดับ และในวันที่ 21 ของการ

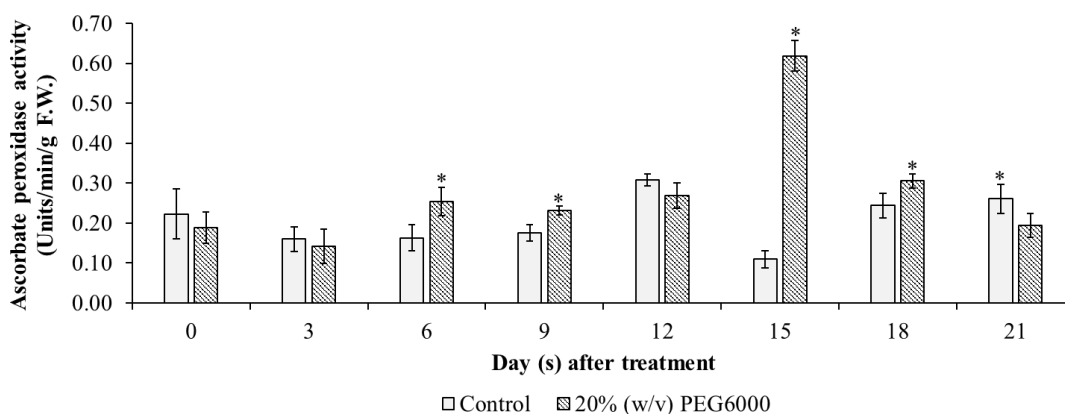
ทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ CAT น้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.20 เท่า (ภาพประกอบ 51)



ภาพประกอบ 51 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ catalase (CAT) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

3.27 เอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX)

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ APX ของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ในวันที่ 3 และ 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ APX ไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 6, 9, 15 และ 18 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ APX มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.55, 1.32, 5.66 และ 1.25 เท่า ตามลำดับ และในวันที่ 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ APX น้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.74 เท่า (ภาพประกอบ 52)

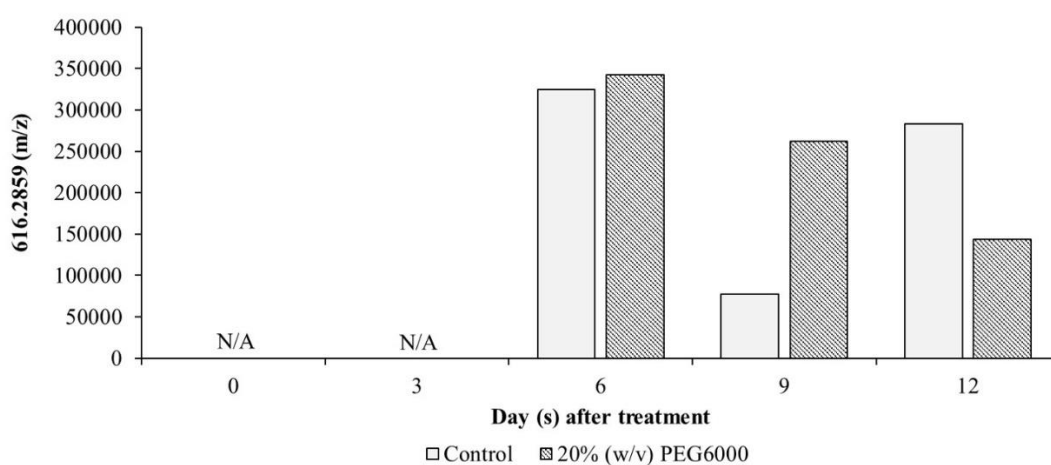


ภาพประกอบ 52 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ ascorbate peroxidase (APX) ของต้นหนุมาน ประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ($n = 5$) $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อน (SE; standard error) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วย Student's t-test

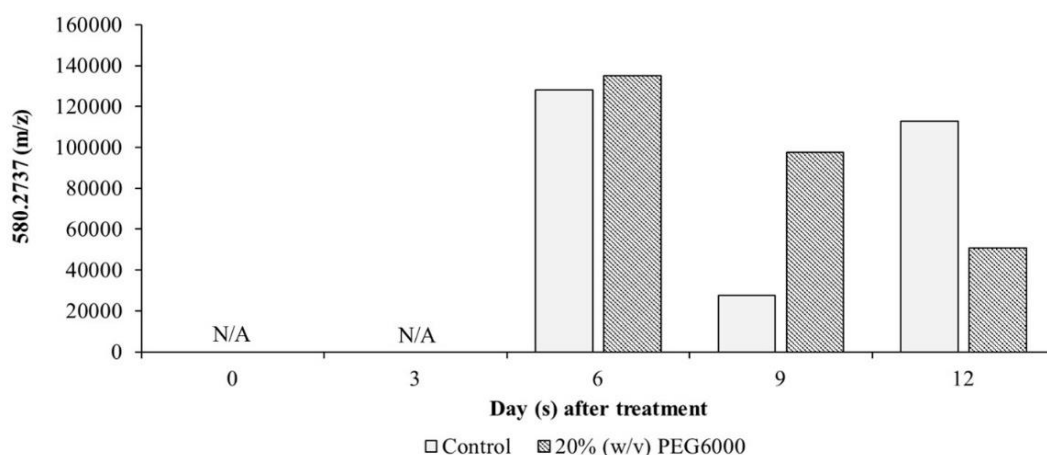
3.28 ปริมาณไตรโทพินอยด์ ซาโปนิน

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อปริมาณไตรโทพินอยด์ ซาโปนินของต้นหนุมานประสานกาย โดยเปรียบเทียบปริมาณสารเชิงสัมพัทธ์จากพื้นที่ใต้กราฟของกราฟโครมาโทแกรม พบว่า ในวันที่ 0 และ 3 ของการทดลอง ไม่พบปริมาณของสารไตรโทพินอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 1 (616.2859 m/z) ในต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 6, 9 และ 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมมีพื้นที่ใต้กราฟของสารไตรโทพินอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 1 เท่ากับ 324,559.81, 77,751.82 และ 283,590.71 counts ตามลำดับ และในต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากับ 342,141.40, 261,925.67 และ 143,298.34 counts ตามลำดับ นอกจากนี้ จากผลการทดลองพบว่า ในวันที่ 6 และ 9 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม เท่ากับ 17,581.59 และ 184,173.85 counts ตามลำดับ และในวันที่ 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีพื้นที่ใต้กราฟน้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม เท่ากับ 140,292.37 counts (ภาพประกอบ 53) จากการตรวจวัดปริมาณของสารไตรโทพินอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 2 และ 3 (580.2737 m/z) ที่ถูกชะออกมาพร้อมกัน พบว่า ในวันที่ 0 และ 3 ของการทดลอง ไม่พบสารชนิดที่ 2 และ 3 ในต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในวันที่ 6, 9 และ 12 ของการทดลอง ต้นหนุมานประสานกาย

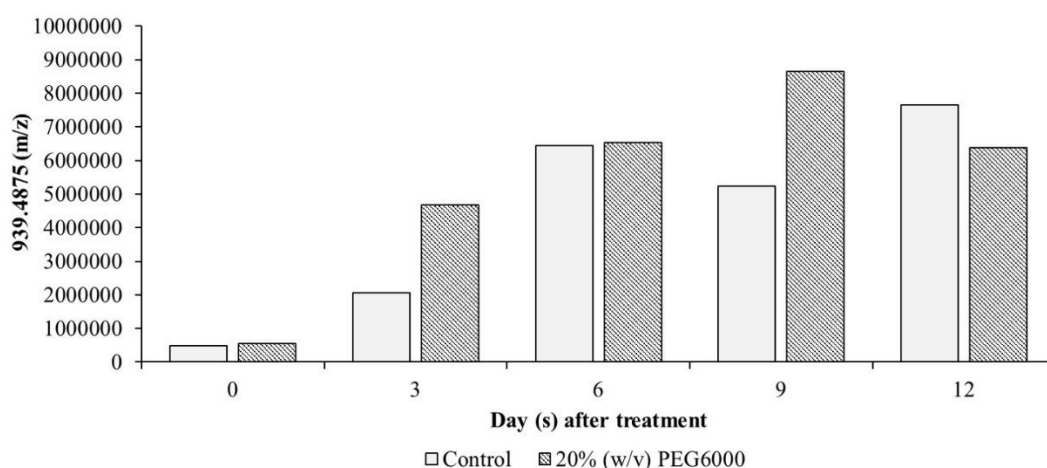
ในชุดควบคุมมีพื้นที่ใต้กราฟของสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 2 และ 3 เท่ากับ 128,029.96, 27,629.42 และ 112,919.84 counts ตามลำดับ และในต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีพื้นที่ใต้กราฟ เท่ากับ 134,953.27, 97,729.65 และ 50,660.65 counts ตามลำดับ นอกจากนี้ จากผลการทดลองพบว่า ในวันที่ 6 และ 9 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม เท่ากับ 6,923.31 และ 70,100.23 counts ตามลำดับ และในวันที่ 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีพื้นที่ใต้กราฟน้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม เท่ากับ 62,259.19 counts (ภาพประกอบ 54) จากการตรวจวัดปริมาณของสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 4 (939.4875 m/z) พบว่า ในวันที่ 0, 3, 6, 9 และ 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมมีพื้นที่ใต้กราฟของสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 4 เท่ากับ 491,692.95, 2,060,687.40, 6,452,400.58, 5,237,811.30 และ 7,659,984.20 counts ตามลำดับ และในต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีพื้นที่ใต้กราฟ เท่ากับ 557,370.80, 4,676,913.23, 6,535,818.34, 8,641,309.58 และ 6,382,103.66 counts ตามลำดับ นอกจากนี้ จากผลการทดลองพบว่า ในวันที่ 0, 3, 6 และ 9 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม เท่ากับ 65,677.85, 2,616,225.83, 83,417.76 และ 3,403,498.28 counts ตามลำดับ และในวันที่ 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีพื้นที่ใต้กราฟน้อยกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม เท่ากับ 1,277,880.54 counts (ภาพประกอบ 55)



ภาพประกอบ 53 พื้นที่ใต้กราฟของสารไตรโทเฟนอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 1 (616.2859 m/z, Rt 9.77 min) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ในวันที่ 0, 3, 6, 9 และ 12 ของการทดลอง และ N/A หมายถึง ไม่มีข้อมูล



ภาพประกอบ 54 พื้นที่ใต้กราฟของสารไตรโทเฟนอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 2 และ 3 (580.2737 m/z, Rt 9.77 min) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ในวันที่ 0, 3, 6, 9 และ 12 ของการทดลอง และ N/A หมายถึง ไม่มีข้อมูล



ภาพประกอบ 55 พื้นที่ใต้กราฟของสารไตรโทเฟนอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 4 (939.4875 m/z, Rt 15.89 min) ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ในวันที่ 0, 3, 6, 9 และ 12 ของการทดลอง

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมและต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 เป็นเวลา 21 วันของการทดลอง พบว่า ในช่วง 6 วันหลังจากได้รับความเครียดจากความแล้ง ต้นหนุมานประสานกายยังคงอยู่ในสภาพปกติ ไม่พบอาการขาดน้ำหรือการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา

แต่หลังจากได้รับสภาวะแล้งเป็นเวลา 9 วัน ต้นหนุมานประสาณกายเริ่มแสดงอาการขาดน้ำ โดยใบบริเวณปลายยอดแสดงอาการเหี่ยว จนกระทั่งวันที่ 15 ของการทดลองต้นหนุมานประสาณกายแสดงอาการขาดน้ำอย่างรุนแรง ลักษณะอาการที่พบคือ ใบแสดงอาการเหี่ยวชัดเจน การจัดเรียงตัวของมุมใบมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ก้านใบเหี่ยว ใบเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และในวันที่ 18 และ 21 ของการทดลอง ใบ ก้านใบ และปลายยอดเหี่ยว การจัดเรียงตัวของมุมใบมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และใบเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล (ภาพประกอบ 56)



ภาพประกอบ 56 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ในวันที่ 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 ของการทดลอง ตามลำดับ

บทที่ 5

อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ความแล้งเป็นหนึ่งในปัจจัยทางกายภาพที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การเจริญเติบโต และผลผลิตของพืช ทั้งในพืช C_3 และ C_4 นอกจากนี้ ยังส่งผลกระทบให้เกิดการยับยั้งการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์อีกด้วย (Karami, Behrouz, & Rudabeh, 2025) อย่างไรก็ตามพืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการทนแล้งที่แตกต่างกัน ดังนั้น การทำความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบของความเครียดจากความแล้ง กลไกการตอบสนองของพืช และการหาวิธีบรรเทาผลกระทบจากความแล้ง จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรและความมั่นคงทางอาหารและยา การจำลองสภาวะแล้งโดยใช้สาร PEG6000 เป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาผลกระทบจากการขาดน้ำของพืช ซึ่งระดับความเข้มข้นของ PEG6000 ที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อพารามิเตอร์ทางสรีรวิทยาและกระบวนการทางชีวเคมีต่างกัน และผลกระทบเหล่านี้จะแสดงความรุนแรงเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นและระยะเวลาที่ได้รับเพิ่มขึ้น (Qi et al., 2023)

จากผลการศึกษาระดับความเข้มข้นของ PEG6000 ที่เหมาะสมต่อการจำลองสภาวะแล้งในต้นหนุมานประสานกาย โดยปลูกในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีการเติมสาร PEG6000 ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยมีระดับความรุนแรงเพิ่มขึ้นเป็นลำดับขั้นอย่างต่อเนื่อง 5 ระดับ ได้แก่ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% (w/v) PEG6000 เป็นเวลา 24 วัน เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นในต้นหนุมานประสานกายต่อสภาพเครียดที่ได้รับ พบว่า ในช่วงแรกของการทดลองหลังจากที่ต้นหนุมานประสานกายได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10% และ 20% (w/v) PEG6000 เป็นเวลา 3 ถึง 9 วัน มีค่า F_v/F_m บ่งบอกถึงความสามารถในการทำงานของระบบแสง II ของพืช และค่า P_i ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงไม่แตกต่างจากต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และในช่วงวันที่ 15 ถึง 24 ของการทดลอง พบว่า ต้นหนุมานประสานกายมีค่า F_v/F_m และ P_i เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายมีความสามารถในการทนต่อความเครียดจากความแล้งและมีประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสงที่ดีกว่า ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้งในระดับความรุนแรงต่ำและปานกลาง ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 30%, 40% และ 50% (w/v) PEG6000 มีค่า F_v/F_m และ P_i มากกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในวันที่ 6 ของการทดลอง และมีค่า F_v/F_m และ P_i ลดลง ในช่วงวันที่ 18 ถึง 24 ของการทดลอง นอกจากนี้ พบว่า ที่ 24 วันหลังได้รับความเครียดจากความแล้งต้นหนุมาน

ประสาณกายไม่สามารถเจริญเติบโตต่อไปได้ที่ระดับความเข้มข้น 50% (w/v) PEG6000 และประสิทธิภาพของกระบวนการใช้แสงของต้นหนุมานประสาณกายที่ระดับความเข้มข้น 30% และ 40% (w/v) PEG6000 มีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งค่า Fv/Fm และ Pi ที่มีการลดลงอย่างมาก แสดงให้เห็นว่าระบบแสง II เกิดความเสียหายอย่างรุนแรง (Badr & Brüggemann, 2020) ในขณะที่ความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10% และ 20% (w/v) PEG6000 ต้นหนุมานประสาณกายสามารถปกป้องระบบแสง II จากความเสียหายได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของ PEG6000 ที่เพิ่มขึ้น ชักนำให้พืชเกิดความเครียดจากความแล้งที่มีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากความเครียดจากความแล้งทำให้การทำงานของระบบแสง II ของพืชเกิดความเสียหาย ซึ่งมีสาเหตุมาจากโปรตีน D1 ในระบบแสง II เกิดการเสื่อมสภาพและมีปริมาณลดลง (Ghotbi-Ravandi et al., 2014)

การลดลงของค่า Fv/Fm และ Pi ในต้นหนุมานประสาณกายสอดคล้องกับค่าดัชนีความเขียวของใบ (SPAD value) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดระดับความเขียวของใบพืช บ่งบอกถึงปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนและปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบพืชโดยทางอ้อม เนื่องจากมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณคลอโรฟิลล์ (ศุภครชา อภิตติกร, คริษฐ์สพล หนูพรหม, และนิราณี บือราเฮง, 2564) จากรายงานก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าค่าดัชนีความเขียวของใบสามารถใช้ประเมินปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบพืชหลายชนิด เช่น ถั่วลิสง (*Arachis hypogaea* L.) (Arunyanark et al., 2008) ข้าว (*Oryza sativa* L.) ข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare*) ข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) ผักกาดหอม (*Lactuca sativa* L.) มะเขือเทศ (*Solanum lycopersicum*) (Parry, Blonquist Jr, & Bugbee, 2014) สับปะรด (*Jatropha curcas* L.) (Nyi, Sridokchan, Chai-arree, & Srinives, 2012) คาโนลา (*Brassica napus* L.) ถั่วเหลือง (*Glycine max* L. Merr.) (Dong et al., 2019) และมะพร้าว น้ำหอม (*Cocos Nufiera* L.) (ศุภครชา อภิตติกร และคณะ, 2564) นอกจากนี้ การศึกษาในพืชผลหลายชนิด พบว่า เสถียรภาพของคลอโรฟิลล์ในใบมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสง และการที่พืชมีความสามารถในการรักษาความหนาแน่นและปริมาณคลอโรฟิลล์ภายใต้ความเครียดจากความแล้งเป็นกลไกของพืชอย่างหนึ่งในการทนแล้ง (Arunyanark et al., 2008; Monteoliva, Guzzo, & Posada, 2021) จากผลการทดลองพบว่า ต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10% (w/v) PEG6000 มีค่าดัชนีความเขียวของใบเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตั้งแต่วันที่ 15 ถึงวันที่ 24 ของการทดลอง ค่าดัชนีความเขียวของใบที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสาณกายมีการสะสมปริมาณคลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่า Fv/Fm และค่า Pi ที่เพิ่มขึ้นใน

ช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งส่งผลดีต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง แสดงให้เห็นว่าค่า F_v/F_m , P_i และดัชนีความเขียวของใบเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กัน เมื่อต้นหนุมานประสานกายได้รับความเครียดจากความแล้งในระดับที่มีความรุนแรงมากขึ้น พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต้นหนุมานประสานกายมีค่าดัชนีความเขียวของใบไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทนแล้งของต้นหนุมานประสานกายโดยการรักษ ปริมาณคลอโรฟิลล์เพื่อให้สามารถทำหน้าที่ดูดซับพลังงานแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ พบว่า ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 30%, 40% และ 50% (w/v) PEG6000 ในช่วง 15 วันแรกของการทดลองมีค่าดัชนีความเขียวของใบไม่แตกต่างจากต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม และหลังจากนั้นมีค่าดัชนีความเขียวของใบลดลง ซึ่งค่าที่ได้สอดคล้องกับการลดลงของค่า F_v/F_m และ P_i ในช่วงเวลาเดียวกัน แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรักษาค่าดัชนีความเขียวของใบในขณะที่ต้นพืชมีสภาพเครียดสูงในช่วงแรก และการได้รับความเครียดจากความแล้งในระดับที่รุนแรงเป็นระยะเวลานานขึ้นส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบพืชลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความเครียดออกซิเดชันและการย่อยสลายของคลอโรฟิลล์ (Anjum et al., 2011) จากผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาความเครียดจากความแล้งที่ยาวนานขึ้นส่งผลให้ค่า F_v/F_m ของต้นกาแฟโรบัสต้า (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner) มีแนวโน้มลดลง ความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ค่าดัชนีความเขียวของใบไม่แตกต่างจากต้นกาแฟโรบัสต้าในชุดควบคุม เมื่อได้รับสภาวะแล้งเป็นเวลา 14 วัน แต่หลังจากนั้นต้นกาแฟโรบัสต้ามีปริมาณคลอโรฟิลล์ ความหนาแน่นของคลอโรฟิลล์ และดัชนีความเขียวของใบลดลง นอกจากนี้ จีโนไทป์ของต้นกาแฟโรบัสต้าที่มีความสามารถในการทนแล้งมีปริมาณคลอโรฟิลล์ ความหนาแน่นของคลอโรฟิลล์ และดัชนีความเขียวของใบสูงที่สุดภายใต้สภาวะแล้ง (Chutteang, Roonprapant, Teinseree, & Arunyanark, 2023) เช่นเดียวกับการศึกษาในต้นมะกอกโอลีฟ (*Olea europaea* L.) จำนวน 5 พันธุ์ปลูก ได้แก่ 'Chetoui', 'Jarbouli', 'Sayali', 'Bessbassi' และ 'Chemchali' พบว่า ปริมาณน้ำสัมพันธ์ในใบ ค่า F_v/F_m ค่า P_i และดัชนีความเขียวของใบมีค่าลดลง เมื่อต้นมะกอกโอลีฟได้รับความเครียดจากความแล้งเป็นเวลานานขึ้น และพันธุ์ที่ทนแล้งได้ดีมีค่า F_v/F_m และค่า P_i ลดลงเพียงเล็กน้อยหลังจากได้รับความเครียดจากความแล้งเป็นเวลา 60 วัน ซึ่งสะท้อนถึงกลไกการตอบสนองเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจากแสง (photodamage) (Boussadia, Omri, & Mzid, 2023) จากผลการทดลองข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้กำหนดให้สารละลายธาตุอาหารพืชที่มีความเข้มข้นของ 20% และ 40% (w/v) PEG6000 เป็นระดับ

ความเข้มข้นที่ชักนำให้ต้นหนุมานประสาณกายเกิดความเครียดจากความแล้งในระดับปานกลาง และระดับรุนแรง ตามลำดับ

จากการศึกษาการจำลองสภาวะแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 เป็นเวลา 21 วัน เพื่อชักนำให้ต้นหนุมานประสาณกายเกิดการตอบสนองทางสรีรวิทยา ที่ระดับความรุนแรงแตกต่างกัน เพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานต่อความเครียดที่ได้รับ พบว่า ความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ส่งผลให้ต้นหนุมานประสาณกายมีค่า F_v/F_m ลดลงในช่วงวันที่ 12 ถึง 21 ของการทดลอง และต้นหนุมานประสาณกายมีค่า P_i มีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 3 ของการทดลอง และมีค่า P_i ลดลงในช่วงวันที่ 9 ถึง 21 ของการทดลอง อย่างไรก็ตาม ต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า F_v/F_m ลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันที่ 3 ถึง 21 ของการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของค่า P_i ที่บ่งบอกความสามารถในการรับโฟตอน (photon) ของระบบแสง II ในต้นหนุมานประสาณกายเพื่อนำไปใช้ในการกระตุ้นให้เกิดการขนส่งอิเล็กตรอนออกจากศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Q_B) ที่พบในช่วงเวลาเดียวกัน เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า F_v/F_m ของต้นหนุมานประสาณกายภายใต้ความเครียดจากความแล้ง พบว่า ค่า F_v/F_m ของต้นหนุมานประสาณกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีค่าใกล้เคียงกับต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุม โดยมีค่าเฉลี่ยในช่วง 0.79-0.81 ในช่วง 9 วันแรก ซึ่งเป็นค่าในช่วงสภาพปกติสำหรับพืช C_3 (Björkman & Demmig, 1987) และหลังจากได้รับความเครียดจากความแล้ง ต้นหนุมานประสาณกายเริ่มมีความเครียดเล็กน้อยจนถึงปานกลาง โดยมีค่าเฉลี่ยในช่วง 0.74-0.77 บ่งบอกว่ากระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงบางส่วนได้รับผลกระทบ ในขณะที่ความเครียดจากความแล้งในระดับที่รุนแรงส่งผลให้ต้นหนุมานประสาณกายมีค่า F_v/F_m ลดลงอย่างมากในวันที่ 18 ถึง 21 โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.64-0.66 ซึ่งค่า F_v/F_m ที่ลดลง แสดงให้เห็นว่าระบบแสง II เกิดความเสียหายและทำงานได้ลดลง เมื่อระยะเวลาการขาดน้ำเพิ่มขึ้น (Shin, Bhandari, Jo, Song, & Lee, 2021)

จากการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงจากค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ พบว่า ความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ส่งผลให้ค่า ABS/RC, DIO/RC และ TRO/RC ของต้นหนุมานประสาณกายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงวันที่ 15 ถึง 21 ของการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสาณกายในชุดควบคุม เช่นเดียวกับต้นหนุมานประสาณกายที่หลังจากได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 พบว่า ค่า ABS/RC, DIO/RC และ TRO/RC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

อย่างต่อเนื่อง ซึ่งค่าที่ได้มีค่ามากกว่าต้นหนุมานประสานกายภายใต้ความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 แสดงให้เห็นว่าพลังงานแสงที่ถูกดูดซับส่วนใหญ่ไม่ถูกนำไปใช้ในกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอน อาจทำให้เกิดการสะสมพลังงานส่วนเกินที่เป็นอันตรายต่อระบบการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช และบ่งบอกว่าศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II บางส่วนไม่สามารถทำงานได้ ซึ่งมีสาเหตุมาจาก oxygen evolving complex (OEC) ถูกยับยั้ง (Yusuf et al., 2010) นอกจากนี้ ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีค่า TR_o/RC เพิ่มขึ้น แต่มีค่า ET_o/RC และค่า $1-V_j$ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II สามารถดักจับพลังงานแสงในรูปโฟตอนได้มากขึ้น แต่ไม่สามารถเกิดกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในระบบแสง II ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่นเดียวกับต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่า $1-V_j$ ลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีค่า ET_o/RC ลดลง ในวันที่ 9, 12, 18 และ 21 ของการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบแสง II ลดลง ต้นหนุมานประสานกายเกิดความเสียหายอย่างต่อเนื่อง ทำให้ไม่สามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีการสูญเสียพลังงานในรูปแบบของการคายพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความเครียดจากความแล้งส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบแสง II ของต้นหนุมานประสานกาย โดยพบว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ได้แก่ ค่า ABS/RC , DIO/RC , TR_o/RC , ET_o/RC และ $1-V_j$ ที่มากกว่าต้นหนุมานประสานกายที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในต้นทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) 2 จีโนไทป์ ได้แก่ S.28111 และ SF0049 เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง 3 ระดับ ได้แก่ ความเครียดจากความแล้งที่ระดับเล็กน้อย ความเครียดจากความแล้งที่ระดับปานกลาง และความเครียดจากความแล้งที่ระดับรุนแรง พบว่าความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ต้นทานตะวันทั้ง 2 จีโนไทป์ มีค่า F_v/F_m และ P_i ลดลง ในขณะที่ต้นทานตะวันที่ได้รับ ความเครียดจากความแล้งในระดับที่รุนแรงมีค่า F_v/F_m และ P_i น้อยกว่าต้นทานตะวันที่ได้รับ ความเครียดจากความแล้งในระดับปานกลาง นอกจากนี้ ต้นทานตะวันมีค่า ABS/RC , DIO/RC และ TR_o/RC เพิ่มขึ้น และมีค่า ET_o/RC ลดลงอย่างมากภายใต้ความเครียดจากความแล้งในระดับที่รุนแรง (Umar & Siddiqui, 2020) อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาการตอบสนองต่อความเครียดจากความแล้งในองุ่น (*Vitis amurens* Rupr.) 2

พันธุ์ปลูก ได้แก่ 'ShuangFeng' และ 'ZuoShanyi' พบว่า ค่า ABS/RC, Dio/RC, TRo/RC และ ETo/RC ภายใต้ความเครียดจากความแล้งที่ระดับเล็กน้อยมีค่าไม่แตกต่างจากต้นอ่อนในชุดควบคุม และต้นอ่อนที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับปานกลางและระดับที่รุนแรง มีค่า ABS/RC, Dio/RC, TRo/RC และ ETo/RC เพิ่มขึ้น (Wang et al., 2012) และการศึกษาของ Boguszezewska-Mańkowska et al. (2018) พบว่า ต้นมันฝรั่ง (*Solanum tuberosum* L.) ที่ไวต่อความเครียดจากความแล้งมีค่า Pi ลดลงอย่างมาก และมีค่า ABS/RC, Dio/RC, TRo/RC และ ETo/RC เพิ่มขึ้น ซึ่งค่า TRo/RC และค่า ETo/RC ในต้นอ่อนและต้นมันฝรั่งที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า ศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาสามารถดักจับพลังงานแสงได้ดีและยังสามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้อย่างต่อเนื่อง ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้ง ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองในต้นหนุมานประสานกายที่มีค่า ETo/RC ลดลง

ความเครียดจากความแล้งส่งผลต่อปริมาณรงควัตถุที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี คลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์ อย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลอง พบว่า ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เพิ่มขึ้น ในวันที่ 12 และมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ลดลง ในวันที่ 21 ของการทดลอง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ต้นหนุมานประสานกายสามารถปรับตัวในระยะเริ่มต้นได้ โดยเพิ่มการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ เอ เพื่อรักษาประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง อย่างไรก็ตาม เมื่อความเครียดจากความแล้งมีการสะสมเพิ่มขึ้น ต้นหนุมานประสานกายไม่สามารถรักษาระดับของปริมาณคลอโรฟิลล์ได้จึงทำให้มีปริมาณลดลง ในขณะที่ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ลดลง ตั้งแต่วันที่ 15 ถึง 21 แสดงให้เห็นว่าความเครียดจากความแล้งในระดับที่รุนแรงส่งผลต่อโครงสร้างของคลอโรพลาสต์หรือเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ และต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% และ 40% (w/v) PEG6000 มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ลดลงอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่วันที่ 9 ถึง 21 ของการทดลอง แสดงให้เห็นว่าคลอโรฟิลล์ บี มีความไวต่อความเครียดจากความแล้งมากกว่าคลอโรฟิลล์ เอ ซึ่งคลอโรฟิลล์ บี ทำหน้าที่เป็นรงควัตถุเสริมในการรับพลังงานแสง การลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ บี จึงเป็นดัชนีบ่งบอกความเสียหายต่อระบบการรับพลังงานแสงในพืชอย่างชัดเจน (Farooq et al., 2009) เมื่อพิจารณาจากปริมาณคลอโรฟิลล์รวม พบว่า ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมลดลงในวันที่ 12,

18 และ 21 ของการทดลอง และต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง ตั้งแต่วันที่ 9 ถึง 21 ของการทดลอง การลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์รวมสะท้อนให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของพืชในระยะยาว (Chaves, Flexas, & Pinheiro, 2009) จากการวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์ พบว่า ความเครียดจากความแล้งทำให้ปริมาณแคโรทีนอยด์ของต้นหนุมานประสานกายลดลง โดยต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีปริมาณแคโรทีนอยด์ลดลงในช่วงวันที่ 15 ถึง 21 ของการทดลอง ในขณะที่ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีปริมาณแคโรทีนอยด์ลดลง ตั้งแต่วันที่ 9 ถึง 21 ของการทดลอง นอกจากนี้ พบว่า ความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 ชักนำให้ต้นหนุมานประสานกายมีการสะสมปริมาณแคโรทีนอยด์มากกว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 ในวันที่ 15 และ 18 ของการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Anjum et al. (2011) และ Gill and Tuteja (2010) พบว่า ความเครียดจากความแล้งส่งผลให้พืชลดการสังเคราะห์รงควัตถุรอง (secondary pigments) เช่น แคโรทีนอยด์ เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในการป้องกันและฟื้นฟูความเสียหายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในระดับเซลล์ เช่นเดียวกับการศึกษาในต้นถั่วดำ (*Vigna mungo* L. Hepper) พบว่า ต้นถั่วดำมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี แคโรทีนอยด์ และปริมาณน้ำสัมพัทธ์ลดลง เมื่อความเข้มข้นของ PEG6000 เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการผลิต ROS มากเกินไปส่งผลกระทบต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ของพืชและเกิดการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง (Jothimani & Arulbalachandran, 2020) อย่างไรก็ตาม มีรายงานการศึกษาลงของระดับความเครียดจากความแล้งที่แตกต่างกันต่อปริมาณรงควัตถุในต้นแตงกวา (*Cucumis sativus* L.) พบว่า ต้นแตงกวาที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความรุนแรงปานกลาง (5% (w/v) PEG6000) มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ต้นแตงกวาที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับรุนแรง (10% (w/v) PEG6000) มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น แต่มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ลดลง (Wang et al., 2024) ซึ่งต้นแตงกวามีกลไกในการดักจับพลังงานโดยเพิ่มการสังเคราะห์รงควัตถุได้ในช่วงแรก เนื่องจากมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ค่อนข้างเสถียร การสังเคราะห์ด้วยแสงจึงเกิดขึ้นได้ตามปกติ และเมื่อต้นแตงกวาได้รับความเครียดจากความแล้งที่รุนแรงขึ้นทำให้คลอโรพลาสต์

เกิดความเสียหายส่งผลให้เกิดการสูญเสียคลอโรฟิลล์ และประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง (Zahedi, Moharrami, Sarikhani, & Padervand, 2020)

ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่ใช้ประเมินสถานะของน้ำในพืชภายใต้สภาวะแล้ง โดยแสดงถึงปริมาณน้ำในใบเทียบกับปริมาณน้ำสูงสุดที่ใบสามารถเก็บไว้ได้ จากผลการทดลอง พบว่า ความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ลดลง และในวันที่ 6 ของการทดลอง ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 มีค่าไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ยกเว้นในวันที่ 18 ของการทดลอง และปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่ความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/v) PEG6000 ต้นหนุมานประสานกายมีค่าปริมาณน้ำสัมพัทธ์น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาปริมาณรงควัตถุและปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในต้นพิสตาชิโอ (*Pistacia vera* L.) จำนวน 4 จีโนไทป์ ได้แก่ Abareqi, Badami-Rize-Zarand, Qazvini และ Sarakhs พบว่า ต้นพิสตาชิโอทั้ง 4 จีโนไทป์ มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์ ปริมาณคลอโรฟิลล์ และปริมาณแคโรทีนอยด์ ลดลง เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่มีระดับความรุนแรงเพิ่มขึ้น (Khoyerd, Shamsheeri, & Estaji, 2016) อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาในต้นแบล็กเบอร์รี่ (*Rubus* sp.) พันธุ์ปลูก 'Boysenberry' พบว่า ต้นแบล็กเบอร์รี่มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงแรกของการได้รับความเครียดจากความแล้ง และปริมาณน้ำสัมพัทธ์ลดลง ในวันที่ 14 ของการทดลอง นอกจากนี้ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี คลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น และมีปริมาณรงควัตถุลดลง ในวันที่ 14 ของการทดลอง แสดงให้เห็นว่าต้นแบล็กเบอร์รี่มีกลไกการปรับตัวและมีความสามารถในการรักษาปริมาณน้ำสัมพัทธ์เพื่อให้สามารถต้านทานต่อความเครียดจากความแล้งที่รุนแรงได้ในช่วงแรก (Yang, Zhang, Wu, & Lyu, 2019) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 มีศักยภาพในการต้านทานต่อความเครียดจากความแล้ง โดยมีความสามารถในการรักษาประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้นาน 9 วัน และมีการสะสมปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ซึ่งเป็นรงควัตถุที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการทดลอง ซึ่งการเลือกความเข้มข้นของ PEG6000 ในการจำลองสภาวะแล้งมีความสำคัญมากเนื่องจากความเครียดจากความแล้งส่งผลกระทบโดยตรงต่อการตอบสนองของพืช แม้ว่าความ

เข้มข้นของ PEG6000 ที่สูงขึ้น จะสามารถชักนำให้ต้นหนุมานประสานกายเกิดความเครียดที่รุนแรงมากขึ้นได้ แต่อาจจะทำให้การเจริญเติบโตและความแข็งแรงของต้นพืชลดลงได้ ในทางกลับกันความเข้มข้นของ PEG6000 ที่ต่ำกว่าอาจจำลองสภาวะแล้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเน้นถึงความจำเป็นในการคัดเลือกระดับความเครียดจากความแล้งและชนิดของพืชที่นำมาทดลอง จากผลการทดลองข้างต้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 เพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

จากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา และปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นหนุมานประสานกาย โดยทำให้ความสูงของต้นหนุมานประสานกายลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ตั้งแต่วันที่ 15 ของการทดลอง นอกจากนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นและขนาดของพื้นที่ใบของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับ ความเครียดจากความแล้งมีค่าลดลง ตั้งแต่วันที่ 9 ของการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าความเครียดจากความแล้งส่งผลให้การเจริญเติบโตของต้นหนุมานประสานกายลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในต้นกระเจี๊ยบเขียว (*Abelmoschus esculentus* L. Moench) พบว่า ความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ต้นกระเจี๊ยบเขียว มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ พื้นที่ใบ และความสูงของลำต้นลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับต้นกระเจี๊ยบเขียวในชุดควบคุม นอกจากนี้ พื้นที่ใบและ ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลดลง อาจส่งผลให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้นกระเจี๊ยบเขียวลดลง (Adejumo, Ezech, & Mur, 2018) เช่นเดียวกับการเจริญเติบโตของต้นการบูร (*Cinnamomum camphora*) พบว่า ความเครียดจากความแล้งที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น และความสูงของต้นการบูรลดลง ซึ่งการที่ต้นการบูรได้รับความเครียดจากความแล้งที่ยาวนานหรือการขาดน้ำอย่างรุนแรง อาจทำให้ต้นการบูรสูญเสียน้ำมากเกินไปส่งผลให้การเจริญเติบโตของต้นการบูรหยุดชะงักและลำต้นเกิดการหดตัว (Wang et al., 2025) และการเจริญเติบโตของต้นโหระพา (*Ocimum basilicum*) และต้นแมงลัก (*Ocimum americanum*) พบว่า ความสูงของลำต้น เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น และพื้นที่ใบของต้นโหระพา และต้นแมงลักมีค่าลดลง เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่มีระดับความรุนแรงเพิ่มขึ้น (Mulugeta, Sárosi, & Radácsi, 2023) อย่างไรก็ตาม การตอบสนองของพื้นที่ใบ เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น และความสูงของต้นฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata*) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่มีระดับความรุนแรงแตกต่างกัน พบว่า การเจริญเติบโตและลักษณะ

ทางสัณฐานวิทยาของต้นฟ้าทะลายโจรไม่ได้รับผลกระทบจากความแล้งอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ พบว่าความสูงของต้นฟ้าทะลายโจรมีค่าลดลง เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่รุนแรงเป็นระยะเวลานาน (Chen et al., 2020) ซึ่งการที่พืชขาดน้ำจะทำให้ความดันเต่ง (turgor pressure) ในเซลล์พืชลดลง ส่งผลให้เซลล์เกิดการหยุดหรือชะลอการแบ่งเซลล์และการขยายขนาดของเซลล์ เป็นสาเหตุให้พืชมีการเติบโตที่ช้าลง พื้นที่ใบและความสูงของลำต้นจึงลดลง (Yang et al., 2021) นอกจากนี้ การลดลงของพื้นที่ใบถือเป็นกลไกอย่างหนึ่งของพืชเพื่อลดการคายน้ำ ดังนั้น ความยืดหยุ่นของพื้นที่ใบจึงเป็นกลยุทธ์ที่สำคัญในการควบคุมประสิทธิภาพการใช้น้ำของพืช (Baerenfaller et al., 2012)

จากการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ความเครียดจากความแล้งทำให้ต้นหนุมานประสานกายมีค่า F_v/F_m ลดลง แสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายมีประสิทธิภาพของการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง ซึ่งบ่งบอกถึงความเสียหายของโปรตีน D1 ภายในศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง (Kalaji et al., 2018) ในขณะเดียวกัน ค่า P_i และ ค่า $1-V_j$ ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพโดยรวมของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง และการเสื่อมถอยของการทำงานของระบบแสง II ซึ่งแสดงถึงความผิดปกติของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่เป็นผลมาจากการขาดน้ำในระดับเซลล์ (Zhang et al., 2019) ในทางตรงกันข้าม ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่า ABS/RC , TRo/RC และ Dio/RC เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ บ่งบอกว่าจำนวนศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาที่สามารถทำงานได้ลดลง ทำให้พลังงานแสงที่ดูดซับต่อศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น พลังงานแสงที่ถูกดักจับส่วนใหญ่ไม่ถูกนำไปใช้ในกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอน อาจทำให้เกิดการสะสมพลังงานส่วนเกินที่เป็นอันตรายต่อระบบแสง II ต้นหนุมานประสานกายจึงปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปของความร้อนเพิ่มขึ้น เพื่อลดการเกิดอนุมูลอิสระ และหลีกเลี่ยงความเสียหายจากออกซิเดชันภายใต้การดูดกลืนพลังงานแสงที่สูงขึ้น (Siddiqui, Al-Whaibi, Faisal, & Al Sahli, 2014) นอกจากนี้ ค่า ETo/RC ของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่าไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากต้นหนุมานประสานกายสามารถรักษาประสิทธิภาพของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้อย่างต่อเนื่อง หรือแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการฟื้นตัวของระบบแสง II บางส่วนในระดับโครงสร้างภายในคลอโรพลาสต์ (Zhang et al., 2021) จากผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาความสามารถในการทนแล้งของพืช

สมุนไพร 4 ชนิด ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ *Chlorophytum borivilianum*, หญ้าหวาน (*Stevia rebaudiana*), โสมอินเดีย (*Withania somnifera*) และฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculate*) เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งที่ 50% FC เป็นเวลา 10, 20 และ 30 วัน พบว่าความเครียดจากความแล้งส่งผลให้พืชสมุนไพรทั้ง 4 ชนิด มีค่า Fv/Fm ลดลง เมื่อระยะเวลาที่ได้รับความเครียดจากความแล้งเพิ่มขึ้น โดยค่า Fv/Fm ในพืชสมุนไพรแต่ละชนิดมีค่าลดลงแตกต่างกัน โดยพบว่าพืชสมุนไพรที่มีค่า Fv/Fm สูงกว่า มีความสามารถในการรักษาอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงได้ดีกว่า (Thakur & Thakur, 2018) จากการศึกษาผลกระทบของความเครียดจากความแล้งในต้นแอปเปิล (*Malus domestica* Borkh.) 3 พันธุ์ปลูก ได้แก่ พันธุ์ปลูกที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ 'Golden delicious reinders' และพันธุ์ปลูกดั้งเดิม ได้แก่ 'Crvenka' และ 'Dugara' พบว่า พันธุ์ปลูก 'Golden delicious reinders' ได้รับผลกระทบจากความแล้งอย่างมาก โดยความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ค่า Fv/Fm, ค่า Pi, ปริมาณคลอโรฟิลล์, ปริมาณแคโรทีนอยด์ และปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบลดลง ในขณะที่ค่า ABS/RC, Dio/RC, TRo/RC และ ETo/RC เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความเครียดจากความแล้งส่งผลต่อการทำงานของศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง II ทำให้เกิดการคายพลังงานที่ถูกดูดซับออกมาในรูปของความร้อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่พันธุ์ดั้งเดิมที่ทนต่อความเครียดจากความแล้งได้ดีกว่ามีค่า ETo/RC และมีปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบไม่แตกต่างกับต้นพืชในชุดควบคุม (Mihaljevic et al., 2021) และจากการศึกษาในต้นมะเขือเทศ (*Solanum lycopersicum* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง โดยงดการให้น้ำเป็นเวลา 7 วัน พบว่า ค่า Fv/Fm, Pi, ETo/RC และปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบลดลง ในขณะที่ ค่า ABS/RC, Dio/RC, TRo/RC และการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับต้นมะเขือเทศในชุดควบคุม นอกจากนี้ พันธุ์พื้นเมือง 'Varamin' ที่ทนต่อความแล้งสามารถรักษาประสิทธิภาพในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงภายใต้สภาวะแล้งได้ เมื่อเปรียบเทียบกับพันธุ์พื้นเมือง 'Orumie' ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีความอ่อนไหวต่อความเครียดจากความแล้งสูง (Sousaraei et al., 2021) เช่นเดียวกับการศึกษาในต้นควินัว (*Chenopodium quinoa* Willd.) พบว่า ความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 15% FC เป็นเวลา 7 และ 14 วัน ชักนำให้ต้นควินัวมีค่า ABS/RC, TRo/RC และ Dio/RC เพิ่มขึ้น และมีค่า ETo/RC, 1-Vj และค่า Pi ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับต้นควินัวในชุดควบคุม (Manaa et al., 2021) ซึ่งการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ลดลง อาจมีสาเหตุมาจากพื้นที่ใบในการเกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง การปิดของปากใบ การสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ลดลง และกลไกการสังเคราะห์ด้วยแสงทำงานได้ไม่ดี เป็นต้น (Farooq et al., 2009)

คลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุที่ทำหน้าที่รับและส่งพลังงานแสงในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชภายในคลอโรพลาสต์ ซึ่งพบว่ากระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่เกิดขึ้นในคลอโรพลาสต์ยังเป็นแหล่งที่สร้างอนุมูลอิสระ (reactive oxygen species, ROS) ในเซลล์พืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง พืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งจะมีระดับของ ROS เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของคลอโรฟิลล์อย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง (Monteoliva et al., 2021) พืชบางชนิดจึงมีการสะสมปริมาณแคโรทีนอยด์ ซึ่งเป็นรงควัตถุที่มีบทบาทในการช่วยป้องกันอันตราย และลดผลกระทบที่เกิดจากความเครียดจากความแล้ง โดยทำหน้าที่รับและส่งพลังงานแสงแทนคลอโรฟิลล์ที่สลายไป แคโรทีนอยด์จึงมีบทบาทสำคัญในการช่วยให้พืชต้านทานต่อความเครียดจากความแล้งได้ (Jaleel et al., 2009) จากผลการทดลอง พบว่า ความเครียดจากความแล้งส่งผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ของต้นหนุมานประสานกายลดลง โดยมีการสะสมปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เพิ่มขึ้นในวันที่ 15 ของการทดลอง และมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ลดลงในวันที่ 21 ของการทดลอง และความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ลดลงอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่วันที่ 6 ของการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาปริมาณรงควัตถุในต้นเก๋ากี้ดำ (*Lycium ruthenicum* Murr.) หลังจากงดการให้น้ำเป็นเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน พบว่าความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และคลอโรฟิลล์รวมของต้นเก๋ากี้ดำลดลง นอกจากนี้ ประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้นเก๋ากี้ดำที่ลดลงอาจเกี่ยวข้องกับปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลดลง ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง (Guo, Yu, Kong, Yan, & Zhang, 2016) และการศึกษาในต้นถั่วเหลือง (*Glycine max* L. Merrill) 2 พันธุ์ปลูก ได้แก่ 'ES Mentor' และ 'Pedro' พบว่า ต้นถั่วเหลืองพันธุ์ปลูก 'ES Mentor' มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์ลดลง เมื่อความเข้มข้นของ PEG6000 เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเครียดจากความแล้งที่ความเข้มข้น 2.5% (w/v) PEG6000 ในระยะเริ่มต้นชักนำให้ต้นถั่วเหลืองพันธุ์ปลูก 'Pedro' มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับต้นถั่วเหลืองในชุดควบคุม (Basal, Szabó, & Veres, 2020) จากรายงานของ Ashraf and Harris (2013) พบว่าในช่วงแรกของการได้รับความเครียดจากความแล้ง พืชบางชนิดอาจมีการปรับตัวทางสรีรวิทยาด้วยการเพิ่มปริมาณรงควัตถุ และหลังจากนั้นกลไกต่าง ๆ เกิดการเสื่อมสภาพลง ซึ่งการลดลงของปริมาณรงควัตถุที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการสลายตัวของคลอโรฟิลล์มากกว่าการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ขึ้นมาใหม่ นอกจากนี้ มีรายงานว่าเมื่อความเครียดจากความแล้งทวีความรุนแรงขึ้นในช่วงระยะเวลาที่ได้รับความเครียดจากความแล้งในระยะเวลายาวนาน คลอโรฟิลล์จะ

เสื่อมสภาพเร็วขึ้นและการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในระบบแสง II จะช้าลง (Chen, Zhang, Liu, & Li, 2020)

จากผลการศึกษาปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบที่ใช้ในการวัดสถานะของน้ำในพืช เพื่อป้องกันถึงผลกระทบของความเครียดจากความแล้งในระดับเซลล์พืช พบว่า ความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบของต้นหนุมานประสานกายลดลง หลังได้รับความเครียดจากความแล้งเป็นเวลา 9 วัน นอกจากนี้ จากการวัดอัตราการคายน้ำซึ่งแสดงถึงปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากใบ และค่าการนำไหลของปากใบที่บ่งบอกระดับการเปิด-ปิดของปากใบ ซึ่งควบคุมการระเหยของน้ำและการรับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า อัตราการคายน้ำและค่าการนำไหลของปากใบของต้นหนุมานประสานกายมีค่าค่อนข้างสูงในวันที่ 3 ของการทดลอง และมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่วันที่ 6 ของการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการตอบสนองของพืชต่อความเครียดจากความแล้ง โดยในช่วงแรกของการได้รับความเครียดจากความแล้ง ต้นหนุมานประสานกายมีปริมาณน้ำในใบเพียงพอทำให้ปากใบเปิดกว้างขึ้นส่งผลให้มีอัตราการคายน้ำและการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับปกติหรือสูงขึ้นชั่วคราว ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นจากการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศส่งผลกระตุ้นการเปิดปากใบในระยะสั้น (Flexas & Carriqui, 2020) อย่างไรก็ตาม เมื่อต้นหนุมานประสานกายได้รับความเครียดจากความแล้งเป็นระยะเวลานานขึ้น ค่าการนำไหลของปากใบและอัตราการคายน้ำเริ่มลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากพืชเริ่มปิดปากใบเพื่อลดการสูญเสียน้ำ และรักษาสถานะของน้ำในเซลล์ โดยอาจมีการสังเคราะห์กรดแอบไซซิกเพิ่มขึ้น ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการส่งสัญญาณให้ปากใบปิด (Kuromori, Seo, & Shinozaki, 2018) จากผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการประเมินการตอบสนองทางสรีรวิทยาและการเจริญเติบโตของต้นฝรั่ง (*Psidium guajava* L.) พันธุ์ปลูก 'Jen-Ju-Ba' เมื่อรดการให้น้ำเป็นเวลา 9 วัน พบว่า ความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ต้นฝรั่งมีค่าการนำไหลของปากใบ อัตราการคายน้ำ ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ และค่า Fv/Fm ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับต้นฝรั่งในชุดควบคุมที่ได้น้ำเพียงพอ ประสิทธิภาพของการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ลดลงส่งผลให้การเจริญเติบโตของต้นฝรั่งลดลง (Lin et al., 2017) เช่นเดียวกับการศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยาของต้นทับทิม (*Punica granatum* L.) จำนวน 5 พันธุ์ปลูก ได้แก่ 'Rabab', 'Shishecap', 'M-Saveh', 'M-Yazdi' และ 'Ghojagh' เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง โดยงดการให้น้ำ พบว่า หลังจากต้นทับทิมได้รับความเครียดจากความแล้งเป็นเวลา 14 วัน อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง อัตราการคายน้ำ และค่าการนำไหลของปากใบลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกพันธุ์ปลูก ที่ทำการศึกษา นอกจากนี้ 'Ghojagh' แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการทนแล้งที่สูงกว่า เนื่องจากมี

อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงมากที่สุด และมีความสามารถในการรักษาปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ และควบคุมการคายน้ำได้ดีกว่า (Pourghayoumi, Bakhshi, Rahemi, Kamgar-Haghighi, & Aalami, 2017)

จากการศึกษาความหนาแน่นของปากใบและดัชนีของปากใบ พบว่า ในช่วงแรกของการทดลอง (วันที่ 3 ถึง 12) ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีความหนาแน่นของปากใบเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงกลไกการตอบสนองของต้นหนุมานประสานกายต่อความเครียดจากความแล้งในช่วงแรก ซึ่งพืชอาจเพิ่มจำนวนปากใบเพื่อรักษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนก๊าซและการสังเคราะห์ด้วยแสงภายใต้การเปิดปากใบที่จำกัด (Franks, Doheny-Adams, Britton-Harper, & Gray, 2015) ในขณะที่การลดลงของความหนาแน่นของปากใบในวันที่ 15 และ 18 และค่าดัชนีของปากใบที่ลดลงในวันที่ 18 ของการทดลอง อาจเกิดจากผลกระทบจากการสะสมของความเครียดที่รุนแรงขึ้น ส่งผลให้การแบ่งเซลล์ของเนื้อเยื่อผิวใบลดลง และส่งผลต่อการพัฒนาของปากใบ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในต้นหม่อน (*Morus alba* L.) พบว่า ความเครียดจากความแล้งทำให้ความหนาแน่นของปากใบเพิ่มขึ้น โดยมีขนาดของปากใบที่เล็กลง นอกจากนี้ จีโนไทป์ของต้นหม่อนที่ทนต่อความเครียดจากความแล้งได้ดีจะมีความหนาแน่นของปากใบ ค่าการนำไหลของปากใบ และอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงที่สูงกว่า ซึ่งความหนาแน่นของปากใบที่เพิ่มขึ้นและขนาดของปากใบที่ลดลงภายใต้ความเครียดจากความแล้งบ่งบอกถึงการปรับตัวให้เข้ากับ ความเครียดจากความแล้ง (Durgadevi & Vijayalakshmi, 2020) เช่นเดียวกับการศึกษาในต้นโหระพา (*Ocimum basilicum* L.) พบว่า ความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ต้นโหระพามีความหนาแน่นของปากใบเพิ่มขึ้นทั้งที่ผิวใบด้านบนและด้านล่าง มีขนาดของปากใบลดลง และมีค่าดัชนีของปากใบไม่แตกต่างกับชุดควบคุม ซึ่งขนาดของปากใบที่ลดลงภายใต้สภาวะแล้งนำไปสู่ความหนาแน่นของเซลล์ผิวใบที่เพิ่มขึ้น (Driesen, De Proft, & Saeys, 2023) อย่างไรก็ตาม ความเครียดจากความแล้งโดยงดการให้น้ำให้กับต้นถั่วบราซิล (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) เป็นเวลา 58 วัน ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดความแตกต่างในด้านขนาดและความหนาแน่นของปากใบของต้นถั่วบราซิล (Schimpl, Ferreira, Jaquetti, Martins, & de Carvalho Gonçalves, 2019)

สภาวะขาดน้ำในต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งจะส่งผลต่อสมดุลออสโมติกการทำงานของเซลล์ และกระบวนการทางสรีรวิทยา พืชบางชนิดจะพยายามใช้กลไกการปรับออสโมซิส (osmotic adjustment) เพื่อตอบสนองต่อความเครียด โดยการสะสมปริมาณโพรลีนและน้ำตาลที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารออสโมไลต์ (osmolytes) ในการรักษาสมดุล

ของน้ำและแรงดันออสโมซิสภายในเซลล์ (Blum, 2017) จากการวิเคราะห์ปริมาณโพรงน้ำ พบว่า ในช่วงวันที่ 3 ถึง 9 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณโพรงน้ำไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบที่มีค่าไม่แตกต่างกับต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม เป็นไปได้ว่าต้นหนุมานประสานกายยังไม่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่มีความรุนแรงมากพอที่จะกระตุ้นการสะสมโพรงน้ำและยังสามารถรักษาปริมาณน้ำภายในใบได้ดี และในช่วงวันที่ 12 ถึง 21 ของการทดลอง ต้นหนุมานประสานกายมีปริมาณโพรงน้ำเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายต้องเผชิญกับการสูญเสียอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการสะสมปริมาณโพรงน้ำเพื่อรักษาสมดุลออสโมติกเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำ พบว่า ในช่วงวันที่ 3 ถึง 9 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำลดลง แสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายใช้พลังงานและน้ำตาลที่สะสมไว้เพื่อรับมือกับความเครียดจากความแล้ง และในวันที่ 12 ของการทดลอง พบว่า ต้นหนุมานประสานกายมีการสะสมของปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับปริมาณโพรงน้ำที่เพิ่มขึ้น บ่งบอกว่าต้นหนุมานประสานกายเริ่มมีการปรับตัวต่อความเครียดจากความแล้ง ทำให้มีการสะสมน้ำตาลเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาแรงดันออสโมติกของเซลล์ นอกจากนี้ ต้นหนุมานประสานกายสามารถรักษาระดับน้ำตาลที่ละลายน้ำในช่วงวันที่ 15 ถึง 18 ของการทดลอง และปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำที่ลดลงในวันที่ 21 ของการทดลอง อาจเกิดจากการที่ต้นหนุมานประสานกายเข้าสู่สภาวะเครียดอย่างรุนแรง เกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง ทำให้การสร้างน้ำตาลลดลงด้วย และน้ำตาลที่สะสมอาจถูกนำไปใช้เพื่อความอยู่รอดของพืชมากขึ้นจนไม่สามารถรักษาสมาดุลของพลังงานได้อีกต่อไป ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในต้นกุหลาบมอญ (*Rosa damascena* Mill.) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งในระดับปานกลาง (50% FC) ระดับรุนแรง (25% FC) และชุดควบคุมที่ได้รับน้ำอย่างเพียงพอ (100% FC) พบว่า ต้นกุหลาบมอญที่ได้รับความเครียดจากความแล้งจะมีการสะสมโพรงน้ำและน้ำตาลที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อระดับความเครียดจากความแล้งเพิ่มขึ้น (Al-Yasi et al., 2020) เช่นเดียวกับการศึกษาในต้นพลูคาว (*Houttuynia cordata* Thumb.) พบว่า ความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ปริมาณโพรงน้ำและน้ำตาลที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น (Than & Le, 2022) กลไกการสะสมปริมาณโพรงน้ำและปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำเกี่ยวข้องกับการกำจัดอนุมูลอิสระ ความคงตัวของเยื่อหุ้มเซลล์ ความเสถียรของกิจกรรมของเอนไซม์ต่าง ๆ และการปรับตัวออสโมติกเพื่อกระตุ้นให้พืชทนทานต่อความเครียดจากความแล้งได้ดีขึ้น (Turner, 2018) นอกจากนี้ การสะสมโพรงน้ำที่เพิ่มขึ้นเป็นกระบวนการที่บ่ง

บอกถึงการบาดเจ็บของพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง (Pei et al., 2010) และจากการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งต่อปริมาณโพรงน้ำและน้ำตาลที่ละลายน้ำในต้นพุทตาน (*Hibiscus mutabilis*) 2 พันธุ์ปลูก ได้แก่ 'JRX-1' และ 'CDS-4' พบว่า ต้นพุทตานพันธุ์ปลูก 'CDS-4' สามารถควบคุมสมดุลออสโมซิสได้โดยการสะสมปริมาณโพรงน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยลดค่าศักย์ของน้ำและทำให้พืชสามารถดูดซึมน้ำได้อย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะแล้ง และต้นพุทตานพันธุ์ปลูก 'CDS-4' ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำในรากและลำต้นเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อความต้องการใช้พลังงานภายใต้ความเครียดจากความแล้ง ซึ่งต้นพุทตานพันธุ์ปลูก 'CDS-4' อาจเคลื่อนย้ายน้ำตาลที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงไปยังส่วนรากและลำต้นเพิ่มขึ้น เพื่อให้ระบบของรากสามารถรักษาการดูดซึมน้ำได้ ในขณะที่ปริมาณโพรงน้ำ ค่าการนำไหลของปากใบ และอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของต้นพุทตานพันธุ์ปลูก 'JRX-1' มีค่าไม่แตกต่างกับต้นพืชในชุดควบคุม ซึ่งการเปิดปากใบอย่างต่อเนื่องอาจทำให้พืชเกิดการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้น แม้ว่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงจะคงที่ แต่ผลผลิตที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยแสงไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปยังส่วนอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากการขาดน้ำส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำในราก ลำต้น และใบลดลง (Zhang et al., 2024)

นอกจากนี้ พืชจะมีการสะสมปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็น reactive oxygen species (ROS) เพิ่มขึ้น ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง ซึ่งเกิดจากความไม่สมดุลระหว่างการสร้างและการกำจัด ROS หากภายในเซลล์พืชมีการสะสม ROS ที่มากเกินไปจะส่งผลให้พืชเกิดความเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) และเกิดความเสียหายต่อเซลล์ได้ เนื่องจากการสะสม ROS ในปริมาณมากจะชักนำให้พืชเกิดกระบวนการลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน (lipid peroxidation) โดย ROS จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไขมันที่บริเวณเยื่อหุ้ม ส่งผลให้ไขมันที่เป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์เสื่อมสภาพ และได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยา คือ ปริมาณของมาลอนไดอัลดีไฮด์ (MDA) ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถใช้ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์เป็นตัวบ่งบอกความเสียหายของเยื่อหุ้มเซลล์ได้ และโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ที่ได้รับความเสียหายจากปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันจะสูญเสียการเป็นเยื่อเลือกผ่าน ไม่สามารถควบคุมสารผ่านเข้าออกได้ ทำให้เกิดการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ออกจากเซลล์ ซึ่งการวัดการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวบ่งบอกความสมบูรณ์และความคงตัวของเยื่อหุ้มเซลล์ จากผลการทดลอง พบว่า ในวันที่ 3, 12 และ 21 ของการทดลอง มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่แตกต่างจากต้นพืชในชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายสามารถควบคุมระดับของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ได้ และในวันที่ 6, 9, 15 และ 18 ของการทดลอง ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงกว่าต้นหนุมานประสานกายในชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายเกิดความเครียดออกซิเดชันและมีการสะสมอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์ นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในบางช่วงเมื่อพืชได้รับความเครียดจากความแล้ง แสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายกำลังเผชิญกับความเครียดออกซิเดชัน ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการเผาผลาญของเซลล์ที่ผิดปกติหรือกลไกการป้องกันที่ยังไม่สามารถจัดการกับสารอนุมูลอิสระได้ จากการวัดปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ พบว่า ในช่วงวันที่ 3 ถึง 9 ของการทดลอง ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ไม่แตกต่างจากต้นพืชในชุดควบคุม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายสามารถรักษาเสถียรภาพของเยื่อหุ้มเซลล์ได้ และตั้งแต่วันที่ 12 ของการทดลอง ต้นหนุมานประสานกายมีปริมาณของมาลอนไดอัลดีไฮด์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเยื่อหุ้มเซลล์ได้รับความเสียหายจากความเครียดออกซิเดชัน และจากการวัดการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ พบว่า ในวันที่ 6, 9 และ 15 ถึง 21 ของการทดลอง มีการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าเยื่อหุ้มเซลล์ของต้นหนุมานประสานกายได้รับความเสียหายจากความเครียดออกซิเดชันและความเครียดจากความแล้งอย่างต่อเนื่อง ทำให้โครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ไม่สามารถควบคุมการเลือกผ่านของสารได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาผลของความเครียดจากความแล้งในต้นหญ้าหวาน (*Stevia rebaudiana*) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10% (w/v) PEG6000 พบว่า ต้นหญ้าหวานที่ได้รับความเครียดจากความแล้งเกิดการสะสมปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ และการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าต้นหญ้าหวานที่ได้รับความเครียดจากความแล้งเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันของไขมันในเยื่อหุ้มเซลล์ นอกจากนี้ การสะสม ROS ของต้นหญ้าหวานที่ได้รับความเครียดจากความแล้งชักนำให้กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ เอนไซม์ SOD, CAT และ APX เพิ่มขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าความเครียดออกซิเดชันที่เกิดจากการชักนำด้วยการจำลองให้พืชได้รับความเครียดจากความแล้งด้วยสารละลาย PEG6000 มีสาเหตุมาจากกลไกการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระที่ไม่เพียงพอ ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเยื่อหุ้มเซลล์และกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ส่งผลให้คาร์โบไฮเดรตและการเจริญเติบโตของต้นหญ้าหวานลดลง (Hajihashemi & Sofo, 2018) เช่นเดียวกับการศึกษาในต้นดาวเรือง (*Tagetes minuta* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความรุนแรงแตกต่างกัน ได้แก่ 100% FC, 75% FC, 50% FC และ 25% FC พบว่า ต้นดาวเรืองที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณน้ำสัมพัทธ์

ลดลง แต่มีการสะสมปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์และการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น เมื่อความเครียดจากความแห้งมีความรุนแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ ได้แก่ เอนไซม์ CAT และเอนไซม์ APX เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นกลไกการตอบสนองของต้นดาวเรืองในการกำจัด ROS และบรรเทาความเสียหายจากการเกิดออกซิเดชัน (Babaei, Moghaddam, Farhadi, & Pirbalouti, 2021) และการศึกษากลไกการเจริญเติบโต การตอบสนองทางสรีรวิทยา และชีวเคมีต่อความเครียดจากความแห้งในต้นผักโขมสวน (*Amaranthus tricolor* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความแห้ง 100% FC (ชุดควบคุม), 80% FC, 50% FC และ 25% FC พบว่า ความเครียดจากความแห้งทำให้ปริมาณน้ำสัมพันธ์ในใบลดลง และปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ รวมถึงกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น (Sarker & Oba, 2018)

สารต่อต้านอนุมูลอิสระในรูปเอนไซม์ เช่น เอนไซม์ SOD เอนไซม์ CAT และเอนไซม์ APX มีบทบาทสำคัญในการกำจัด ROS ที่มากกว่าระดับปกติ เพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ ซึ่งเอนไซม์ SOD มีหน้าที่กำจัดอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ (O_2^-) โดยเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เอนไซม์ CAT และเอนไซม์ APX มีหน้าที่กำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษต่อเซลล์ ซึ่งเอนไซม์ APX จะทำงานร่วมกับเอนไซม์ CAT ในการกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ออกจากเซลล์ (Gill & Tuteja, 2010) จากผลการทดลอง พบว่า ต้นหนุมานประสานกาย ที่ได้รับความเครียดจากความแห้งมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD ลดลง ในวันที่ 3, 18 และ 21 ของการทดลอง และมีค่าคงที่ในบางช่วง ในขณะที่ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแห้งมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ CAT และเอนไซม์ APX ในใบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในวันที่ 6, 9, 15 และ 18 ของการทดลอง และสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายมีการตอบสนองต่อความเครียดจากความแห้งด้วยการปรับระบบการป้องกันอนุมูลอิสระ (antioxidant defense system) เฉพาะบางชนิดของเอนไซม์ การลดลงของกิจกรรมเอนไซม์ SOD อาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของโปรตีนหรือการควบคุมการแสดงออกของยีนภายใต้ความเครียดจากความแห้ง อย่างไรก็ตาม ต้นหนุมานประสานกายอาจชดเชยด้วยการเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ CAT และเอนไซม์ APX เพื่อช่วยในการกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการทำงานของเอนไซม์ SOD นอกจากนี้ ในวันที่ 21 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแห้งมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD เอนไซม์ CAT และเอนไซม์ APX ในใบลดลง แสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายอาจสูญเสียความสามารถในการจัดการกับอนุมูลอิสระที่

เกิดขึ้นภายใต้สภาวะแล้ง โดยเฉพาะเมื่อได้รับความเครียดอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ซึ่งกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ที่ลดลงสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ และการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ แสดงให้เห็นว่าความเครียดจากความแล้งในระยะยาวส่งผลต่อสมดุลระหว่างการสร้างและการกำจัด ROS ภายในเซลล์พืช เมื่อกลไกการป้องกันไม่สามารถกำจัด ROS ได้อย่างเพียงพอ จะนำไปสู่ความเสียหายของเซลล์ และการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสำคัญในใบ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยาและชีวเคมีในต้นโบทัน 2 พันธุ์ปลูก ได้แก่ 'Karl Rosenfield' และ 'Da Fu Gui' พบว่า ความเครียดจากความแล้งชักนำให้ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำ ปริมาณโปรตีน กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD และเอนไซม์ APX เพิ่มขึ้น และความเครียดจากความแล้งส่งผลให้ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบ กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ POD และ เอนไซม์ CAT ลดลง และการประเมินความสามารถในการต้านทานต่อความแล้ง พบว่า 'Karl Rosenfield' แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการต้านทานต่อความแล้งมากกว่า 'Da Fu Gui' ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตพบในกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ทั้ง 4 ชนิด พบว่า ระบบของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระอาจมีบทบาทในการช่วยให้พืชตอบสนองต่อความเครียดจากความแล้งที่รุนแรงได้ แต่ระบบเอนไซม์ดังกล่าวได้รับความเสียหายในระยะการเจริญเติบโตในช่วงแรก (Wang et al., 2019) จากการศึกษาในต้นข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) 2 จีโนไทป์ ที่มีระดับความสามารถในการทนต่อความเครียดจากความแล้งแตกต่างกัน ได้แก่ FD-83 ที่ทนต่อความแล้งได้ดี และ Nesser ที่ไวต่อความแล้ง พบว่า จีโนไทป์ที่ทนต่อความแล้ง (FD-83) มีปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ไม่แตกต่างจากชุดควบคุม และมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD เอนไซม์ CAT และเอนไซม์ POD เพิ่มขึ้น ในขณะที่กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ APX คงที่ และจีโนไทป์ที่ไวต่อความแล้ง (Nesser) มีปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ และกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD เอนไซม์ CAT และเอนไซม์ APX เพิ่มขึ้น แต่มีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ POD ลดลง (Hameed, Goher, & Iqbal, 2013) และจากการศึกษาในต้นพริก (*Capsicum annuum* L.) 2 พันธุ์ปลูก ได้แก่ 'Shanshu-2001' และ 'Nongchengjiao-2' โดยต้นพริกทั้งสองพันธุ์ปลูกได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความรุนแรงแตกต่างกัน ได้แก่ ชุดควบคุม (80% FC), ความเครียดจากความแล้งในระดับเล็กน้อย (60% FC), ความเครียดจากความแล้งในระดับปานกลาง (40% FC) และ ความเครียดจากความแล้งในระดับที่รุนแรง (20% FC) พบว่า กิจกรรมการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ เอนไซม์ SOD, เอนไซม์ CAT และเอนไซม์ POD เพิ่มขึ้น ในช่วงเริ่มต้นของการได้รับความเครียดจากความแล้ง และการทำงานของเอนไซม์ลดลงเมื่อความเครียดจากความแล้งยาวนานขึ้น ซึ่งบ่งบอกว่าการได้รับความเครียดจากความแล้ง

เป็นเวลานาน ส่งผลให้กิจกรรมการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระลดลง ซึ่งพริกพันธุ์ 'Shanshu-2001' สามารถต้านทานต่อความแล้งได้ดี เนื่องจากมีการเจริญเติบโตและผลผลิตที่ดีกว่า มีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ และการสะสมสารออกซิโมไลต์เพิ่มขึ้น เกิดปฏิกิริยาฟิสิกส์เคมีลดลง และมีความสามารถในการรักษาระดับน้ำในเนื้อเยื่อ (Anjum, Farooq, Xie, Liu, & Ijaz, 2012) นอกจากนี้ การศึกษาการตอบสนองของสารต้านอนุมูลอิสระของพืชในวงศ์ Lamiaceae 3 ชนิด ได้แก่ ต้นหุสบ (*Hyssopus officinalis* L.) ต้นเสฉฝรั่ง (*Salvia officinalis* L.) และต้นออริกาโน (*Origanum vulgare* L.) พบว่า ในต้นออริกาโนและต้นเสฉฝรั่งมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มาลอนไดอัลดีไฮด์ และโพรลีนเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง และการศึกษาการตอบสนองของระบบต้านอนุมูลอิสระ พบว่า ต้นหุสบมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD และเอนไซม์ POD เพิ่มขึ้น ในขณะที่ต้นเสฉฝรั่งมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ CAT ลดลง และมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD เอนไซม์ APX และเอนไซม์ POD ใกล้เคียงกับต้นเสฉฝรั่งในชุดควบคุม แต่มีปริมาณกรดแอสคอร์บิกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ภายใต้ความเครียดจากความแล้งในระดับปานกลาง และในต้นออริกาโนมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ CAT เพิ่มขึ้น ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง การตอบสนองของระบบของสารต้านอนุมูลอิสระมีบทบาทสำคัญในการปกป้องพืชจากความแล้ง ซึ่งผลกระทบของความเครียดจากความแล้งต่อระบบของสารต้านอนุมูลอิสระมีความเฉพาะเจาะจงในพืชแต่ละชนิด รวมถึงระยะเวลา และระดับของความเครียดที่พืชได้รับ (Skrypnik, Maslennikov, Antipina, Katserov, & Feduraev, 2024)

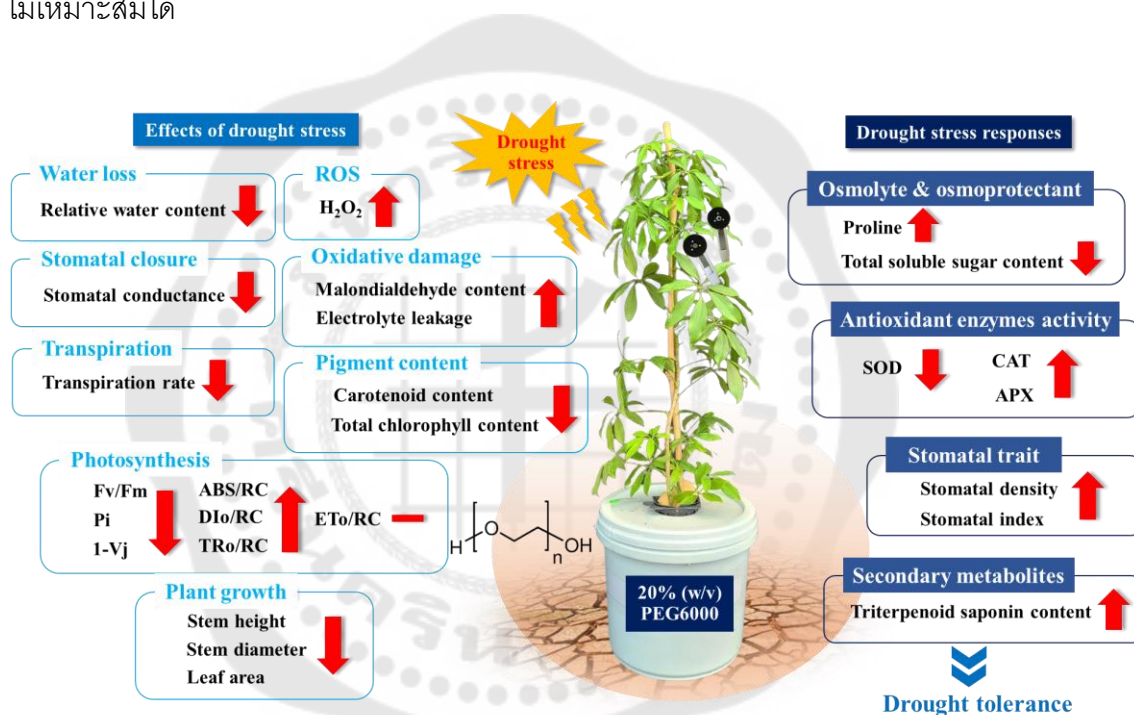
จากข้อมูลพื้นที่ใต้กราฟของสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน 4 ชนิด ที่ตรวจพบในใบของต้นหนุมานประสานกาย พบว่า ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง มีปริมาณสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 1 (616.2859 m/z) เพิ่มขึ้นในช่วงวันที่ 6 และ 9 ของการทดลอง โดยมีพื้นที่ใต้กราฟมากที่สุดในวันที่ 6 ของการทดลอง แสดงให้เห็นถึงกลไกการตอบสนองของต้นหนุมานประสานกาย ซึ่งเป็นการป้องกันของพืชต่อความเครียดจากความแล้ง โดยกระตุ้นการสังเคราะห์สารทุติยภูมิเพิ่มขึ้น และในวันที่ 12 ของการทดลองต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีพื้นที่ใต้กราฟลดลง คิดเป็น 49.5% ซึ่งอาจสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเมแทบอลิซึมของพืช และต้นหนุมานประสานกายมีพื้นที่ใต้กราฟของสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 2 และ 3 (580.2737 m/z) เพิ่มขึ้นในช่วงแรก (วันที่ 6 ถึง 9) โดยมีพื้นที่ใต้กราฟมากที่สุดในวันที่ 6 ของการทดลอง เช่นเดียวกับพื้นที่ใต้กราฟของสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 1 (616.2859 m/z) และมีพื้นที่ใต้กราฟลดลง คิดเป็น 55.1% ใน

วันที่ 12 ของการทดลอง และต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีการสะสมสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ชนิดที่ 4 (939.4875 m/z) ในระดับที่สูงกว่าชนิดอื่น ๆ โดยพื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกหลังจากได้รับการจำลองสภาวะแล้ง และมีพื้นที่ใต้กราฟมากที่สุดในวันที่ 9 ของการทดลอง และพื้นที่ใต้กราฟมีค่าลดลงในวันที่ 12 ของการทดลอง เช่นเดียวกับพื้นที่ใต้กราฟของสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนินชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ต้นหนุมานประสานกายตอบสนองต่อความเครียดจากความแล้ง โดยการสังเคราะห์สารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนินเพิ่มขึ้น ในช่วงวันที่ 6 ถึง 9 เพื่อให้ต้นหนุมานประสานกายสามารถปรับตัวเข้ากับความเสี่ยงจากความแล้งได้ และการสังเคราะห์สารกลุ่มนี้ลดลง ภายหลังจากได้รับการจำลองให้พืชได้รับความเครียดจากความแล้งเป็นเวลา 12 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเสี่ยงของระบบเมแทบอลิซึมของพืช ในขณะที่ยังคงสังเคราะห์โปรตีน และปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ CAT และ APX เพื่อช่วยป้องกันความเสี่ยงจากการขาดน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับการสะสมปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และมาลอนไดอัลดีไฮด์ ในช่วงวันที่ 6 ถึง 12 ที่บ่งบอกว่าต้นหนุมานประสานกายเกิดความเครียดออกซิเดชัน ซึ่งการตอบสนองในระยะยาวของต้นหนุมานประสานกายอาจมีการสะสมสารเหล่านี้ลดลงเป็นการปรับตัวของพืช เนื่องจากเกิดความเสี่ยงของเซลล์อย่างรุนแรง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในต้นชะเอมจีน (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.) ซึ่งเป็นพืชสมุนไพรที่ส่วนของรากมีคุณสมบัติในการล้างสารพิษและต้านอนุมูลอิสระ แต่เนื่องจากการเพาะปลูกต้นชะเอมจีนส่วนใหญ่มีคุณภาพลดลง จึงมีการหาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของรากชะเอมจีน โดยชักนำให้เกิดความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้นของสาร PEG6000 ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 5%, 10% และ 20% (w/v) PEG6000 เป็นเวลา 4 วัน พบว่าความเครียดจากความแล้งชักนำให้รากชะเอมจีนมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น และการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารทุติยภูมิ เช่น 3-hydroxy-3-methylglutaryl-coenzyme A reductase (HMGR), squalene synthase (SQS), β -amyrin synthase (β -AS) และ phenylalanine ammonia-lyase (PAL) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณสารทุติยภูมิทั้งไตรเทอพีนอยด์และฟลาโวนอยด์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในรากชะเอมจีนที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 10% (w/v) PEG6000 และส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของยาเพิ่มขึ้นด้วยความเครียดจากความแล้งในระดับที่เหมาะสมจึงช่วยเพิ่มการสะสมสารทุติยภูมิของรากชะเอมจีน และสามารถแก้ปัญหาคุณภาพของชะเอมจีนที่ลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Fan, Shen, He, Deng, & Meng, 2022) และจากการศึกษาในต้นดอกบัลลูน (*Platycodon grandiflorus* (Jacq.) A.DC.) ซึ่งเป็นพืชสมุนไพรที่มีสารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ

ได้แก่ platycodin D, deapioplatycodin D และ platycodin D3 พบว่า ต้นดอกบัลลูนที่ได้รับน้ำอย่างจำกัดส่งผลให้มีความชื้นในดินลดลง และมีปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ โพโรลีน น้ำตาลที่ละลายน้ำ กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD, เอนไซม์ CAT และเอนไซม์ POD เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ จากการวัดปริมาณสารไตรเทอพินอยด์ ซาโปนินที่สกัดได้จากส่วนของราก พบว่า ต้นดอกบัลลูนที่ได้รับน้ำอย่างจำกัดมีปริมาณ platycodin D เพิ่มขึ้นในวันที่ 45, 60 และ 75 ของการทดลอง มีปริมาณ deapioplatycodin D เพิ่มขึ้นในวันที่ 15 ของการทดลอง และมีปริมาณ platycodin D3 ไม่แตกต่างกับต้นพืชในชุดควบคุมที่ได้รับน้ำเพียงพอในช่วงแรก และมีการสังเคราะห์ platycodin D3 ลดลงในวันที่ 75 ของการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารไตรเทอพินอยด์ ซาโปนิน ได้แก่ *AACT*, *HMGR* และ *HMGS* มีการแสดงออกที่มากขึ้นในต้นดอกบัลลูนที่ได้รับน้ำในปริมาณลดลง แสดงให้เห็นว่าการได้รับน้ำอย่างจำกัดชักนำให้ต้นดอกบัลลูนเกิดการตอบสนองทางสรีรวิทยา การแสดงออกของยีน และการสังเคราะห์สารไตรเทอพินอยด์ ซาโปนิน เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นแนวทางในการเพาะปลูกเพื่อเพิ่มปริมาณสาร platycodin ในต้นดอกบัลลูนได้ (Li, Cheng, Zhang, Yang, & Han, 2023)

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายมีศักยภาพในการทนต่อความเครียดจากความแล้งสูงสุดที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 ซึ่งต้นหนุมานประสานกายมีความสามารถในการปรับตัวทางสรีรวิทยาเพื่อให้ต้านทานต่อความเครียดจากความแล้งได้ดี จากการจำลองสภาวะแล้งในต้นหนุมานประสานกายโดยการชักนำด้วยสาร PEG6000 ที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 สามารถสรุปกลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาของต้นหนุมานประสานกายได้ ดังภาพประกอบ 57 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งทำให้ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบลดลง ส่งผลให้ต้นหนุมานประสานกายรักษาปริมาณของน้ำ โดยการปิดปากใบให้มีขนาดลดลง ทำให้อัตราการคายน้ำและการแลกเปลี่ยนก๊าซลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงด้วย ต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับความเครียดจากความแล้งจะมีการชักนำให้เกิดการสร้าง ROS เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้โครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลาย ความเครียดออกซิเดชันทำให้ต้นหนุมานประสานกายมีปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ และการรื้อไหลของสารอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น ปริมาณของ ROS ที่มากเกินไปยังส่งผลเสียต่อโครงสร้างคลอโรพลาสต์ทำให้เกิดการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ ปริมาณรงควัตถุทั้งคลอโรฟิลล์รวมและแคโรทีนอยด์ลดลงส่งผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงและการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้ ความเครียดจากความแล้งส่งผลต่อการเจริญเติบโตทางลำต้นได้อย่างชัดเจน โดยความเครียดจากความแล้งทำให้ความสูง

ของลำต้น เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น และพื้นที่ใบลดลง ต้นหนุมานประสานกายมีการตอบสนองต่อความเครียดจากความแล้ง โดยการสะสมปริมาณโพรลีน และกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ CAT และเอนไซม์ APX เพิ่มขึ้น แต่กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ SOD ลดลงและคงที่ในบางช่วง และมีการเพิ่มความหนาแน่นของปากใบและดัชนีของปากใบ เพื่อรักษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนก๊าซ แม้ว่าปากใบจะเปิดได้อย่างจำกัด ความเครียดจากความแล้งกระตุ้นให้ต้นหนุมานประสานกายมีการสังเคราะห์สารไตรเทอพินอยด์ ซาโปนิน เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นกลไกที่ช่วยให้ต้นหนุมานประสานกายสามารถปรับตัวและเพิ่มความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้



ภาพประกอบ 57 กลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาของต้นหนุมานประสานกายที่ได้รับ

ความเครียดจากความแล้งที่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000

ข้อเสนอแนะทั่วไป

1) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าต้นหนุมานประสานกายมีศักยภาพในการเจริญเติบโตภายใต้ระบบเกษตรที่มีน้ำจำกัด (deficit irrigation) โดยไม่จำเป็นต้องรดน้ำบ่อยครั้ง ซึ่งอาจเป็นทางเลือกหนึ่งในการส่งเสริมการปลูกพืชสมุนไพรอย่างยั่งยืนในสภาพแวดล้อมที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรน้ำหรือพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการขาดแคลนน้ำ

2) แนะนำการรดให้น้ำก่อนการเก็บเกี่ยวใบต้นหนุมานประสานกายสามารถช่วยเพิ่มปริมาณสารไตรเทอพินอยด์ ซาโปนินในต้นพืชได้ โดยเฉพาะเมื่อต้นหนุมานประสานกายได้รับความเครียดจากความแล้งที่ควบคุมได้ในระหว่างการเพาะปลูก ซึ่งจากการทดลอง พบว่า การปลูก

ในสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้น 20% (w/v) PEG6000 แสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวไม่ควรเกิน 6 ถึง 9 วัน หลังจากได้รับสภาวะแล้ง ทั้งนี้สามารถแนะนำให้เกษตรกรนำแนวทางดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในการจัดการน้ำก่อนการเก็บเกี่ยว เพื่อลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มคุณภาพของสารออกฤทธิ์ทางยาในพืชสมุนไพร

ข้อเสนอแนะในการศึกษาครั้งต่อไป

1) การศึกษาความสามารถในการฟื้นตัวของต้นหนุมานประสานกายหลังจากได้รับน้ำอีกครั้ง โดยเฉพาะในช่วงหลังจากวันที่ 9 ของการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงที่ต้นหนุมานประสานกายแสดงอาการตอบสนองต่อความเครียดจากความแล้งและกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเริ่มเสื่อมสภาพ การศึกษาในประเด็นนี้จะช่วยประเมินศักยภาพของต้นหนุมานประสานกายในการฟื้นฟูสภาพทางสรีรวิทยาและชีวเคมีภายหลังจากความเครียด และให้ข้อมูลที่สำคัญต่อการจัดการน้ำในระบบการปลูกพืชสมุนไพรภายใต้สภาวะแล้ง

2) การศึกษาการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับความเครียดจากความแล้งและการสังเคราะห์สารไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ของต้นหนุมานประสานกาย เพื่อศึกษากลไกการตอบสนองและการปรับตัวของพืชต่อสภาวะแล้งในระดับโมเลกุล

3) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระดับฮอร์โมน ABA ในต้นหนุมานประสานกายภายใต้สภาวะความเครียดจากความแล้ง เพื่อวิเคราะห์บทบาทของฮอร์โมนดังกล่าวในการควบคุมการเปิด-ปิดของปากใบ ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการปรับตัวของพืชต่อการสูญเสียน้ำ และความสามารถในการทนแล้งของพืชสมุนไพร

4) การศึกษาปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำในส่วนของลำต้นและรากของต้นหนุมานประสานกายภายใต้สภาวะแล้งเพิ่มเติม เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนย้ายน้ำตาลที่ละลายน้ำ ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจกลไกการปรับตัวทางสรีรวิทยาของพืชต่อความแล้งผ่านการเคลื่อนย้ายและการสะสมคาร์โบไฮเดรตภายในลำต้นและราก

บรรณานุกรม

- Adejumo, S. A., Ezech, O. S., & Mur, L. A. (2018). Okra growth and drought tolerance when exposed to water regimes at different growth stages. *International Journal of Vegetable Science* 25(3), 226-258.
- Al-Yasi, H., Attia, H., Alamer, K., Hassan, F., Ali, E., Elshazly, S., . . . & Hessini, K. (2020). Impact of drought on growth, photosynthesis, osmotic adjustment, and cell wall elasticity in Damask rose. *Plant Physiology and Biochemistry*, 150, 133-139.
- Anjum, S. A., Farooq, M., Xie, X. Y., Liu, X. J., & Ijaz, M. F. (2012). Antioxidant defense system and proline accumulation enables hot pepper to perform better under drought. *Scientia horticulturae*, 140, 66-73.
- Anjum, S. A., Xie, X. Y., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African journal of agricultural research*, 6(9), 2026-2032.
- Ansari, W. A., Atri, N., Pandey, M., Singh, A. K., Singh, B., & Pandey, S. (2019). Influence of drought stress on morphological, physiological and biochemical attributes of plants: a review. *Biosciences biotechnology research Asia*, 16(4), 697-709.
- Ansari, W. A., Atri, N., Singh, B., Kumar, P., & Pandey, S. (2018). Morpho-physiological and biochemical responses of muskmelon genotypes to different degree of water deficit. *Photosynthetica*, 56(4), 1019-1030.
- Arunyanark, A., Jogloy, S., Akkasaeng, C., Vorasoot, N., Kesmala, T., Nageswara Rao, R. C., . . . & Patanothai, A. (2008). Chlorophyll stability is an indicator of drought tolerance in peanut. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 194(2), 113-125.
- Ashraf, M., & Harris, P. J. C. (2013). Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica*, 51(2), 163-190.
- Babaei, K., Moghaddam, M., Farhadi, N., & Pirbalouti, A. G. (2021). Morphological, physiological and phytochemical responses of Mexican marigold (*Tagetes minuta* L.) to drought stress. *Scientia horticulturae*, 284, 110116.
- Babaei, L., Sharifani, M. M., Darvishzadeh, R., & Abbaspour, N. (2021). Impact of drought

- stress on photosynthetic response of some pear species. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 8(4), 353-369.
- Badr, A., & Brüggemann, W. (2020). Comparative analysis of drought stress response of maize genotypes using chlorophyll fluorescence measurements and leaf relative water content. *Photosynthetica*, 58(2), 38-645.
- Baerenfaller, K., Massonnet, C., Walsh, S., Baginsky, S., Bühlmann, P., Hennig, L., . . . & Gruissem, W. (2012). Systems-based analysis of Arabidopsis leaf growth reveals adaptation to water deficit. *Molecular systems biology*, 8(1), 606.
- Baghery, M. A., Kazemitabar, S. K., Dehestani, A., & Mehrabanjoubani, P. (2023). Sesame (*Sesamum indicum* L.) response to drought stress: susceptible and tolerant genotypes exhibit different physiological, biochemical, and molecular response patterns. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 29(9), 1353-1369.
- Basal, O., Szabó, A., & Veres, S. (2020). Physiology of soybean as affected by PEG-induced drought stress. *Current Plant Biology*, 22, 100135.
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, L. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207.
- Björkman, O., & Demmig, B. (1987). Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta*, 170, 489-504.
- Blum, A. (2017). Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. *Plant, cell & environment*, 40(1), 4-10.
- Boguszewska-Mańkowska, D., Pieczyński, M., Wyrzykowska, A., Kalaji, H. M., Sieczko, L., Szweykowska-Kulińska, Z., & Zagdańska, B. (2018). Divergent strategies displayed by potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars to cope with soil drought. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 204(1), 13-30.
- Boussadia, O., Omri, A., & Mzid, N. (2023). Eco-physiological behavior of five Tunisian olive tree cultivars under drought stress. *Agronomy*, 13(3), 720.
- Bressan, R. A., Hasegawa, P. M., & Handa, A. K. (1981). Resistance of cultured higher plant cells to polyethylene glycol-induced water stress. *Plant Science Letters* 21,

23–30.

- Brummitt, R. K. (2001). *World Geographical Scheme for Recording Plant Distributions* (2nd ed.). Pittsburgh: Hunt Institute for Botanical Documentation Carnegie Mellon University.
- Caine, R. S., Yin, X., Sloan, J., Harrison, E. L., Mohammed, U., Fulton, T., . . . & Gray, J. E. (2019). Rice with reduced stomatal density conserves water and has improved drought tolerance under future climate conditions. *The New phytologist*, 221(1), 371–384.
- Caser, M., Chitarra, W., D'Angiolillo, F., Perrone, I., Demasi, S., Lovisolo, C., . . . & Scariot, V. (2019). Drought stress adaptation modulates plant secondary metabolite production in *Salvia dolomitica* Codd. *Industrial Crops and Products*, 129, 85-96.
- Caverzan, A., Passaia, G., Rosa, S. B., Ribeiro, C. W., Lazzarotto, F., & Margis-Pinheiro, M. (2012). Plant responses to stresses: role of ascorbate peroxidase in the antioxidant protection. *Genetics and molecular biology*, 35, 1011-1019.
- Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of botany*, 103(4), 551-560.
- Chen, T., Zhang, Y., Liu, Z., & Li, Y. (2020). Drought stress affects photosystem II and antioxidant systems in *Atriplex canescens*. *Photosynthetica*, 58(2), 413–420.
- Chen, X., Xie, Y., Wei, K., Lan, Z., Li, C., Li, Y., & Guo, X. (2020). Drought stress enhanced andrographolides contents in *Andrographis paniculata*. *Acta Ecologica Sinica*, 40(2), 113-121.
- Chinese Pharmacopoeia Commission. (2015). *Pharmacopoeia of the People's Republic of China* (10th ed) (Vol. 1).
- Chutteang, C., Roonprapant, P., Teinseree, N., & Arunyanark, A. (2023). Association between chlorophyll stability and drought tolerance in Robusta coffee. *Agriculture and Natural Resources*, 57(2), 331-342.
- Dong, T., Shang, J., Chen, J. M., Liu, J., Qian, B., Ma, B., . . . & Zhou, G. (2019). Assessment of portable chlorophyll meters for measuring crop leaf chlorophyll

- concentration. *Remote Sensing*, 11(22), 2706.
- Driesen, E., De Proft, M., & Saeys, W. (2023). Drought stress triggers alterations of adaxial and abaxial stomatal development in basil leaves increasing water-use efficiency. *Horticulture Research*, 10(6), uhad075.
- Dubey, R., Pandey, B. K., Sawant, S. V., & Shirke, P. A. (2023). Drought stress inhibits stomatal development to improve water use efficiency in cotton. *Acta Physiologiae Plantarum*, 45(2), 30.
- Durgadevi, R., & Vijayalakshmi, D. (2020). Mulberry with increased stomatal frequency regulates gas exchange traits for improved drought tolerance. *Plant Physiology Reports*, 25(1), 24-32.
- Fan, J., Shen, Y., He, L. W., Deng, D. Q., & Meng, X. C. (2022). Effects of drought stress on the quality of licorice. *Pharmacognosy Magazine*, 18(80), 976-984.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185-212.
- Flexas, J., & Carriquí, M. (2020). Photosynthesis and photosynthetic efficiencies along the terrestrial plant's phylogeny: lessons for improving crop photosynthesis. *The Plant Journal*, 101(4), 964-978.
- Franks, P. J., Doheny-Adams, T. W., Britton-Harper, Z. J., & Gray, J. E. (2015). Increasing water-use efficiency directly through genetic manipulation of stomatal density. *New Phytologist*, 207(1), 188-195.
- Ghotbi-Ravandi, A. A., Shahbazi, M., Shariati, M., & Mulo, P. (2014). Effects of mild and severe drought stress on photosynthetic efficiency in tolerant and susceptible barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200(6), 403-415.
- Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology & Biochemistry*, 48(12), 909-930.
- Guo, Y. Y., Yu, H. Y., Kong, D. S., Yan, F., & Zhang, Y. J. (2016). Effects of drought stress

- on growth and chlorophyll fluorescence of *Lycium ruthenicum* Murr. seedlings. *Photosynthetica*, 54(4), 524-531.
- Hajhashemi, S., & Sofo, A. (2018). The effect of polyethylene glycol-induced drought stress on photosynthesis, carbohydrates and cell membrane in *Stevia rebaudiana* grown in greenhouse. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(8), 142.
- Hameed, A., Goher, M., & Iqbal, N. (2013). Drought induced programmed cell death and associated changes in antioxidants, proteases, and lipid peroxidation in wheat leaves. *Biologia Plantarum*, 57(2), 370-374.
- Harris, D., Tripathi, R. S., & Joshi, A. (2002). On-farm seed priming to improve crop establishment and yield in dry direct-seeded rice. *Direct Seeding: Research Strategies and Opportunities*, 231-240.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S., Mahmud, J., . . . & Fotopoulos, V. (2020). Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress: Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator. *Antioxidants (Basel)*, 9(8), 681.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Anee, T. I., Parvin, K., Nahar, K., Mahmud, J. A., & Fujita, M. (2019). Regulation of Ascorbate-Glutathione Pathway in Mitigating Oxidative Damage in Plants under Abiotic Stress. *Antioxidants*, 8(9), 384.
- Haworth, M., Carli, A., Montesano, V., Killi, D., Fabbri, A., Balestrini, R., . . . & Centritto, M. (2024). *Cannabis sativa* genotypes with larger leaf areas have higher potential to adjust stomatal size and density in response to water deficit: The effect on stomatal conductance and physiological stomatal behaviour. *Plant Stress*, 14, 100649.
- Hiscox, J. D., & Israelstam, G. F. (1979). A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany*, 57, 1332-1334.
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. *California agricultural experiment station*, 347, 23-32.
- Hojati, M., Modarres-Sanavy, S. A. M., Karimi, M., & Ghanati, F. (2011). Responses of growth and antioxidant systems in *Carthamus tinctorius* L. under water deficit stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 33, 105-112.

- Hosseini, M. S., Samsampour, D., Ebrahimi, M., Abadía, J., & Khanahmadi, M. (2018). Effect of drought stress on growth parameters, osmolyte contents, antioxidant enzymes and glycyrrhizin synthesis in licorice (*Glycyrrhiza glabra* L.) grown in the field. *Phytochemistry*, 156, 124-134.
- Hussain, S., Khalid, M. F., Saqib, M., Ahmad, S., Zafar, W., Rao, M. J., . . . & Anjum, M. A. (2018). Drought tolerance in citrus rootstocks is associated with better antioxidant defense mechanism. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40, 1-10.
- Jaleel, C. A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H. J., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2009). Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *International Journal of Agriculture & Biology* 11(1), 100-105.
- Jiang, Y., & Huang, B. (2002). Protein Alterations in Tall Fescue in Response to Drought Stress and Absciscic Acid. *Crop Science*, 42(1), 202-207.
- Jothimani, K., & Arulbalachandran, D. (2020). Physiological and biochemical studies of black gram (*Vigna mungo* (L.) Hepper) under polyethylene glycol induced drought stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 29, 101777.
- Kalaji, H., & Guo, P. (2008). Chlorophyll fluorescence: A useful tool in barley plant breeding programs (pp. 439-463).
- Kalaji, H. M., Bağba, W., Gediga, K., Goltsev, V., Samborska, I. A., Cetner, M. D., . . . & Dankov, K. (2018). Chlorophyll fluorescence as a tool for nutrient status identification in rapeseed plants. *Photosynthesis Research*, 136, 329-343.
- Karami, S., Behrouz, S., & Rudabeh, R. (2025). Molecular investigation of how drought stress affects chlorophyll metabolism and photosynthesis in leaves of C3 and C4 plant species: a transcriptome meta-analysis. *Heliyon*, 11, e42368.
- Khodabin, G., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Rad, A. H. S., & Modarres-Sanavy, S. A. M. (2020). Effect of drought stress on certain morphological and physiological characteristics of a resistant and a sensitive canola cultivar. *Chemistry & biodiversity*, 17(2), e1900399.
- Khoyerdi, F. F., Shamshiri, M. H., & Estaji, A. (2016). Changes in some physiological and

- osmotic parameters of several pistachio genotypes under drought stress. *Scientia horticulturae*, 198, 44-51.
- Kleinwächter, M., & Selmar, D. (2014). New insights explain that drought stress enhances the quality of spice and medicinal plants: potential applications. *Agronomy for Sustainable Development (Springer Science & Business Media B.V.)*, 35(1), 121-131.
- Kuromori, T., Seo, M., & Shinozaki, K. (2018). ABA transport and plant water stress responses. *Trends in plant science*, 23(6), 513-522.
- Lagattuta, D. (2022). How to Grow & Care for *Schefflera* (Umbrella Plant). Retrieved from <https://www.thespruce.com/grow-schefflera-plants-inside-1902771>.
- Laopaksa, A., Umnouypol, S., & Jongbunpasert, V. (1988). The study of antibacterial activity of herbs in respiratory tract infection. *The Thai journal of pharmaceutical science*, 13, 23-36.
- Li, M., Cheng, L., Zhang, M., Yang, L. M., & Han, M. (2023). *Platycodon grandiflorus* subjected to full-and restricted-water regimes show differential biosynthesis of triterpenoid saponins. *Acta Physiologiae Plantarum*, 45(4), 55.
- Liang, D., Liu, Y. F., Hao, Z. Y., Luo, H., Wang, Y., Zhang, C. L., . . . & Yu, D. Q. (2015). Acylated flavonol glycosides and δ -truxinate derivative from the aerial parts of *Lysimachia clethroides*. *Phytochemistry Letters*, 11, 116-119.
- Liang, G., Liu, J., Zhang, J., & Guo, J. (2020). Effects of Drought Stress on Photosynthetic and Physiological Parameters of Tomato. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 145(1), 12-17.
- Lin, T. W., Pan, M. W., Lee, Y. C., Hsieh, H. Y., Lin, T. W., Pan, M. W., . . . & Chang, J. C. (2017). Assessing the physiological responses and shoot growth of potted 'Jen-Ju-Ba' guava (*Psidium guajava* L.) plants to drought. *International Symposium on GA3 Tropical Fruit (Guava, Wax Apple, Pineapple and Sugar Apple)* 1166, 173-182.
- Mafakheri, A., Siosemardeh, A., Bahramnejad, B., Struik, P. C., & Sohrabi, Y. (2010). Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea

- cultivars *Australian journal of crop science* 4(8), 580-585.
- Majid, K., & Roza, G. (2012). The effect of drought stress on leaf chlorophyll content and stress resistance in maize cultivars (*Zea mays*). *African Journal of Microbiology Research*, 6(12), 2844-2848.
- Manaa, A., Goussi, R., Derbali, W., Cantamessa, S., Essemine, J., & Barbato, R. (2021). Photosynthetic performance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) after exposure to a gradual drought stress followed by a recovery period. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1862(5), 148383.
- Mandoulakani, B. A., Eyvazpour, E., & Ghadimzadeh, M. (2017). The effect of drought stress on the expression of key genes involved in the biosynthesis of phenylpropanoids and essential oil components in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Phytochemistry*, 139, 1-7.
- Mathobo, R., Marais, D., & Steyn, J. M. (2017). The effect of drought stress on yield, leaf gaseous exchange and chlorophyll fluorescence of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultural Water Management*, 180, 118-125.
- Matsui, K., Wirotasangthong, M., Thanakijcharoenpath, W., Mungmee, C., & Nishikawa, A. (2010). 2 Inhibitory Effects of Schefflera leucantha Extract on Production of Allergic Mediators by Langerhans Cells and Mast Cells. *Journal of investigational allergology & clinical immunology*, 20(6), 463-468.
- Meher., Shivakrishna, P., Ashok Reddy, K., & Manohar Rao, D. (2018). Effect of PEG-6000 imposed drought stress on RNA content, relative water content (RWC), and chlorophyll content in peanut leaves and roots. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(2), 285-289.
- Mehla, N., Sindhi, V., Josula, D., Bisht, P., & Wani, S. H. (2017). *In Reactive Oxygen Species and Antioxidant Systems in Plants: Role and Regulation under Abiotic Stress*. Singapore: Springer.
- Mihaljevic, I., Viljevac Vuletic, M., Simic, D., Tomas, V., Horvat, D., Josipovic, M., . . . & Vukovic, D. (2021). Comparative study of drought stress effects on traditional and modern apple cultivars. *Plants*, 10(3), 561.

- Mohammadkhani, N., & Heidari, R. (2008). Drought-induced Accumulation of Soluble Sugars and Proline in Two Maize Varieties. *World Applied Sciences Journal*, 3(3), 448-453.
- Moller, I., Jensen, P., & Hansson, A. (2007). Oxidative modifications to cellular components in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 58, 459-481.
- Monteoliva, M. I., Guzzo, M. C., & Posada, G. A. (2021). Breeding for drought tolerance by monitoring chlorophyll content. *Gene Technol*, 10(165), 10-35248.
- Mulugeta, S. M., Sárosi, S., & Radácsi, P. (2023). Physio-morphological trait and bioactive constituents of *Ocimum* species under drought stress. *Industrial Crops and Products*, 205, 117545.
- Mumivand, H., Ebrahimi, A., Morshedloo, M. R., & Shayganfar, A. (2021). Water deficit stress changes in drug yield, antioxidant enzymes activity and essential oil quality and quantity of Tarragon (*Artemisia dracunculus* L.). *Industrial Crops and Products*, 164, 113381.
- Murchie, E. H., & Lawson, T. (2013). Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of experimental botany*, 64(13), 3983–3998.
- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and cell physiology*, 22(5), 867-880.
- Nasrollahi, V., Mirzaie-asl, A., Piri, K., Nazeri, S., & Mehrabi, R. (2014). The effect of drought stress on the expression of key genes involved in the biosynthesis of triterpenoid saponins in liquorice (*Glycyrrhiza glabra*). *Phytochemistry*, 103, 32-37.
- Nguanchoo, V., Balslev, H., Sadgrove, N. J., & Phumthum, M. (2023). Medicinal plants used by rural Thai people to treat non-communicable diseases and related symptoms. *Heliyon*, 9(1), e12758.
- Nguyen, H. T., Babu, R. C., & Blum, A. (1997). Breeding for drought resistance in rice: Physiology and molecular genetics considerations. *Crop Science*, 37(5), 1426-1443.
- Nowak, M., Manderscheid, R., Weigel, H.-J., Kleinwächter, M., & Selmar, D. (2010).

- Drought stress increases the accumulation of monoterpenes in sage (*Salvia officinalis*), an effect that is compensated by elevated carbon dioxide concentration. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 83, 133–136
- Nyi, N., Sridokchan, W., Chai-arree, W., & Srinives, P. (2012). Nondestructive measurement of photosynthetic pigments and nitrogen status in *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.) by chlorophyll meter. *The Philippine Agricultural Scientist*, 95(2), 83-89.
- Oliveira, B. H. D., Santos, C. A., & Espíndola, A. P. D. (2002). Determination of the triterpenoid, betulinic acid, in *Doliocarpus schottianus* by HPLC. *Phytochemical Analysis: An International Journal of Plant Chemical and Biochemical Techniques*, 13(2), 95-98.
- Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., & Tran, L. P. (2014). Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science* 5, 1-9.
- Osmolovskaya, N., Shumilina, J., Kim, A., Didio, A., Grishina, T., Bilova, T., . . . & Wessjohann, L. A. (2018). Methodology of Drought Stress Research: Experimental Setup and Physiological Characterization. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(12), 4089.
- Pancharoen, O., Tuntiwachwuttikul, P., Taylor, W. C., & Picker, K. (1994). Triterpenoid glycosides from *Schefflera lucantha*. *Phytochemistry*, 35(4), 987-992.
- Panthong, A., Kanjanapothi, D., & Taylor, W. C. (1986a). Ethnobotanical review of medicinal plants from Thai traditional book. *Journal of Ethnopharmacology*, 213-228.
- Panthong, A., Kanjanapothi, D., & Taylor, W. C. (1986b). Ethnobotanical review of medicinal plants from Thai traditional book Part I: Plants with anti-inflammatory, anti-asthmatic and antihypersensitive properties. *Journal of Ethnopharmacology*, 18, 213-228.
- Parry, C., Blonquist Jr, J. M., & Bugbee, B. (2014). *In situ* measurement of leaf chlorophyll concentration: analysis of the optical/absolute relationship. *Plant, cell & environment*, 37(11), 2508-2520.

- Pei, Z. F., Ming, D. F., Liu, D., Wan, G. L., Geng, X. X., Gong, H. J., & Zhou, W. J. (2010). Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Journal of plant growth regulation*, 29, 106-115.
- Phetruang, W., Haituk, S., Kankavee, P., & Cheewangkoon, R. (2019). New record of *Nyssopsora thwaitesii* on *Schefflera leucantha* and its colonization. *Plant Pathology & Quarantine*, 9(1), 185–191.
- Pongchairerk, U., Chungsamarnyart, N., Chantakru, S., Pongket, P., & Saengprapaitip, K. (2009). *Ethanol Extract of Schefflera leucantha* Viguer Enhances Wound Healing in Dog. Paper presented at the 3rd Congress of the Asian Association of Veterinary Anatomists, Chungbuk National University, Cheongju, Korea.
- Potduang, B., Chongsiriroeg, C., Benmart, Y., Giwanon, R., Supatanakul, W., & Tanpanich, S. (2007). Biological activity of *Schefflera leucantha*. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 4(2), 157 – 164.
- Pourghayoumi, M., Bakhshi, D., Rahemi, M., Kamgar-Haghighi, A. A., & Aalami, A. (2017). The physiological responses of various pomegranate cultivars to drought stress and recovery in order to screen for drought tolerance. *Scientia horticulturae*, 217, 164-172.
- Qi, Y., Ma, L., Ghani, M. I., Peng, Q., Fan, R., Hu, X., & Chen, X. (2023). Effects of drought stress induced by hypertonic polyethylene glycol (PEG-6000) on *Passiflora edulis* Sims physiological properties. *Plants*, 12(12), 2296.
- Rouen, A., Baghizadeh, A., & Roghami, M. (2023). Physiological and Biochemical Responses of watermelon landraces to water deficit stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 70(6), 134.
- Sarker, U., & Oba, S. (2018). Drought Stress Effects on Growth, ROS Markers, Compatible Solutes, Phenolics, Flavonoids, and Antioxidant Activity in *Amaranthus tricolor*. *Appl Biochem Biotechnol*, 186, 999–1016.
- Satayavivad, J., Bunyapraphatsara, N., Thantawat, A., & Kositchaiwat, U. (1996). Hypoglycemic activity of the aqueous extract of *Schefflera leucantha* Viguer in rat.

Thai Journal of Phytopharmacy, 3, 1-5.

- Schimpl, F. C., Ferreira, M. J., Jaquetti, R. K., Martins, S. C. V., & de Carvalho Gonçalves, J. F. (2019). Physiological responses of young Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) plants to drought stress and subsequent rewatering. *Flora*, 252, 10-17.
- Schonfeld, M. A., Johnson, R. C., Carver, B. F., & Mornhiweg, D. W. (1988). Water relations in winter wheat as drought resistance indicator. *Crop Science*, 28(3), 526-531.
- Selmar, D., & Kleinwächter, M. (2013). Influencing the product quality by deliberately applying drought stress during the cultivation of medicinal plants. *Industrial Crops & Products*, 42, 558-566.
- Shakeel, A. A., Xiao-yu, X., Long-chang, W., Muhammad, F. S., Chen, M., & Wang, L. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African journal of agricultural research*, 6(9), 2026-2032.
- Sharma, P., & Dubey, R. S. (2005). Drought Induces Oxidative Stress and Enhances the Activities of Antioxidant Enzymes in Growing Rice Seedlings. *Plant Growth Regul* 46, 209–221.
- Shin, Y. K., Bhandari, S. R., Jo, J. S., Song, J. W., & Lee, J. G. (2021). Effect of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters, phytochemical contents, and antioxidant activities in lettuce seedlings. *Horticulturae*, 7(8), 238.
- Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H., Faisal, M., & Al Sahli, A. A. (2014). Nano-silicon dioxide mitigates the adverse effects of salt stress on *Cucurbita pepo* L. . *Environmental toxicology and chemistry*, 33(11), 2429-2437.
- Sinchaisri, N., Roongsook, D., & Areekul, S. (1988). Botanical repellent against the diamondback moth, *Plutella xylostella* L. . *The Kasetsart Journal*, 22, 71-74.
- Skrypnik, L., Maslennikov, P., Antipina, M., Katserov, D., & Feduraev, P. (2024). Comparative Study on the Response of Hyssop (*Hyssopus officinalis* L.), Salvia (*Salvia officinalis* L.), and Oregano (*Origanum vulgare* L.) to Drought Stress Under Foliar Application of Selenium. *Plants*, 13(21), 2986.
- Sousaraei, N., Mashayekhi, K., Mousavizadeh, S. J., Akbarpour, V., Medina, J., & Aliniaiefard, S. (2021). Screening of tomato landraces for drought tolerance based

- on growth and chlorophyll fluorescence analyses. *Horticulture, environment, and biotechnology*, 62, 521-535.
- Sumanta, N., Haque, C. I., Nishika, J., & Suprakash, R. (2014). Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids from commonly grown fern species by using various extracting solvent. *Research Journal of Chemical Sciences*, 4(9), 63-69.
- Taesotikul, T., Panthong, A., & Kanjanapothi, D. (1980). *Brondiodilator activity of Schefflera venulosa : preliminary investigation*. Paper presented at the 4th Asian symposium on medicinal plants and species, Bangkok, Thailand.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (1991). *Plant physiology: Mineral nutrition*. Redwood City, California: The Benjamin Cummings Publishing Company, Inc.
- Tawatsin, A., Thavara, U., Wongsinkongman, P., Bansiddhi, J., Boonruad, T., Chavalittumrong, P., . . . & Mulla, M. S. (2005). Repellency and ovipositional deterrent effects of essential oils extracted from plants in Thailand against four mosquito vectors (Diptera: Calicidae) and oviposition deterrent effects against *Aedes Aegypti* (Diptera: Calicidae) *The Southeast Asian journal of tropical medicine and public health*, 37, 915-931.
- Thakur, A., & Thakur, C. L. (2018). Evaluation of four medicinal herb species under conditions of water-deficit stress. *Indian Journal of Plant Physiology*, 23(3), 459-466.
- Than, T. T., & Le, N. N. T. (2022). Effects of drought stress on growth and flavonoid accumulation of fish mint (*Houttuynia cordata* Thumb.). *Plant Science Today*, 9(3), 37-43.
- Turakainen, M., Hartikainen, H., & Seppanen, M. M. (2004). Effects of selenium treatments on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and concentrations of soluble sugars and starch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(17), 5378–5382.
- Turner, N. C. (2018). Turgor maintenance by osmotic adjustment: 40 years of progress. . *Journal of experimental botany*, 69(13), 3223-3233.
- Umar, M., & Siddiqui, Z. S. (2020). Florescence assessment of sunflower genotypes

- against drought stress environment. *Pakistan Journal of Botany*, 52(4), 1181-1188.
- Velikova, V., Yordanov, I., & Edreva, A. (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants protective role of exogenous polyamines. *Plant Science*, 151, 59-66.
- Wan, Y., Liang, Y., Gong, X., Ouyang, J., Huang, J., Wu, X., . . . & Zhao, G. (2023). Growth, ROS Markers, Antioxidant Enzymes, Osmotic Regulators and Metabolic Changes in Tartary Buckwheat Subjected to Short Drought. *Phyton*, 92(1).
- Wang, C. Q., Wang, Y., Wang, W. J., Wang, L., & Ye, W. C. (2014a). New oleanane saponins from *Schefflera kwangsiensis*. *Phytochemistry Letters*, 10, 268-271.
- Wang, H., Gao, J., Zhu, D., & Yu, B. (2007). Quality evaluation of *Polygala japonica* through simultaneous determination of six bioactive triterpenoid saponins by HPLC-ELSD. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 43(4), 1552-1556.
- Wang, Q., Zhao, R., Chen, Q., da Silva, J. A. T., Chen, L., & Yu, X. (2019). Physiological and biochemical responses of two herbaceous peony cultivars to drought stress. *HortScience*, 54(3), 492-498.
- Wang, R., Qin, X., Pan, H., Li, D., Xiao, X., Jin, Y., . . . & Liang, H. (2025). Assessing the effects of drought stress on photosynthetic performance and physiological resistance in camphor seedling leaves. *PloS one*, 20(1), e0313316.
- Wang, X., Sun, H., Lian, X., Feng, J., Zhao, J., Wang, Y., & Liu, Y. (2024). Physiological and biochemical characteristics of cucumber seedlings under different levels of drought stress (PEG 6000 concentrations). *Horticultural Science*, 51(3), 202-211.
- Wang, X., Wu, Z., Zhou, Q., Wang, X., & Song, S. (2022). Physiological response of soybean plants to water deficit. *Frontiers in Plant Science*, 12, 809692.
- Wang, Y., Liang, D., Khan, F. A., Zhang, C. L., Liu, Y. F., Chen, R. Y., . . . & Yu, D. Q. (2020). Chemical constituents from *Schefflera leucantha* R.Vig. (Araliaceae). *Biochemical systematics and ecology*, 91, 104076.
- Wang, Y., Liu, Y. F., Zhang, C. L., Liang, D., Luo, H., Hao, Z. Y., . . . & Yu, D. Q. (2016a). Four new triterpenoid saponins isolated from *Schefflera kwangsiensis* and their

- inhibitory activities against FBPase1. 15, 204-209.
- Wang, Y., Wang, L., Wang, W. J., Zhang, X. Q., Tian, H. Y., Zhang, Q. W., . . . & Ye, W. C. (2014b). New triterpenoid saponins from the aerial parts of *Schefflera kwangsiensis*. *Carbohydrate Research*, 385, 65-71.
- Wang, Y., Zhang, C.-L., Liu, Y.-F., Liang, D., Shi, G.-R., Wang, X., . . . & Yu, D.-Q. (2019). Sesquiterpenes and nor sesquiterpenes from *Schefflera leucantha* R.Vig. (Araliaceae). *Biochemical Systematics and Ecology*, 83, 7-9.
- Wang, Y., Zhang, C. L., Liu, Y. F., Liang, D., Luo, H., Hao, Z. Y., . . . & Yu, D. Q. (2014). Hepatoprotective triterpenoids and saponins of *Schefflera kwangsiensis*. *Planta medica*, 80, 215-222.
- Wang, Y., Zhang, C. L., Liu, Y. F., Liang, D., Luo, H., Hao, Z. Y., & Yu, D. Q. (2014c). Hepatoprotective triterpenoids and saponins of *Schefflera kwangsiensis*. *Planta medica*, 80, 215-222.
- Wang, Z., Li, G., Sun, H., Ma, L., Guo, Y., Zhao, Z., . . . & Mei, L. (2018). Effects of drought stress on photosynthesis and photosynthetic electron transport chain in young apple tree leaves. *Biology open*, 7(11), bio035279.
- Wang, Z., Li, G., Sun, H., Ma, L., Guo, Y., Zhao, Z., & Mei, L. (2018). Effects of drought stress on photosynthesis and photosynthetic electron transport chain in young apple tree leaves. *Biology open*, 7(11), bio035279.
- Wang, Z. X., Chen, L., Ai, J., Qin, H. Y., Liu, Y. X., Xu, P. L., . . . & Zhang, Q. T. (2012). Photosynthesis and activity of photosystem II in response to drought stress in Amur Grape (*Vitis amurensis* Rupr.). *Photosynthetica*, 50, 189-196.
- Westover, J. (2020). *Schefflera* Pests. Retrieved from <https://homeguides.sfgate.com/schefflera-pests-26994.html>
- Witthawaskul, P., Panthong, A., Kanjanapothi, D., Taesothikul, T., & Lertprasertsuke, N. (2003). Acute and subacute toxicities of the saponin mixture isolated from *Schefflera leucantha* Viguiet. *Journal of Ethnopharmacology*, 89(1), 115-121.
- Xiong, D., & Flexas, J. (2020). From one side to two sides: the effects of stomatal distribution on photosynthesis. *New Phytologist*, 228(6), 1754-1766.

- Yadollahi, A., Arzani, K., Ebadi, A., Wirthensohn, M., & Karimi, S. (2011). The response of different almond genotypes to moderate and severe water stress in order to screen for drought tolerance. *Scientia horticulturae*, 129(3), 403-413.
- Yang, G., Wang, Y., Yu, Y., Zheng, J., Chen, J., Li, S., . . . & Cao, Z. (2019). Schekwanglupaside C, a new lupane saponin from *Schefflera kwangsiensis*, is a potent activator of sarcoplasmic reticulum Ca^{2+} -ATPase. *Fitoterapia*, 137, 104150.
- Yang, H. Y., Zhang, C. H., Wu, W. L., & Lyu, L. F. (2019). Influence of drought stress on the leaf morphology and physiological characteristics in blackberry (*Rubus* L.) seedlings. In *XXX International Horticultural Congress IHC2018: III International Berry Fruit Symposium* 1265 27-34.
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7(3), 50.
- Yemm, E., & Willis, A. J. (1954). The estimation of carbohydrate in plant extracts by Anthrone. *Biochemical Journal*, 57, 508-514.
- Yi, X. P., Zhang, Y. L., Yao, H. S., Luo, H. H., Gou, L., Chow, W. S., & Zhang, W. F. (2016). Rapid recovery of photosynthetic rate following soil water deficit and re-watering in cotton plants (*Gossypium herbaceum* L.) is related to the stability of the photosystems. *Journal of plant physiology*, 194, 23-34.
- Yusuf, M. A., Kumar, D., Rajwanshi, R., Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M., & Sarin, N. B. (2010). Overexpression of γ -tocopherol methyl transferase gene in transgenic *Brassica juncea* plants alleviates abiotic stress: physiological and chlorophyll a fluorescence measurements. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1797(8), 1428-1438.
- Zahedi, S. M., Hosseini, M. S., Fahadi Hoveizeh, N., Kadkhodaei, S., & Vaculík, M. (2023). Physiological and Biochemical Responses of Commercial Strawberry Cultivars under Optimal and Drought Stress Conditions. *Plants*, 12(3), 496.
- Zahedi, S. M., Moharrami, F., Sarikhani, S., & Padervand, M. (2020). Selenium and silica nanostructure-based recovery of strawberry plants subjected to drought stress. *Scientific reports*, 10(1), 17672.

- Zhang, A., Liu, M., Gu, W., Chen, Z., Gu, Y., & Pei, L. (2021). Effect of drought on photosynthesis, total antioxidant capacity, bioactive component accumulation, and the transcriptome of *Atractylodes lancea*. *BMC Plant Biology*, 21(1), 293.
- Zhang, C., Shi, S., Liu, Z., & Yang, F. (2019). Drought tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties is associated with enhanced antioxidative protection and declined lipid peroxidation. *Journal of plant physiology*, 232, 226-240.
- Zhang, C., Yang, H., Wu, W., & Li, W. (2017). Effect of drought stress on physiological changes and leaf surface morphology in the blackberry. *Brazilian Journal of Botany*, 40, 625-634.
- Zhang, F., Zhu, K., Wang, Y. Q., Zhang, Z. P., Lu, F., Yu, H. Q., & Zou, J. Q. (2019). Changes in photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of sorghum under drought and waterlogging stress. *Photosynthetica*, 57(4), 1156-1164.
- Zhang, J., Zheng, H. G., Aarti, A., Pantuwan, G., Nguyen, T. T., Tripathy, J. N., & Nguyen, H. T. (2001). Locating genomic regions associated with components of drought resistance in rice: comparative mapping within and across species. *Theoretical and applied Genetics*, 103(1), 19-29.
- Zhang, L., Wang, Y., & Yu, D. Q. (2015). Simultaneous quantification of six major triterpenoid saponins in *Schefflera kwangsiensis* using high-performance liquid chromatography coupled to orbitrap mass spectrometry. *Natural Product Research*, 5, 285-292.
- Zhang, L., Xu, Q., Yong, X., Wu, M., Jiang, B., Jia, Y., . . . & Pan, Y. (2024). Effects of water deficit on two cultivars of *Hibiscus mutabilis*: A comprehensive study on morphological, physiological, and metabolic responses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 217, 109269.
- Zhang, Z., Wu, J., Xi, Y., Zhang, L., Gao, Q., & Wang-Pruski, G. (2021). Effects of autotoxicity on seed germination, gas exchange attributes and chlorophyll fluorescence in melon seedlings. *Journal of plant growth regulation*, 41, 993-1003.
- กรมพัฒนาที่ดิน. (2558). แนวทางจัดการพื้นที่ประสบภัยแล้ง, นิยามภัยแล้ง, กลุ่มป้องกันภัย

ธรรมชาติ และความเสี่ยงทางการเกษตร กองนโยบายและแผนการใช้ที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ สืบค้นจาก

http://irw101.1dd.go.th/lib/topic4_old.php?page=12

กรมอุตุนิยมวิทยา. (2565). การคาดการณ์ลักษณะอากาศช่วงฤดูฝนของประเทศไทย พ.ศ. 2565.

สืบค้นจาก <http://climate.tmd.go.th/content/file/2316>

เกษตรก้าวหน้า. (2563). การขาดน้ำกับการเติบโตของพืชที่ควรรู้. สืบค้นจาก www.แทนไทกรีนพาวเวอร์.com/article/12/การขาดน้ำกับการเติบโตของพืช-ที่ควรรู้

คงเอก ศิริงาม. (2564, พฤษภาคม-มิถุนายน). ผลของสภาวะขาดน้ำต่อการร่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ ปริมาณรงควัตถุ ปริมาณโปรตีน และการเจริญเติบโตของข้าว Effect of Drought Stress on Electrolyte Leakage, Photosynthetic Pigment Concentrations, Proline Content and Growth of Rice (*Oryza sativa* L.). วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (วท.), 29(3).

เฉลิมพล แซมเพชร. (2535). สรีรวิทยาการผลิตพืชไร่ (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

ชวนพิศ แดงสวัสดิ์. (2544). สรีรวิทยาของพืช (*Plant physiology*) (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: พัฒนาศึกษา.

ฐานข้อมูลสมุนไพรไทย. (2553). หนุमानประสานกาย. สืบค้นจาก

https://pharmacy.mahidol.ac.th/medplantdatabase/dtl_herbal.asp?hidKeylink=063Sch0Leu00

เทียนชัย ศิริเสน. (2552). ยก "หนุमानประสานกาย" แจว! นำร่องสินค้าสมุนไพรไทยสู่หัววัด. สืบค้นจาก <https://mgronline.com/smes/detail/9520000083712>

นางลักษณ์ พยัคฆ์ศิรินาวัน, อุบล ชินวัง, และสุวัฒน์ ธีระพงษ์ธนากร. (2557). การประยุกต์ใช้เทคนิคคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์กับพืชสวน. วารสารการเกษตรราชภัฏ, 13(2), 37-46.

นพมาศ สุนทรเจริญนนท์. (2554, มกราคม). ชะเอมเทศ. บทความวิชาการ สมุนไพรในตำรับยาหอม. จุลสารข้อมูลสมุนไพรคณะเภสัชศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล, 28(2), 7-12.

นมัสการ เสงี่ยมศรี, และอุณรรุจ บุญประกอบ. (2563). การใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาเพื่อเป็นดัชนีการคัดเลือกพันธุ์ทนแล้งในฝรั่ง Use of Morphological and Physiological Characters as Selection Index for Drought Tolerance in Guava. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 9(1).

นวรรตน์ อุดมประเสริฐ. (2558). สรีรวิทยาของพืชภายใต้สภาวะเครียด *Plant stress physiology*.

กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิศาชล แจ่มพรมมา, ประสิทธิ์ ใจคิด, พชริน ส่งศรี, ประสาร สวัสดิ์ชิตัง, ศักดา ดาดวง, และสมปอง ธรรมศิริรักษ์. (2555). การประเมินการรื้อไหลของสารอิเล็กทรอนิกส์, ศักดา ดาดวง, และสมปอง ธรรมศิริรักษ์. (2555). การประเมินการรื้อไหลของสารอิเล็กทรอนิกส์ และระดับมาลอนไดแอล ดีไฮด์ของใบอ้อย 10 สายพันธุ์ ภายใต้สภาวะขาดน้ำ. เกษตร, 40(2), 74-82.

บุปผา เหล่าสินชัย, และชลิดา อุดนุฒิ. (2543). เพลี้ยแป้งและเพลี้ยหอย ศัตรูพืชที่สำคัญ.

กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร กองกัญและสัตววิทยา.

เบญจมาศ จันทะภา ไพบุญยกิจกุล, เบญจพร อุทัยศรี, และชลี ไพบุญยกิจกุล. (2555, มกราคม-มิถุนายน). การพัฒนาเทคนิควัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) โดยการวัดพื้นที่ภาพถ่าย. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง, 21(1), 76-88.

ปิยะดา ธีระกุลพิศุทธิ์. (2559). สรีรวิทยาของพืชในสภาพเครียดเค็ม (พิมพ์ครั้งที่ 1). ขอนแก่น: ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ภาวนา อัศวะประภา. (2560). คู่มือการปลูกพืชสมุนไพร. สืบค้นจาก http://eto.ku.ac.th/neweto/e-book/plant/herb_gar/herb3.pdf

เภสัชวัตุ. (2564). หนุมานประสานกาย. สืบค้นจาก [https://thai-herbs.thdata.co/หนุมาน](https://thai-herbs.thdata.co/หนุมานประสานกาย/#)

มหาวิทยาลัยมหิดล คณะทันตแพทยศาสตร์. (2551). สมุนไพรไทยเพื่อสุขภาพช่องปาก. กรุงเทพฯ: คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

ยงยุทธ โสสถสภา. (2559). ความเครียดของพืชและการบรรเทาความเครียด. วารสารดินและปุ๋ย, 38(4), 47-78.

เยาวพา จิระเกียรติกุล. (2546). การขยายพันธุ์พืชสมุนไพรบางชนิดด้วยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ชะเอมไทย (*Albizia myriophylla*) และหนุมานประสานกาย (*Schefflera leucantha*).

กรุงเทพฯ: ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ราชันย์ ภูมา, และสมราน สุดดี. (2557). ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย เต็ม สมิตินันท์ ฉบับแก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2557. กรุงเทพฯ: สำนักงานหอพรรณไม้ สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.

ลิลลี่ กาวีตะ, มาลี ณ นคร, ศรีสม สุวรรณวงศ์, สุริยา ตันติวิวัฒน์, และณรงค์ วงศ์กันทรกร. (2560). สรีรวิทยาของพืช (*Plant physiology*) (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- วันดี กุญชรพันธ์. (2536). พฤษเคมีเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเภสัชวินิจฉัย คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- วิทย์ เทียงบุญธรรม. (2542). พจนานุกรมสมุนไพรไทย (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: รวมสาส์น.
- วิไลภรณ์ บุญญกิจจินดา. (2556). สรีรวิทยาของพืช (*Plant physiology*). นครปฐม: โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์.
- ศราวดี ทับช่วยขวา, วณิษา ปันฟ้า, จักรกฤษณ์ คณารีย์, กันยานุช เทาประเสริฐ, และยิ่งยง เทาประเสริฐ. (2564, กันยายน-ธันวาคม). ประมวลรายชื่อพืชสมุนไพรไทยที่สามารถขยายพันธุ์ด้วยวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (THE COMPILATION OF THAI MEDICINAL PLANTS USING TISSUE CULTURE METHOD PROPAGATION). วารสารครุศาสตร์ปริทรรศน์, 8(3), 324-336.
- ศุภครุษา อภิตติกร, ศิริรัฐสพล หนูพรหม, และนิราณี ปือราเฮง. (2564). การใช้คอลโรฟิลล์มิเตอร์ประเมินระดับคอลโรฟิลล์และไนโตรเจนในใบมะพร้าวน้ำหอม. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 29(3), 498-507.
- ศูนย์วิจัยพืชไร่นครสวรรค์. (2563). เพ็ญอ่อนข้าวโพด. สืบค้นจาก <https://www.doa.go.th/fc/nakhonsawan/?p=2454>
- สาธิต สือประเสริฐสุข, และชนาวีชร อรุณรัตน์. (2558). การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำและภัยแล้ง (water resources management and drought). สืบค้นจาก https://dwr.go.th/uploads/file/article/2015/article_th-16082015-104440-394136.pdf
- สารรังสิตออนไลน์. (2563). เปิดสรรพคุณสมุนไพรไทยรักษาไวรัส Covid-19 สู่การพัฒนาสมุนไพรเพื่อส่งออก. สืบค้นจาก <https://www2.rsu.ac.th/sarnrangsit-online-detail/ORM19032020>
- สำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร. (2555). หนุमानประสานกาย. สืบค้นจาก <http://www.agriman.doae.go.th/home/kpi006/0229hanuman.pdf>
- สุกัญญา สุวรรณระ. (2543). อัตราการสังเคราะห์แสงของใบ คอลโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์และการเจริญเติบโตของหญ้าขน [*Brachiaria mutica* (Forsk.) Stapf]. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (Master's thesis)). มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา. สืบค้นจาก <https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2016/17300/1/117756.pdf>
- สุเทพ สหายา. (2555). คู่มือสำรวจศัตรูพืชและศัตรูธรรมชาติในแหล่งปลูกมันสำปะหลัง (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช กรมวิชาการเกษตร.

- สุนทรียังษ์ชาวลัย. (2535). ชลศาสตร์ในระบบดิน-พืช : กลไกการเปิดปิดของปากใบ. สืบค้นจาก <https://www.cab.kps.ku.ac.th/plantbiophysics/pdf/Transport/10Transport.pdf>
- สุภาพร ภัตสร. (2561). รูปแบบการแสดงออกของยีน Heat Shock Protein ในข้าวท่าพะเยาระยะต้นกล้าภายใต้สภาวะแล้ง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 26(7), 1211.
- แสนสุข รัตนผล, วิชัย ตู่แก้ว, เสาวรส ธรรมเพียร, ณัฐธิยา หาญณรงค์, เสาวนีย์ แก้วพระเวช, และสุรเชษฐ์ ชมเงิน. (2556). องค์ความรู้เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสู่การเป็น *smart officer*: การขยายพันธุ์พืช. กรุงเทพฯ: กรมส่งเสริมการเกษตร.
- อนุสิทธิ์ ชีช่วง, และจรัส ลีตติวงศ์. (2562). การศึกษาเบื้องต้นทางเนื้อเยื่อชั้นผิวใบของพืชวงศ์มะดูกบางชนิดในประเทศไทย. วารสารพฤกษศาสตร์แห่งประเทศไทย, 11(2), 113-127.
- อ้อมบุญ วาลิสุต, และปองทิพย์ สิทธิสาร. (2556). หลักการวิเคราะห์พฤกษเคมีในสมุนไพรด้วยเทคนิคทีแอลซีและทีแอลซีสมรรถนะสูง = *Phytochemical analysis principles of medicinal plants by TLC and HPTLC*. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเภสัชวินิจฉัย คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- อัฉรี สิงห์โต. (2562). ภัยแล้งทางการเกษตรของไทย. สืบค้นจาก https://webapp.idd.go.th/lpd/node_modules/Article_Lpd/Article_Lpd1_1/บทความแล้งพื้นที่เกษตร.pdf



1. สารเคมีสำหรับสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland

สารเคมี (Stock solution)	ปริมาณที่ใช้ : มิลลิลิตร/900 มิลลิลิตร
1 M KH_2PO_4	1
1 M KNO_3	5
1 M $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	5
1 M $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2
ธาตุอาหารรองและจุลธาตุ	มิลลิลิตร/ลิตร
H_3BO_3	2.86
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.81
ZnCl_2	0.11
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.05
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.025
ปริมาณที่ใช้ : 1 มิลลิลิตร/900 มิลลิลิตร	
Fe-EDTA	กรัม/550 มิลลิลิตร
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	13.5
$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	22.4
ปริมาณที่ใช้ : 1 มิลลิลิตร/900 มิลลิลิตร	

2. การเตรียมสารละลาย Fe-EDTA

ทำการละลาย EDTA disodium salt ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)หนัก 22.4 กรัม ในน้ำกลั่น ปริมาตร 186 มิลลิลิตร และละลาย ferric chloride ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)หนัก 13.5 กรัม ในน้ำกลั่น ปริมาตร 364 มิลลิลิตร จากนั้นค่อย ๆ เทสารละลาย ferric chloride ลงในสารละลาย EDTA disodium salt โดยใช้ magnetic stirrer อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ทำการคนจนกระทั่งละลาย เป็นเนื้อเดียวกัน

3. การเตรียมสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland

เตรียมสารละลายธาตุอาหารจาก stock solution ต่าง ๆ ตามปริมาณที่ระบุในข้อที่ 1 จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 900 มิลลิลิตร ปรับ pH ให้มีค่าอยู่ในช่วง 5.8–6.5 ด้วยสารละลาย sodium hydroxide หรือ hydrochloric acid

4. การเตรียมสารละลาย PEG6000

เตรียมสารละลาย PEG6000 ในการจำลองสภาวะแล้งให้ได้ความเข้มข้น 5 ระดับ ได้แก่ 10, 20, 30, 40 และ 50%(w/v) โดยการชั่งสาร PEG6000 10 กรัม ต่อปริมาตรสารละลายธาตุอาหาร 100 มิลลิลิตร (เตรียมสารละลาย 10%(w/v) PEG6000) สำหรับการเตรียมสารละลาย PEG6000 ที่ความเข้มข้น 20, 30, 40 และ 50%(w/v) โดยชั่ง PEG6000 20, 30, 40 และ 50 กรัม ต่อปริมาตรสารละลายธาตุอาหาร 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ

5. การเตรียม 3%(w/v) sulfosalicylic acid

ชั่งสาร sulfosalicylic acid 3 กรัม ละลายในน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

6. การเตรียม acid ninhydrin

ชั่ง ninhydrin 1.25 กรัม ผสมกับ glacial acetic acid ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และ 6 M phosphoric acid ปริมาตร 60 มิลลิลิตร นำสารผสมที่ผสมแล้วไปอุ่นบน hot plate ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และคนให้ละลาย (acid ninhydrin จะต้องทำการเตรียมก่อนทุกครั้งที่ทำ การวิเคราะห์ และเก็บไว้ที่ 4 องศาเซลเซียสได้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง)

7. การทำกราฟมาตรฐานโพรีน

เตรียมสารละลายโพรีน ความเข้มข้น 0, 1.875, 3.75, 7.5, 15, 30 และ 60 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร จากสารละลายโพรีนมาตรฐานความเข้มข้น 6,000 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายโพรีน (ภาพประกอบ 59)

8. การเตรียม anthrone reagent

กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 70 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร และเติม anthrone 0.05 กรัม คนให้ละลาย และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

9. การทำกราฟมาตรฐานน้ำตาลที่ละลายน้ำ

เตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคส ความเข้มข้น 0, 31.25, 62.5, 125, 250, 500 และ 1,000 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร จากสารละลายน้ำตาลกลูโคสมาตรฐานความเข้มข้น 5,000 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายกลูโคส (ภาพประกอบ 58)

10. การเตรียมสารละลายกรดไตรคลอโรอะซีติก (trichloroacetic acid; TCA) ความเข้มข้น 0.1%(w/v)

ชั่งสาร trichloroacetic acid (TCA) 0.05 กรัม ใส่ลงในปิเกตอร์ เติมน้ำกลั่น ละลายให้เข้ากัน และปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร

11. การเตรียมสารละลายกรดไทโอบาร์บิทูริก (thiobarbituric acid; TBA) ความเข้มข้น 0.5%(w/v) ใน TCA ความเข้มข้น 20%(w/v)

ชั่งสาร trichloroacetic acid (TCA) 10 กรัม ใส่ลงในปิ๊กเกอร์ เติมน้ำกลั่น ละลายให้เข้ากัน และปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร จากนั้นชั่งสาร thiobarbituric acid (TBA) 0.1 กรัม ใส่ลงในปิ๊กเกอร์ ละลายในสารละลาย trichloroacetic acid (TCA) ความเข้มข้น 20%(w/v) ผสมให้เข้ากัน และปรับปริมาตรเป็น 20 มิลลิลิตร

12. การเตรียมสารละลาย 10 mM potassium phosphate buffer (pH 7.0)

ชั่งสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 0.286 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วเติมไดโพแทสเซียมฟอสเฟต (K_2HPO_4) 0.505 กรัม ผสมเข้าด้วยกัน แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 500 มิลลิลิตร และนำไปวัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter ปรับ pH ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ให้มีค่า pH 7.0

13. การเตรียม 1 M potassium iodide (KI)

ชั่งสารโพแทสเซียมไอโอไดด์ 16.6 กรัม ใส่ลงในปิ๊กเกอร์ เติมน้ำกลั่น คนให้ละลาย ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร

14. การทำกราฟมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 0, 50, 100, 200, 400, 800 และ 1,000 ไมโครโมล/ลิตร จากสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10,000 ไมโครโมล/ลิตร แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ภาพประกอบ 60)

15. การเตรียม extraction buffer หรือสารละลาย I (solution I)

ชั่งสาร polyvinylpyrrolidone 4 กรัม ใส่ลงในปิ๊กเกอร์ เติมสารละลาย 10 mM potassium phosphate buffer (pH 7) เป็นตัวทำละลาย ละลายให้เข้ากัน และปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร

16. การเตรียม 0.1 mM ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA)

ชั่งสาร EDTA 186.12 กรัม ใส่ลงในปิ๊กเกอร์ เติมน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร กวนด้วย magnetic stirrer (EDTA ไม่สามารถละลายน้ำได้) ปรับ pH ให้ได้ 8 (ซึ่งเป็น pH ที่ EDTA จะละลายหมดพอดี) จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปนึ่งฆ่าเชื้อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

17. การเตรียม 13 mM methionine

ชั่งสาร methionine มา 1.492 กรัม ใส่ลงในปิกเกอร์ เติมน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

18. การเตรียม nitroblue tetrazolium (NBT) ความเข้มข้น 75 ไมโครโมลาร์

ชั่งสาร NBT มา 0.37 กรัม ใส่ลงในปิกเกอร์ เติมน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรให้ได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

19. การเตรียม riboflavin ความเข้มข้น 2 ไมโครโมลาร์

ชั่งสาร riboflavin มา 0.188 กรัม ใส่ลงในปิกเกอร์ เติมน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร โดยสารละลาย riboflavin ที่เตรียมจะต้องเก็บไว้ในขวดสีชาเพื่อป้องกันแสง

20. การเตรียม สารผสมสำหรับปฏิกิริยา (reaction mixture)

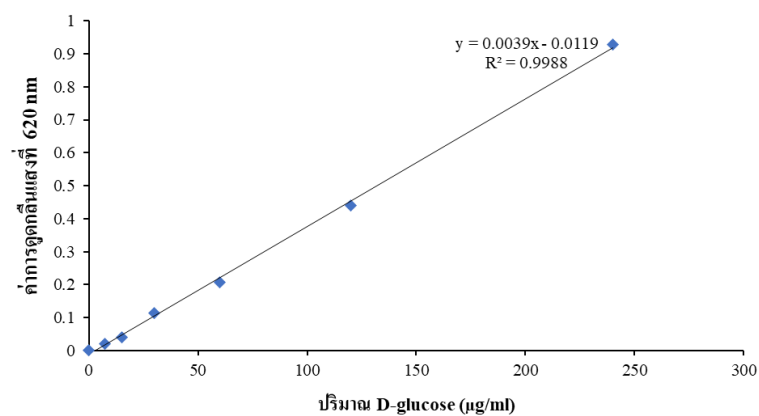
เตรียม reaction mixture โดยการปิเปตสารละลายจากแต่ละขวด stock solution ใส่ลงในปิกเกอร์ ซึ่งประกอบด้วย 0.1 mM ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) ปริมาตร 0.02 มิลลิลิตร, 13 mM methionine ปริมาตร 13 มิลลิลิตร, 75 μ M nitroblue tetrazolium (NBT) ปริมาตร 0.75 มิลลิลิตร, 2 μ M riboflavin ปริมาตร 0.02 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรของสารละลายให้ได้ 100 มิลลิลิตร ด้วย 10 mM potassium phosphate buffer (pH 7)

21. การเตรียม 50 mM potassium phosphate buffer (pH 7)

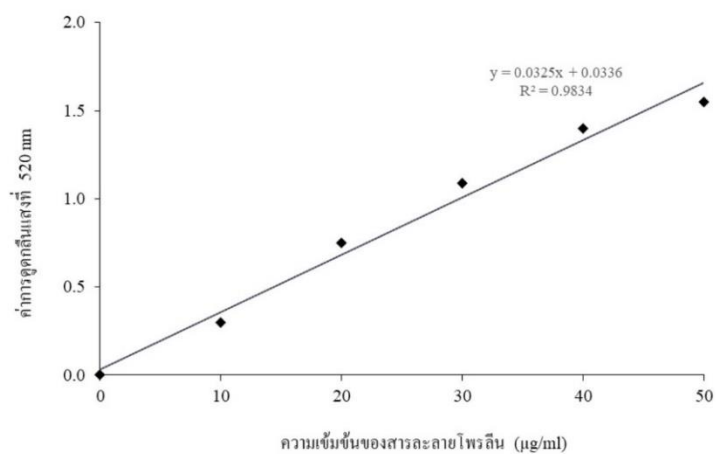
ชั่งสาร KH_2PO_4 2.858 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วเติมสารละลาย K_2HPO_4 5.051 กรัม ผสมเข้าด้วยกัน ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร และนำไปวัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter ปรับ pH ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ให้มีค่า pH 7.0

22. การทำกราฟมาตรฐานโปรตีนโบวันซีรั่มอัลบูมิน

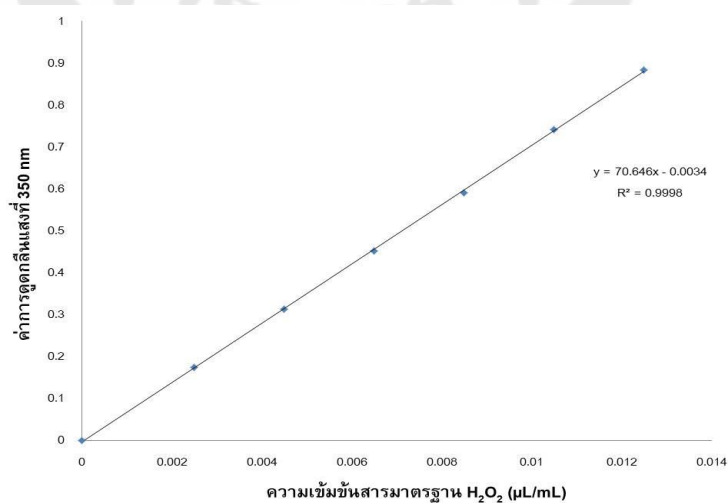
เตรียมละลายโบวันซีรั่มอัลบูมิน (Bovine Serum Albumin, BSA) ความเข้มข้น 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 และ 400 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จากสารละลายมาตรฐานโบวันซีรั่มอัลบูมินความเข้มข้น 1,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานโปรตีนโบวันซีรั่มอัลบูมิน



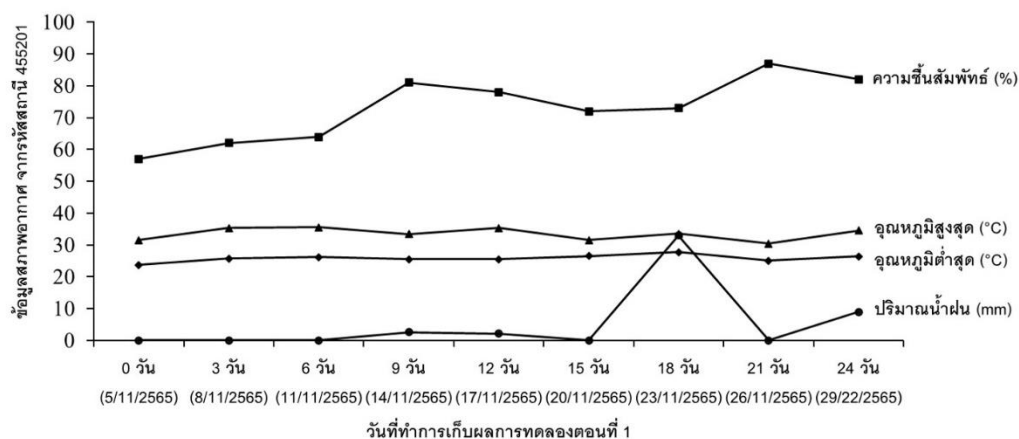
ภาพประกอบ 58 กราฟมาตรฐานของสารละลายกลูโคส



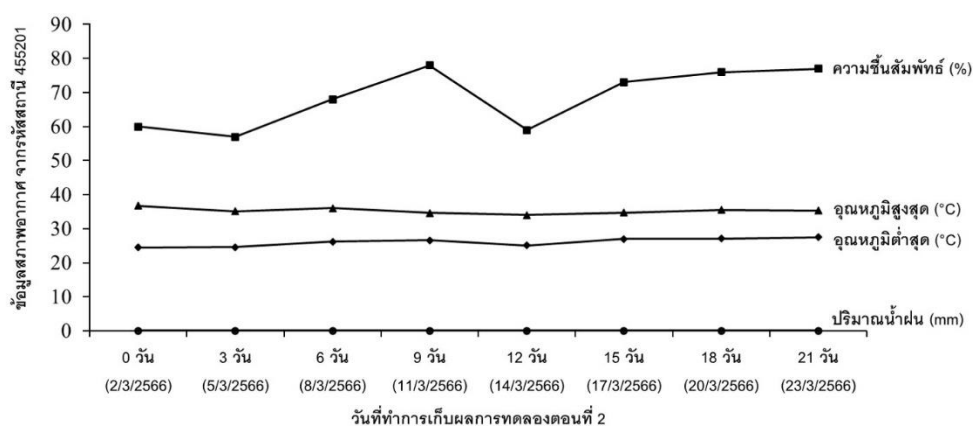
ภาพประกอบ 59 กราฟมาตรฐานของสารละลายโปรตีน



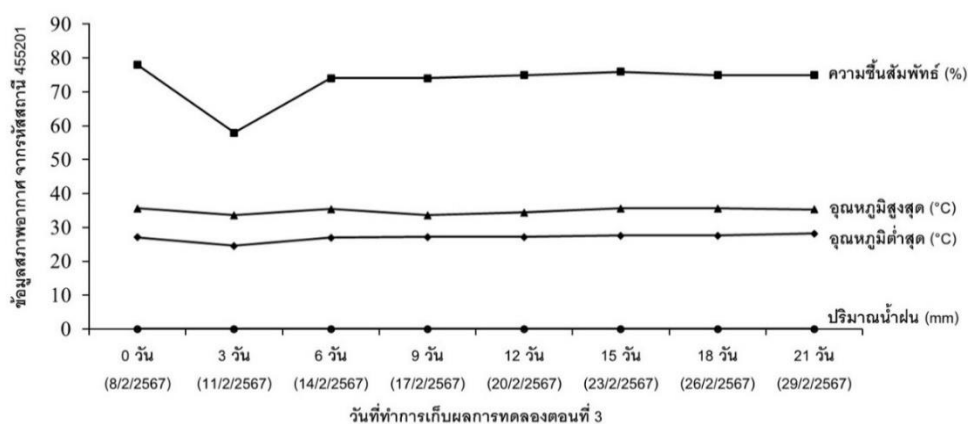
ภาพประกอบ 60 กราฟมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)



ภาพประกอบ 61 สภาพอากาศในระหว่างการเก็บผลการทดลองตอนที่ 1 ข้อมูลที่ได้มาจากกรม
อุตุนิยมวิทยา รหัสสถานี 455201



ภาพประกอบ 62 สภาพอากาศในระหว่างการเก็บผลการทดลองตอนที่ 2 ข้อมูลที่ได้มาจากกรม
อุตุนิยมวิทยา รหัสสถานี 455201



ภาพประกอบ 63 สภาพอากาศในระหว่างการเก็บผลการทดลองตอนที่ 3 ข้อมูลที่ได้มาจาก
กรมอุตุนิยมวิทยา รหัสสถานี 455201

ประวัติผู้เขียน

