



ผลของซิลิคอนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สารพฤกษเคมีและสารต้านอนุมูลอิสระของ
Dicliptera tinctoria (Nees) Kostel. ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้ง
EFFECTS OF SILICON ON PHYSIOLOGICAL CHANGES, PHYTOCHEMICALS AND
ANTIOXIDANTS OF *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel. UNDER DROUGHT STRESS

ฉัฐิพร พรหมสุวรรณ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2565

ผลของซิลิโคนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สารพฤษเคมีและสารต้านอนุมูลอิสระของ
Dicliptera tinctoria (Nees) Kostel. ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้ง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

EFFECTS OF SILICON ON PHYSIOLOGICAL CHANGES, PHYTOCHEMICALS AND
ANTIOXIDANTS OF *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel. UNDER DROUGHT STRESS



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

Faculty of Science, Srinakharinwirot University

2022

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญาานิพนธ์

เรื่อง

ผลของซิลิโคนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สารพิษเคมีและสารต้านอนุมูลอิสระของ *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel. ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้ง

ของ

สิริวัชร พรหมสุวรรณ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชามาภรณ์ แสงงาม)

ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาสนี พงษ์ประยูร)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิวาพร ลงยันต์)

ชื่อเรื่อง	ผลของซิลิคอนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สารพฤษเคมีและสารต้านอนุมูลอิสระของ <i>Dicliptera tinctoria</i> (Nees) Kostel. ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้ง
ผู้วิจัย	ฐิติพร พรหมสุวรรณ
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชумаภรณ์ แสงงาม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของซิลิคอนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สารพฤษเคมีและสารต้านอนุมูลอิสระของ *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง การทดลองที่ 1 ศึกษาระดับ field capacity (FC) ของดินที่เหมาะสมต่อการจำลองสภาวะแล้งในพืช พบว่า พืช *D. tinctoria* สามารถทนต่อความแล้งได้สูงสุดที่ระดับ 25% FC เป็นระยะ 12 วัน การทดลองที่ 2.1 ศึกษาผลของซิลิคอนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการของพืช *D. tinctoria* ภายใต้ความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC เป็นระยะเวลา 18 วัน พบว่าซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM สามารถเพิ่มค่า Fv/Fm ค่า Pi ปริมาณน้ำสัมพันธ์ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี และปริมาณแคโรทีนอยด์ การทดลองที่ 2.2 การศึกษาผลของซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการ สารพฤษเคมี และสารต้านอนุมูลอิสระของพืช ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง พบว่า การพ่นซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM ช่วยเพิ่มปริมาณน้ำสัมพันธ์ ค่า Fv/Fm ค่า Pi ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ปริมาณแคโรทีนอยด์ ค่า stomatal conductance ปริมาณแอนโทไซยานิน ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ขณะที่ลดการสะสมโปรตีน ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มาลอนไดอัลดีไฮด์ การรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ และกิจกรรมของเอนไซม์อะซีเตส จากผลการสรุปได้ว่า พืช *D. tinctoria* ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และทำการพ่นซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM ช่วยเพิ่มกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช

คำสำคัญ : *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel ซิลิคอน ความแล้ง แอนโทไซยานิน

Title	EFFECTS OF SILICON ON PHYSIOLOGICAL CHANGES, PHYTOCHEMICALS AND ANTIOXIDANTS OF <i>Dicliptera tinctoria</i> (Nees) Kostel. UNDER DROUGHT STRESS
Author	THITIPORN POMSUWAN
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2022
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Sukhumaporn Saeng-ngam

The objective of this research was to examine the effects of silicon on physiological changes, phytochemicals and antioxidants of *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel under drought stress. The experiment was divided into two parts. Firstly, the level of drought tolerance was tested by field capacity (FC). After 12 days, the results showed that *D. tinctoria* could tolerate at 25% FC. Experiment 2.1 was the concentration of silicon in *D. tinctoria* at 25% FC. After 18 days, the results demonstrated that 1.5 millimolar of silicon increased Fv/Fm, Pi, relative water content, chlorophyll a, b and carotenoids in *D. tinctoria*. Experiment 2.2 was on the effects of silicon on some physiological changes, phytochemicals, and antioxidants capacity under drought stress. The results found that drought stressed plants were sprayed with 1.5 millimolar silicon increased relative water content, chlorophyll a, b, carotenoids, stomatal conductance, anthocyanin content, antioxidant activity, Fv/Fm and Pi. However, proline and total soluble sugar content, hydrogen peroxide, malondialdehyde, electrolyte leakage and catalase (CAT) activity were decreased in drought stressed plant. In summary, spraying with 1.5 millimolar silicon under drought stress at 25% FC increased the efficiency of photosynthesis in *D. tinctoria*.

Keyword : *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel Silicon Drought stress Anthocyanin

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุขุมารภรณ์ แสงงาม อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญา
นิพนธ์ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา ให้การสนับสนุน ให้โอกาสและให้กำลังใจ สำหรับการเรียน การทำวิจัย
และแนวทางการแก้ปัญหาปริญญาานิพนธ์มาโดยตลอด และช่วยตรวจปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ให้มี
ความสมบูรณ์และถูกต้องยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)
ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปี
งบประมาณ พ.ศ. 2565 สัญญาเลขที่ 036/2565 ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือ
วิทยาศาสตร์ในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ นางสาวสิริลักษณ์ นิ่มนวล นายพรพล เปียรักษา
นายพร มณีโชติ นางสาวเกศินี ฤทธิงาม และนายธนบูรณ์ พลากุลมณฑล สมาชิกห้องปฏิบัติการ
สรีรวิทยาพืชที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้กำลังใจมาโดยตลอด สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ
คุณแม่ที่เลี้ยงดูให้ความรักความอบอุ่น คำปรึกษาในการแก้ปัญหาทั้งเรื่องเรียนและการดำเนินชีวิต
ให้โอกาสทางการศึกษาที่ดี สนับสนุน ให้กำลังใจและผลักดันในการทำปริญญาานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วง
ไปได้ด้วยดี

ฐิติพร พรหมสุวรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูปภาพ.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง 1	
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	3
สมมติฐานในงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	5
ปัญหาภัยแล้ง.....	5
ความสัมพันธ์ของ ดิน น้ำ และพืช.....	7
ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพืช <i>Dicliptera tinctoria</i> (Nees) Kostel.....	12
สารพฤกษเคมีที่สำคัญในต้นพืช <i>Dicliptera tinctoria</i> (Nees) Kostel.....	13
กลุ่มสารประกอบกรดฟีนอลิก (phenolic acids).....	13
กลุ่มสารประกอบแทนนิน (tannins).....	14
กลุ่มสารประกอบฟลาโวนอยด์ (flavonoids).....	15
แอนโทไซยานิน (anthocyanin).....	17
การตรวจสอบความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณ มาลอนไดอัลดีไฮด์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	19

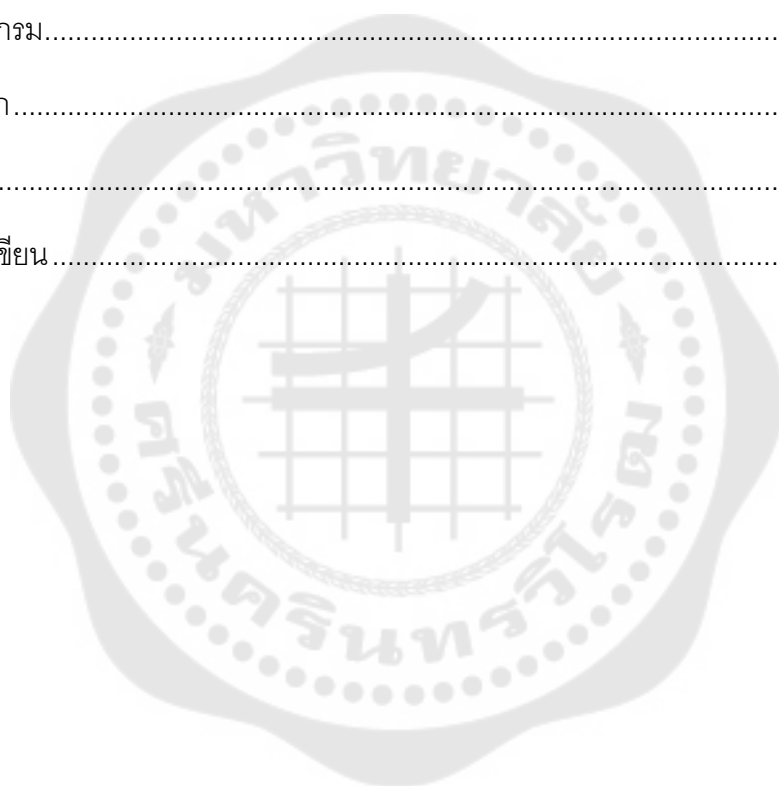
2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl radical scavenging capacity assay (DPPH assay)	19
แอนโทไซยานิน (anthocyanin)	19
มาลอนไดอัลดีไฮด์ (malondialdehyde; MDA)	19
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide; H ₂ O ₂)	20
กลไกการตอบสนองของพืชต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและสัณฐานวิทยาภายใต้ความเครียดจากความแล้ง	20
ความเครียดจากความแล้ง	20
กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงภายใต้ความเครียดจากความแล้ง	21
อนุมูลอิสระและการป้องกันอันตรายที่เกิดจากอนุมูลอิสระภายใต้ความเครียดจากความแล้ง	25
การปรับสมดุลออสโมซิสของพืชเมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง	29
การตรวจสอบปริมาณโพสเฟอรัสและปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ในพืช	30
นินไฮดริน (ninhydrin)	30
แอนโทรน (anthrone)	30
บทบาทของซิลิคอนในการเจริญเติบโตของพืช <i>Dicliptera tinctoria</i> (Nees) Kostel	31
ซิลิคอนต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง	35
ซิลิคอนต่ออนุมูลอิสระและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ	35
ซิลิคอนต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเซลล์	36
การวิเคราะห์ปริมาณซิลิคอน	37
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	38
วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี	38
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	42
การทดลองที่ 1 การหาระดับของ field capacity ของดินเหมาะสมต่อการจำลองสภาวะแล้งในพืช <i>D. tinctoria</i>	42
1.1 การเตรียมต้นพืชสำหรับการทดลอง	42

1.2 วิธีการหาค่าความจุภาคสนามของดิน (field capacity; FC)	42
1.2.1 วิธีการกำหนดค่า field capacity จำนวน 5 ระดับ	43
การทดลองที่ 2 เพื่อศึกษาผลของซิลิโคนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืช <i>D.tinctoria</i> ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง	44
2.1 การศึกษาผลของซิลิโคนที่ความเข้มข้นแตกต่างกันภายใต้ความเครียดจากความแล้ง	44
2.2 การศึกษาผลของซิลิโคนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สารพฤกษเคมี และ สารต้านอนุมูลอิสระของพืช <i>D.tinctoria</i> ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง	44
2.2.1 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบพืช (relative water content; RWC).....	45
2.2.2 การวัดประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photochemical efficiency of PSII reaction).....	45
2.2.3 ปริมาณรงควัตถุในใบพืช (pigment content).....	45
2.2.4 ปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ (total soluble sugar)	46
2.2.5 ปริมาณโพรลีน (proline content).....	46
2.2.6 วิเคราะห์ลักษณะทางกายวิภาคบางประการของพืช <i>Dicliptera tinctoria</i> (Nees) Kostel	47
2.2.6.1 การศึกษากายวิภาคของใบทางด้านตัดขวาง.....	47
2.2.6.2 การศึกษาโครงสร้างของคลอโรพลาสต์.....	47
2.2.7 การวัดความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (free radical scavenging activity).....	48
2.2.8 ปริมาณแอนโทไซยานิน (anthocyanin content)	48
2.2.9 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide content; H ₂ O ₂)	49
2.2.10 ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ (malondialdehyde content; MDA)	49
2.2.11 การรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte leakage; EL)	50

2.2.12 ค่าการเปิดปิดปากใบพืช (stomatal conductance).....	50
2.2.13 กิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant activities)	50
2.2.13.1 กิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระคะตะเลส (catalase; CAT)	50
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	52
การทดลองที่ 1 การหาระดับ field capacity ของดินที่เหมาะสมต่อการจำลองสภาวะแล้งในพืช <i>D. tinctoria</i>	52
ประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (maximum quantum efficiency of PSII photochemistry; Fv/Fm)	54
ค่า Performance index (Pi)	57
ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ	60
ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี	64
ปริมาณแคโรทีนอยด์.....	68
ปริมาณน้ำสัมพัทธ์.....	72
การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของซิลิคอนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืช <i>D. tinctoria</i> ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้ง	78
2.1 การศึกษาผลของซิลิคอนที่ความเข้มข้นแตกต่างกันต่อการตอบสนองทาง สรีรวิทยาบางประการของพืช <i>D. tinctoria</i> ภายใต้สภาวะเครียดจากความ แล้ง.....	78
ประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (maximum quantum efficiency of PSII photochemistry; Fv/Fm)	80
Performance index (Pi)	85
ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ	90
ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี	94
ปริมาณแคโรทีนอยด์.....	98

ปริมาณน้ำสัมพัทธ์.....	103
การหาระดับความเข้มข้นของซัลโคคอนที่สะสมในพืช <i>Dicliptera tinctoria</i> (Nees) Klostel เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง.....	107
2.2 การศึกษาผลของซัลโคคอนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สารพฤกษเคมี และ สารต้านอนุมูลอิสระของพืช ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้ง	110
ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบพืช	113
ประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (maximum quantum efficiency of PSII photochemistry; Fv/Fm)	116
Performance index (Pi)	120
ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ	124
ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี	128
ปริมาณแคโรทีนอยด์.....	131
ปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้.....	134
ปริมาณโพสลิน	138
ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ.....	141
ปริมาณแอนโทไซยานิน.....	145
ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	149
ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์	153
ค่า stomatal conductance	157
การรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์.....	161
กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์อะซีเตเลส	165
การหาปริมาณซัลโคคอนที่สะสมในต้นพืช <i>D. tinctoria</i> เมื่อได้รับสภาวะเครียดจาก ความแล้งและสภาวะปกติ.....	169
การศึกษากายวิภาคของใบภาคตัดขวางของต้นพืช <i>D. tinctoria</i>	171

ผลของซิลิโคนต่อโครงสร้างคลอโรพลาสต์ในใบของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> เมื่อได้รับ สภาวะเครียดจากความแล้ง.....	174
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	176
อภิปรายผลการวิจัย.....	176
สรุปผลการวิจัย.....	196
ข้อเสนอแนะ.....	196
บรรณานุกรม.....	197
ภาคผนวก.....	219
.....	220
ประวัติผู้เขียน.....	226



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของดินและชนิดของเนื้อดินที่แตกต่างกัน.....	11
ตาราง 2 การศึกษาผลชิลิคอนลดความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพและการตอบสนองทาง สัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาในพืช	33
ตาราง 3 การศึกษาการใช้ชิลิคอนทางใบที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันในพืชแต่ละชนิด	34
ตาราง 4 ค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความ แล้งที่ระดับต่าง ๆ	56
ตาราง 5 ค่า Pi ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับต่าง ๆ	59
ตาราง 6 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ ระดับต่าง ๆ	63
ตาราง 7 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ ระดับต่าง ๆ	67
ตาราง 8 ปริมาณแคโรทีนอยด์ ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ ระดับต่าง ๆ	71
ตาราง 9 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ ต่าง ๆ	76
ตาราง 10 ค่า Fv/Fm ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ ระดับ 25% FC และพ่นด้วยชิลิคอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	84
ตาราง 11 ค่า Pi ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วันที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยชิลิคอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	89
ตาราง 12 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจาก ความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยชิลิคอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	93
ตาราง 13 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจาก ความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยชิลิคอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	97

ตาราง 14 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	102
ตาราง 15 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	106
ตาราง 16 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนความเข้มข้น 1.5 mM	115
ตาราง 17 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	115
ตาราง 18 ค่า Fv/Fm ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	119
ตาราง 19 Fv/Fm ของต้นพืชของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	119
ตาราง 20 ค่า Pi ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	123
ตาราง 21 ค่า Pi ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	123
ตาราง 22 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	127
ตาราง 23 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	127
ตาราง 24 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	130

ตาราง 25 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM 130

ตาราง 26 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM 133

ตาราง 27 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM 133

ตาราง 28 ปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนความเข้มข้น 1.5mM..... 137

ตาราง 29 ปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM 137

ตาราง 30 ปริมาณโปรตีนของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM..... 140

ตาราง 31 ปริมาณโปรตีนของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM 140

ตาราง 32 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM..... 144

ตาราง 33 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM 144

ตาราง 34 ปริมาณแอนโทไซยานินของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติและต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM..... 148

ตาราง 35 ปริมาณแอนโทไซยานินของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	148
ตาราง 36 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM.....	152
ตาราง 37 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	152
ตาราง 38 ปริมาณมาลอนไดอิลดีไฮด์ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM.....	156
ตาราง 39 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	156
ตาราง 40 ค่า stomatal conductance ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	160
ตาราง 41 ค่า stomatal conductance ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	160
ตาราง 42 การรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	164
ตาราง 43 การรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM	164
ตาราง 44 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์อะซีเตเลสของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนความเข้มข้น 1.5 mM.....	168

ตาราง 45 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์อะไมเลสของต้นพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับ สภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับ สภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM.....	168
ตาราง 46 การผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโพรลิน222	222
ตาราง 47 การผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้.....223	223
ตาราง 48 การผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน.....223	223
ตาราง 49 การผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ224	224
ตาราง 50 การผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H ₂ O ₂)224	224
ตาราง 51 การผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์.....225	225
ตาราง 52 การผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์อะไมเลส225	225

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 สถานะของน้ำในดิน.....	10
ภาพประกอบ 2 ปริมาณน้ำในดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ความจุสนามของดินและจุดเหี่ยวถาวร.....	10
ภาพประกอบ 3 ต้นพืช <i>D. tinctoria</i>	12
ภาพประกอบ 4 โครงสร้างทั่วไปของสารประกอบฟีนอลิก	13
ภาพประกอบ 5 สารประกอบกรดไฮดรอกซีซินนามิก (hydroxycinnamic acid)	14
ภาพประกอบ 6 ตัวอย่างของสารประกอบกรดไฮดรอกซีเบนโซอิก (hydroxybenzoic acids).....	14
ภาพประกอบ 7 โครงสร้างไฮโดรไลซ์แทนนิน (hydrolysable tannins).....	15
ภาพประกอบ 8 โครงสร้างคอนเดนแทนนิน (condensed tannins)	15
ภาพประกอบ 9 โครงสร้างพื้นฐานของฟลาโวนอยด์ (flavonoids).....	17
ภาพประกอบ 10 โครงสร้างของแอนโทไซยานิดิน (anthocyanidin).....	18
ภาพประกอบ 11 โครงสร้างของแอนโทไซยานิน (anthocyanin)	18
ภาพประกอบ 12 ไดอะแกรมแสดงระดับพลังงานของคลอโรฟิลล์ และสเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์ ของคลอโรฟิลล์.....	24
ภาพประกอบ 13 ลำดับการตรวจสอบการปลดปล่อยรังสีฟลูออเรสเซนซ์ในพืช.....	24
ภาพประกอบ 14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน	28
ภาพประกอบ 15 กระบวนการสังเคราะห์และสลายโพรงในพืชชั้นสูง.....	30
ภาพประกอบ 16 กรอบวิจัยของการทดลอง	38
ภาพประกอบ 17 การเก็บตัวอย่างใบลำดับที่ 3-5	42
ภาพประกอบ 18 การหาระดับ field capacity (FC) ของดินที่เหมาะสมต่อการจำลองสภาวะแล้ง ให้กับต้นพืช <i>D. tinctoria</i> ในวันแรกของการทดลอง ประกอบด้วย 100% FC (A), 50% FC (B), 43.75% FC (C), 37.5% FC (D), 31.5% FC (E), 25% FC (F), 12.5% FC (G), 6.25% FC (H)	53

ภาพประกอบ 19 การหาระดับ field capacity (FC) ของดินที่เหมาะสมต่อการจำลองสถานะแล้งให้กับต้นพืช *D. tinctoria* วันที่ 12 ของการทดลอง ประกอบด้วย 100% FC (A), 50% FC (B), 43.75% FC (C), 37.5% FC (D), 31.5% FC (E), 25% FC (F), 12.5% FC (G), 6.25% FC (H)53

ภาพประกอบ 20 คลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (chlorophyll fluorescence) ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสถานะเครียดจากความแล้งที่ระดับต่างกัน ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย55

ภาพประกอบ 21 ค่า Performance index (Pi) ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสถานะเครียดจากความแล้งที่ระดับต่างกัน ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย.....58

ภาพประกอบ 22 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสถานะเครียดจากความแล้งที่ระดับต่างกัน ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย.....62

ภาพประกอบ 23 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสถานะเครียดจากความแล้งที่ระดับต่างกัน ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) และตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย66

ภาพประกอบ 24 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสถานะเครียดจากความแล้งที่ระดับต่างกัน ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย..... 70

ภาพประกอบ 25 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสถานะเครียดจากความแล้งที่ระดับต่างกัน ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษ

ตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย 75

ภาพประกอบ 26 ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และได้รับซิลิคอนความเข้มข้นที่แตกต่างกันไป ประกอบด้วย ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิคอน (A) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิคอนความเข้มข้น 0.5 mM (B) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิคอนความเข้มข้น 1 mM (C) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM (D) และต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิคอนความเข้มข้น 2 mM (E) ในวันที่ 0 ของการทดลอง..... 79

ภาพประกอบ 27 ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และได้รับซิลิคอนความเข้มข้นที่แตกต่างกันไป ประกอบด้วย ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิคอน (A) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิคอนความเข้มข้น 0.5 mM (B) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิคอนความเข้มข้น 1 mM (C) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM (D) และต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิคอนความเข้มข้น 2 mM (E) ในวันที่ 18 ของการทดลอง..... 79

ภาพประกอบ 28 คลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (chlorophyll fluorescence, Fv/Fm) ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย 83

ภาพประกอบ 29 ค่า Performance index (Pi) ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย 88

ภาพประกอบ 30 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน

(standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย.....92

ภาพประกอบ 31 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย.....96

ภาพประกอบ 32 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย..... 101

ภาพประกอบ 33 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย..... 105

ภาพประกอบ 34 ปริมาณซิลิโคนที่สะสมในต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) 109

ภาพประกอบ 35 การศึกษาผลของซิลิโคนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สารฟลูออเรสเซนซ์ และสารต้านอนุมูลอิสระของพืช ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง ประกอบด้วย ต้นพืชในชุดควบคุมที่ไม่ได้พ่นซิลิโคน (A) ต้นพืชในชุดควบคุมและพ่นซิลิโคนความเข้มข้น 1.5 mM (B) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่พ่นซิลิโคน (C) และต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนความเข้มข้น 1.5 mM (D) ในวันแรกของการทดลอง 111

ภาพประกอบ 36 การศึกษาผลของซิลิคอนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สารพฤกษเคมี และ สารต้านอนุมูลอิสระของพืช ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง ประกอบด้วย ต้นพืชในชุดควบคุมที่ไม่ได้พ่นซิลิคอน (A) ต้นพืชในชุดควบคุมและพ่นซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM (B) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่พ่นซิลิคอน (C) และต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM (D) ในวันที่ 3 ของการทดลองและทำการให้น้ำกับต้นพืช (re-watering) 111

ภาพประกอบ 37 วันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับการให้น้ำ (re-watering) หลังจากได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ประกอบด้วย ต้นพืชในชุดควบคุมที่ไม่ได้พ่นซิลิคอน (A) ต้นพืชในชุดควบคุมและพ่นซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM (B) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่พ่นซิลิคอน (C) และต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM (D)..... 112

ภาพประกอบ 38 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี T-test 114

ภาพประกอบ 39 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี T-test..... 114

ภาพประกอบ 40 ค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (chlorophyll fluorescence, Fv/Fm) ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี T-test..... 117

ภาพประกอบ 41 ค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาด

เคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test..... 118

ภาพประกอบ 42 ค่า performance index (Pi) ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test 121

ภาพประกอบ 43 ค่า performance index (Pi) ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test..... 122

ภาพประกอบ 44 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test 125

ภาพประกอบ 45 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test..... 126

ภาพประกอบ 46 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test 129

ภาพประกอบ 47 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน

(standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test.....	129
ภาพประกอบ 48 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test	132
ภาพประกอบ 49 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test.....	132
ภาพประกอบ 50 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test.....	135
ภาพประกอบ 51 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test	136
ภาพประกอบ 52 ปริมาณโพรตีนของพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test	139
ภาพประกอบ 53 ปริมาณโพรตีนของพืช <i>D. tinctoria</i> อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test	139

ภาพประกอบ 54 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test..... 142

ภาพประกอบ 55 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test..... 143

ภาพประกอบ 56 ปริมาณแอนโทไซยานินของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test 146

ภาพประกอบ 57 ปริมาณแอนโทไซยานินของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test..... 147

ภาพประกอบ 58 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test..... 150

ภาพประกอบ 59 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test..... 151

ภาพประกอบ 60 ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และ ต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test 154

ภาพประกอบ 61 ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test..... 155

ภาพประกอบ 62 ค่า stomatal conductance ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test..... 158

ภาพประกอบ 63 ค่า stomatal conductance ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test..... 159

ภาพประกอบ 64 การร่วไหลของเล็กโตรไลต์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และ ต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test 162

ภาพประกอบ 65 การร่วไหลของอิเล็กโตรไลต์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test..... 163

ภาพประกอบ 66 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์อะไมเลสของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test..... 166

ภาพประกอบ 67 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์อะไมเลสของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test 167

ภาพประกอบ 68 ปริมาณซิลิโคนที่สะสมในต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน ต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test 170

ภาพประกอบ 69 ภาคตัดขวางเส้นกลางใบของต้นพืช *D. tinctoria*..... 171

ภาพประกอบ 70 ภาคตัดขวางของต้นพืช *D. tinctoria* บริเวณมัดท่อลำเลียง 172

ภาพประกอบ 71 ภาคตัดขวางบริเวณเนื้อเยื่อพื้นของต้นพืช *D. tinctoria* 172

ภาพประกอบ 72 ภาคตัดขวางของต้นพืช *D. tinctoria* ที่เห็นบริเวณ cystolith ซึ่งอยู่บนชั้นอภิเดอริมิส (upper epidermis) 173

ภาพประกอบ 73 ภาคตัดขวางของต้นพืช *D. tinctoria* บริเวณเนื้อเยื่อชั้นมีโซฟิลล์ (mesophyll tissue)..... 173

ภาพประกอบ 74 โครงสร้างของคลอโรพลาสต์ในใบพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน (25%FC+ 0mM H₂SiO₄) (A) กำลังขยาย 3,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 10,000 เท่า (CP: chloroplast, SG: starch grain และ SL: stroma lamellae) และโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ในใบพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM (25%FC+ 0mM

H ₂ SiO ₄) (C) กำลังขยาย 3,000 เท่า และ (D) กำลังขยาย 10,000 เท่า (CP: chloroplast, SG: starch grain และ SL: stroma lamellae).....	175
ภาพประกอบ 75 กราฟมาตรฐานกลูโคส	220
ภาพประกอบ 76 กราฟมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H ₂ O ₂)	220
ภาพประกอบ 77 กราฟมาตรฐานโพรีน	221
ภาพประกอบ 78 กราฟมาตรฐานความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ	221



บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ในปี พ.ศ. 2562 ประเทศไทยมีเนื้อที่ที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตรมากถึง 149.24 ล้านไร่ หรือคิดเป็นร้อยละ 46.53 ของพื้นที่ทั้งประเทศ ขณะที่ปริมาณน้ำฝนทั้งประเทศเฉลี่ย 1,338 มิลลิเมตร ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนทั้งประเทศเฉลี่ยน้อยกว่าในปี พ.ศ. 2561 และ พ.ศ. 2560 คิดเป็น 1,629 มิลลิเมตร และ 2,092 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีอุณหภูมิทั้งประเทศเฉลี่ย 27.86 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่า ในปี พ.ศ. 2561 และ พ.ศ. 2560 ซึ่งมีอุณหภูมิ 26.21 องศาเซลเซียส และ 26.27 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (สำนักเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) ส่งผลให้เกษตรกรประสบกับปัญหาภัยแล้ง เนื่องจากมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อพื้นที่เพาะปลูก พืชเจริญเติบโตได้ไม่เต็มที่ ผลผลิตที่ได้จึงต่ำลง

ภัยแล้ง (drought) เกิดจากการขาดแคลนน้ำในดินทำให้พืชได้รับน้ำไม่เพียงพอจึงเกิดสภาพเครียดจากสภาวะแล้ง (drought stress) ส่งผลชักนำให้พืชมีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการทางสรีรวิทยา เช่น กระบวนการดูดน้ำและแร่ธาตุ และกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง ส่งผลต่อการเติบโตและระยะการพัฒนาของพืช ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยและองค์ความรู้จากผลการวิจัย ที่ช่วยลดค่าใช้จ่ายทางการเกษตรและช่วยเหลือเกษตรกรในการแก้ไขปัญหาภัยแล้ง เพื่อทำให้เกิดการเพิ่มผลผลิตของพืชให้สูงขึ้นและมีคุณภาพดี เช่น การให้ธาตุอาหารที่ช่วยเสริมประโยชน์ (beneficial element) เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานของพืช ต่อสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น แมลงศัตรูพืช เชื้อก่อโรคบางชนิด ความเค็ม และความแล้ง เป็นต้น ซึ่งซิลิคอน (silicon; Si) เป็นธาตุที่มีมากที่สุดเป็นอันดับ 2 ในชั้นผิวโลกรองจากออกซิเจน (O) พืชต้องการธาตุนี้ในปริมาณเล็กน้อย แต่ไม่สามารถขาดธาตุเหล่านี้ได้เนื่องจากจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช ซิลิคอนในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จะอยู่ในรูปสารละลาย กรดโมโนซิลิก (monosilic acid; H_4SiO_4) และกรดพอลิซิลิก (polysilic acid;) (ยงยุทธ โสสถสภา, 2558) จากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า ซิลิคอนมีบทบาทในการช่วยป้องกันรังควาณที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เพิ่มกิจกรรมการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น การทำงานของเอนไซม์คะตาเลส (catalase; CAT) เพอร์ออกซิเดส (peroxidase; POD) และกลูตาไธโอน (glutathione; GSH) เป็นต้น เพิ่มปริมาณน้ำสัมพัทธ์ (relative water content; RWC) และเพิ่มการสะสมปริมาณโพรลีน (proline content) ในผักกาดก้านขาว (*Brassica napus* L.) ภายใต้ความเครียดจากสภาวะแล้ง (M. Hasanuzzaman, Nahar, Anee, Khan, & Fujita, 2018)

นอกจากนี้ยังพบว่า ซิลิโคนช่วยเพิ่มอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (net CO₂ assimilation rate) ของใบข้าวสาลีภายใต้ความแล้ง ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระภายในต้นพืช ดังนั้นซิลิโคนจึงมีบทบาทในการช่วยลดความเสียหายของเซลล์และลดการชักนำการผลิตรีแอกทีฟออกซิเจนสปีชีส์ (reactive oxygen species; ROS) ภายใต้ความแล้ง (Gong, Zhu, Chen, Wang, & Zhang, 2005a) นอกจากนี้ผลของการศึกษาการดพอลิซิลิกต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 พบว่า การพ่นซิลิโคนในอัตรา 50 100 และ 150 มิลลิลิตร/น้ำ 20 ลิตร มีผลทำให้ผลผลิตของข้าวเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับการไม่ฉีดพ่นกรดซิลิกิก โดยให้ผลผลิตเท่ากับ 28.84, 26.48 และ 27.36 กรัมต่อต้น ตามลำดับ (สำราญ พิมราช, เหล็กไหล จันทะบุตร, พรพิชญ์ ธรรมปัทม์, & สุนันท์ บุตรศาสตร์, 2563) และพืช *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel มีถิ่นกำเนิดบริเวณตอนใต้ของประเทศจีนและพบการกระจายพันธุ์บริเวณ ประเทศไทย เวียดนาม ลาว จีน และอินเดีย (Khue, Sao Mai, Tuan, Oanh, & Van, 2014) นิยมนำพืชชนิดนี้ ไปใช้เป็นสีผสมอาหาร เนื่องจากใบให้สารสีม่วงแดง และนำไปใช้เป็นยาสมุนไพร สารสีม่วงแดงจัดเป็นสารสีในกลุ่มแอนโทไซยานิน (anthocyanin) (Quan et al., 2016) จากรายงานผลการวิจัยก่อนหน้านี้มีการศึกษาสารสกัดและการประเมินฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาของสารสีของพืช *Peristrophe bivalvis* (L.) Merr พบว่าสารสีม่วงนี้มีฤทธิ์ยับยั้งกิจกรรมออกซิเดชันคิดเป็น 71% แต่ไม่แสดงฤทธิ์ต้านการอักเสบ และที่ความเข้มข้น 100 µg/ml สามารถฆ่าเซลล์มะเร็งปอดชนิด A549 และมะเร็งตับชนิด Hep3B ของมนุษย์ได้ เนื่องจากมีสารต้านอนุมูลอิสระและมีฤทธิ์ต้านกิจกรรมของเซลล์มะเร็งที่มีแนวโน้มค่อนข้างดีในระดับเฉลี่ย (Van Hung Mai & Do, 2020) โดยในประเทศไทยพบพืชชนิดนี้บริเวณภาคเหนือ ซึ่งมีภูมิประเทศเป็นเทือกเขาสูงสลับซับซ้อนและลาดต่ำลงมาสู่ที่ราบ ภูมิอากาศของภาคเหนือส่วนใหญ่เป็นแบบสะวันนา (tropical savanna climate; AW) คือมีอากาศร้อนชื้นสลับฤดูแล้งซึ่งเป็นปัจจัยจำกัดของพื้นที่ที่อยู่ห่างไกลจากทะเลทำให้ฤดูร้อนมีอากาศอบอ้าวและฝนตกน้อย โดยพืชชนิดดังกล่าวมีการปลูกอย่างแพร่หลายในพื้นที่เพาะปลูกชุมชนผลิตชาอินทรีย์ห้วยน้ำกั้น จ.เชียงราย แต่ยังคงขาดองค์ความรู้และข้อมูลเชิงลึกในด้านการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืชเมื่อได้รับความเครียดจากสภาวะแล้ง รวมถึงฤทธิ์ทางพิษเคมีและความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และเพื่อเป็นการนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้มาใช้เป็นแนวทางในการจัดการระบบการเพาะปลูกพืชเพื่อเป็นการควบคุมกระบวนการผลิตและส่งเสริมให้เป็นพืชเศรษฐกิจของแหล่งชุมชนในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยต่อไปในอนาคต ทั้งนี้ยังเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนให้มีความเข้มแข็งในการผลิตสินค้าทางการเกษตร

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาผลของซิลิคอนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืชและสารต้านอนุมูลอิสระของ *D.tinctoria* ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง โดยการศึกษาหาระดับความชื้นภายในดินต่ำสุดที่พืชสามารถเจริญเติบโตและดำรงชีวิตได้ (field capacity; FC) ร่วมกับการศึกษาบทบาทของซิลิคอน โดยการพ่นซิลิคอนให้กับต้นพืช *D.tinctoria* ทางใบ เพื่อศึกษาผลของซิลิคอนต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ปริมาณรงควัตถุที่สำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง สารพิษเคมีที่สำคัญ ได้แก่ แอนโทไซยานิน ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืช ได้แก่ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ และปริมาณโพรงน้ำ รวมทั้งศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายวิภาค ได้แก่ รูปร่างของคลอโรพลาสต์ และกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ คอะตะเลส (catalase; CAT) และอนุมูลอิสระ ได้แก่ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ (malondialdehyde; MDA) และการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte leakage) ทั้งนี้เพื่อนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ทางด้านการเกษตร เพื่อให้พืชชนิดนี้มีความสามารถในการทนต่อสภาวะแล้งได้ดีและพัฒนาระบบการจัดการเพาะปลูกพืชดังกล่าว เพื่อส่งเสริมให้เป็นพืชเศรษฐกิจในอนาคตโดยมีความร่วมมือกับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนและหน่วยงานภาครัฐต่อไป

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

- 1 ศึกษาระดับความจุภาคสนามของดินที่เหมาะสมต่อการจำลองสภาวะแล้งของพืช *D.tinctoria*
- 2 ศึกษาความเข้มข้นของซิลิคอนที่เหมาะสมของพืช *D. tinctoria* ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง
- 3 ศึกษาความเข้มข้นของซิลิคอนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืชและสารต้านอนุมูลอิสระของพืช *D. tinctoria* ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง

สมมติฐานในงานวิจัย

- 1 ซิลิคอนมีบทบาทในการช่วยให้พืช *D. tinctoria* ทนต่อความเครียดจากความแล้งโดยส่งผลต่อการตอบสนองทางสรีรวิทยาบางประการของพืชด้วยการช่วยเพิ่ม กระบวนการสะสมปริมาณโพรงน้ำ น้ำตาล และประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช
- 2 ซิลิคอนมีบทบาทในการเพิ่มการสะสมสารพิษเคมีของพืช *D. tinctoria* ภายใต้ความเครียดจากความแล้งได้

3 ซิลิโคนสามารถลดการสะสมอนุมูลอิสระและเพิ่มกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์
ต้านอนุมูลอิสระของพืช *D. tinctoria* ภายใต้ความเครียดจากความแห้งได้



บทที่ 2

บททวนวรรณกรรม

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. ปัญหาภัยแล้ง
2. ความสัมพันธ์ของ น้ำ ดิน และพืช
3. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพืช *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel
4. สารพฤกษเคมีที่สำคัญใน *D. tinctoria*
5. กลไกการตอบสนองของพืชต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและสัณฐานวิทยาภายใต้ความแล้ง
6. บทบาทของซิลิโคนต่อการเจริญเติบโตของพืช *D. tinctoria*

ปัญหาภัยแล้ง

ภัยแล้ง (drought) เป็นภัยธรรมชาติที่เกิดจากการขาดแคลนน้ำ หรือความแห้งแล้งของลมฟ้าอากาศ ทำให้มีฝนน้อย หรือฝนไม่ตกต้องตามฤดูกาลเป็นระยะเวลา นานกว่าปกติและครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง ส่งผลต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ เนื่องจากขาดแคลนน้ำดื่มและน้ำใช้ พืชพรรณต่างๆ ได้รับความไม่เพียงพอ ทำให้เจริญเติบโตไม่เต็มที่ นอกจากนี้ปัญหาภัยแล้งมีสาเหตุอีกหลายประการทั้งที่เกิดโดยธรรมชาติ เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลก การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลและมหาสมุทร การเปลี่ยนแปลงของร่องมรสุมทำให้ฝนตกไม่ต่อเนื่อง เป็นต้น และภัยแล้งที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การตัดไม้ทำลายป่า การขยายโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อผลิตสิ่งอำนวยความสะดวก ในการตอบสนองความต้องการของมนุษย์ การทำลายชั้นโอโซนและเกิดภาวะเรือนกระจก จากการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น การผลิตสเปร์ยกระป๋อง สารให้ความเย็นในตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ การใช้พลาสติกโฟม และควันที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของรถยนต์และเชื้อเพลิงต่างๆ โดยภัยแล้งในประเทศไทยมีสาเหตุหลักจากฝนแล้งและทิ้งช่วงเป็นระยะเวลา นาน ทำให้มีปริมาณน้ำฝนน้อยกว่าปกติ สถานการณ์ภัยแล้งในปี พ.ศ.2562 ได้ปรากฏภัยแล้งในหลายพื้นที่และส่งผลกระทบต่อหลายจังหวัดและการคาดการณ์ภัยแล้งจากกรมอุตุนิยมวิทยา รายงานว่า ตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนกรกฎาคม ประเทศไทยมีอากาศร้อนอบอ้าวโดยเฉพาะบริเวณประเทศไทยตอนบนและภาคเหนือยังคงมีอากาศร้อนจัดต่อเนื่องรวมถึงภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางที่มีอากาศร้อนในหลายพื้นที่ เนื่องจากอิทธิพลของหย่อมความกดอากาศต่ำ จากความร้อนที่ปกคลุมบริเวณ

ภาคเหนือตอนบนและส่งผลให้มีฝนเป็นระยะโดยเฉพาะบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือในเกณฑ์ต่ำกว่าปกติร้อยละ 30 และ 41 ตามลำดับ และเดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคม บริเวณประเทศไทยมีฝนตกต่อเนื่องจากอิทธิพลของร่องมรสุมที่พาดผ่านบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ประกอบกับมีมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดปกคลุมทะเลอันดามันของประเทศไทย อีกทั้งมีพายุหมุนเขตร้อนเคลื่อนตัวเข้าสู่ประเทศไทยจำนวน 2 ลูก คือพายุไซร่อนวิภา (wipha) ที่เคลื่อนที่เข้าสู่ประเทศไทยที่จังหวัดน่านและพายุไซร่อนโพดุล (podul) ในเดือนสิงหาคม ส่งผลให้มีน้ำท่วมฉับพลันในหลายพื้นที่ของภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณฝนสะสมตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2562 ถึงวันที่ 27 ตุลาคม 2562 มีปริมาณฝนสะสมทั้งประเทศประมาณ 1,241 มิลลิเมตร ซึ่งทุกภาคของประเทศไทยมีปริมาณฝนสะสมน้อยกว่าปี พ.ศ.2561 เฉลี่ยร้อยละ 16 และน้อยกว่าค่าเฉลี่ยรอบ 30 ปี ร้อยละ 13 และทุกภาคมีปริมาณฝนตกต่ำกว่าค่าเฉลี่ย 30 ปี อยู่ระหว่างร้อยละ 9 ถึง 31 และมีอุณหภูมิจังหวัดของประเทศไทยในตอนบนจะมีค่าสูงกว่าปกติประมาณ 1 องศาเซลเซียสและภาคใต้มีอุณหภูมิจังหวัดสูงกว่าปกติประมาณ 0.5 องศาเซลเซียส ส่วนอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่จำนวน 35 แห่งทั่วประเทศ มีปริมาณน้ำกักเก็บคงเหลือทั้งสิ้น 47,400 ล้านลูกบาศก์เมตร คิดเป็นร้อยละ 67 ของความจุและเป็นน้ำใช้การได้จริงเพียง 23,858 ล้านลูกบาศก์เมตร สำหรับลุ่มน้ำเจ้าพระยาอ่างเก็บน้ำหลักทั้ง 4 แห่ง คือ เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อย และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ มีปริมาณน้ำกักเก็บคงเหลือรวมกัน 12,073 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการเพาะปลูกพืชในช่วงฤดูแล้ง (กรมชลประทาน, 2562) จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่าปัญหาภัยแล้งในประเทศไทยส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อภาคเกษตรกรรม ซึ่งเป็นอาชีพส่วนใหญ่ของประชาชนในประเทศ โดยเฉพาะชาวนาและเกษตรกรที่เพาะปลูกพืช เนื่องจากน้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช ซึ่งเมื่อมีปริมาณน้ำในดินไม่เพียงพอ พืชจึงเติบโตได้ลดลง ทำให้ได้ผลผลิตลดลง ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจโดยรวมด้านการส่งออกผลผลิตทางเกษตรของไทย อย่างไรก็ตาม การศึกษากลไกการปรับตัวของพืชเมื่อได้รับความเครียดที่ไม่เหมาะสมจากความแล้งนั้นว่ามีความสำคัญต่อการเพิ่มศักยภาพในการผลิตพืช เพื่อให้พืชสามารถเจริญเติบโตภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น ความเค็ม และความแล้ง เป็นต้น ดังนั้นในการศึกษาค้นคว้าวิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาผลของซิลิคอนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและกลไกการปรับตัวของพืช *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel. เมื่อได้รับความเครียดภายใต้ความแล้ง ซึ่งเป็นพืชที่กำลังได้รับความนิยมและสำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทยโดยมีการเพาะปลูกพืชดังกล่าวในพื้นที่เกษตรกรรมทางภาคเหนือของชุมชนผลิตชาอินทรีย์ห้วยน้ำกั้น อ.เวียงป่าเป้า จ.เชียงราย ประกอบ

กับยังไม่มีการศึกษาด้านการตอบสนองและการปรับตัวทางสรีรวิทยาของพืชและผลของการใช้ซิลิโคนในพืชดังกล่าว ซึ่งประโยชน์จากการศึกษาในครั้งนี้จะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและการปรับตัวของพืชชนิดนี้ เพื่อการนำไปใช้ในการวางแผนและการจัดการระบบการเพาะปลูกพืชสำหรับการเตรียมพร้อมในการรองรับสถานการณ์ปัญหาภัยแล้ง และเพื่อเป็นการหาแนวทางในการเพิ่มผลผลิตและพัฒนาให้เป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยในอนาคต

ความสัมพันธ์ของ ดิน น้ำ และพืช

ดินเป็นทรัพยากรทางธรรมชาติที่มีความสำคัญโดยช่วยยึดเหนี่ยวพืชและเป็นแหล่งของธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ส่วนประกอบของดินแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน คือ

1. อนินทรีย์วัตถุ (inorganic matter) เป็นส่วนประกอบที่พบมากที่สุดที่ดินคิดเป็น 45-50% ซึ่งเกิดจากการผุพังสลายของหินและแร่ธาตุต่างๆ ทำให้อินทรีย์สารมีอนุภาคเล็ก ใหญ่ แตกต่างกันไป เรียกว่า อนุภาคดิน (soil particle) เช่น กรวดหยาบ กรวดละเอียดทรายหยาบ ดิน ตะกอน เป็นต้น

2. อินทรีย์วัตถุ (organic matter) เกิดจากการเน่าเปื่อย ผุพังของเศษกิ่งไม้ ใบไม้หรือสิ่งมีชีวิตที่ตายทับถมไปบนดิน และมีการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดินจากการหลั่งหรือปลดปล่อยสารอินทรีย์ของสิ่งมีชีวิต สารอินทรีย์ดังกล่าว เช่น เซลลูโลส ลิกนิน กรดอะมิโน เป็นต้น เมื่อสิ้นสุดการย่อยสลายจะเหลือลิกนินที่สลายยากที่สุดรวมกับซากสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในดิน และสารที่ทนทานต่อการย่อยสลายคือ กรดฟุลวิก และกรดฮิวมิก ซึ่งเป็นสารที่เป็นสีน้ำตาลหรือดำ และเป็นสารคอลลอยด์เชิงซ้อน จากนั้นจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ให้มีขนาดเล็กเท่าคอลลอยด์เรียกว่า ฮิวมัส (humus) ซึ่งเป็นอินทรีย์วัตถุที่มีโครงสร้างซับซ้อนและทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ และทำหน้าที่เป็นแหล่งแลกเปลี่ยนไอออนบวกในดิน เนื่องจากฮิวมัสสามารถรวมตัวกับโปรตีนและสารประกอบไนโตรเจน ซึ่งโมเลกุลของโปรตีนมีทั้งประจุบวกและประจุลบ ทำให้ผิวด้านนอกของฮิวมัสมีประจุไฟฟ้าอยู่ และฮิวมัสเป็นของแข็งที่อยู่ในสภาพที่มีอนุภาคละเอียดมาก ทำให้สามารถดูดยึดไอออนบวกและไอออนลบไว้ที่ผิวได้

3. อากาศในดิน (soil air) คิดเป็นสัดส่วน 25% เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สออกซิเจน (O_2) แก๊สไนโตรเจน (N_2) ซึ่งเป็นแก๊สที่ได้จากอากาศเหนือดิน นอกจากนี้ยังมีแก๊สที่ได้จากกระบวนการหายใจของสิ่งมีชีวิตในดิน หรือแก๊สที่ได้จากกระบวนการเน่าเปื่อยของสิ่งมีชีวิต เช่น แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สมีเทน (CH_4) แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น อากาศในดินมีความสำคัญต่อพืชอย่างมาก เนื่องจากรากพืชต้องการใช้ O_2 ในการหายใจ ในดินจะมี O_2 อยู่ 1-20% ซึ่งต่ำกว่าในบรรยากาศ โดยถ้าในดินแห้ง อากาศจะเข้าไปแทนที่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

ทำให้อากาศในดินมากขึ้น ขณะที่ในดินมีปริมาณน้ำท่วม น้ำจะไปไล่อากาศทำให้อากาศในดินลดลง การถ่ายเทอากาศระหว่างดินและบรรยากาศเป็นไปได้ยาก จึงมีปริมาณ CO_2 สะสมอยู่ในดินปริมาณมาก ดินจะขาด O_2 ส่งผลให้พืชเจริญเติบโตได้ช้าลง

4. น้ำ (water) เป็นสารที่มีความสำคัญและจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลก โดยน้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในทุกส่วนของพืช เช่น ในรากมีน้ำเป็นส่วนประกอบ 70-90% ใบมีน้ำเป็นส่วนประกอบ 75-90% ลำต้นมีน้ำเป็นส่วนประกอบ 50-80% ผลมีน้ำเป็นส่วนประกอบ 80-95% เมล็ดมีน้ำเป็นส่วนประกอบ 5-15% (วิไลภรณ์ บุญญกิจจินดา, 2556) ในพืชล้มลุกจะมีน้ำเป็นส่วนประกอบ 80-95% ของน้ำหนักสด ในพืชยืนต้น มีน้ำเป็นส่วนประกอบ 30-50% (สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์, 2548) แต่ปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบในพืชจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของพืช เนื้อเยื่อของพืช อายุของพืช และอวัยวะแต่ละส่วนของพืช นอกจากนี้น้ำยังเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์ ช่วยรักษาสภาพความเต่งของเซลล์ (cell turgidity) ซึ่งทำให้เซลล์พืชมีรูปร่างคงตัว โดยแรงดันน้ำภายในเซลล์จะทำให้เซลล์พืชเกิดความเต่ง (turgid) ส่งผลต่อการขยายขนาดของเซลล์พืช และยังมีผลต่อการเปิด ปิด ปากใบและช่วยให้เกิดการเคลื่อนไหวของพืช น้ำเป็นตัวกลางของปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่มีเอนไซม์เป็นตัวควบคุม และมีส่วนร่วมในกระบวนการเมแทบอลิซึมและช่วยให้สารประกอบอินทรีย์ต่างๆภายในเซลล์ สามารถดำเนินกิจกรรมต่างๆได้ตามปกติ น้ำในดิน (soil water) มีบทบาทสำคัญในกระบวนการต่างๆ ทั้งกระบวนการเคมี ฟิสิกส์ และชีววิทยาที่เกิดขึ้นภายในดิน น้ำในดินได้มาจากหลายทางเช่น หยาดน้ำฟ้า แหล่งน้ำใต้ดิน และการเกิดน้ำป่า เป็นต้น น้ำที่ซึมลงดินจะถูกยึดไว้ด้วยแรงดึงดูดของโลก (gravitation force) ทำให้น้ำมีการระบายนลงสู่ดินโดยเพิ่มพลังงานอิสระของน้ำในดินให้เคลื่อนที่ไปตามแรงดึงดูดของโลก และแรงยึดเมทริก (matric force) ทำให้เกิดการกักเก็บน้ำไว้ในดินโดยจะลดพลังงานอิสระของน้ำในดิน เพื่อให้ให้น้ำในดินเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น จะเห็นได้ว่าน้ำในดินถูกยึดด้วยแรงที่แตกต่างกันทำให้พืชสามารถนำน้ำไปใช้ประโยชน์ได้ (available water) และไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (unavailable water) ตามสภาพของน้ำ (ภาพประกอบ 1) น้ำซึม (gravitational water) เป็นน้ำที่เกิดจากฝนตกหรือดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated soil) ทุกช่องว่างเต็มไปด้วยน้ำ จากนั้นน้ำจะเคลื่อนที่ไปบรรจุอยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่ในอนุภาคดิน และแรงดึงดูดของโลกจะเป็นแรงที่ช่วยระบายน้ำสู่ด้านล่างจะเหลือแต่อากาศที่บรรจุแทนทำให้รากพืชสามารถนำน้ำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย จนกระทั่งเหลือน้ำชั้นบางรอบผิวอนุภาคดิน (surface water) เป็นน้ำที่อยู่รอบนอกของอนุภาคดิน มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของอนุภาคเม็ดดินและโมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวแอดฮีชัน (adhesion force) สูงมากทำให้ดินที่มีช่องว่างระหว่างอนุภาคดินใหญ่จะไม่มีน้ำ

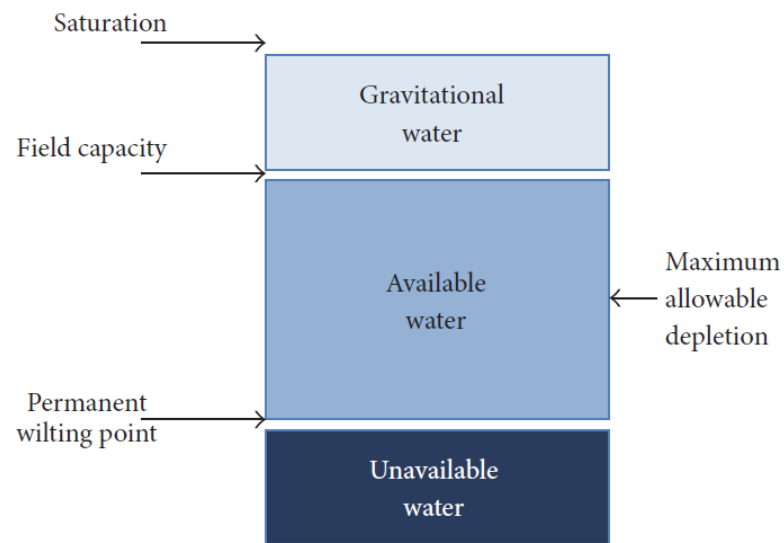
เหลืออยู่ จากพืชจึงไม่สามารถนำน้ำไปใช้ประโยชน์ได้ ขณะที่ดินที่มีช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเล็ก จะมีน้ำแคพิลลารี (capillary water) เป็นน้ำที่แทรกอยู่ระหว่างอนุภาคเม็ดดินเมื่ออนุภาคเม็ดดินมารวมกลุ่มกันจะถูกยึดด้วยแรงยึดแคพิลลารี (capillary attraction) จากพืชจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้และความชื้นที่เหลืออยู่หลังจากที่น้ำไหลตามแรงดึงดูดของโลก ความชื้น ณ จุดนี้ เรียกว่า ความจุสนามของดิน (field capacity; FC) คือ ค่าที่บอกความสามารถสูงสุดในการกักเก็บน้ำของดินต่อเนื้อดินแห้ง 100 กรัม มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ซึ่งในดินแต่ละชนิดจะมีค่าความจุสนามของดินที่แตกต่างกันไป เช่น ดินเหนียว มีค่าความจุสนามดิน 45% ดินทรายมีค่าความจุสนามของดิน 5% โดย ณ ความจุสนามของดินจะมีอากาศและน้ำแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดินที่ยึดไว้ด้วยแรงยึดแคพิลลารี และแรงยึดน้ำชั้นบางรอบผิวอนุภาคดิน หลังจากทีน้ำเคลื่อนที่ไปตามแรงดึงดูดของโลกแล้ว พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ ปริมาณน้ำในดินจะลดลงและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างน้ำและอนุภาคดินจะเพิ่มมากขึ้น ดินจะมีความชื้นลดลง จนถึงจุดที่พืชไม่สามารถดึงน้ำในดินมาใช้ได้ พืชจะแสดงอาการเหี่ยวโดยจะเริ่มเหี่ยวจากใบล่างก่อน ซึ่งเรียกว่า จุดเหี่ยวถาวร (permanent wilting point; PWP) เป็นค่าที่บอกปริมาณน้ำต่ำสุดที่เหลืออยู่ ณ จุดความชื้นต่ำสุดที่พืชจะสามารถนำไปใช้ได้ต่อเนื้อดินแห้ง 100 กรัม มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ซึ่งสภาพของดินที่มีปริมาณน้ำอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดินน้อยมากนี้ พืชจึงไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งเมื่อถึงจุดนี้แล้ว ถึงแม้จะรดน้ำหรือให้น้ำกับพืช พืชจะไม่สามารถฟื้นกลับมาเจริญเติบโตได้อย่างปกติ (ภาพประกอบ 2) ซึ่งสามารถคำนวณหาความชื้นหรือน้ำที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จากสมการ (1)

$$AW = FC - PWP \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ AW = น้ำที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available water; AW)

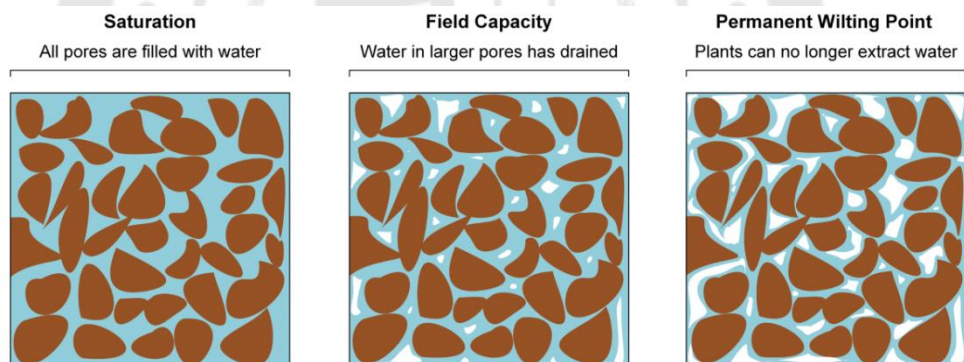
FC = ความจุสนามของดิน (field capacity; FC)

PWP = จุดเหี่ยวถาวร (permanent wilting point; PWP)



ภาพประกอบ 1 สถานะของน้ำในดิน

ที่มา: (Datta, Taghvaeian, & Stivers, 2017)



ภาพประกอบ 2 ปริมาณน้ำในดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ความจุสนามของดินและจุดเหี่ยวถาวร

ที่มา: (Datta et al., 2017)

ตาราง 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของดินและชนิดของเนื้อดินที่แตกต่างกัน

SOIL TEXTURE	FC (%)	PWP (%)	AW (%)
Sand	10	4	6
Loamy sand	16	7	9
Sandy loam	21	9	12
Loam	27	12	15
Silt loam	30	15	15
Sandy clay loam	36	16	20
Sandy clay	32	18	14
Clay loam	29	18	11
Silty clay loam	28	15	13
Silty clay	40	20	20
Clay	40	22	18

ที่มา: (Datta et al., 2017)

จากตาราง 1 แสดงให้เห็นว่าน้ำที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ขึ้นอยู่กับเนื้อของดิน เช่น ดินทราย จะมีปริมาณน้ำที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์น้อยที่สุด ดินร่วนจะมีปริมาณน้ำที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในระดับปานกลาง และดินเหนียวจะมีปริมาณน้ำที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด นอกจากนี้ชนิดของพืชและระบบรากของพืชก็มีผลต่อการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ ดังนั้น การให้น้ำสำหรับพืชควรคำนึงถึงเนื้อดิน และการกำหนดการให้น้ำแก่พืชเป็นเรื่องที่มีความสำคัญ ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการปลูกพืชให้เจริญเติบโตได้ดีและให้ผลผลิตสูง

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพืช *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel

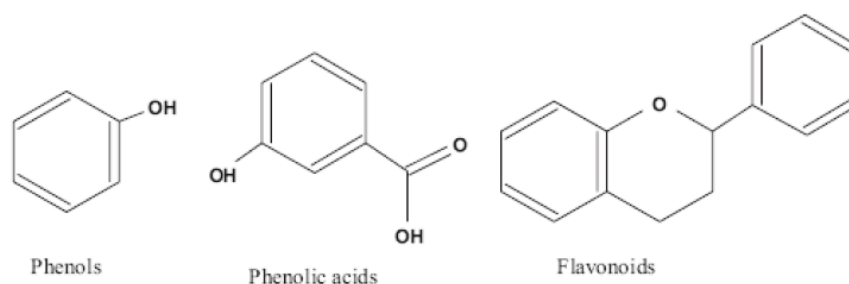
พืชชนิดนี้มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel จัดอยู่ในวงศ์ Acanthaceae เช่น เหงือกปลาหมอ บานหยา และต้อยติ่ง เป็นพืชล้มลุก (herbaceous plant) สามารถเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ชื้น ดินร่วนปนทราย มีถิ่นกำเนิดบริเวณตอนใต้ของประเทศจีน และพบการกระจายพันธุ์บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น ประเทศเวียดนาม ไทย ลาว เป็นต้น มีความสูง 30-60 เซนติเมตร ใบเดี่ยวสีเขียว ปลายใบแหลมรูปหอกโดยแผ่นใบมีฐานใบกว้างแล้วค่อยๆ เรียวไปทางปลายใบ ยาว 3-4 เซนติเมตร กว้าง 2-4 เซนติเมตร ดอกเดี่ยวรูปแตร ออกเป็นกระจุกบริเวณซอกใบและปลายยอด ดอกบานเต็มที่สีชมพูอ่อน กลีบดอก 2 -3 กลีบ (Do & Nguyen, 2007) (ภาพประกอบ 3) สำหรับประเทศไทยไม่มีหลักฐานว่านำพืชดังกล่าวมาปลูกเมื่อใด ในปัจจุบันมีการเพาะปลูกในพื้นที่เกษตรกรรมทางภาคเหนือและมีการนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชาอินทรีย์สำเร็จรูป ซึ่งเรียกว่าชาเลือดมังกร เนื่องจากมีสารแอนโทไซยานินที่ให้สีม่วงแดง ซึ่งเป็นสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์ ซึ่งเป็นสารในกลุ่มฟีนอลิก (phenolic compound) มีฤทธิ์ในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ยับยั้งจุลินทรีย์ และต้านโรคเบาหวาน เป็นต้น (Benavente-Garcia, Castillo, Lorente, Ortuño, & Del Rio, 2000; Mojica, Berhow, & Gonzalez de Mejia, 2017)



ภาพประกอบ 3 ต้นพืช *D. tinctoria*

สารพิษเคมีที่สำคัญในต้นพืช *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel.

สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compound) จัดเป็นสารทุติยภูมิ (secondary metabolite) ที่พบตามธรรมชาติในพืชหลายชนิด เช่น ผัก ผลไม้ ถั่วเมล็ดแห้ง เครื่องเทศ สมุนไพร เป็นต้น ซึ่งมีความสำคัญในการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ของพืช ช่วยป้องกันเชื้อโรคและแมลงที่เข้ามาทำอันตรายกับพืช (Bravo, 1998) โครงสร้างสารประกอบฟีนอลิก ประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก มีหมู่ไฮดรอกซิล (OH group) อย่างน้อยหนึ่งหมู่ต่อกับสารฟีนอล (phenol) ในโมเลกุลประกอบด้วยวงแหวนเบนซีน 1 วง และหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ (ภาพประกอบ 4) สารประกอบกลุ่มนี้สามารถจำแนกได้หลายกลุ่ม เช่น กลุ่มสารประกอบกรดฟีนอลิก (Phenolic acids) กลุ่มสารประกอบแทนนิน (Tannins) และกลุ่มสารประกอบฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) (Shahidi & Nacz, 1995)



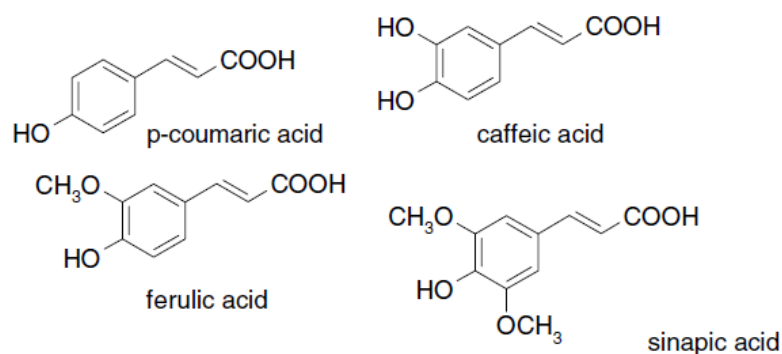
ภาพประกอบ 4 โครงสร้างทั่วไปของสารประกอบฟีนอลิก

ที่มา: (Jideani & Diedericks, 2014)

กลุ่มสารประกอบกรดฟีนอลิก (phenolic acids)

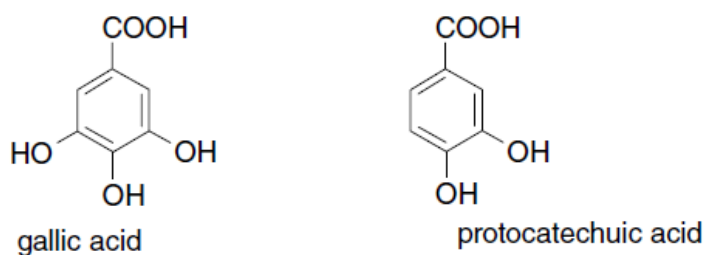
ประกอบด้วย 2 กลุ่มย่อย คือ

1. กรดไฮดรอกซีซินนามิก (hydroxycinnamic acid) ประกอบด้วย กรดคาเฟอิก (caffeic acid) กรดคลอโรจีนิก (chlorogenic acid) กรดฟีลูอิก (ferulic acid) กรดพาราคูมาลิก (p-coumaric acid) และ กรดซินแนปิก (sinapic acid) (ภาพประกอบ 5) (Balasundram, Sundram, & Samman, 2006)
2. กรดไฮดรอกซีเบนโซอิก (hydroxybenzoic acids) ประกอบด้วย กรดแกลลิก (gallic acid) กรดวานิลลิก (vanillic acid) กรดพาราไฮดรอกซีเบนโซอิก (p-hydroxybenzoic acid) กรดโปรโตคาเทอควิก (protocatechuic acid) และกรดไซลิคิก (syringic acid) (ภาพประกอบ 6) (Balasundram et al., 2006)



ภาพประกอบ 5 สารประกอบกรดไฮดรอกซีซินนามิก (hydroxycinnamic acid)

ที่มา: (Balasundram et al., 2006)



ภาพประกอบ 6 ตัวอย่างของสารประกอบกรดไฮดรอกซีเบนโซอิก (hydroxybenzoic acids)

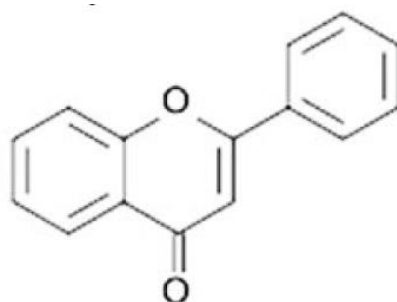
ที่มา: (Balasundram et al., 2006)

กลุ่มสารประกอบแทนนิน (tannins)

เป็นสารโพลีฟีนอล (polyphenol) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลใหญ่ เป็นสารให้รสฝาด (astringency) และรสขม (bitter) พบได้ในพืชหลายชนิด เช่น ใบชา ใบฝรั่ง กัลยาดิบ มีส่วนสำคัญเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล และยับยั้งจุลินทรีย์ แทนนิน ประกอบด้วย 2 กลุ่มย่อยคือ

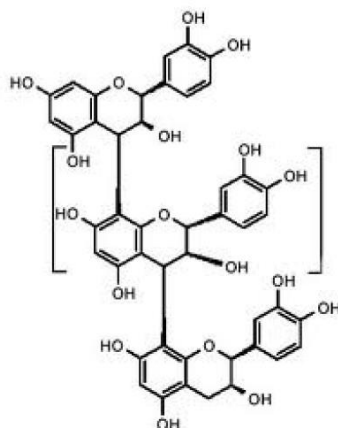
1. ไฮโดรไลซ์แทนนิน (hydrolysable tannins) เป็นโครงสร้างที่ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือโครงสร้างของน้ำตาล เช่น น้ำตาลกลูโคส หรือสารประกอบโพลีออล (polyol) และโครงสร้างของกรดฟีนอลิก เช่น กรดแกลลิก ที่อยู่ในรูปออกซิไดซ์ ซึ่งมาเชื่อมกันด้วยพันธะเอสเตอ์ (ester linkage) เรียกว่า deposite linkage (ประกร รามกุล, 2553) (ภาพประกอบ 7)

2. คอนเดนแทนนิน (condensed tannins) เป็นสารประกอบโพลีฟีนอลที่มีโครงสร้างซับซ้อน ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์ เรียกอีกชื่อว่า โปรแอนโทไซยานิดิน (proanthocyanidins) และสลายตัวด้วยน้ำได้ง่ายกว่าไฮโดรไลซ์แทนนิน (ภาพประกอบ 8) (ประกร รามกุล, 2553)



ภาพประกอบ 7 โครงสร้างไฮโดรไลซ์แทนนิน (*hydrolysable tannins*)

ที่มา: (ประกร รามกุล, 2553)



ภาพประกอบ 8 โครงสร้างคอนเดนแทนนิน (*condensed tannins*)

ที่มา: (Jideani & Diedericks, 2014)

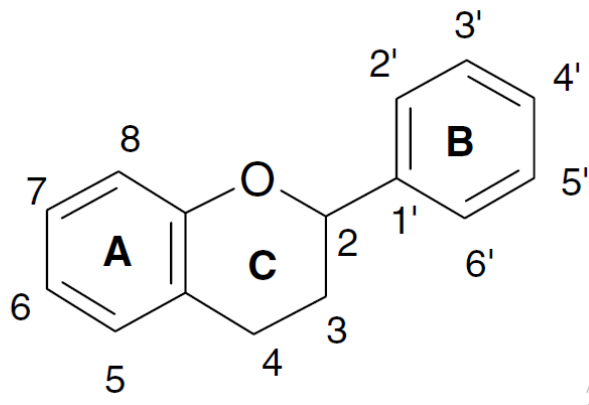
กลุ่มสารประกอบฟลาโวนอยด์ (flavonoids)

เป็นสารโพลีฟีนอล (polyphenol) ที่พบในธรรมชาติมากกว่า 4,000 ชนิด ซึ่งเป็นสารให้สีที่พบในส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ใบ เกสร และผล โดยเฉพาะในดอกทำให้มีสีสันสวยงาม โครงสร้างพื้นฐานของสารประกอบฟลาโวนอยด์เป็นฟีนอลเบนโซไพโรน (phenylbenzopyrones) ประกอบด้วยคาร์บอน 15 ตัว (C6 -C3 -C6) จัดเรียงเป็น 3 วง เรียกเป็น วง A, B และ C โดย วง

A และ B เป็นวงเบนซีน (benzene ring) ส่วน วง C อยู่ตรงกลางของโครงสร้างเรียกว่า heterocyclic pyran ring (ภาพประกอบ 9) ฟลาโวนอยด์เป็นสารที่สำคัญต่อการตอบสนองของพืชเมื่อได้รับความเครียด เนื่องจากมีกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระที่สูง ทำให้พืชสามารถทนต่อสภาวะเครียดได้ดี (Nakabayashi et al., 2014) และสร้างรงควัตถุในพืชโดยทำหน้าที่เป็นไฟโตอเล็กซิน (phytoalexin) เพื่อช่วยป้องกันเชื้อจุลินทรีย์ ฟลาโวนอยด์จะมีชื่อโครงสร้างหลักที่เหมือนกัน แต่ต่างกันที่ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันซึ่งแทนที่ของหมู่ฟีนิล (phenyl) และหมู่แทนที่ชนิดต่างๆ แบ่งได้ 3 กลุ่มหลัก (ระวีวรรณ แก้วอมตวงศ์, 2555) คือ

1. โครงสร้าง 1,3-ไดฟีนิล-2-โพรเพน-1-โอน (1,3-Diphenyl-2-propen-1-one) เช่น ชาลโคน (chalcone) ไดไฮโดรชาลโคน (dihydrochalcone) และออโรน (aurone)
 2. โครงสร้างฟีนิลโครโมน (phenylchromone) แบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ
 - 2.1 2-ฟีนิลโครโมน (2- phenylchromone) เช่น ฟลาโวน (flavone) ฟลาโวนอล (flavonol) และฟลาวาโนน (flavanones)
 - 2.2 3-ฟีนิลโครโมน (3- phenylchromone) เช่น ไอโซฟลาโวนอยด์ (isoflavonoid)
 3. โครงสร้างฟีนิลโครมิน (phenylchromine) เช่น ฟาแวน-3-อล (flavan-3-ol) แอนโทไซยานิน (anthocyanin)
- เพื่อไม่ให้เกิดความสับสน จึงมีการตั้งชื่อตามระบบโดยใช้หลักเกณฑ์ของการตั้งชื่อสารประกอบเคมีของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) (ระวีวรรณ แก้วอมตวงศ์, 2555) ดังนี้

1. กลุ่มฟลาโวน เช่น อะพิจินิน (apigenin)
2. กลุ่มฟลาโวนอล เช่น เคอร์ซีติน (quercetin)
3. กลุ่มฟลาวาโนน เช่น นารินจินิน (naringenin)
4. กลุ่มไอโซฟลาโวน เช่น จินิสทีน (genistein)
5. กลุ่มชาลโคน เช่น ไอโซควิลิติจินิน (isoliquiritigenin)
6. กลุ่มออโรน เช่น ซัลฟูริติน (sulfuritin)
7. กลุ่มฟาแวน-3-อล เช่น แคทิจิน (catechin)



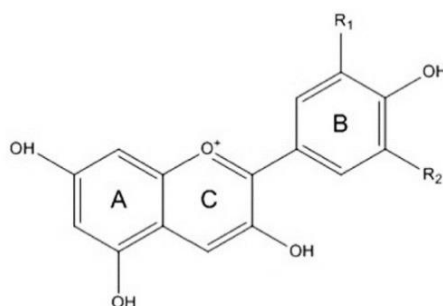
ภาพประกอบ 9 โครงสร้างพื้นฐานของฟลาโวนอยด์ (flavonoids)

ที่มา: (Balasundram et al., 2006)

แอนโทไซยานิน (anthocyanin)

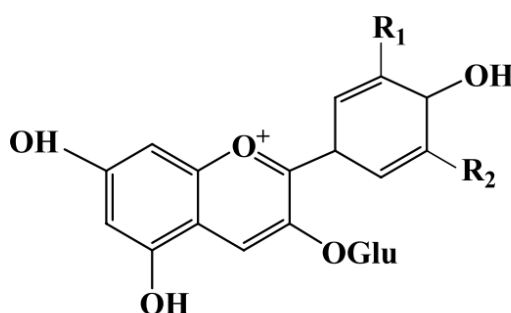
เป็นสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่พบได้มากในธรรมชาติ เป็นรงควัตถุที่มีสีแดงไปจนถึงสีม่วง หรือสีน้ำเงิน พบในแวคิวโอลของพืชซึ่งทำให้เกิดสีในใบ ดอก ผล โดยสีของแอนโทไซยานินสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามค่า pH โดยค่า pH ที่เป็นกรดแก่ ($\text{pH} < 2$) จะมีสีแดง เมื่อมีค่า pH ประมาณ 3-6 จะมีสีม่วง และเมื่อมีค่า pH เป็นด่าง ($\text{pH} > 7$) จะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน สีเขียว หรือไม่มีสี ขึ้นอยู่กับความคงตัวของโครงสร้างฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานินมีฤทธิ์ในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระและป้องกันการเกิดโรคเรื้อรังต่างๆ เช่น โรคมะเร็ง (cancer) โรคหลอดเลือดหัวใจ (cardiovascular disease) และโรคเบาหวาน (diabetes) (Ghiselli, Nardini, Baldi, & Scaccini, 1998) การศึกษาผลของแอนโทไซยานินในผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวาน ชนิดที่ 2 ซึ่งมีจำนวนผู้ป่วยเพิ่มขึ้นทั่วโลก โรคนี้สามารถต้านทานต่ออินซูลินและความผิดปกติของเซลล์ตับอ่อน และนำไปสู่ภาวะแทรกซ้อนในระดับมหภาคและจุลภาค โดยทำการศึกษาในเซลล์ และการทดลองทางคลินิกในมนุษย์ จากผลการศึกษาพบว่าแอนโทไซยานินช่วยลดระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือด และปรับปรุงความต้านทานต่ออินซูลิน ป้องกัน β -cell เพิ่มการหลั่งอินซูลินและลดการย่อยของน้ำตาลในลำไส้เล็ก ซึ่งกลไกการออกฤทธิ์ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ (Sancho & Pastore, 2012) โดยแอนโทไซยานินเกิดจากโครงสร้างคาร์บอน 15 อะตอมภายในโมเลกุล มีหมู่เบนซีน 2 หมู่ เชื่อมต่อกันด้วยคาร์บอน 3 อะตอม มีโครงสร้างแบบ C6-C3-C6 ซึ่งเป็นไกลโคไซด์ (glycoside) ของ 2-phenyl benzopyrylium หรือ flavylium cation ที่ไม่มีหมู่น้ำตาลมาเกาะ (aglycone) เรียกว่า แอนโทไซยานิดิน (anthocyanidin) (ภาพประกอบ 10) เป็น

สารที่ไม่เสถียรในธรรมชาติ เมื่อมีหมู่น้ำตาลมาเกาะในตำแหน่งที่ 3 หรือ ตำแหน่งที่ 3,5 ของแอนโทไซยานิดินจะได้แอนโทไซยานิน (anthocyanin) (ภาพประกอบ 11) โดยน้ำตาลที่มาเกาะเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) เช่น กลูโคส (glucose) กาแลกโทส (galactose) และ อราบินโนส (arabinose) นอกจากนี้ยังพบน้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharide) และน้ำตาลโมเลกุลสาม (trisaccharide) ซึ่งน้ำตาลเหล่านี้จะช่วยให้ aglycone สามารถจับกับแอนโทไซยานินได้ดีขึ้น (สุวิชา ดีหะสิงห์, 2550) ซึ่งแอนโทไซยานินในธรรมชาติมีหลายชนิด โดยมีชื่อที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) และหมู่เมทอกซิล (methoxyl; OMe) ที่มาเกาะในโครงสร้างของแอนโทไซยานิน (Banerjee, Dasgupta, & De, 2005)



ภาพประกอบ 10 โครงสร้างของแอนโทไซยานิดิน (anthocyanidin)

ที่มา: (Kamiloglu, Capanoglu, Grootaert, & Van Camp, 2015)



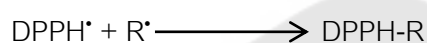
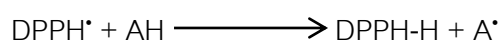
ภาพประกอบ 11 โครงสร้างของแอนโทไซยานิน (anthocyanin)

ที่มา: (Tadesse, Abebe, Chebude, Garcia, & Yohannes, 2012)

การตรวจสอบความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl radical scavenging capacity assay (DPPH assay)

เป็นวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดย 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl เป็นสารที่มีสีม่วง ดูดกลืนแสงได้ดีที่มีความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร และเป็น stable radical ในตัวทำละลายเมทานอล โดย DPPH[•] ทำปฏิกิริยากับสารอนุมูลอิสระ (antioxidant; AH) หรืออนุมูลอิสระ (radical species; R) ดังสมการ



ถ้าตัวอย่างพืชมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้สูง ความเข้มข้นของสารละลายสีม่วงจะลดลง ซึ่งมีการรายงานผลการทดลองเป็นค่า 50% effective concentration (EC₅₀) คือ ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่ทำให้ความเข้มข้นของ DPPH[•] เหลืออยู่ 50% (ปริญญ์ บัวสด, 2549)

แอนโทไซยานิน (anthocyanin)

การวิเคราะห์แอนโทไซยานินในพืชโดยใช้วิธีการสกัด ควรเลือกตัวทำละลายที่สามารถนำปริมาณแอนโทไซยานินออกมาได้มากที่สุด การศึกษาก่อนหน้านี้ทำการเนื้อองุ่นที่เหลือจากคั้นน้ำด้วยตัวทำละลาย เมทานอล เอทานอล และน้ำ พบว่า เมทานอลเป็นสารสกัดที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเอทานอล 20% และมีประสิทธิภาพมากกว่าน้ำ 73% (Metivier, Francis, & Clydesdale, 1980) และการใช้กรดร่วมกับตัวทำละลายเพื่อใช้สกัดแอนโทไซยานิน เพราะแอนโทไซยานินมีความคงตัวสูงที่ pH ต่ำ และสามารถดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด การศึกษาการตอบสนองของระบบนิเวศทางทะเลทรายของข้าวบาร์เลย์ป่า (*Hordeum spontaneum*) ต่อความแห้งแล้งและความเข้มของแสงที่มากเกินไปมีลักษณะเฉพาะโดยการเหนี่ยวนำกิจกรรมเคมีแสงที่ขึ้นกับ O₂ และการสะสมของแอนโทไซยานิน พบว่าภายใต้ความแล้ง (SB plant; xeria ecotype คือพืชที่มีรูปร่างลักษณะและปรับตัวให้เหมาะสมตามสภาพแวดล้อมแบบทะเลทราย) และ (AM plant; mesic ecotype คือพืชที่มีรูปร่างลักษณะและปรับตัวให้เหมาะสมตามสภาพแวดล้อมแบบเมดิเตอร์เรเนียน) มีความเข้มข้นของแอนโทไซยานินทั้งหมดภายใต้ภาวะแห้งแล้งเพิ่มขึ้น 230 และ 30% ในใบของ SB และ AM plant (Eppel, Keren, Salomon, Volis, & Rachmilevitch, 2013)

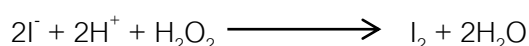
มาลอนไดอัลดีไฮด์ (malondialdehyde; MDA)

การวิเคราะห์ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ ซึ่งเป็นสารที่มีขั้วสูง ละลายน้ำได้ดี ไม่มี chromophore ทำให้ยากในการสกัดและการตรวจวัด ทำให้มีการทำปฏิกิริยากับ thiobarbituric

acid (TBA) เกิดเป็นสารสีที่เรียกว่า TBARS (thiobarbituric acid reactive substances) ได้เป็นสารสีชมพูอมส้ม (โอบา วุฑฒัน, 2549)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide; H₂O₂)

การวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ potassium iodide (KI) ซึ่งใช้อย่างแพร่หลายในด้านชีววิทยาพืช โดย KI เกิดการแตกตัวได้ iodide ions (I⁻) และทำปฏิกิริยากับ H₂O₂ เกิดเป็นสาร iodine (I₂) ดังสมการ



จากนั้น I₂ จะทำปฏิกิริยากับ I⁻ ได้ triiodide (I₃⁻) ที่มีสารสีเหลือง (Junglee, Urban, Sallanon, & Lopez-Lauri, 2014)

กลไกการตอบสนองของพืชต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและสัณฐานวิทยาภายใต้ความเครียดจากความแล้ง

ความเครียดของพืช (plant stress) คือ สภาวะหนึ่งที่เกิดกับพืชเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช (Ow, Yeo, & Sim, 2011) ความเครียดของพืช แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. ความเครียดจากปัจจัยทางชีวภาพ (biotic stress) ในพืชมีสาเหตุจากสิ่งมีชีวิต ได้แก่ ไวรัส แบคทีเรีย ฟังไจ แมลง และ วัชพืช เป็นต้น ซึ่งสาเหตุหลักของความเครียดจากปัจจัยทางชีวภาพจะส่งผลโดยตรงต่อพืชทำให้พืชไม่สามารถนำสารอาหารไปในกระบวนการเมแทบอลิซึมภายในต้นพืชได้ ก่อให้เกิดการตายของพืชในที่สุด นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสูญเสียผลผลิตก่อนและหลังเก็บเกี่ยว (Gull, Lone, & Wani, 2019)
2. ความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพ (abiotic stress) เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ผลผลิตทางการเกษตรทั่วโลกเกิดความเสียหายอย่างมาก เช่น ความแล้ง (drought) ความเค็ม (salinity) ความร้อน (heat) และน้ำท่วม (flooding) เป็นต้น (Mittler, 2006) การศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า ผลของความเครียดจากความแล้งร่วมกับการเกิดความเครียดจากร้อน ส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชอาหาร เช่น ข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์ และ ถั่วเหลือง โดยทำให้ผลผลิตของพืชลดลง (Craufurd & Peacock, 1993; Heyne & Brunson, 1940) ความเครียดจากความแล้ง (drought stress) จัดเป็นความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพ ที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการรบกวนกระบวนการเมแทบอลิซึม การพัฒนา และการผลิตมวลชีวภาพของพืช (Tankari et al., 2021) ภาพจำลองภูมิอากาศ (climate scenarios) ในอนาคตพบว่า การเกิดความแล้งจะรุนแรงเพิ่มมากขึ้น

เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของโลก (Cook, Smerdon, Seager, & Coats, 2014) ความเครียดจากความแล้ง ทำให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ค่านำไหลปากใบ (stomatal conductance) ระดับน้ำในธัญพืช ถั่ว และพืชหัวมีค่าลดลง (Daryanto, Wang, & Jacinthe, 2016) ซึ่งต้องใช้กลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาเพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างการสังเคราะห์สารอินทรีย์ต่างๆ ให้พืชมีชีวิตรอดและเจริญเติบโตต่อไปได้

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงภายใต้ความเครียดจากความแล้ง

รงควัตถุ (pigment) เป็นโมเลกุลที่ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสง และนำพลังงานแสงไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง พบอยู่ในไทลาคอยด์เมมเบรน (thylakoid membrane) ของคลอโรพลาสต์ (chloroplast) โดยรงควัตถุที่สังเคราะห์ด้วยแสงในพืชแบ่งออกได้ 3 กลุ่ม คือ คลอโรฟิลล์ แครโรทีนอยด์ และ ไฟโคบิลิน คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุที่ทำให้พืชมีสีเขียว มีหลายชนิด เช่น คลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี คลอโรฟิลล์ ซี เป็นต้น (จิรัศย์ เจนพานิชย์, 2555) โดยรงควัตถุแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นต่างๆ ได้ในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติของรงควัตถุนั้นๆ เช่น คลอโรฟิลล์ เอ ดูดกลืนแสงสีน้ำเงินในช่วงคลื่น 420 นาโนเมตร และสีแดงในช่วงคลื่น 660 นาโนเมตร ได้ดีที่สุด ส่วนคลอโรฟิลล์ บี ดูดกลืนแสงสีน้ำเงินในช่วงคลื่น 435 นาโนเมตร และสีแดงในช่วงคลื่น 643 นาโนเมตรได้ดีที่สุด เมื่อพืชได้รับความเครียดจากความแล้งอาจส่งผลต่อการสร้างและการสลายของรงควัตถุในใบพืช (Iturbe-Ormaetxe, Escuredo, Arrese-Igor, & Becana, 1998) สอดคล้องกับการศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยา ศีรวิทยา และสสารพฤษเคมี ของพืช Mexican marigold (*Tagetes minuta* L.) พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี คลอโรฟิลล์รวม และแครโรทีนอยด์ ลดลงเมื่อพืชได้รับระดับของความแล้งเพิ่มขึ้น การลดลงของรงควัตถุที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงภายใต้ความเครียดจากความแล้งเกี่ยวข้องกับการเปิด ปิดปากใบ ซึ่งการจำกัดของน้ำที่มีอยู่ในเซลล์ของพืช ส่งผลให้เกิดความเสียหายของคลอโรพลาสต์ (S. Babaei, Niknam, & Behmanesh, 2021) เช่นเดียวกับการศึกษาผลของซาลิไซลิกและไซเดียมไนโตรพอสไซด์ต่อการเจริญเติบโต รงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงและสารทุติยภูมิของพืช safflower ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแครโรทีนอยด์ลดลง เนื่องจากปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี มีความไวต่อการลดลงของค่า water potential ในดิน (Chavoushi, Najafi, Salimi, & Angaji, 2020)

คลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (Chlorophyll fluorescence) เมื่อคลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุหลักในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การดูดกลืนแสงและการถ่ายทอดพลังงานของคลอโรฟิลล์ ดังนี้

1. เริ่มจากอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากวงโคจรในสถานะพื้น (ground state) ซึ่งเป็นสถานะที่เสถียร ไปยังวงโคจรที่ห่างจากนิวเคลียสออกไป ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร เรียกว่า สถานะกระตุ้น (excited state) ซึ่งคลอโรฟิลล์จะอยู่ในสถานะนี้เป็นระยะเวลาสั้นๆ เป็นเวลา 10^{-9} - 10^{-6} วินาที และอิเล็กตรอนต้องคายพลังงานออกสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อที่จะกลับสู่สถานะพื้น (ภาพประกอบ 12) โดยปลดปล่อยพลังงานไปใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง (photochemistry)
2. ปลดปล่อยพลังงานในรูปความร้อน (heat loss)
3. ปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสงฟลูออเรสเซนซ์ (chlorophyll fluorescence) (Taiz & Zeiger, 2002)

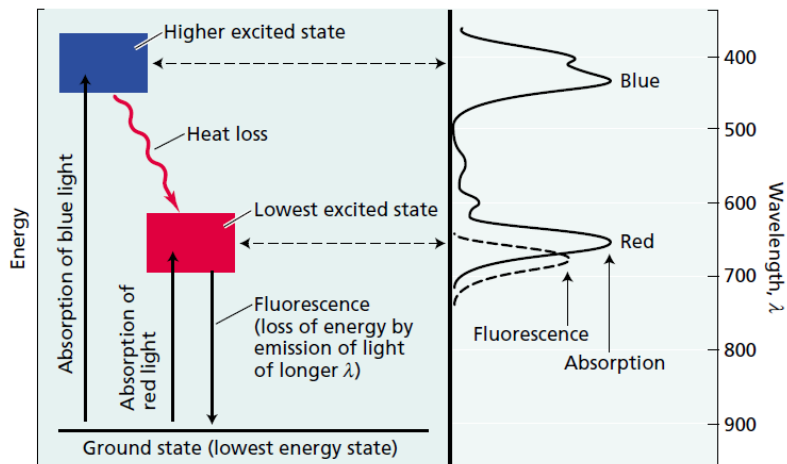
นักสรีรวิทยาพืชจึงนำคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์มาใช้ศึกษาด้านสรีรวิทยาพืช เพื่อให้ทราบถึงความผิดปกติของพืชจากการได้รับความเครียดจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม และช่วยประเมินคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลผลิตที่มีผิวสีเขียว และไม่ตัดดอกที่ใบติดอยู่ เนื่องจากเมื่อพืชได้รับความเครียด ระบบแสงสอง (photosystem II, PSII) จะถูกทำลายหรือมีการทำงานที่ผิดปกติ ทำให้การเรืองแสงของคลอโรฟิลล์มีค่าเปลี่ยนแปลงไป (นงลักษณ์ พยัคฆศิริ นาวิน, อุบล ชินวัง, & สุวัฒน์ ธีระพงษ์ธนากร, 2557) การใช้เครื่องมือคลอโรฟิลล์ฟลูออโรมิเตอร์ (chlorophyll fluorometer) เพื่อวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ และประเมินประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงและการปลดปล่อยพลังงานในรูปของความร้อนของพืชได้ (ปิยะดา ธีระกุล พิศุทธิ, 2552) โดยเริ่มจากนำใบพืชไปไว้ในที่มืดโดยศูนย์กลางปฏิกิริยา (reaction center) ของระบบแสงของพืช อยู่ในสภาพเปิด เป็นระยะเวลา 20-30 นาที (dark-adapted leaf) ซึ่งเครื่องมือคลอโรฟิลล์ฟลูออโรมิเตอร์จะมีอุปกรณ์สำหรับหนีบใบเพื่อให้พืชอยู่ในที่มืด จากนั้นตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) จะส่งผ่านไปในระบบแสงสอง ซึ่งจะอยู่ในสถานะพื้น เพื่อให้สามารถเปิดรับพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ได้สูงที่สุด ในสถานะพื้นนี้ คลอโรฟิลล์สามารถเปล่งฟลูออเรสเซนซ์ออกมาได้ต่ำสุดหรือเครื่องวัดจะอ่านค่าความเข้มแสงต่ำสุดก่อนเรียกว่า minimum fluorescence; F_0 ทั้งนี้ที่พืชได้รับรังสีดวงอาทิตย์หรือเครื่องส่องแสงความเข้มชั้นสูง อิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนย้ายไปอยู่ในสถานะกระตุ้น ค่าที่เครื่องอ่านได้เรียกว่า maximum fluorescence; F_m และพลังงานจะถูกส่งต่อไปยังระบบแสงหนึ่ง (photosystem I, PSI) อิเล็กตรอนจะสามารถรับพลังงานจากดวงอาทิตย์ต่อไป ผลต่างของค่า F_0 และ ค่า F_m เรียกว่า variable fluorescence ; F_v (ภาพประกอบ 13) คำนวณได้จาก $F_v = F_m - F_0$ และค่า F_v/F_m เป็นค่าที่เครื่องจะคำนวณออกมาเป็นตัวเลขได้โดยตรง และสามารถคำนวณได้จากค่า maximum quantum yield; ϕ_{dark} คือค่าที่ใบพืช

อยู่ในสภาพมืดและศูนย์กลางปฏิกิริยาแสงอยู่ในสภาพเปิดเต็มที่ หลังจากที่ถูกอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านระบบแสงสองสมบูรณ ได้จากสมการ (2)

$$\phi_{\text{dark}} = F_m - F_0 / F_m \dots\dots\dots (2)$$

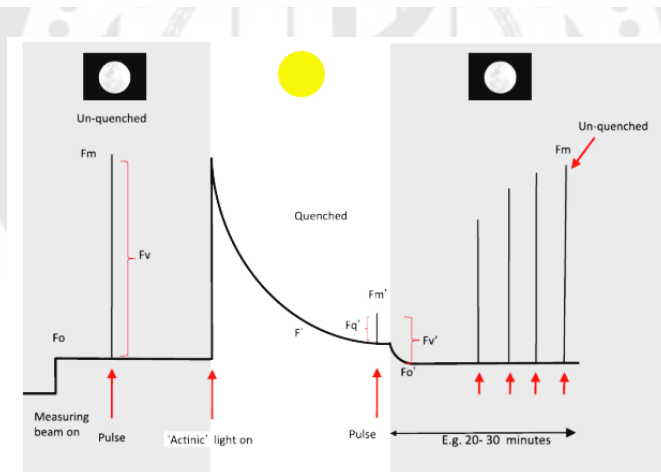
เมื่อ ϕ_{dark} = สัดส่วนของ photon ที่ใช้ในการเกิด photochemistry ในระบบแสงสอง ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่วัดได้หลังจากใบพืชอยู่ในที่มืด (ศรีนัดดา บำเพ็ญผล, 2554)

ค่า performance index (PI) เป็นค่าบอกรถึงความสามารถในการรับ photon ของระบบแสงสองในพืชเพื่อนำไปกระตุ้นให้เกิดการขนส่งอิเล็กตรอนออกจากศูนย์กลางปฏิกิริยาของระบบแสงสองไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Q_B) (สุขุมภรณ์ แสงงาม, ธนบูรณ์ พลากุลมณฑล, คณิน คงเอียง, & อภิชาติ สุขสำราญ, 2561) จากผลการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า กลไกการทำงานของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง สามารถตรวจสอบได้จากการวัดค่า F_v/F_m ซึ่งบ่งบอกถึงสัดส่วนของ photon ของศูนย์กลาง ปฏิกิริยาของระบบแสงสอง และสัมพันธ์กับค่าการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (net photosynthesis) ของพืช (Baghbani-Arani, Modarres-Sanavy, Mashhadi-Akbar-Boojar, & Mokhtassi-Bidgoli, 2017) สอดคล้องกับค่า F_0 , F_m , F_v , F_v/F_m ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญของพารามิเตอร์คลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งใช้ประเมินความเครียดทางสรีรวิทยาพืช โดย ค่า F_0 และ ค่า F_m เป็นอินดิเคเตอร์ในการวิเคราะห์ความรุนแรงจากความเครียด และการเพิ่มขึ้นของค่า F_0 จะสอดคล้องกับการลดลงของค่า F_m ที่ระดับความเครียดที่สูงขึ้น แสดงให้เห็นถึงการลดลงของส่วนรับแสง (light harvesting complex) ในระบบแสงสอง (Hazrati, Tahmasebi-Sarvestani, Modarres-Sanavy, Mokhtassi-Bidgoli, & Nicola, 2016) โดยปกติแล้วพืชที่ไม่ได้รับความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพหรือปัจจัยทางชีวภาพ จะมีค่า F_v/F_m ประมาณ 0.83 และค่านี้จะลดลงเมื่อได้รับความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพหรือปัจจัยทางชีวภาพ (Björkman & Demmig, 1987) การศึกษาการเปรียบเทียบผลของบราสซิโนสเตียรอยด์ และบราสซิโนสเตียรอยด์มีมิกต่อการปรับปรุงการสังเคราะห์ด้วยแสง ปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน ของเมล็ดข้าวภายใต้ความเครียดจากความร้อน พบว่า เมื่อพืชได้รับความเครียดจากความร้อนจะส่งผลให้ค่า F_v/F_m ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุม (Thussagunpanit et al., 2015)



ภาพประกอบ 12 ไดอะแกรมแสดงระดับพลังงานของคลอโรฟิลล์ และสเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์ของคลอโรฟิลล์

ที่มา: (Taiz & Zeiger, 2002)



ภาพประกอบ 13 ลำดับการตรวจสอบการปลดปล่อยรังสีฟลูออเรสเซนซ์ในพืช

ที่มา: (Erik H Murchie & Tracy Lawson, 2013; E. H. Murchie & T. Lawson, 2013)

อนุมูลอิสระและการป้องกันอันตรายที่เกิดจากอนุมูลอิสระภายใต้ความเครียดจากความแล้ง

อนุมูลอิสระ (free radical) คือ โมเลกุลหรือสารประกอบอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวที่อยู่อย่างอิสระ อนุมูลอิสระมีทั้งที่อยู่ในสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า สถานะที่มีประจุไฟฟ้าทั้งประจุบวกและประจุลบ ซึ่งแสดงด้วยจุดในตำแหน่งข้างบนของสัญลักษณ์ทางเคมี เช่น อนุมูล A^{\cdot} อนุมูล A^{-} และอนุมูล A^{+} ซึ่งอิเล็กตรอนเดี่ยวนี้จะไม่เสถียร มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและพยายามจับคู่กับอิเล็กตรอนอื่น จึงมีคุณสมบัติเฉพาะและมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ อนุมูลอิสระแบ่งได้ 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (reactive oxygen species; ROS) เช่น ซูเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน (superoxide anion; $O_2^{\cdot-}$) ไฮดรอกซิล (hydroxyl; $\cdot OH$) และ ไฮโดรเปอร์ออกซิล (hydroperoxyl; HO_2^{\cdot}) เป็นต้น กลุ่มที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ (reactive nitrogen species; RNS) เช่น ไนตริกออกไซด์ (nitric oxide; NO^{\cdot}) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (nitrogen dioxide; NO_2^{\cdot}) เป็นต้น และกลุ่มที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ (reactive chlorine species; RCS) เช่น อะตอมมิคคลอรีน (atomic chlorine) (โอบา วัชรคุปต์, 2549) ออกซิเจน มีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตต่างๆ โมเลกุลของออกซิเจนในธรรมชาตินับเป็นอนุมูลอิสระ เนื่องจากออกซิเจนมีอนุภาคมูลฐานของโปรตอน 8 อนุภาค อิเล็กตรอน 8 อนุภาค และนิวตรอน 8 อนุภาค เคลื่อนที่อยู่ใน 5 ออร์บิทัล แต่มีอิเล็กตรอนเดี่ยว 2 อิเล็กตรอนที่ไม่ได้เข้าคู่กัน แต่จะแยกกันอยู่ในออร์บิทัลละ 1 อิเล็กตรอน ทำให้ออกซิเจนไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยออกซิเจนในธรรมชาติที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ ซิงเกิลท์ออกซิเจน (singlet oxygen, 1O_2) และเพื่อลดอันตรายที่เกิดจากกลุ่มที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ จะมีการเปลี่ยนโมเลกุลให้เป็นน้ำเพื่อลดอันตราย เนื่องจากน้ำไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา (โอบา วัชรคุปต์, 2549) โดยปกติอนุมูลอิสระกลุ่มออกซิเจนในเซลล์พืชจะมีปริมาณต่ำ เมื่อเซลล์พืชได้รับความเครียดจากปัจจัยจากสิ่งแวดล้อม จะมีการกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระกลุ่มออกซิเจนเพิ่มขึ้นซึ่งจะเป็นพิษต่อสารชีวโมเลกุลภายในเซลล์ (ธนบุรณ พลากุลมณฑล, 2563) จึงมีกระบวนการสังเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) เพื่อทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระโดยตรงและกำจัดอนุมูลอิสระให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อกระบวนการทางชีวเคมีต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของพืช

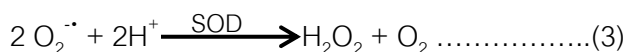
อนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นจะเป็นพิษกับสารชีวโมเลกุลภายในเซลล์ เนื่องจากสารชีวโมเลกุลไวต่อการถูกออกซิไดซ์ เพราะสารชีวโมเลกุลเหล่านี้มีอิเล็กตรอน หรืออะตอมไฮโดรเจนที่หลุดง่าย ทำให้อนุมูลอิสระเข้าไปแย่งจับที่อิเล็กตรอนแล้วดึงโมเลกุลออกจากสารชีวโมเลกุล ส่งผลให้การทำงานของสารชีวโมเลกุลภายในเซลล์ผิดปกติหรือถูกทำลาย โดยสารชีวโมเลกุลที่สำคัญ ได้แก่

โปรตีนที่เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ (enzyme) และรีเซพเตอร์ (receptor) ซึ่งลิพิด (lipid) เป็นองค์ประกอบของเมมเบรน (membrane) เมื่อลิพิดถูกออกซิไดซ์ด้วยอนุมูลอิสระจะเรียกว่า ลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน (lipid peroxidation) เป็นกระบวนการที่กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่มากกว่า 1 พันธะและฟอสโฟลิพิด (phospholipid) เสียสภาพจากการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ และอนุมูลอิสระเพียง 1 อนุมูล สามารถเกิดลิพิดเปอร์ออกซิเดชันได้หลายร้อยโมเลกุลก่อนที่จะสิ้นสุดปฏิกิริยา (โอบา วัชรคุปต์, 2549) กระบวนการนี้ทำให้เกิดความเสียหาย ต่อเมมเบรน โดยส่งผลให้เกิดการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte leakage) ออกจากเซลล์ ส่งผลทำให้โปรตีนเสียสภาพ เกิดการตายของเซลล์ และเกิดการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน รวมถึงคีโตนและอัลดีไฮด์ ซึ่งอัลดีไฮด์เป็นผลผลิตของการเกิดลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน คือ มาลอลนไดอัลดีไฮด์ (malondialdehyde; MDA) ดังนั้นในงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน จึงมักตรวจวัดปริมาณ MDA ที่สะสมในพืชร่วมกับการวัดเกิดการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ โดยกระบวนการเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน (ภาพประกอบ 14) ดังนี้

1. ปฏิกิริยาเริ่มต้นของการเกิดโซ่ (initiation phase) เริ่มจากอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนที่กรดไขมันไม่อิ่มตัว เกิดเป็นอนุมูลลิพิด (L^{\cdot})
2. ปฏิกิริยาการทวีเพิ่มขึ้น (propagation phase) อนุมูลลิพิดจากปฏิกิริยาเริ่มต้นของการเกิดโซ่ทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับออกซิเจน เกิดเป็นอนุมูลลิพิดเปอร์ออกซี (LOO^{\cdot}) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้กับลิพิดโมเลกุลอื่น เกิดเป็นลิพิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ($LOOH$)
3. สิ้นสุดปฏิกิริยา (termination phase) อนุมูลลิพิด หรือ อนุมูลลิพิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ถูกขจัดออกไปโดยทำปฏิกิริยากับสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น วิตามินอี หรือ ทั้ง 2 อนุมูลนี้ทำปฏิกิริยากันทำให้อิเล็กตรอนเดี่ยวของแต่ละอนุมูลเข้าคู่กันได้

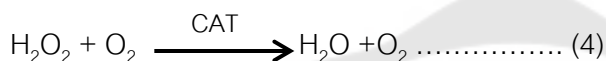
อนุมูลอิสระที่มากเกินไปจนเกินไป ทำให้เซลล์มีกลไกเพื่อควบคุมปริมาณอนุมูลอิสระ เพื่อไม่ให้มีปริมาณที่สูงเกินอันตรายโดยกระบวนการสังเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) เพื่อทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระโดยตรงและกำจัดอนุมูลอิสระให้หมดไป สารต้านอนุมูลอิสระทั้งในรูปแบบเอนไซม์และไม่ได้เอนไซม์ โดยสารต้านอนุมูลอิสระที่อยู่ในรูปเอนไซม์นั้นในระดับเซลล์ ถือเป็นกลไกที่สำคัญในการควบคุมปริมาณอนุมูลอิสระให้สมดุล เอนไซม์ที่สำคัญ (enzymatic antioxidants) ในกระบวนการดังกล่าว เช่น

1. เอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (superoxide dismutase; SOD) ทำหน้าที่ กำจัดอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ($O_2^{\cdot-}$) ให้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide; H_2O_2) ดังสมการ (3)



และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกกำจัดโดยเอนไซม์คะตะเลส (catalase; CAT) และเอนไซม์กลูตาไทโอนเปอร์ออกซิเดส (glutathione peroxidase; GPx)

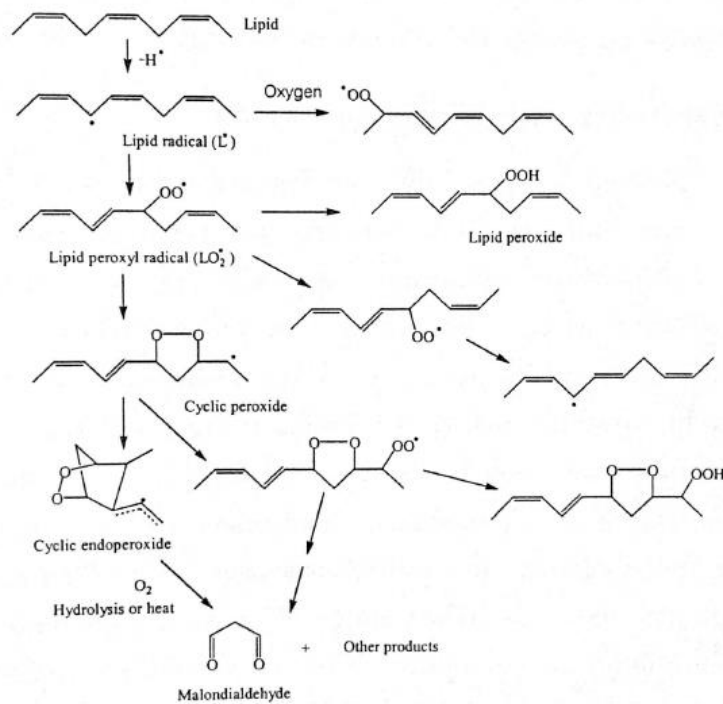
2. เอนไซม์คะตะเลส (catalase; CAT) ทำหน้าที่เปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นน้ำและออกซิเจน ดังสมการ (4)



3. เอนไซม์กลูตาไทโอนเปอร์ออกซิเดส (glutathione peroxidase; GPx) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยารีดักชันของลิพิดเปอร์ออกไซด์ (ROOH) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเม็กลูตาไทโอน (GSH) ร่วมอยู่ในปฏิกิริยานี้ด้วย ดังสมการ (5)



สำหรับสารต้านอนุมูลอิสระที่ไม่ได้อยู่ในรูปเอนไซม์ (non-enzymatic antioxidant) เช่น วิตามินซี (ascorbate) ฟลาโวนอยด์ (flavonoid) และแอนโทไซยานิน (anthocyanin) เป็นต้น (ธนากร แสงสง่า, 2557)



ภาพประกอบ 14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน

ที่มา: (โสภา วชิระคุปต์, 2549)

การศึกษาความเครียดจากความแล้งพบว่า ส่งผลต่อการเจริญเติบโต ปริมาณของสารอนุมูลอิสระ สารละลายของสารประกอบที่ไม่เป็นพิษต่อพืช ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในผักโขมสวน (*Amaranthus tricolor* L.) 4 สายพันธุ์ โดยมีรายงานว่า ผักโขมสวนทั้ง 4 สายพันธุ์มีการเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน การสะสมสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งตั้งแต่ระดับต่ำถึงระดับความเครียดจากความแล้งระดับรุนแรง ในขณะที่เดียวกันสารละลายของสารประกอบที่ไม่เป็นพิษต่อพืช และสารต้านอนุมูลอิสระที่ไม่ใช่เอนไซม์ เช่น โพรลีน แคโรทีนอยด์ วิตามินซี และฟลาโวนอยด์ เพิ่มขึ้น โดยพืชจะมีกลไกป้องกันอันตรายจากความเครียดจากความแล้งระดับต่ำถึงระดับความเครียดจากความแล้งระดับรุนแรง เพื่อลดการสะสมของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และมาลอนไดอัลดีไฮด์ (Sarker & Oba, 2018) เช่นเดียวกับการศึกษาผลของบราสซิโนสตีรอยด์ต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงและลิพิดเปอร์ออกซิเดชันของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ภายใต้สภาวะเครียดจากความร้อนพบว่า ความเครียดจากความร้อนส่งผลให้ต้นข้าวมี

การสะสมปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์เพิ่มสูงขึ้น โดยก่อนที่ต้นข้าวจะได้รับความเครียดจากความร้อนในทุกที่ที่ทำการทดลอง มีปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ใกล้เคียงกัน และต้นข้าวที่ได้รับความเครียดจากความร้อนและไม่พบบราสซิโนสเตรอยด์ มีปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์เพิ่มขึ้นหลังได้รับความเครียดจากความร้อนเป็นระยะเวลา 9 วัน เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (วีรศิลป์ สอนจรรยา et al., 2556)

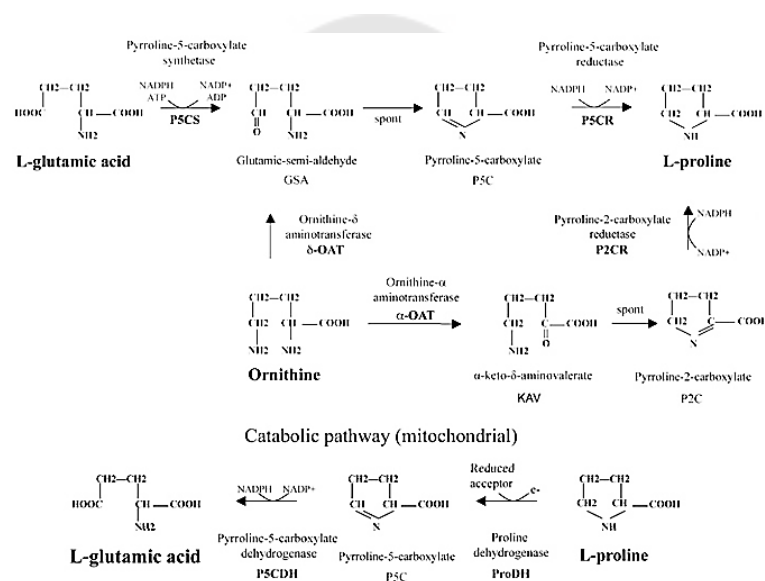
การปรับสมดุลออสโมซิสของพืชเมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง

เมื่อพืชได้รับความเครียดจากความแล้ง จะมีการปรับค่าออสโมซิสในเซลล์พืช (osmotic adjustment) โดยลดค่าออสโมติกโพเทนเชียล (osmotic potential) ทำให้ค่าวอเตอร์โพเทนเชียล (water potential) ในเซลล์ต่ำกว่าค่าวอเตอร์โพเทนเชียลในดิน ทำให้น้ำสามารถออสโมซิสเข้าสู่เซลล์เพื่อรักษาความต่งของเซลล์ และน้ำในเซลล์ยังช่วยป้องกันโปรตีนไม่ให้เสียสภาพเมื่อเซลล์ขาดน้ำ (วิไลภรณ์ บุญญกิจจินดา, 2556) โดยมีการสะสมตัวถูกละลายซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งถูกเก็บสะสมไว้ในไซโทซอล และสะสมไออนไว้ในแวคิวโอล เพื่อป้องกันไม่ให้ไออนมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ ตัวถูกละลายเหล่านี้เรียกว่าการสะสมคอมแพทิเบิล โซลูท (compatible solute) หรือสารออสโมติกโพรเทคแทนต์ (osmotic protectant) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่เป็นพิษต่อพืช สารกลุ่มนี้ได้แก่ กลุ่มของน้ำตาล เช่น ซอร์บิทอล (sorbitol) ทรีฮาโลส (trehalose) และแมนนิทอล (mannitol) เป็นต้น กลุ่มกรดอะมิโน เช่น โพรลีน (proline) โคลีน (choline) และไกลซีน-บีเทน (glycine betaine) เป็นต้น

โพรลีน (proline) เป็นกรดอะมิโนที่สังเคราะห์มาจากกรดอะมิโนกลูตาเมตในไซโทพลาสซึม หรือในคลอโรพลาสต์ (Verslues & Sharma, 2010) โดยในพืชชั้นสูงมีกระบวนการสังเคราะห์โพรลีนผ่าน 2 วิธี คือ วิธี กลูตาเมต (glutamate pathway) และวิธีออธรีนีน (ornithine pathway) ดังนี้

1. วิธีกลูตาเมต (glutamate pathway) เริ่มจาก L-glutamic acid เป็นสารตั้งต้น และเปลี่ยนเป็น glutamic-semi-aldehyde (GSA) โดยใช้เอนไซม์ pyrroline-5-carboxylate synthetase (P5 C5) และ GSA จะถูกเปลี่ยนเป็น pyrroline-5-carboxylate (P5C) ได้เอง (spontaneous) และเปลี่ยนเป็น L-proline โดยใช้เอนไซม์ pyrroline-5-carboxylate reductase (P5 CR) (Trovato, Mattioli, & Costantino, 2008) ดังภาพประกอบ 15
2. วิธีออธรีนีน (ornithine pathway) จะถูกเปลี่ยนด้วยเอนไซม์ ornithine- δ aminotransferase (δ -OAT) เป็น GSA P5C และ L-proline ตามลำดับ และ

เอนไซม์ ornithine- α -aminotransferase (α -OAT) เปลี่ยนเป็น α -keto- δ -aminotransferase (KAV) และเปลี่ยนเป็น pyrroline-2-carboxylate (P2C) ได้เอง และเปลี่ยนเป็น L-proline ตามลำดับ (Trovato et al., 2008) ดังภาพประกอบ 15 การสลายไพโรลีนจะเกิดขึ้นในไมโทคอนเดรีย โดย L-proline เปลี่ยนเป็น P5C โดยเอนไซม์ proline dehydrogenase (ProDH) และ P5C เปลี่ยนเป็น L-glutamic acid โดยเอนไซม์ pyrroline-5-carboxylate dehydrogenase (P5CDH) ซึ่งการสลายไพโรลีนจะเกิดขึ้นเมื่อพืชอยู่ในสภาพปกติ แต่ถ้าพืชได้รับความเครียดจากความแล้งจะไม่เกิดกระบวนการสลายไพโรลีน



ภาพประกอบ 15 กระบวนการสังเคราะห์และสลายไพโรลีนในพืชชั้นสูง

ที่มา: (Trovato et al., 2008)

การตรวจสอบปริมาณไพโรลีนและปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ในพืช

นินไฮดริน (ninhydrin)

นินไฮดริน (2,2-dihydroxyindane-1,3-dione) ถูกนำมาใช้ในการทดสอบกรดอะมิโน โดยนินไฮดรินเป็นสารไม่มีสีโดยจะทำปฏิกิริยากับหมู่แอลฟา-อะมิโน เกิดสารประกอบสารสีม่วงเข้ม เรียกว่า Ruhemann's purple ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงได้ดีที่สุดที่ 520 นาโนเมตร และเมื่อกรดอะมิโนไพโรลีนทำปฏิกิริยากับนินไฮดรินจะให้สารประกอบสีเหลือง (Carillo & Gibon, 2011)

แอนโทรน (anthrone)

แอนโทรนเป็นการตรวจสอบหาปริมาณคาร์โบไฮเดรต โดยน้ำตาล D- glucose ทำปฏิกิริยากับกรดเข้มข้น เช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ทำให้พันธะไกลโคซิดิกถูกทำลาย ได้ผลิตภัณฑ์

เป็น มอนอแซ็กคาไรด์ จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาการตั้งน้ำออกจากโมเลกุลได้สารประกอบ hydroxymethyl furfural จากนั้น anthrone จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบ hydroxymethyl ได้สีน้ำเงินอมเขียว (Yemm & Willis, 1954) กลไกการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาเมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง

โดยพืชสามารถปรับตัวกับความแล้งได้โดยการหลีกเลี่ยงต่อความแล้ง (drought avoidance) และการทนทานต่อความแล้ง (drought resistance) การหลีกเลี่ยงต่อความแล้งเกี่ยวข้องกับกับการปรับตัวทางสรีรวิทยาของปากใบซึ่งช่วยลดอัตราการคายน้ำ และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำภายในเซลล์ของพืชได้ การศึกษาอิทธิพลของไนโตรเจนต่อการตอบสนองทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาของพืช *Populus alba* × *P. glandulosa* ต่อความเครียดจากความแล้งพบว่า ทั้งไนโตรเจนและน้ำมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อจำนวนชั้นและความหนาของไซเลม (xylem) โดยความหนาของไซเลมลดลงเมื่อเกิดความแล้งและมีความหนาลดลงมากขึ้นภายใต้สภาวะที่มีไนโตรเจนต่ำ และเวสเซล (vessel) มีจำนวนเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดความแล้ง (Song et al., 2019) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาของต้นถั่วเหลือง (*Glycine max* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งพบว่า เมื่อเกิดความแล้งค่าการนำไหลของปากใบ (stomatal conductance) ในใบลดลง 42% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และใบพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง มีค่าดัชนีปากใบ (stomatal index) ส่วนของใบด้านบน (upper) และด้านล่างของใบ (lower) เฉลี่ย 7.74 และ 21.31 เมื่อเทียบกับใบพืชที่ไม่ได้รับความเครียดจากความแล้ง ตามลำดับ และพบการกระจายตัวของเซลล์ sclerenchyma บนคอร์เท็กซ์ (cotex) และโฟลเอ็ม (phloem) ในพืชที่ได้รับความเครียด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เซลล์ sclerenchyma ที่เพิ่มขึ้น มีบทบาทในการช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำให้กับพืชได้ (Makbul, Güler, Durmuş, & Güven, 2011)

บทบาทของซิลิคอนในการเจริญเติบโตของพืช *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel

ซิลิคอน (Si) เป็นธาตุที่พบมากเป็นอันดับที่ 2 บนพื้นโลกและสะสมในพืชหลายวงศ์ (families) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพืชวงศ์หญ้า (Gramineae) และพืชวงศ์กก (Cyperaceae) (Hattori et al., 2005) ซิลิคอนในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปซิลิกา (silica; SiO_2) หรือ ซิลิคอนไดออกไซด์ (silicon dioxide) ซึ่งพืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ พืชสามารถนำซิลิคอนไปใช้ได้อยู่ในรูปกรดมอนอซิลิก (monosilicic acid) ซึ่งมีสูตรทางเคมีคือ H_4SiO_4 หรือ $\text{Si}(\text{OH})_4$ และกรดพอลิซิลิก (polysilicic acid) (ยงยุทธ โอสถสภา, 2558) การดูดซึมของซิลิคอนโดยรากพืชพบว่าซิลิคอนอยู่ในรูปกรดซิลิกจะถูกควบคุมโดยตัวขนส่งซิลิคอน (silicon transporter) ในพืช โดยตัวขนส่ง

ซิลิคอนตัวแรกคือ *Lsi1* เป็นโปรตีนที่มีความคล้ายคลึงกับโปรตีน nodulin 26 (NOD26-like intrinsic proteins) ทำหน้าที่ควบคุมการเข้าของซิลิคอนสู่เซลล์ (influx transporter) และตัวขนส่งซิลิคอนตัวที่สองคือ *Lsi2* เป็นโปรตีนผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (transmembrane protein) ทำหน้าที่ควบคุมซิลิคอนออกนอกเซลล์ (efflux transporter) (J. F. Ma, Yamaji, Tamai, & Mitani, 2007) โดยยีนคู่เหมือนของ *Lsi1* ซึ่งพบการแสดงออกในรากของข้าวบาร์เลย์ ข้าว ข้าวสาลี และข้าวโพด ขณะที่ยีนคู่เหมือนอื่นๆ เช่น *OsLsi6*, *HvLsi6* และ *ZmLsi6* มีการแสดงออกทั้งในส่วนของใต้ดินและส่วนเหนือดิน ส่วนยีนคู่เหมือนของ *Lsi2* พบการแสดงออกในรากของข้าว ข้าวบาร์เลย์ และข้าวโพด ขณะที่ในการศึกษาในต้นผักทอง พบการแสดงออกของยีน *Lsi2* ทั้งในส่วนของใต้ดินและเหนือดิน (Deshmukh & Bélanger, 2016) ดังนั้นพืชจะมีตัวขนส่งซิลิคอนที่เฉพาะเจาะจงขึ้นอยู่กับชนิดพืช การเคลื่อนย้ายซิลิคอนไปยังส่วนเหนือดินโดยผ่านเนื้อเยื่อไซเล็ม โดยมีกระบวนการคายน้ำของพืชเป็นตัวกลางในการเคลื่อนย้ายซิลิคอนไปยังส่วนต่างๆ ของพืช และการสะสมซิลิคอนจะในรูปแบบของซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica; $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (Yamaji, Chiba, Mitani-Ueno, & Ma, 2012; เจริญ วัฒนเดชาเสรี, 2561) เนื่องจากผลกระทบของความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพมีอิทธิพลต่อกระบวนการทางสรีรวิทยา ชีวเคมี และชีวโมเลกุลในพืช ตั้งแต่กระบวนการงอกของเมล็ดจนถึงการออกดอก และก่อให้เกิดความเสียหายของผลผลิตในที่สุด (P. Singh, Tomer, Kumar, & Sinha, 2010) นอกจากนี้ได้มีการศึกษาผลของการใช้ซิลิคอนต่อการเจริญเติบโตของพืช และการศึกษาผลของซิลิคอนเพื่อช่วยลดอันตรายที่เกิดขึ้นกับพืชชนิดต่างๆ เมื่อได้รับปัจจัยทางกายภาพและชีวภาพที่ไม่เหมาะสม ดังตาราง 2

ตาราง 2 การศึกษาผลของซิลิคอนต่อความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพและการตอบสนองของทางสรีรวิทยาและสรีรวิทยาในพืช

Application of silicon	Concentration of silicon applied	Abiotic stress	Plants species	Morpho-physiological traits affected	Reference
exogenous	2.5 mM sodium metasilicate (Na ₂ SiO ₃)	Salinity stress	<i>Glycine max</i>	Improved plant growth, photosynthesis, chlorophyll content	(Lee, Sohn, Hamayun, Yoon, & Lee, 2010)
exogenous	1mM sodium silicate (Na ₂ SiO ₃)	Cadmium stress	<i>Gossypium hirtum</i>	Enhances growth and photosynthetic parameters, increase POD, CAT and SOD activities	(M. A. Farooq et al., 2013)
exogenous	2.7 mmolL ⁻¹ of sodium and potassium silicate	Salinity stress	<i>Capsicum annuum</i>	Improves chlorophyll a and b, mineral nutrients, water status, and fruit yield	(Abdelaal et al., 2020)
exogenous	1 mM (SiO ₂)	Drought stress	<i>Brassica napus L.</i>	Decrease MDA, H ₂ O ₂ , increase AsA, GSH activities	(M. Hasanuzzaman et al., 2018)
exogenous	1.7 mM (K ₂ SiO ₃) and applied with 120 mM NaCl	Drought stress	<i>Brassica juncea</i>	Reduce ROS increase chlorophyll content and RWC	(Alamri et al., 2020)
exogenous	0, 0.5, 1, 1.5, 2 mM	Drought stress	<i>Oryza sativa L.</i>	Increase photosynthetic rate transpiration rate and adjustment mineral nutrient	(Chen, Yao, Cai, & Chen, 2011)

ตาราง 3 การศึกษาการใช้ซิลิคอนทางใบที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันในพืชแต่ละชนิด

Application of silicon	Concentration of silicon applied	Plant species	References
Exogenous silicon by foliar in leave	Si (50, 100 and 150 mg L ⁻¹)	Tuberose (<i>Polianthes tuberosa</i> L.)	(Shahzad, Ali, Ahmad, Ercisli, & Anjum, 2021)
Exogenous silicon by foliar in leave	Si-NPs (0, 0.75, 1.5 and 2.25 mM)	Summer savory (<i>Satureja hortensis</i>) L.	(Farajzadeh Memari-Tabrizi, Yousefpour-Dokhanieh, & Babashpour-Asl, 2021)
Exogenous silicon by foliar in leave	Na ₂ SiO ₃ · 9 H ₂ O (100, 200 and 300 mg/L)	Soybean (<i>Glycine max</i> (L.) Merr.	(Hussain et al., 2021)
Exogenous silicon by foliar in leave	Potassium silicate 2 mM	Cowpea (<i>vigna unguiculata</i> L. cv. Doki 331)	(Menwad, Desoky, & Rady, 2018)

การศึกษาผลเสริมฤทธิ์ของไนตริกออกไซด์และซิลิคอน ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ความทนทานต่อความเครียดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและการลดการดูดซึมสารหนูในพืช *Brassica juncea* พบว่าความเป็นพิษของสารหนูส่งผลต่อการเจริญเติบโตและลดความสูงของพืช น้ำหนักแห้งของราก และยอดของพืช และพื้นที่ใบ 39%, 25%, 27% และ 23% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชุดควบคุม ขณะที่การใช้ไนตริกออกไซด์ร่วมกับซิลิคอน ช่วยเพิ่มความสูงของพืช น้ำหนักแห้งของราก และยอดของพืช และพื้นที่ใบ เมื่อได้รับความเครียดจากสารหนู 26%, 17%, 13% และ 21% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (Ahmad et al., 2021) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการประยุกต์ใช้ซิลิคอน ช่วยทำให้ข้าวฟ่างทนต่อสภาวะแล้ง (*Sorghum bicolor*) พบว่าอัตราส่วนระหว่างลำต้นและราก (shoot/root ratio) รวมทั้งน้ำหนักแห้งของรากมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่มีการใส่ซิลิคอน (Hattori et al., 2005)

ซิลิคอนต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

เมื่อพืชได้รับความเครียดจากความแล้งจะส่งผลทำให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง ซิลิคอนจึงมีบทบาทช่วยในการรักษารังควัตถุที่จำเป็นต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เช่น คลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์ เป็นต้น การศึกษาผลของการบำบัดด้วยปุ๋ยซิลิคอนต่อการสร้างปมและผลผลิตในถั่วเหลือง (*Glycine max* L.) พบว่า ต้นพืชในชุดการทดลองที่ได้รับซิลิคอน ใบมีกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ อัตราการคายน้ำของพืช และค่าน้ำไหลปากใบสูงขึ้น เมื่อเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ซิลิคอน ช่วยปรับปรุงกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของถั่วเหลืองได้ (Tripathi, Na, & Kim, 2021) สอดคล้องกับการศึกษาผลของซิลิคอนต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การแลกเปลี่ยนแก๊ส รังควัตถุที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ความสามารถในการเป็นเยื่อเลือกผ่าน และปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของสายพันธุ์ข้าวสาลีที่แตกต่างกันภายใต้ความเครียดจากความแล้งพบว่า การประยุกต์ใช้ซิลิคอนช่วยเพิ่มปริมาณน้ำสัมพัทธ์และรังควัตถุที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (คลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี คลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์) และความสามารถในการเป็นเยื่อเลือกผ่าน เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (Maghsoudi, Emam, & Pessarakli, 2016)

ซิลิคอนต่ออนุมูลอิสระและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ

จากการศึกษาที่มีมาก่อนหน้านี้พบว่า ซิลิคอนช่วยปรับปรุงการทำงานของกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ และบรรเทาความเครียดจากกระบวนการออกซิเดชัน การศึกษาผลของซิลิคอนต่อการดูดกลืนแสง กิจกรรมของสารต้านอนุมูลอิสระ และโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ในใบมะเขือเทศ (*Solanum lycopersicum* L.) ภายใต้การถูกกระตุ้นจากความเครียดจากความแล้งพบว่า ซิลิคอนมีบทบาทในการช่วยลดการสะสมของอนุมูลอิสระกลุ่มออกซิเจน (ROS) โดยช่วย

ส่งเสริมกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น เอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส เอนไซม์กลูตาไทโอนรีดักเตส และเอนไซม์โมโนดีไฮโดรแอสคอร์เบตเพอริดักเตส และช่วยป้องกันโครงสร้างของคลอโรพลาสต์จากความเสียหายจากอนุมูลอิสระที่มีความรุนแรง (Cao, Ma, Zhao, Wang, & Xu, 2015) สอดคล้องกับการศึกษาการให้ซิลิโคนจากภายนอกกับพืช เพื่อศึกษาผลของซิลิโคนต่อกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ และปฏิกิริยาดีเพนโดออกซิเดชันในใบแตงกวาภายใต้ความเครียดจากอุณหภูมิต่ำ พบว่าเมื่อมีการให้ซิลิโคนจากภายนอกร่วมกับการให้อุณหภูมิต่ำกับต้นพืช การเหี่ยวของใบแตงกวาจะลดลงเมื่อเทียบกับการให้ความเย็นแบบดั้งเดิม ในขณะที่ปริมาณซิลิโคนภายในช่วยเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระเช่น superoxide dismutase (SOD) ascorbate glutathione peroxidase (GSH-PX) (peroxidase (APX) glutathione (GSH) monodehydroascorbate reductase (MDHAR) glutathione reductase (GR) และ ascorbic acid (AsA) ลดระดับของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน และปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ อาจเป็นเพราะว่าการให้ซิลิโคนภายนอกกับต้นพืชนั้น ช่วยชักนำให้การสะสมของซิลิโคนภายในเซลล์พืชเพิ่มขึ้น และด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีการเพิ่มกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระและลดการเกิดดีเพนโดออกซิเดชันที่เกิดจากความเครียดจากอุณหภูมิต่ำ (chilling stress) ในพืชดังกล่าวได้ (Liu, Lin, Xu, Wang, & Bai, 2009)

ซิลิโคนต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเซลล์

จากการศึกษาที่มีมาก่อนหน้านี้พบว่าซิลิโคนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเซลล์ของพืช เช่น ช่วยเพิ่มความหนาของผนังเซลล์ ความหนาของใบ เมื่อได้รับความเครียดที่เกิดจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม การศึกษาผลของซิลิโคนลดความเป็นพิษของแมงกานีสในสายพันธุ์ข้าวโพดที่ไวต่อแมงกานีสและทนต่อแมงกานีส พบว่าทริตเมนต์ที่ไม่ได้รับซิลิโคน บริเวณเนื้อเยื่อผิว ชั้นมีโซฟิลล์จะแบนและช่องว่างระหว่างเซลล์เล็กกว่าเมื่อเทียบกับชุดควบคุม และข้าวโพดสายพันธุ์ Kneja 605 มีความหนาของใบเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับทริตเมนต์ที่ได้รับแมงกานีสและไม่ได้รับซิลิโคน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซิลิโคนชักนำให้มีการลดความเป็นพิษของแมงกานีสในข้าวโพดสายพันธุ์ Kneja 605 โดยการเพิ่มความหนาของชั้นอีพิดERMัล (epidermal cell) (Doncheva et al., 2009) นอกจากนี้ซิลิโคนยังช่วยปรับปรุงการสร้างไทลาคอยด์ใน bundle sheath cell ของคลอโรพลาสต์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาผลของซิลิโคนช่วยลดความเป็นพิษของแคดเมียมโดยการเพิ่มอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ bundle sheath cell ของคลอโรพลาสต์ในข้าวโพด (*Zea mays* L., hybrid Jozefina) พบว่าใน bundle sheath cell ชุดควบคุมและทริตเมนต์ที่ได้รับซิลิโคนยังคงมีไทลาคอยด์แบ่งแยกกันอย่างชัดเจน

ขณะที่การเพิ่มของแคดเมียมส่งผลให้โครงสร้างไทลาคอยตีในคลอโรพลาสต์มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของ starch grain ใน bundle sheath cell ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซิลิคอนช่วยให้การจัดเรียงตัวของไทลาคอยตีในคลอโรพลาสต์เกิดได้ดีขึ้นเมื่อได้รับความเครียดจากแคดเมียม (Vaculík, Pavlovič, & Lux, 2015)

การวิเคราะห์ปริมาณซิลิคอน

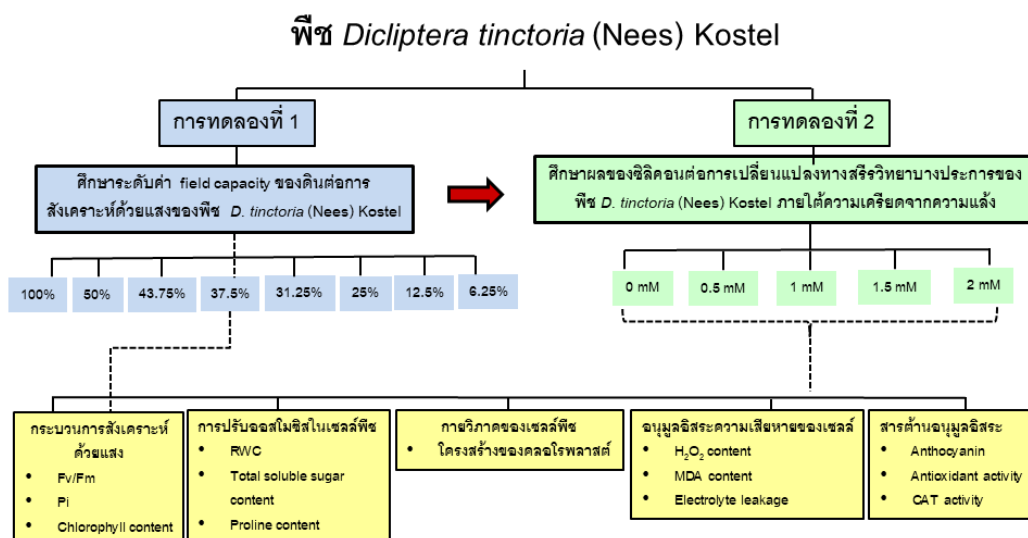
การวิเคราะห์ปริมาณซิลิคอนโดยใช้เครื่อง scanning electron microscope and energy dispersive x-ray microanalysis system (SEM-EDS) เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานที่เข้าร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งมีบทบาทสำคัญในปัจจุบันในการวิเคราะห์ธาตุทั้งทางด้านกายภาพ และชีวภาพ โดยการกระตุ้นวัตถุตัวอย่างโดยอนุภาคพลังงานสูง ได้แก่อนุภาคอิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกลอยออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) อนุภาคจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่มาอย่างรวดเร็ว เมื่ออนุภาคนี้ผ่านเข้ามาในอะตอมของวัตถุตัวอย่างบางส่วนก็จะมีโอกาสที่จะชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอม การชนนี้ก็จะถ่ายทอดพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นและหลุดออกไปจากอะตอม เป็นอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้เกิดที่ว่างขึ้น ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นสูงกว่าจะตกลงมาอยู่แทนที่ ในการตกลงมาอยู่ชั้นต่ำกว่านี้ อิเล็กตรอนจะปล่อยหรือคายพลังงานที่มีอยู่มากเกินระดับที่ต้องการออกไป พลังงานที่คายออกมานี้จะอยู่ในรูปของรังสีเอกซ์เฉพาะ (characteristic x-ray) ซึ่งจะบอกได้ว่าวัตถุตัวอย่างมีองค์ประกอบของธาตุใดบ้าง เนื่องจากแต่ละธาตุมีรังสีเอกซ์เฉพาะที่ไม่เหมือนกัน (สัมพันธ์ วงศ์นาวา, 2547)

การวิเคราะห์ปริมาณซิลิคอนโดยใช้วิธี micro determination นำตะกอนซิลิกามาหลอมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปกรดซิลิซิก ซึ่งเป็นรูปที่สามารถละลายน้ำได้และนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตรและคำนวณหาปริมาณซิลิคอนจากสมการ (Nayar, Misra, & Patnaik, 1975; เวนนี วัฒนเดชเสวี, 2561) ดังสมการ

$$\text{ปริมาณซิลิคอน (\%)} = \frac{\text{ppm จาก standard curve} * 50 * 100 * \text{ปริมาตรสุดท้าย (ml)}}{\text{ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ (ml)} * \text{น้ำหนักแห้งพืช (g)} * 10^6}$$

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้



ภาพประกอบ 16 กรอบวิจัยของการทดลอง

วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี

1. วัสดุและอุปกรณ์สำหรับเตรียมต้นกล้า ได้แก่
 - กิ่งพันธุ์ *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel
 - แกลบดำ
 - ดินผสม (ประกอบด้วย ดินร่วน ขุยมะพร้าว ใบก้ามปู (อัตราส่วน 1:1:1))
 - ถูปลูก
 - กระถาง
2. วัสดุและอุปกรณ์สำหรับวัดคุณสมบัติและความชื้นในดิน ได้แก่
 - เครื่อง soil moisture meter
3. วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบพืช
 - เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
 - ตู้อบความร้อน
 - กรรไกร

4. วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงและปริมาณรงควัตถุที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่
 - เครื่อง chlorophyll fluorometer (Pocket PEA, Hansatech Instruments Ltd, King's Lynn, Norfolk, UK)
 - เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (รุ่น Unico S1200 Visible Spectrophotometer, United Products & Instruments, Inc.)
 - Dimethyl sulfoxide (DMSO)
5. วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ที่สะสมในใบพืช
 - เครื่องเขย่าสาร
 - อ่างควบคุมอุณหภูมิ
 - เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (รุ่น Unico S1200 Visible Spectrophotometer, United Products & Instruments, Inc.)
 - กระดาษกรอง (Whatman No.1)
 - anthrone
 - 80% (v/v) ethanol
 - 70% (v/v) sulfuric acid
6. วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนที่สะสมในใบพืช
 - เครื่องปั่นเหวี่ยง
 - เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (รุ่น Unico S1200 Visible Spectrophotometer, United Products & Instruments, Inc.)
 - กระดาษกรอง (Whatman No.1)
 - acid ninhydrin
 - glacial acetic acid
 - 3% (w/v) sulfosalicylic acid
 - toluene
7. วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการศึกษาลักษณะทางกายวิภาคของพืช
 - กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Leica DM 2500 & DM2500 LED, Leica Microsystems (SEA) Pte Ltd., Singapore)
 - acetic acid

- formalin
 - ethanol 95% (v/v)
 - น้ำกลั่น
8. วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ
- เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (รุ่น Unico S1200 Visible Spectrophotometer, United Products & Instruments, Inc.)
 - 2,2- diphenyl-1-picryl-hydrazyl radical (DPPH)
 - ethanol 80% (v/v)
9. วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน
- เครื่องปั่นเหวี่ยง
 - เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (รุ่น Unico S1200 Visible Spectrophotometer, United Products & Instruments, Inc.)
 - กระดาษกรอง (Whatman No.1)
 - ascorbic acid
 - acidic methanol
 - methanol
 - t-butyl hydroquinone
 - hydrochloric acid
10. วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- เครื่องปั่นเหวี่ยง
 - เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (รุ่น Unico S1200 Visible Spectrophotometer, United Products & Instruments, Inc.)
 - กระดาษกรอง (Whatman No.1)
 - 0.1% (w/v) trichloroacetic acid (TCA)
 - 10 mM potassium phosphate buffer
 - 1M potassium iodide
 - 1% (w/v) TCA
11. วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์

- เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (รุ่น Unico S1200 Visible Spectrophotometer, United - Products & Instruments, Inc.)
 - กระดาษกรอง (Whatman No.1)
 - 0.1% (w/v) trichloroacetic acid (TCA)
 - 0.5% (w/v) thiobarbituric acid
 - 20% (w/v) TCA
12. วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์การรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์
- เครื่องวัดการนำไฟฟ้า
 - อ่างควบคุมอุณหภูมิ
 - น้ำกลั่น
13. วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์การเปิดปิดปากใบพืช
- เครื่อง AP4 porometer (AP4 Delta-T Devices Ltd Cambridge, UK)
14. วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระที่สะสมในใบพืช
- เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงยูวี (UV-VIS Spectrometer รุ่น UV-1800, Shimadzu Scientific Instruments, Japan)
 - 10 mM potassium phosphate buffer
 - 4% (w/v) polyvinyl pyrrolidone (PVP)
 - 0.03% hydrogen peroxide

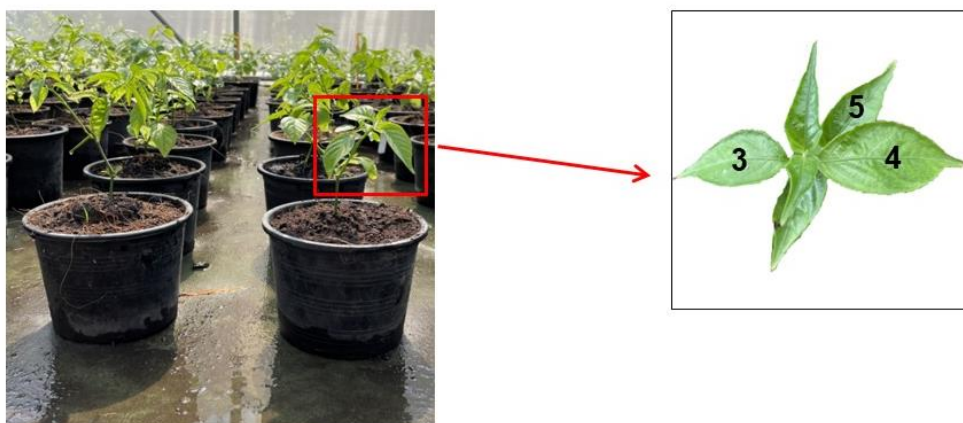
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomization Design; CRD) โดยนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) ตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's multiple-range test (DMRT) และวิเคราะห์ t-test แบบ independent ด้วยโปรแกรม SPSS version 20 (Statistics package for the social sciences)

การทดลองที่ 1 การหาระดับของ field capacity ของดินเหมาะสมต่อการจำลองสถานะแล้งในพืช *D. tinctoria*

1.1 การเตรียมต้นพืชสำหรับการทดลอง

เตรียมตัวอย่างต้นพืชในการทดลอง โดยการปักชำต้นพืช *D. tinctoria* ด้วยวัสดุปลูกที่ประกอบด้วยแกลบดำ ปลูกไว้ในโรงเรือนทดลอง อาคาร 10 คณะวิทยาศาสตร์ โดยให้ได้รับแสงจากธรรมชาติและรดน้ำทุกวัน และเริ่มทำการทดลองเมื่อต้นมีอายุ 90 วัน สภาพต้นสมบูรณ์ที่มีขนาดและความสูงสม่ำเสมอทุกต้น และควบคุมความชื้นด้วยเครื่องมือวัดความชื้นในดิน ร่วมกับการชั่งน้ำหนักกระถาง ร่วมกับการเก็บผลการทดลองทุก ๆ 3 วัน เป็นระยะเวลา 15 วัน สุ่มเก็บตัวอย่างใบที่อยู่ลำดับที่ 3-5 เมื่อนับจากปลายยอด จำนวน 4 ช้ำ ของแต่ละชุดการทดลอง ดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 การเก็บตัวอย่างใบลำดับที่ 3-5

1.2 วิธีการหาค่าความจุภาคสนามของดิน (field capacity; FC)

ตากดินให้แห้ง ชั่งน้ำหนักกระถางและใยแก้ว จากนั้นใส่ดินที่ตากแห้งแล้วในกระถางที่มีใยแก้วรองก้นกระถาง ชั่งน้ำหนักกระถาง ใยแก้วและดินที่ตากแห้งแล้ว จากนั้นใส่น้ำ ปริมาตร 2

ลิตร ลงไปในกระถางที่มีกะละมังรองก้นกระถาง ตั้งทิ้งไว้ให้น้ำไหลออกจากกระถางเป็นระยะเวลา 3 วัน และบันทึกปริมาตรน้ำที่ไหลออกจากกระถางทุกวัน โดยการใช้กระบอกตวงวัดปริมาตรน้ำที่ไหลออกจากกระถาง และชั่งน้ำหนักกระถาง โยแก้วและดินซึ่งมีปริมาตรน้ำที่ดินสามารถอุ้มได้มากที่สุด พร้อมทั้งวัดค่าความชื้นในดินด้วยเครื่องวัดความชื้นของดินและคำนวณหาน้ำหนักที่ดินสามารถอุ้มน้ำได้มากที่สุดหรือไม่มีช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดิน เนื่องจากดินอึดตัวด้วยน้ำแคพิลลารี (capillary water) ซึ่งเป็นความชื้นทั้งหมดที่เหลืออยู่หลังจากมีการปล่อยน้ำให้ไหลตามแรงดึงดูดของโลก ความชื้นของดิน ณ จุดนี้เรียกว่าความจุภาคสนามของดิน เพื่อนำมาศึกษาในการกำหนดสภาวะแล้งในการทดลองขั้นต่อไป

1.2.1 วิธีการกำหนดค่า field capacity จำนวน 5 ระดับ

การหาระดับความชื้นที่เหมาะสมต่อการจำลองสภาวะแล้งในพืช *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 8 ชุดการทดลอง ๆ ละ 4 ซ้ำ ๆ ละ 4 ต้น ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 100% FC

ชุดการทดลองที่ 2 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 50% FC

ชุดการทดลองที่ 3 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 43.75% FC

ชุดการทดลองที่ 4 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 37.5% FC

ชุดการทดลองที่ 5 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 31.25% FC

ชุดการทดลองที่ 6 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 25% FC

ชุดการทดลองที่ 7 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 12.5% FC

ชุดการทดลองที่ 8 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 6.25% FC

บันทึกค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงได้แก่ คลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (chlorophyll fluorescence; Fv/Fm) performance index (Pi) ปริมาณรงควัตถุในใบพืช (pigment content) และปริมาณน้ำสัมพัทธ์ (relative water content)

ทำการทดลองเพื่อหาระดับความแล้งต่ำสุดของที่ดินที่พืชจะสามารถเจริญเติบโตได้ เพื่อนำไปใช้ในการทดลองที่ 2 ต่อไป

การทดลองที่ 2 เพื่อศึกษาผลของซิลิโคนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืช *D.tinctoria* ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง

2.1 การศึกษาผลของซิลิโคนที่ความเข้มข้นแตกต่างกันภายใต้ความเครียดจากความแล้ง

พืช *D.tinctoria* อายุ 90 วัน สภาพต้นสมบูรณ์ที่มีขนาดและความสูงสม่ำเสมอทุกต้น และควบคุมความชื้นด้วยเครื่องมือวัดความชื้นในดินร่วมกับการชั่งน้ำหนักกระถาง ร่วมกับการเก็บผลการทดลองทุก ๆ 3 วัน เป็นระยะเวลา 18 วัน เลือกรุ่นการทดลองที่มีระดับความแล้งต่ำสุดของที่ดินที่พืชจะสามารถเจริญเติบโตได้จากการทดลองที่ 1.2.1 จากนั้นศึกษาผลของซิลิโคนต่อการตอบสนองทางสรีรวิทยาบางประการภายใต้ความเครียดจากความแล้ง ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 25% FC และไม่พ่นซิลิโคน

ชุดการทดลองที่ 2 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 mM

ชุดการทดลองที่ 3 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 mM

ชุดการทดลองที่ 4 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

ชุดการทดลองที่ 5 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 2 mM

โดยการพ่นสารซิลิโคน ปริมาตร 40 มิลลิลิตรต่อกระถางให้ทั่วทั้งต้น จากนั้นสุ่มเก็บตัวอย่างใบจำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ต้น ของแต่ละชุดการทดลอง ดังภาพประกอบ 19 จากนั้นนำต้นพืชมาทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา โดยบันทึกค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่ คลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (chlorophyll fluorescence; Fv/Fm), performance index (Pi) และปริมาณรงควัตถุในใบพืช (pigment content) เมื่อได้ความเข้มข้นของซิลิโคนที่ 1.5 mM ซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชภายใต้ความเครียดจากความแล้งจากหัวข้อที่ 2.1 จากนั้นนำมาศึกษาผลของซิลิโคนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาสารพฤกษเคมี และกิจกรรมของสารต้านอนุมูลอิสระของพืช *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel ภายใต้ความเครียดจากความแล้งในหัวข้อที่ 2.2 ดังนี้

2.2 การศึกษาผลของซิลิโคนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สารพฤกษเคมี และสารต้านอนุมูลอิสระของพืช *D.tinctoria* ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง

พืช *D.tinctoria* อายุ 90 วัน สภาพต้นสมบูรณ์ที่มีขนาดและความสูงสม่ำเสมอทุกต้น และควบคุมความชื้นด้วยเครื่องมือวัดความชื้นในดินร่วมกับการชั่งน้ำหนักกระถาง ร่วมกับการเก็บผลการทดลองทุก ๆ 3 วัน เป็นระยะเวลา 18 วัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ๆ ละ 5 ซ้ำ ๆ ละ 3 ต้น ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 100% FC และไม่พ่นสารซิลิโคน

ชุดการทดลองที่ 2 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 100% FC และพ่นสารซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

ชุดการทดลองที่ 3 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 25% FC และพืชน้ำที่ความเข้มข้น 1.5 mM ชุดการทดลองที่ 4 ดินที่มีความชื้น ที่ระดับ 25% FC และพืชน้ำที่ความเข้มข้น 1.5 mM โดยจำลองสภาวะแล้งให้กับต้นพืชเป็นระยะเวลา 3 วัน หลังจากนั้นทำการให้น้ำกับต้นพืช (recovery) เพื่อให้กลับสู่สภาวะปกติ จากนั้นศึกษาผลของซิลิโคนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สารพฤกษเคมี และสารต้านอนุมูลอิสระภายใต้ความเครียดจากความแล้ง ดังต่อไปนี้

2.2.1 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบพืช (relative water content; RWC)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบ จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ต้น ของแต่ละชุดการทดลอง ทำการบันทึกข้อมูลค่าปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบของพืช *D.tinctoria* โดยตัดตัวอย่างใบน้ำหนัก 0.04 กรัม จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักใบ (leaf fresh weight; F.W.) แล้วนำใบพืชมาแช่ในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำใบพืชมาซับด้วยกระดาษทิชชูแล้วชั่งน้ำหนักใบหลังแช่น้ำ (leaf turgid weight; T.W.) นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ละชั่งน้ำหนักใบแห้ง (leaf dry weight; D.W.) จากนั้นนำมาคำนวณสูตรของ Barrs and Weatherley (1962) ดังนี้

$$RWC = [(F.W. - D.W.) / (T.W. - D.W.)] \times 100$$

2.2.2 การวัดประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photochemical efficiency of PSII reaction)

วัดค่า Fv/Fm และค่า Pi ของใบพืช *D.tinctoria* ด้วยเครื่อง chlorophyll fluorometer โดยสุ่มเก็บตัวอย่างใบ จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ต้น ของแต่ละชุดการทดลอง จากนั้นใช้เครื่องมือสำหรับหนีบใบเพื่อให้ใบอยู่ในที่มืด (dark-adapted) เป็นระยะเวลา 25-30 นาที และวัดด้วยเครื่องคลอโรฟิลล์ฟลูออโรมิเตอร์ (chlorophyll fluorometer)

2.2.3 ปริมาณรงควัตถุในใบพืช (pigment content)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบ จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ต้น ของแต่ละชุดการทดลอง วิเคราะห์รงควัตถุในใบพืช โดยตัดแปลงวิธีการของ Makinde and Akande (2012) โดยตัดเนื้อเยื่อใบของพืช *D.tinctoria* น้ำหนัก 0.01 กรัม แล้วแช่ในสารละลาย dimethyl sulfoxide (DMSO) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ในที่มืด อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารสกัดที่ได้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ ตามวิธีการของ Sumanta, Haque, Nishika, and Suprakash (2014) และวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance; A) ด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 480, 649 และ 665 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และปริมาณแคโรทีนอยด์และรายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมของน้ำหนักสด (mg/g F.W.) จากสมการ

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

Chlorophyll b content (mg/g leaf F.W.) = $25.06(A_{649}) - 6.5(A_{665})$

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

เมื่อ A = Absorbance, C_a = Chlorophyll a, C_b = chlorophyll b

2.2.4 ปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ (total soluble sugar)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบ น้ำหนัก 0.2 กรัม จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ต้น ของแต่ละชุดการทดลอง แช่ลงในไนโตรเจนเหลวและเก็บที่อุณหภูมิต่ำ - 20 องศาเซลเซียส และนำมาสกัดน้ำตาลโดยดัดแปลงวิธีการของ Robbins and Pharr (1987) โดยบดตัวอย่างใบด้วยไนโตรเจนเหลว และเติมเอทานอล 80% (v/v) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง (whatman No.1) ดูดสารละลายใสด้านบน (supernatant) 0.5 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย anthrone 4.5 มิลลิลิตร ผสมสารละลายให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร (vortex mixer) จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิต่ำ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณหาปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ รายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมของน้ำหนักสด (mg/g F.W.) แล้วเทียบกับกราฟมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคส

2.2.5 ปริมาณโพรลีน (proline content)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบ น้ำหนัก 0.2 กรัม จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ต้น ของแต่ละชุดการทดลอง ทำการวิเคราะห์หาปริมาณโพรลีน ตามวิธีการของ Bates, Waldren, and Teare (1973) เติมสารละลาย 3% (w/v) sulfosalicylic acid 10 มิลลิลิตร กรองด้วยกระดาษกรอง จากนั้นดูดสารละลายส่วนใส 2 มิลลิลิตร เติมสารละลาย acid ninhydrin 2 มิลลิลิตร และเติมสารละลาย glacial acetic acid ผสมสารให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร และนำไปบ่มที่อุณหภูมิต่ำ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที ทำการหยุดปฏิกิริยาโดยแช่ในน้ำแข็ง แล้วเติม toluene ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นผสมสารให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร ซึ่งจะเกิดการแยกชั้นของสารละลาย toluene ดูดชั้นที่มี chromophore สีชมพูหรือสีแดง มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ของสารละลายโพรลีนที่ทราบความเข้มข้น มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโพรลีนกับค่าการดูดกลืนแสงจากกราฟมาตรฐานโพรลีน รายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมของน้ำหนักสด ($\mu\text{g/g F.W.}$)

2.2.6 วิเคราะห์ลักษณะทางกายวิภาคบางประการของพืช *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel

2.2.6.1 การศึกษากายวิภาคของใบทางด้านตัดขวาง

สุ่มเก็บตัวอย่างใบของแต่ละทรีตเมนต์ จำนวน 5 ต้น ต้นละ 3 ใบและศึกษา 3 จุดคือ บริเวณฐานใบ บริเวณกลางใบ และบริเวณปลายใบ ด้วยวิธีพาฟินตามวิธีการของ Johansen (1940) โดยล้างตัวอย่างพืชด้วยน้ำให้สะอาด เช็ดให้แห้ง แล้วใช้มีดโกนตัดตัวอย่างใบให้มีความกว้างและยาวประมาณ 0.5 เซนติเมตร และแช่ใน 70% FAA นำขึ้นส่วนที่แช่ใน FAA มาเข้าเครื่องดูดอากาศเป็นระยะ 2 วัน ดูดน้ำออกด้วย 70% ethanol 3 ครั้ง แช่เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำมาแช่ใน TBA (tertiary butyl alcohol) ที่ความเข้มข้นของ ethyl alcohol 5 ระดับ คือ 100% 95% 70% 50% 30% แช่ในแต่ละระดับเป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นแช่ใน pure TBA 24 ชั่วโมง ทำการแทนที่ alcohol โดยใช้พาราฟินด้วย paraffin oil และ TBA อัตราส่วน 1:1 เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนพาราฟิน ทุก 6 ชั่วโมง 3 ครั้ง และฝังชิ้นตัวอย่างลงในพาราฟินบริสุทธิ์ในเครื่องฝังเนื้อเยื่อในพาราฟิน เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ตัดแบ่งพาราฟินออกเป็นชิ้นเล็กๆ และนำไปติดบนแท่งไม้ ตัดชิ้นส่วนตัวอย่างด้วยเครื่อง rotary microtome ให้มีความหนา 8-10 ไมครอน นำส่วนที่ตัดได้มาติดลงบนแผ่นสไลด์โดยใช้น้ำยา Hanpt's adhesive และ 3% formalin แล้วทำให้แห้งด้วยเครื่องอุ่นสไลด์ การเตรียมตัวอย่างก่อนย้อมสี นำสไลด์ที่ติดชิ้นตัวอย่างล้างพาราฟินออกโดยแช่ใน xylene 5 นาที แล้วนำไปแช่ในสารละลายที่มีส่วนผสมของ xylene และ 100% alcohol อัตราส่วน 1:1 เป็นระยะเวลา 5 นาที และแช่สไลด์ในสารละลายที่มีส่วนผสมของ alcohol และ ether อัตราส่วน 1:1 และแช่ใน ethyl alcohol 5 ระดับ คือ 100% 95% 70% 50% 30% แช่ในระดับเป็นระยะเวลา 5 นาที แล้วแช่ในน้ำสะอาดเป็นระยะเวลา 10 นาที การย้อมสีด้วย 1% safranin O ในน้ำกลั่น 8-10 ชั่วโมง นำแผ่นสไลด์มาล้างน้ำสะอาด 3 ครั้ง และจุ่มลงใน 30% 50% 70% และ 95% ethyl alcohol จากนั้นย้อมด้วย 1% fast green เป็นระยะเวลา 5-10 วินาที ล้างด้วย 100% ethyl alcohol หลังจากนั้นนำไปแช่สารละลายที่มีส่วนผสมของ xylene และ 100% ethyl alcohol อัตราส่วน 1:1 เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำ cover slip มาปิดโดยใช้ Canada balsom ช่วยยึดสไลด์นำสไลด์มาศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

2.2.6.2 การศึกษาโครงสร้างของคลอโรพลาสต์

ศึกษาโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (transmission electron microscope; TEM) ญัฐสุนิ ตลิ่งไธสง (2551) ตามขั้นตอน โดยกำจัดฝุ่นผงหรือเมือกที่เกาะตามผิวใบ โดยทำความสะอาดใบพืชด้วยสารละลาย normal saline ตัดตัวอย่างใบพืชด้วยมีด

โขน โดยเฉพาะบริเวณที่ต่อการทำการศึกษาให้มีความกว้างและความยาวประมาณ 0.5 มิลลิเมตร แล้วแช่ในสารละลาย FAA เพื่อรักษาสภาพเนื้อเยื่อ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นส่วนตัวอย่าง 0.1 M phosphate buffer pH 7.2 จำนวน 3 ครั้งเพื่อล้างสารละลาย FAA จากนั้นนำชิ้นส่วนตัวอย่างไปแช่ในสารละลาย 1% osmium tetroxide เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง นำชิ้นส่วนตัวอย่างล้างด้วย phosphate buffer จำนวน 3 ครั้ง แล้วดึงน้ำออกจากชิ้นตัวอย่างโดยแช่ใน 30% 50% 70% 95% และ 100% ethyl alcohol ตามลำดับขั้นตอนละ 10 นาที ทำตัวอย่างให้แห้งสนิทด้วย critical point drying โดยผ่านตัวอย่างลงใน amyl acetate แล้วนำเข้าเครื่องทำให้แห้ง เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง และนำชิ้นส่วนตัวอย่างที่แห้งสนิทติดบนฐานรองรับด้วยกาวเงิน แล้วนำไปเคลือบด้วยทองด้วยเครื่อง sputter coater จากนั้นนำไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope; TEM)

2.2.7 การวัดความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (free radical scavenging activity)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบ น้ำหนัก 0.2 กรัม จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ต้น ของแต่ละชุดการทดลอง ทำการวิเคราะห์หาปริมาณความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ดัดแปลงวิธีการของ Pham, Tang Nguyen, Van Vuong, Bowyer, and Scarlett (2017) โดยใช้สารที่มีคุณสมบัติเป็นอนุมูลอิสระ คืออนุมูลอิสระ (D (2,2- diphenyl-1-picryl-hydrazyl radical; DPPH)) โดยบดตัวอย่างด้วยไนโตรเจนเหลว เติม 80% Ethanol ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร บ่มในอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำสารสกัดตัวอย่างพืช 0.2 มิลลิลิตร เติม 0.1 mM DPPH ที่ละลายในเอทานอล 80% (v/v) บ่มในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 30 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาคำนวณหา % inhibition จากสูตรดังนี้

$$\% \text{ inhibition} = [(A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}) / A_{\text{control}}] \times 100$$

เมื่อ A_{control} = ค่าดูดกลืนแสงของปฏิกิริยาที่ไม่มีสารสกัด (extraction)

A_{sample} = ค่าดูดกลืนแสงของปฏิกิริยาที่มีตัวทำปฏิกิริยา (reagent) และสารสกัด (extraction)

% inhibition ของวิตามินซีนำมาใช้เป็นกราฟมาตรฐาน และรายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมของ ไทรล็อก (trolox) (mg TE/g F.W.)

2.2.8 ปริมาณแอนโทไซยานิน (anthocyanin content)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบ จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ต้น ของแต่ละชุดการทดลอง ทำการวิเคราะห์หาปริมาณแอนโทไซยานิน ตามวิธีการของ Rabino and Mancinelli (1986) โดยใช้ตัวอย่างพืช 0.2

กรัมบ่มใน acidic methanol ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ประกอบด้วย 80% MeOH, 0.16% ascorbic acid, 0.16% t-butyl hydroquinone และ 0.1% HCl ในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง บ่มเหวี่ยงด้วยความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 4 นาที นำสารละลายใส่ในหลอดทดลองและเติม acidic methanol ปริมาตร 600 ไมโครลิตร นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 530 และ 657 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณแอนโทไซยานินโดยใช้สูตร ดังนี้

$$Q_{\text{anthocyanin}} = (A_{530} - 0.25 \times A_{657}) \times M^{-1}$$

เมื่อ $Q_{\text{anthocyanin}}$ = ปริมาณแอนโทไซยานิน

A_{530} และ A_{657} = ค่าดูดกลืนแสง

M = น้ำหนักของตัวอย่างพืชที่ใช้สกัด (กรัม)

2.2.9 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide content; H_2O_2)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบ จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ต้น ของแต่ละชุดการทดลอง ทำการวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตามวิธีการของ Velikova, Yordanov, and Edreva (2000) บดตัวอย่าง 0.2 กรัม ด้วยไนโตรเจนเหลว เติมสารละลาย 0.1% (w/v) trichloroacetic acid (TCA) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง นำสารละลายส่วนใสปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย potassium phosphate buffer ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร และสารละลาย potassium iodide ปริมาตร 1 มิลลิลิตร บ่มเป็นระยะเวลา 30 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 390 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้มาสร้างกราฟมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ รายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมของน้ำหนักสด ($\mu\text{g/g F.W.}$)

2.2.10 ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ (malondialdehyde content; MDA)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบ จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ต้น ของแต่ละชุดการทดลอง ทำการวิเคราะห์หาปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ตามวิธีการของ Velikova et al. (2000) บดตัวอย่าง 0.2 กรัม ด้วยไนโตรเจนเหลว เติมสารละลาย 0.1% (w/v) trichloroacetic acid (TCA) กรองด้วยกระดาษกรอง นำสารละลายส่วนใสของสารสกัดปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย 0.5% (w/v) thiobarbituric acid (TBA) ในสารละลาย TCA 20% (w/v) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าผสมสาร จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที หยุดปฏิกิริยาในน้ำแข็งทันที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 532 และ 600 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ โดย

ใช้ค่า extinction coefficient เท่ากับ $155 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ รายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมของ น้ำหนักสด ($\mu\text{mol/g F.W.}$)

2.2.11 การรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte leakage; EL)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบ จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ต้น ของแต่ละชุดการทดลอง ทำการวิเคราะห์หา การรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ในใบของพืช *Dicliptera tinctoria* (Nees) Kostel ทำการตัดชิ้นส่วนใบ 5 เซนติเมตร นำชิ้นส่วนของใบแช่ลงในน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาทีและนำไปวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC_1) หลังจากนั้น นำชิ้นส่วนของใบที่แช่ในน้ำกลั่นไปบ่มที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที ตั้งไว้ให้เย็นและนำไปวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC_2) จากนั้นนำไปแทนค่าในสมการตามวิธีการของ Dionisio-Sese and Tobita (1998) ดังนี้

$$EL = (EC_1/EC_2) \times 100$$

2.2.12 ค่าการเปิดปิดปากใบพืช (stomatal conductance)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบ จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ต้น ของแต่ละชุดการทดลอง ทำการหนีบใบและ บันทึกราคาการเปิดปิดปากใบพืชด้วยเครื่อง porometer

2.2.13 กิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant activities)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบ จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ต้น ของแต่ละชุดการทดลอง ทำการวิเคราะห์ กิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระโดยการสกัดเอนไซม์ต้านออกซิเดชันตามวิธีการของ Velikova et al. (2000) บดตัวอย่าง 0.2 กรัม ด้วยไนโตรเจนเหลว เติม extraction buffer หรือ สารละลาย I (solution I) ประกอบด้วย สารละลาย 10 mM potassium phosphate buffer (pH 7.0) ที่มีสารละลาย 4% polyvinyl-polypyrrolidone (PVP) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยง ด้วยความเร็ว 6,000 รอบต่อวินาที เป็นระยะเวลา 15 นาที นำสารละลายส่วนใส ใส่ในหลอดไมโครเซ็นติฟิวจ์ (microcentrifuge tube) และนำไปเก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ วิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ catalase (CAT) เมื่อต้องการนำสารสกัดของ ตัวอย่างพืชไปวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ควรวางสารสกัดในกล่องควบคุมอุณหภูมิจนกระทั่ง สารสกัดเริ่มละลายจึงนำไปใช้ในการวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ในหัวข้อถัดไป

2.2.13.1 กิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระคะตะเลส (catalase; CAT)

ตามวิธีการของ (Velikova et al., 2000) โดยดูดส่วนใสจากหลอดไมโครเซ็นติฟิวจ์ (microcentrifuge tube) เก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส 0.1 มิลลิลิตร ผสมสารละลายในการทำ ปฏิกิริยา (reaction mixture) ประกอบด้วย 10 mM potassium phosphate buffer 0.8 มิลลิลิตร, 0.03% hydrogen peroxide (H_2O_2) นำมาวัด ค่าการดูดกลืนแสงด้วย เครื่อง UV-spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 240 นาโนเมตร บันทึกผลทุก 20 วินาที เป็นระยะเวลา 5

นาที่ รายงานผลในหน่วย $\text{units min}^{-1} \text{ g F.W.}^{-1}$ โดยดัดแปลงวิธีการของ (Velikova et al., 2000) ซึ่งคือค่า extinction coefficient เท่ากับ 40 mM^{-1}



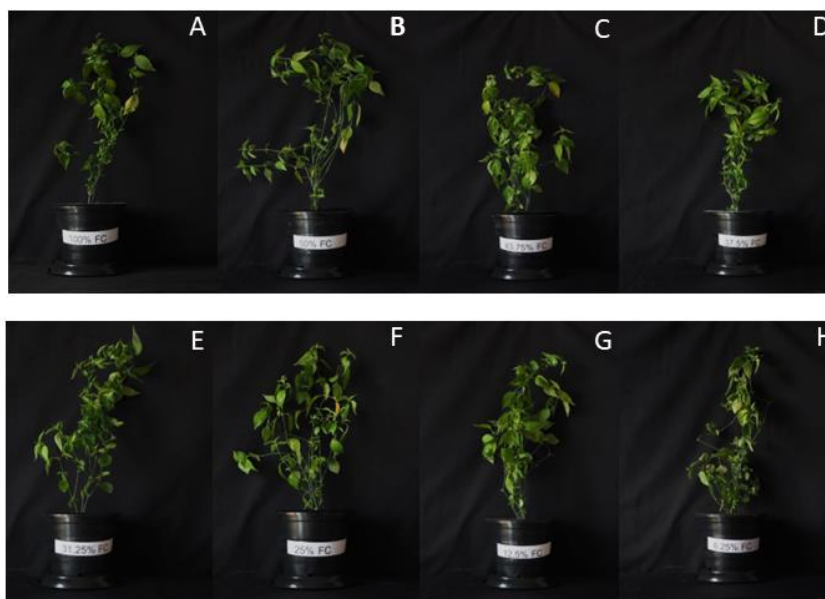
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการทดลอง ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยโดยการศึกษาตามขั้นตอนและขบวนการต่าง ๆ และให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ได้ดังนี้

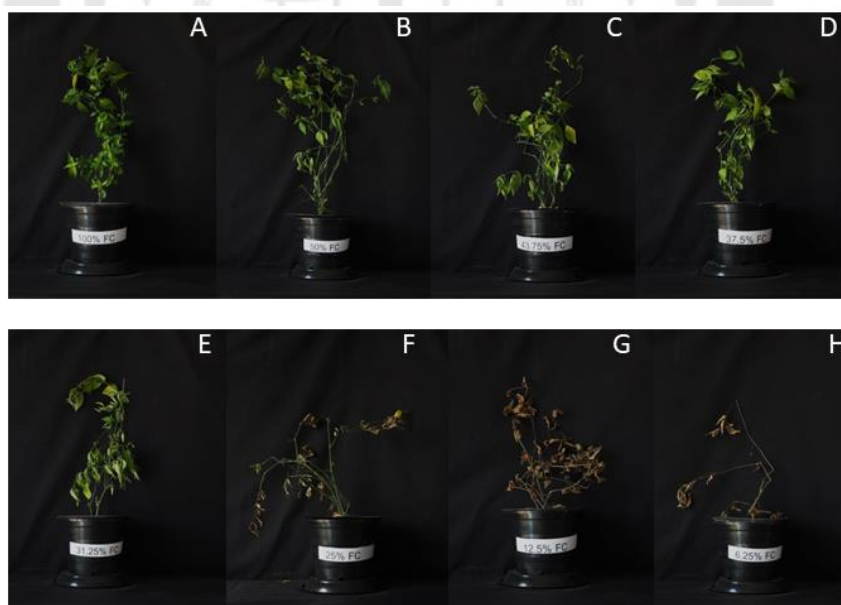
การทดลองที่ 1 การหาระดับ field capacity ของดินที่เหมาะสมต่อการจำลองสภาวะแล้งในพืช *D. tinctoria*

การศึกษารูปแบบของระดับความเครียดจากสภาวะแล้งต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ดังภาพประกอบ 18 และ 19 โดยพิจารณาจากค่า Fv/Fm ค่า Pi และปริมาณรงควัตถุที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงในใบพืช (pigment content) ได้แก่ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ปริมาณแคโรทีนอยด์ และปริมาณน้ำสัมพัทธ์





ภาพประกอบ 18 การหาระดับ field capacity (FC) ของดินที่เหมาะสมต่อการจำลองสภาวะแล้งให้กับต้นพืช *D. tinctoria* ในวันแรกของการทดลอง ประกอบด้วย 100% FC (A), 50% FC (B), 43.75% FC (C), 37.5% FC (D), 31.5% FC (E), 25% FC (F), 12.5% FC (G), 6.25% FC (H)



ภาพประกอบ 19 การหาระดับ field capacity (FC) ของดินที่เหมาะสมต่อการจำลองสภาวะแล้งให้กับต้นพืช *D. tinctoria* วันที่ 12 ของการทดลอง ประกอบด้วย 100% FC (A), 50% FC (B), 43.75% FC (C), 37.5% FC (D), 31.5% FC (E), 25% FC (F), 12.5% FC (G), 6.25% FC (H)

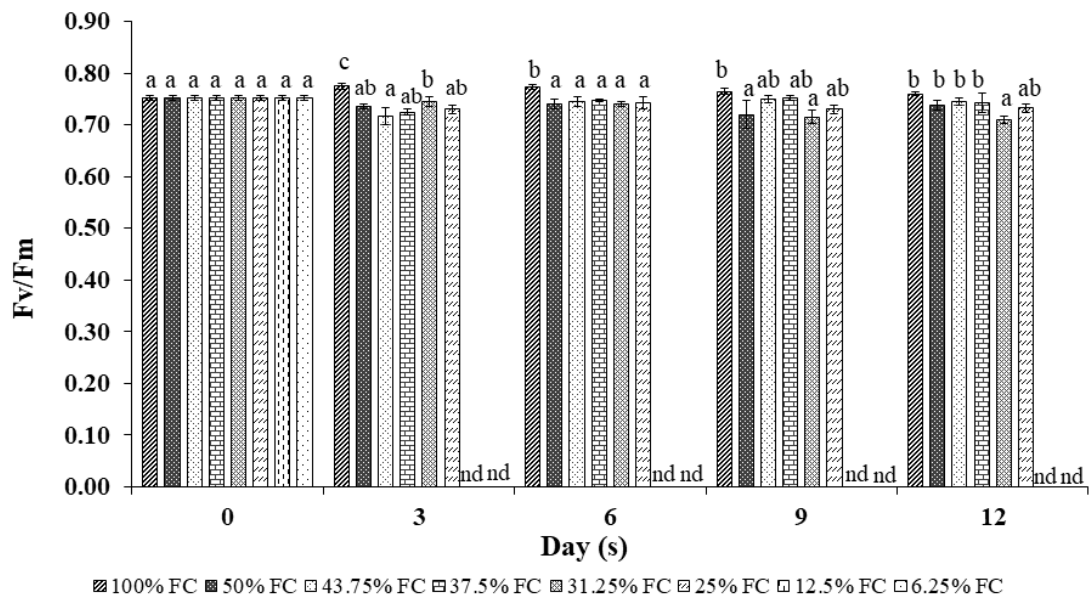
ประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (maximum quantum efficiency of PSII photochemistry; Fv/Fm)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในชุดควบคุม มีค่า Fv/Fm มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC, 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.05, 0.08, 0.07, 0.04 และ 0.06 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC มีค่า Fv/Fm มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.04 เท่า ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC มีค่า Fv/Fm น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC โดยต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC มีค่า Fv/Fm น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.07 และ 0.04 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC มีค่า Fv/Fm น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.05, 0.06, 0.04 และ 0.06 เท่า ตามลำดับ

วันที่ 6 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ในชุดควบคุมมีค่า Fv/Fm มากที่สุด โดยต้นพืชในชุดควบคุมมีค่า Fv/Fm มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC, 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.04, 0.04, 0.03, 0.04 และ 0.04 เท่าตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC, 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC มีค่า Fv/Fm น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับต้นพืชในชุดควบคุมโดยต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC, 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC มีค่า Fv/Fm น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.04, 0.04, 0.03, 0.04 และ 0.04 เท่าตามลำดับ

วันที่ 9 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ในชุดควบคุมมีค่า Fv/Fm มากที่สุด โดยต้นพืชในชุดควบคุมมีค่า Fv/Fm มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC และ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.06 และ 0.07 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC และ 31.25% FC มีค่า Fv/Fm น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.06 และ 0.07 เท่า ตามลำดับ

วันที่ 12 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC และ 37.5% FC มีค่า Fv/Fm มากที่สุด โดยมีค่ามากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.07, 0.04, 0.05 และ 0.05 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC มีค่า Fv/Fm น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC และ 37.5% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.07, 0.04, 0.05 และ 0.04 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 20 และตาราง 4)



ภาพประกอบ 20 คลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (chlorophyll fluorescence) ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช

D. tinctoria ตาย

ตาราง 4 ค่าคลอโรฟิลล์ลูออลเซนส์ ของต้นพืช *D. tinctoria* เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับต่างๆ

Treatment	Fv/Fm (mean ± SE)				
	0	3	6	9	12
100% FC	0.753 ± 0.005	0.775 ± 0.006c	0.773 ± 0.005b	0.765 ± 0.006b	0.760 ± 0.004b
50% FC	0.753 ± 0.005	0.735 ± 0.005ab	0.740 ± 0.009a	0.720 ± 0.027a	0.738 ± 0.009b
43.75% FC	0.753 ± 0.005	0.718 ± 0.016a	0.745 ± 0.009a	0.750 ± 0.007ab	0.745 ± 0.006b
37.5% FC	0.753 ± 0.005	0.725 ± 0.006ab	0.748 ± 0.003a	0.753 ± 0.005ab	0.743 ± 0.019b
31.25% FC	0.753 ± 0.005	0.745 ± 0.010b	0.740 ± 0.004a	0.715 ± 0.013a	0.710 ± 0.008a
25% FC	0.753 ± 0.005	0.730 ± 0.009ab	0.743 ± 0.011a	0.730 ± 0.009ab	0.733 ± 0.008ab
12.5% FC	0.753 ± 0.005	nd	nd	nd	nd
6.25% FC	0.753 ± 0.005	nd	nd	nd	nd

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กหลังตัวเลขที่เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

nd = ไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

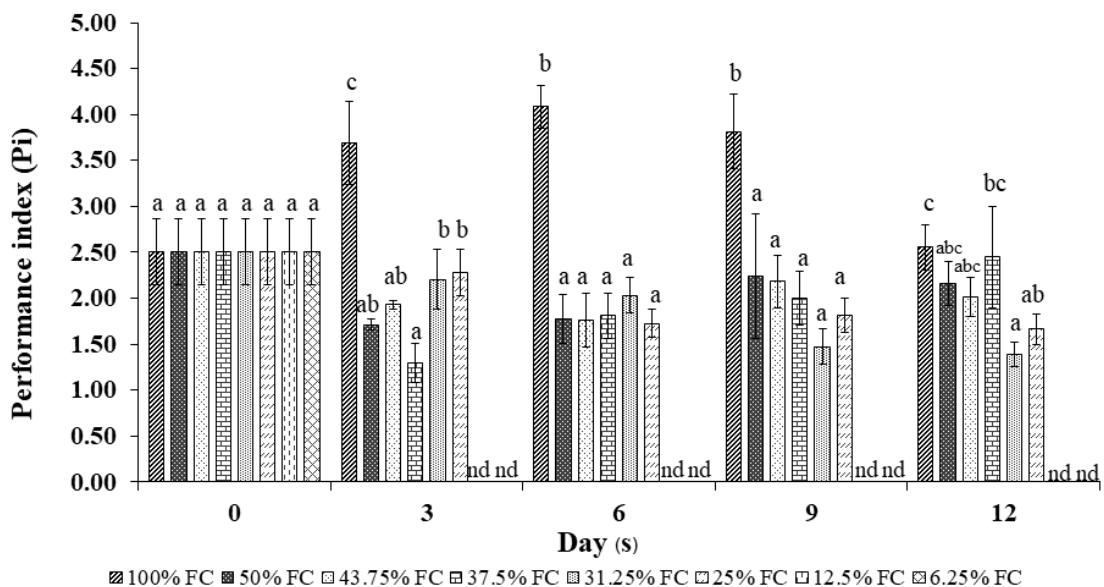
ค่า Performance index (Pi)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในชุดควบคุมมีค่า Pi มากที่สุด โดยมีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC, 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.15, 0.91, 1.85, 0.67 และ 0.62 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC และ 25% FC มีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.71 และ 0.76 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC มีค่า Pi น้อยที่สุด โดยมีค่า Pi น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.65, 0.41 และ 0.43 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC และ 43.75% FC มีค่า Pi น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.54 และ 0.48 เท่า ตามลำดับ

วันที่ 6 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ในชุดควบคุม มีค่า Pi มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC, 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.29, 1.32, 1.26, 1.01 และ 1.36 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC, 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC ตามลำดับ มีค่า Pi น้อยที่สุด โดยมีค่า Pi น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.56, 0.57, 0.56, 0.50 และ 0.58 เท่า ตามลำดับ

วันที่ 9 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ในชุดควบคุม มีค่า Pi มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75%, 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.70, 0.75, 0.91, 1.59 และ 1.10 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50%, 43.75%, 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC มีค่า Pi น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.41, 0.43, 0.48, 0.61 และ 0.52 เท่า ตามลำดับ

วันที่ 12 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ในชุดควบคุมมีค่า Pi มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.84 และ 0.54 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC มีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.77 เท่า ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC มีค่า Pi น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.46 และ 0.44 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 21 และตาราง 5)



ภาพประกอบ 21 ค่า Performance index (Pi) ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

ตาราง 5 ค่า Pi ของต้นพืช *D. tinctoria* เมื่อได้รับสภาพเครียดจากความแห้งที่ระดับต่าง ๆ

Treatment	Pi (mean ± SE)				
	0	3	6	9	12
100% FC	2.505 ± 0.359	3.688 ± 0.451c	4.085 ± 0.233b	3.815 ± 0.402b	2.555 ± 0.250c
50% FC	2.505 ± 0.359	1.713 ± 0.057ab	1.780 ± 0.265a	2.245 ± 0.677a	2.155 ± 0.241abc
43.75% FC	2.505 ± 0.359	1.930 ± 0.050ab	1.763 ± 0.297a	2.180 ± 0.290a	2.018 ± 0.215abc
37.5% FC	2.505 ± 0.359	1.293 ± 0.214a	1.810 ± 0.245a	2.000 ± 0.292a	2.450 ± 0.555bc
31.25% FC	2.505 ± 0.359	2.205 ± 0.327b	2.033 ± 0.192a	1.473 ± 0.194a	1.385 ± 0.134a
25% FC	2.505 ± 0.359	2.280 ± 0.255b	1.728 ± 0.157a	1.813 ± 0.187a	1.663 ± 0.164ab
12.5% FC	2.505 ± 0.359	nd	nd	nd	nd
6.25% FC	2.505 ± 0.359	nd	nd	nd	nd

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กหลังตัวเลขที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

nd = ไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ

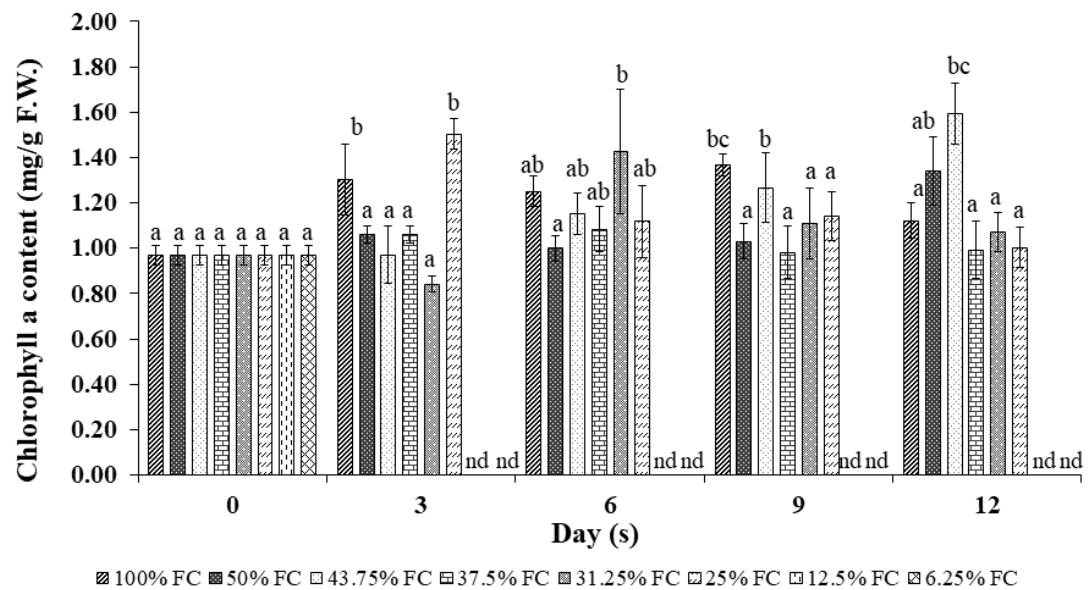
จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มากที่สุด โดยต้นพืชในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC, 37.5% FC และ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.23, 0.34, 0.23 และ 0.55 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC, 37.5% FC และ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.42, 0.55, 0.42 และ 0.79 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC, 37.5% FC และ 31.25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยที่สุด โดยต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.19 และ 0.29 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.25 และ 0.36 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.19 และ 0.30 เท่า ตามลำดับ แต่ละต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.35 และ 0.44 เท่า ตามลำดับ

วันที่ 6 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.43 เท่า ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.30 เท่า

วันที่ 9 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ในชุดควบคุม มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 37.5% FC, 31.25% FC

และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.33, 0.39, 0.24 และ 0.20 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50%, 37.5%, 31.25% และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.23, 0.29, 0.14 และ 0.11 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.25 และ 0.18 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.28 และ 0.23 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้ ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.19 และ 0.13 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยกว่าเมื่อเทียบกับต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.17 และ 0.10 เท่า ตามลำดับ

วันที่ 12 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.31, 0.61, 0.49 และ 0.59 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC ตามลำดับ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.24, 0.37, 0.33 และ 0.37 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 22 และตาราง 6)



ภาพประกอบ 22 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียด จากความแล้งที่ระดับต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษร ภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

ตาราง 6 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นพืช *D. tinctoria* เมื่อได้รับสภาพเครียดจากความแห้งที่ระดับต่าง ๆ

Treatment	Chlorophyll a content (mg/g F.W.) (Mean ± SE)				
	0	3	6	9	12
100% FC	0.969 ± 0.043	1.302 ± 0.155b	1.251 ± 0.065ab	1.369 ± 0.048bc	1.122 ± 0.079a
50% FC	0.969 ± 0.043	1.061 ± 0.039a	1.001 ± 0.056a	1.031 ± 0.079a	1.341 ± 0.150ab
43.75% FC	0.969 ± 0.043	0.970 ± 0.126a	1.152 ± 0.091ab	1.268 ± 0.154b	1.594 ± 0.135bc
37.5% FC	0.969 ± 0.043	1.060 ± 0.038a	1.084 ± 0.101ab	0.982 ± 0.117a	0.993 ± 0.128a
31.25% FC	0.969 ± 0.043	0.843 ± 0.037a	1.427 ± 0.277b	1.108 ± 0.155a	1.073 ± 0.086a
25% FC	0.969 ± 0.043	1.504 ± 0.066b	1.118 ± 0.157ab	1.140 ± 0.107a	1.003 ± 0.088a
12.5% FC	0.969 ± 0.043	nd	nd	nd	nd
6.25% FC	0.969 ± 0.043	nd	nd	nd	nd

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กหลังตัวเลขที่เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

nd = ไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

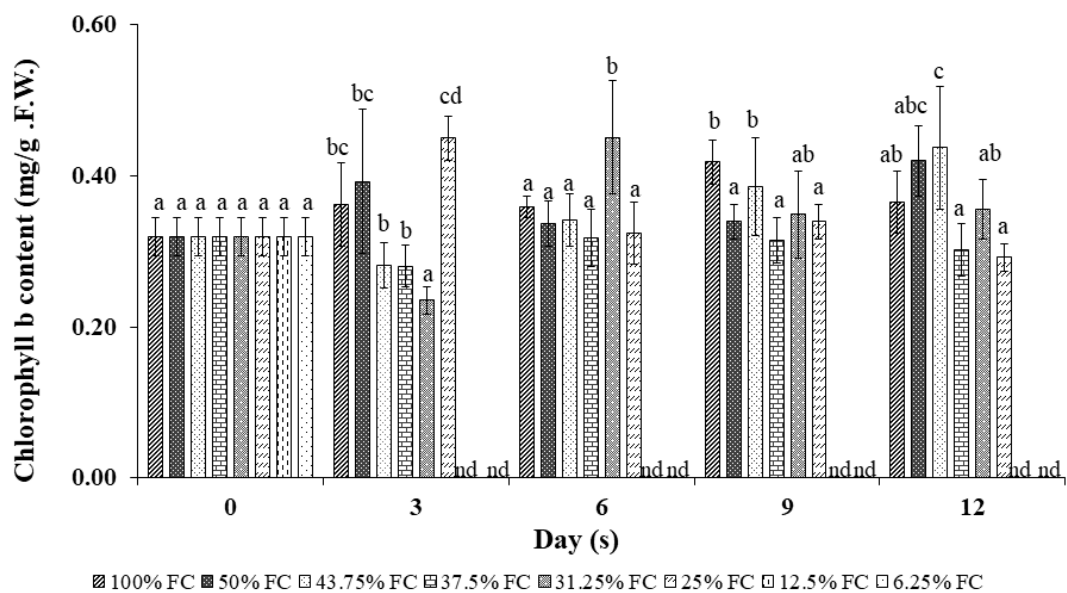
ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง พบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC, 37.5% FC และ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.60, 0.60 และ 0.91 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.54 และ 0.67 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC และ 37.5% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.20 และ 0.19 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC และ 37.5% FC ตามลำดับ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี น้อยกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.37 และ 0.38 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC, 37.5% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.35, 0.40, 0.17, 0.16 และ 0.48 เท่า ตามลำดับ

วันที่ 6 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC, 37.5% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.26, 0.34, 0.32, 0.42 และ 0.39 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC, 37.5% FC และ 25% FC ตามลำดับ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.21, 0.25, 0.24, 0.30 และ 0.28 เท่า ตามลำดับ

วันที่ 9 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี มากที่สุด โดยต้นพืชในชุดควบคุม มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 37.5% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.19, 0.25 และ 0.19

เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 37.5% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.12, 0.19 และ 0.12 เท่า ตามลำดับ วันที่ 12 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.20, 0.45, 0.23 และ 0.50 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.17 และ 0.19 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC และ 25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี น้อยที่สุด โดยต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี น้อยกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.31 เท่า และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี น้อยกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.33 เท่า (ภาพประกอบ 23 และตาราง 7)



ภาพประกอบ 23 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของพืช *D.tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) และตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

ตาราง 7 ปริมาณคลอโรฟิลล์พี ของต้นพืช *D. tinctoria* เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับต่าง ๆ

Treatment	Chlorophyll b content (mg/g F.W.) (Mean ± SE)				
	0	3	6	9	12
100% FC	0.319 ± 0.025	0.362 ± 0.055bc	0.359 ± 0.014a	0.419 ± 0.029b	0.365 ± 0.041ab
50% FC	0.319 ± 0.025	0.392 ± 0.096bc	0.337 ± 0.030a	0.339 ± 0.023a	0.420 ± 0.046abc
43.75% FC	0.319 ± 0.025	0.282 ± 0.030b	0.342 ± 0.035a	0.386 ± 0.065b	0.437 ± 0.081c
37.5% FC	0.319 ± 0.025	0.281 ± 0.027b	0.318 ± 0.038a	0.314 ± 0.030a	0.302 ± 0.034ab
31.25% FC	0.319 ± 0.025	0.235 ± 0.018a	0.451 ± 0.074b	0.349 ± 0.058ab	0.355 ± 0.039ab
25% FC	0.319 ± 0.025	0.450 ± 0.029cd	0.324 ± 0.040a	0.339 ± 0.023a	0.292 ± 0.019a
12.5% FC	0.319 ± 0.025	nd	nd	nd	nd
6.25% FC	0.319 ± 0.025	nd	nd	nd	nd

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กหลังตัวเลขที่เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

nd = ไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

ปริมาณแคโรทีนอยด์

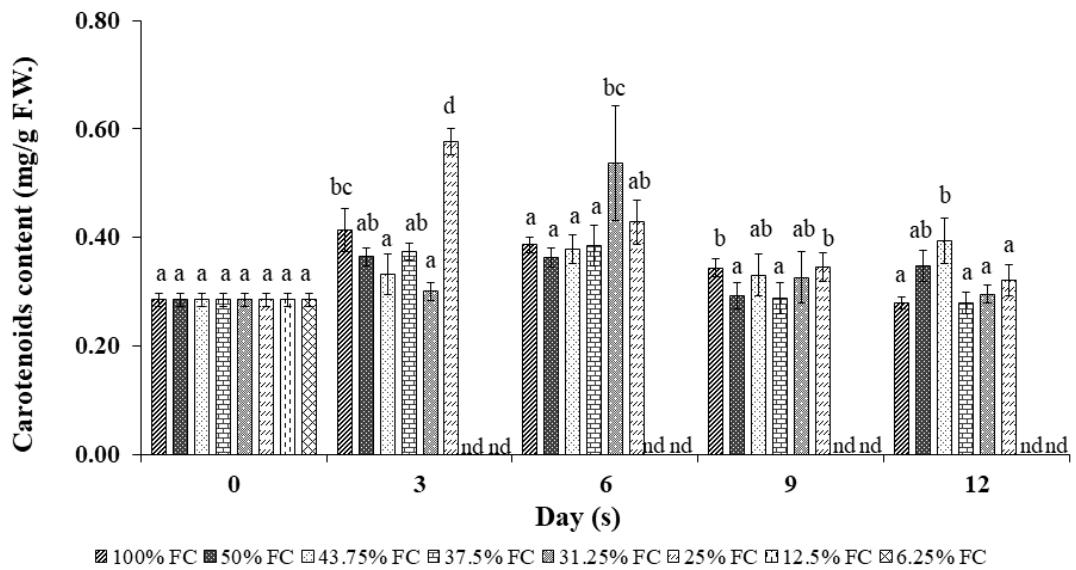
จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง พบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีปริมาณแคโรทีนอยด์มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC, 37.5% FC และ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.39, 0.58, 0.73, 0.55 และ 0.92 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชในชุดควบคุมมีปริมาณแคโรทีนอยด์มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC และ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.24 และ 0.38 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชในชุดควบคุมมีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.28 เท่า นอกจากนี้ ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC และ 31.25% FC มีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยที่สุด โดยต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC มีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.20 และ 0.42 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC มีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.48 และ 0.09 เท่า ตามลำดับ

วันที่ 6 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC มีปริมาณแคโรทีนอยด์มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC และ 37.5% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.39, 0.48, 0.42 และ 0.39 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC, 43.75% FC และ 37.5% FC มีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.28, 0.64, 0.29 และ 0.28 เท่า ตามลำดับ

วันที่ 9 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีปริมาณแคโรทีนอยด์มากที่สุด โดยต้นพืชในชุดควบคุมมีปริมาณแคโรทีนอยด์มากกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC และ 37.5% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.18 และ 0.19 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีปริมาณแคโรทีนอยด์

มากกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC และ 37.5% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.19 และ 0.20 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC และ 37.5% FC มีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยที่สุด โดยต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC มีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.15 และ 0.16 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC มีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.16 และ 0.17 เท่า ตามลำดับ

วันที่ 12 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC ปริมาณแคโรทีนอยด์มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.41, 0.41, 0.33 และ 0.23 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC มีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยที่สุด โดยต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC มีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.30, 0.29, 0.25 และ 0.18 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 24 และตาราง 8)



ภาพประกอบ 24 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

ตาราง 8 ปริมาณแคโรทีนอยด์ ของต้นพืช *D. tinctoria* เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับต่าง ๆ

Treatment	Carotenoids content (mg/g F.W.) (Mean ± SE)				
	0	3	6	9	12
100% FC	0.285 ± 0.012	0.414 ± 0.039bc	0.386 ± 0.013a	0.344 ± 0.016b	0.279 ± 0.011a
50% FC	0.285 ± 0.012	0.364 ± 0.016ab	0.363 ± 0.018a	0.292 ± 0.025a	0.348 ± 0.029ab
43.75% FC	0.285 ± 0.012	0.333 ± 0.037a	0.378 ± 0.026a	0.330 ± 0.039ab	0.394 ± 0.042b
37.5% FC	0.285 ± 0.012	0.373 ± 0.015ab	0.386 ± 0.038a	0.288 ± 0.029a	0.278 ± 0.020a
31.25% FC	0.285 ± 0.012	0.300 ± 0.016a	0.537 ± 0.106bc	0.326 ± 0.048ab	0.296 ± 0.018a
25% FC	0.285 ± 0.012	0.577 ± 0.024d	0.428 ± 0.040ab	0.346 ± 0.027b	0.321 ± 0.029a
12.5% FC	0.285 ± 0.012	nd	nd	nd	nd
6.25% FC	0.285 ± 0.012	nd	nd	nd	nd

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กหลังตัวเลขที่เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

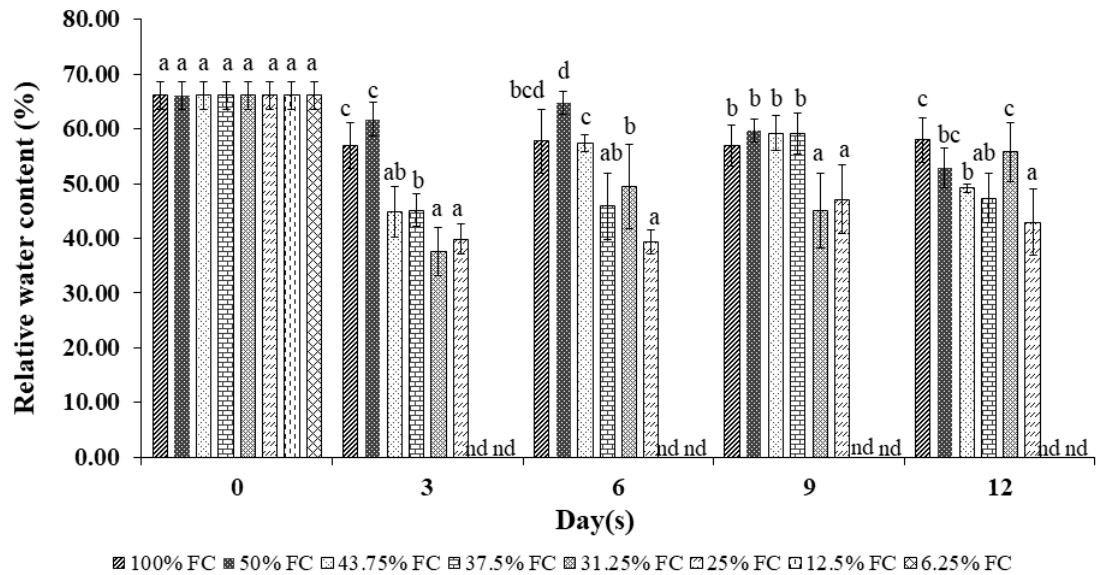
nd = ไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

ปริมาณน้ำสัมพัทธ์

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์มากที่สุด โดยต้นพืชในชุดควบคุม มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC, 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.27, 0.26, 0.52 และ 0.43 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC, 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.38, 0.37, 0.64 และ 0.51 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.20 และ 0.33 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC และ 25% FC มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์น้อยที่สุด โดยต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 31.25% FC มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC และ 37.5% FC มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.34, 0.39 และ 0.17 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC และ 37.5% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.30, 0.36 และ 0.12 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.21 และ 0.27 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 37.5% FC มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.21 และ 0.27 เท่า ตามลำดับ

วันที่ 6 ของการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์มากที่สุด ซึ่งมากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 43.75% FC, 37.5% FC, 31.25% FC และ 25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.13, 0.41, 0.31 และ 0.64 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชในชุดควบคุมมีปริมาณน้ำสัมพัทธ์มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC อย่างมี

พืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 31.25% FC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.15 และ 0.12 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 25 และตาราง 9)



ภาพประกอบ 25 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษ ตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

ตาราง 9 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ ของต้นพืช *D. tinctoria* เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับต่าง ๆ

Treatment	Relative water content (%) (Mean ± SE)				
	0	3	6	9	12
100% FC	66.15 ± 2.56	56.96 ± 4.18c	57.74 ± 5.83bcd	56.88 ± 3.71b	57.93 ± 4.05c
50% FC	66.15 ± 2.56	61.72 ± 3.08c	64.66 ± 2.09d	59.77 ± 2.11b	52.94 ± 3.63bc
43.75% FC	66.15 ± 2.56	44.80 ± 4.64ab	57.36 ± 1.49c	59.19 ± 3.22b	49.22 ± 0.78b
37.5% FC	66.15 ± 2.56	45.11 ± 2.93b	45.87 ± 6.11ab	59.13 ± 3.74b	47.30 ± 4.53ab
31.25% FC	66.15 ± 2.56	37.56 ± 4.49a	49.46 ± 7.72b	45.02 ± 6.81a	55.81 ± 5.37c
25% FC	66.15 ± 2.56	39.8 ± 2.75a	39.37 ± 2.25a	47.04 ± 6.28a	42.88 ± 6.06a
12.5% FC	66.15 ± 2.56	nd	nd	nd	nd
6.25% FC	66.15 ± 2.56	nd	nd	nd	nd

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กหลังตัวเลขที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

nd = ไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้น *D. tinctoria* ตาย

จากผลการทดลอง การหาระดับความสามารถในการทนต่อสภาวะเครียดจากความแล้งทางสัณฐานวิทยาของต้นพืช *D. tinctoria* ดงภาพประกอบ 18 และ 19 พบว่า ต้นพืชสามารถทนต่อความแล้งได้สูงสุดที่ระดับ 25% FC เนื่องจากมีค่า Fv/Fm ไม่แตกต่างกับพืชในชุดควบคุม ในวันที่ 9 และวันที่ 12 ของการทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีค่า Pi ไม่แตกต่างกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC ซึ่งแสดงให้เห็นว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีความสามารถในการทนต่อสภาวะเครียดจากความแล้งได้ดีเท่ากับต้นพืชที่ได้น้ำในระดับ 50% FC และจากผลการทดลองพบว่า ในวันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์มากกว่าต้นพืชในชุดควบคุม วันที่ 6 ถึง วันที่ 12 ของการทดลองพบว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างจากชุดควบคุม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีความสามารถในการทนต่อสภาวะเครียดจากความแล้งได้ดี โดยพืชมีกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และปริมาณคลอโรฟิลล์ และแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างจากต้นพืชในชุดควบคุม ดังนั้นจากการทดลองข้างต้นผู้วิจัยจึงเลือก Field capacity ของดินที่ระดับ 25% FC เพื่อนำมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

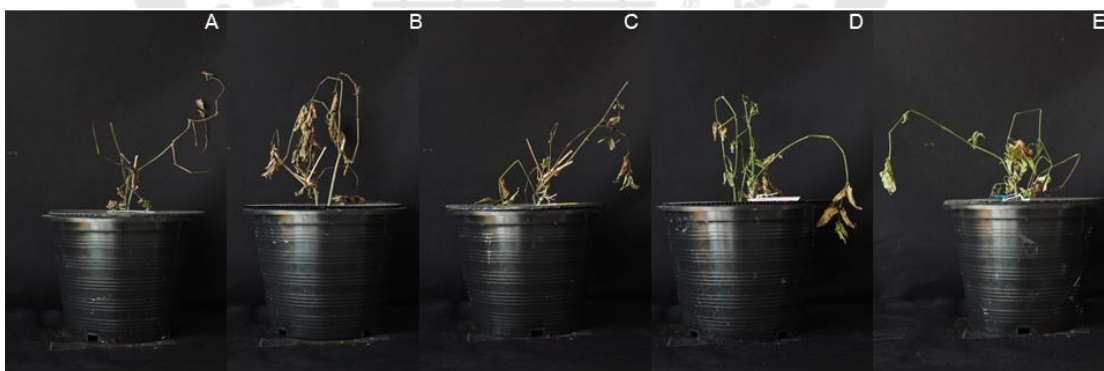
การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของซิลิโคนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืช *D. tinctoria* ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้ง

2.1 การศึกษาผลของซิลิโคนที่ความเข้มข้นแตกต่างกันต่อการตอบสนองทางสรีรวิทยาบางประการของพืช *D. tinctoria* ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้ง

ศึกษาผลของซิลิโคนที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน ดังภาพประกอบ 26 และ 27 ประกอบไปด้วยความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 mM ตามลำดับ ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้งต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยพิจารณาจากค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (maximum quantum efficiency of PSII photochemistry; Fv/Fm) ค่า performance index (Pi) และปริมาณรงควัตถุที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงในใบพืช (pigment content) ได้แก่ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ปริมาณแคโรทีนอยด์ ปริมาณน้ำส้มปัทม์ในใบพืช และปริมาณซิลิโคนที่สะสมในพืช



ภาพประกอบ 26 ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และได้รับซิลิโคนความเข้มข้นที่แตกต่างกันไป ประกอบด้วย ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน (A) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 0.5 mM (B) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 1 mM (C) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 1.5 mM (D) และต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 2 mM (E) ในวันที่ 0 ของการทดลอง



ภาพประกอบ 27 ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และได้รับซิลิโคนความเข้มข้นที่แตกต่างกันไป ประกอบด้วย ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน (A) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 0.5 mM (B) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 1 mM (C) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 1.5 mM (D) และต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 2 mM (E) ในวันที่ 18 ของการทดลอง

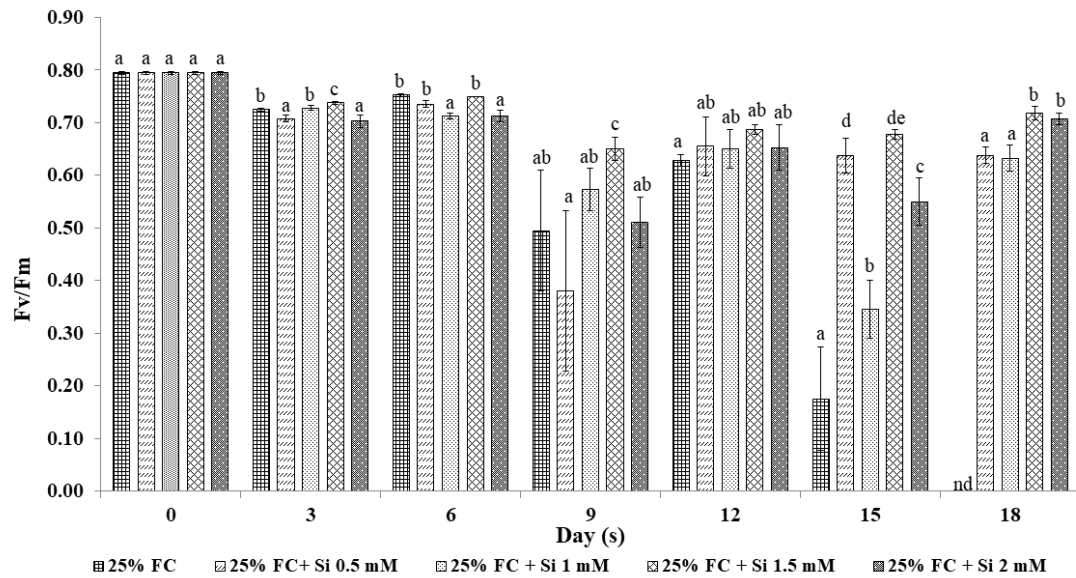
ประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (maximum quantum efficiency of PSII photochemistry; Fv/Fm)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า Fv/Fm มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.02, 0.04, 0.01 และ 0.05 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน มีค่า Fv/Fm มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 2 mM ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.02 และ 0.03 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1 mM มีค่า Fv/Fm มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 2 mM ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.03 และ 0.04 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 2 mM มีค่า Fv/Fm น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.06 และ 0.03 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 2 mM มีค่า Fv/Fm น้อยกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.07 และ 0.03 เท่า ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 6 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.5 mM มีค่า Fv/Fm มากที่สุด โดยต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน มีค่า Fv/Fm มากกว่าต้นพืชที่พ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.06 และ 0.06 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5 mM ค่า Fv/Fm มากกว่าต้นพืชที่พ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1 และ 2 mM ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.03 และ 0.03 เท่า ตามลำดับ และต้น

ซีลีคอนที่ความเข้มข้น 1 mM มีค่า Fv/Fm มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นซีลีคอน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.97 เท่า และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซีลีคอนที่ความเข้มข้น 2 mM มีค่า Fv/Fm มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นซีลีคอน และต้นพืชที่พ่นซีลีคอนที่ความเข้มข้น 1 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 2.14 และ 0.59 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซีลีคอน มีค่า Fv/Fm น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซีลีคอนที่ความเข้มข้น 0.5, 1, 1.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.73, 0.49, 0.74 และ 0.68 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่พ่นด้วยซีลีคอนที่ความเข้มข้น 1 mM มีค่า Fv/Fm น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซีลีคอนที่ความเข้มข้น 0.5, 1.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.46, 0.49 และ 0.37 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซีลีคอนที่ความเข้มข้น 2 mM มีค่า Fv/Fm น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซีลีคอนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.14 และ 0.19 เท่า ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซีลีคอนที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 mM มีค่า Fv/Fm มากที่สุด โดยต้นพืชที่พ่นด้วยซีลีคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า Fv/Fm มากกว่าต้นพืชที่พ่นซีลีคอนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.13 และ 0.13 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่พ่นด้วยซีลีคอนที่ความเข้มข้น 2 mM มีค่า Fv/Fm มากกว่าต้นพืชที่พ่นซีลีคอนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.11 และ 0.12 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซีลีคอนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 mM ตามลำดับ มีค่า Fv/Fm น้อยที่สุด โดยต้นพืชที่พ่นด้วยซีลีคอนที่ความเข้มข้น 0.5 mM มีค่า Fv/Fm น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซีลีคอนที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.11 และ 0.10 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซีลีคอนที่ความเข้มข้น 1 mM มีค่า Fv/Fm น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซีลีคอนที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.12 และ 0.11 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 28 และตาราง 10)



ภาพประกอบ 28 คลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (chlorophyll fluorescence, Fv/Fm) ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC และพืชนิลิคอนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

ตาราง 10 ค่า Fv/Fm ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสถานะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Treatment	Fv/Fm (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
25% FC	0.795 ± 0.003	0.725 ± 0.003b	0.753 ± 0.003b	0.495 ± 0.115ab	0.628 ± 0.011a	0.175 ± 0.098	nd
25% FC + 0.5 mM Si	0.795 ± 0.003	0.708 ± 0.006a	0.735 ± 0.006b	0.380 ± 0.153a	0.655 ± 0.056ab	0.638 ± 0.033	0.638 ± 0.015
25% FC + 1 mM Si	0.795 ± 0.003	0.728 ± 0.005b	0.713 ± 0.005a	0.573 ± 0.041ab	0.650 ± 0.037ab	0.345 ± 0.055	0.633 ± 0.025
25% FC + 1.5mM Si	0.795 ± 0.003	0.738 ± 0.003c	0.750 ± 0.000b	0.650 ± 0.023c	0.688 ± 0.009ab	0.678 ± 0.009	0.718 ± 0.013
25% FC + 2 mM Si	0.795 ± 0.003	0.703 ± 0.012a	0.713 ± 0.012a	0.510 ± 0.048ab	0.653 ± 0.048	0.550 ± 0.046	0.708 ± 0.011

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กหลังตัวเลขที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

nd = ไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้น *D. tinctoria* ตาย

Performance index (Pi)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า Pi มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.54, 0.70, 0.24 และ 0.64 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 mM มีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.25, 0.37 และ 0.33 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 2 mM ตามลำดับ มีค่า Pi น้อยที่สุด โดยต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีค่า Pi น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 และ 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.20 และ 0.35 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 mM มีค่า Pi น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 และ 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.27 และ 0.41 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 2 mM มีค่า Fv/Fm น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 และ 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.25 และ 0.39 เท่า ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 6 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า Pi มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.29, 0.91 และ 0.65 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.81 และ 0.57 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 และ 2 mM มีค่า Pi น้อยที่สุด โดยต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 mM มีค่า Pi น้อยกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

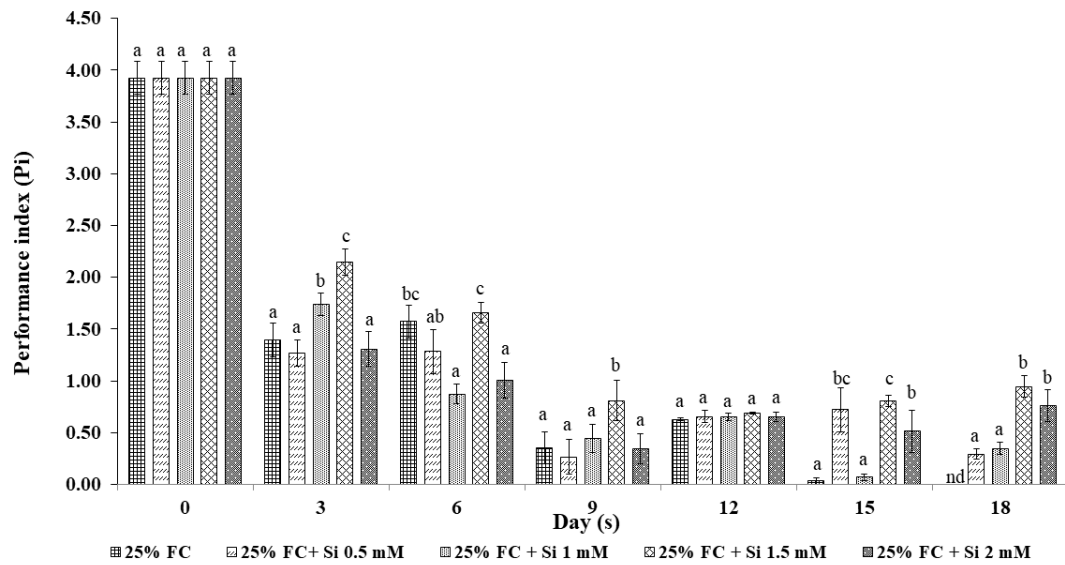
คิดเป็น 0.45 และ 0.48 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 2 mM มีค่า Pi น้อยกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.36 และ 0.39 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 mM มีค่า Pi น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.23 เท่า

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 9 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า Pi มากที่สุด โดยมีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นซิลิโคน และต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.29, 2.06, 0.83 และ 1.38 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นซิลิโคน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM มีค่า Pi น้อยที่สุด โดยต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นซิลิโคน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM ตามลำดับ มีค่า Fv/Fm น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.56, 0.67, 0.45 และ 0.58 เท่า ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 15 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า Pi มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 23.48, 10.88 และ 0.58 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 mM มีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 20.82 และ 9.59 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 2 mM มีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 14.55 และ 6.54 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 mM มีค่า Pi น้อยที่สุด โดยต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีค่า Pi น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.95, 0.96 และ 0.94 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับ

สภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 mM มีค่า Pi น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1.5 และ 2 mM ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.91, 0.92 และ 0.87 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 2 mM มีค่า Pi น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.37 เท่า ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 mM มีค่า Pi มากที่สุด โดยต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 2.23 และ 1.74 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 2 mM มีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 mM ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.59 และ 1.20 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 mM ตามลำดับ มีค่า Pi น้อยที่สุด โดยต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 mM มีค่า Pi น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.69 และ 0.61 เท่า ตามลำดับ และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 mM มีค่า Fv/Fm น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.63 และ 0.55 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 29 และตาราง 11)



ภาพประกอบ 29 ค่า Performance index (Pi) ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC และฟอสซิลิคอนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

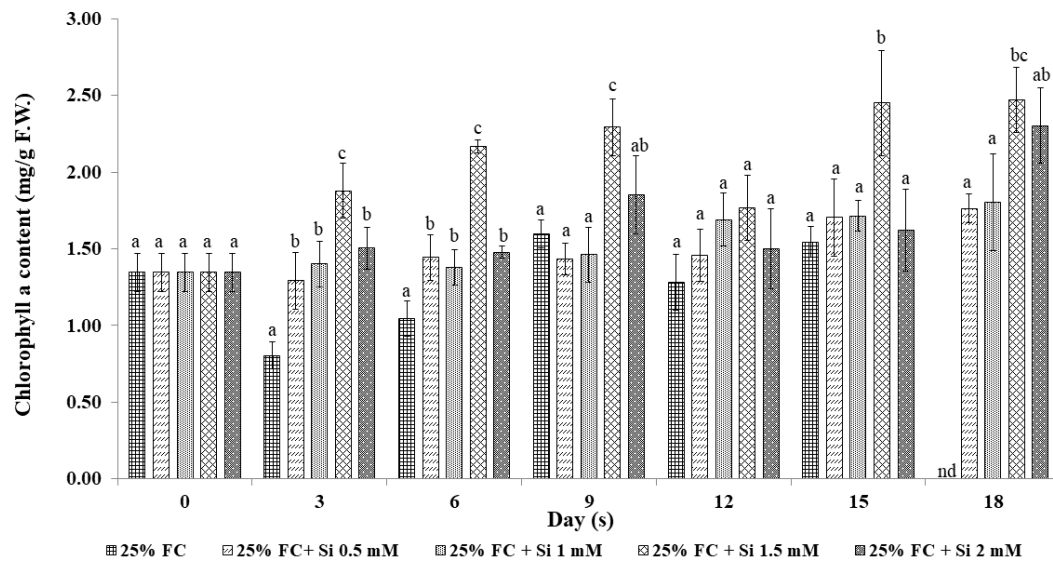
ตาราง 11 ค่า Pi ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วันที่ได้รับสภาพะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC และฟื้นด้วยวิธีการเพิ่มความชื้นขึ้นต่างๆ

Treatment	Chlorophyll a content (mg/g F.W.) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
25% FC	3.925 ± 0.158	1.393 ± 0.162a	1.573 ± 0.161bc	0.353 ± 0.156a	0.628 ± 0.011a	0.033 ± 0.033a	nd
25% FC + 0.5 mM Si	3.925 ± 0.159	1.268 ± 0.123a	1.283 ± 0.215ab	0.265 ± 0.168a	0.655 ± 0.056a	0.720 ± 0.210bc	0.293 ± 0.048a
25% FC + 1 mM Si	3.925 ± 0.160	1.740 ± 0.110b	0.870 ± 0.096a	0.443 ± 0.135a	0.650 ± 0.037a	0.068 ± 0.034a	0.345 ± 0.058a
25% FC + 1.5mM Si	3.925 ± 0.161	2.150 ± 0.127c	1.658 ± 0.100c	0.810 ± 0.191b	0.688 ± 0.009a	0.808 ± 0.056c	0.945 ± 0.106b
25% FC + 2 mM Si	3.925 ± 0.162	1.308 ± 0.168a	1.005 ± 0.171a	0.340 ± 0.144a	0.653 ± 0.048a	0.513 ± 0.205b	0.760 ± 0.158b

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กหลังตัวเลขที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

nd = ไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

เอ น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.29 และ 0.27 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 30 และตาราง 12)



ภาพประกอบ 30 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจาก

ต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

ตาราง 12 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC และฟื้นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

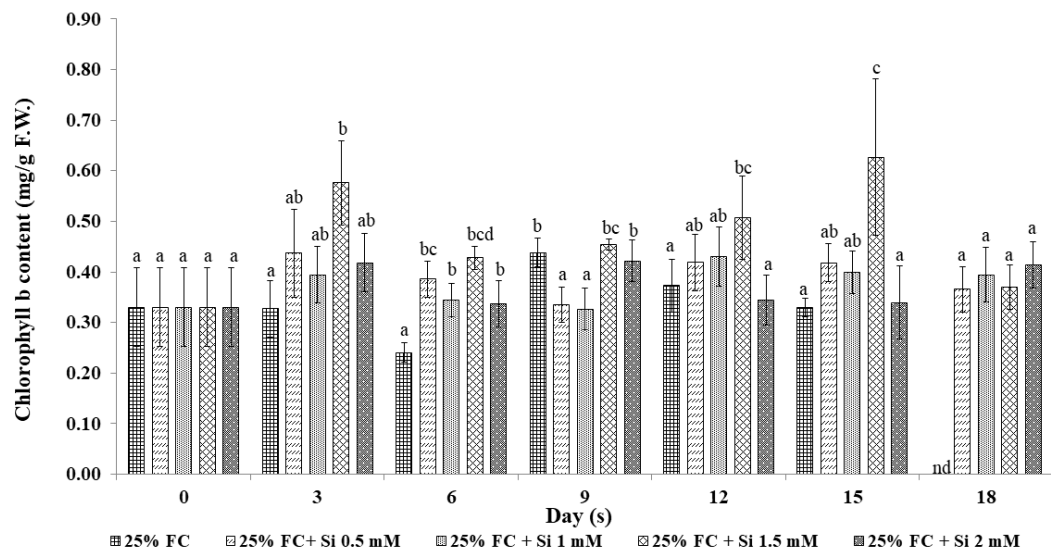
Treatment	Chlorophyll a content (mg/g F.W.) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
25% FC	3.925 ± 0.158	1.393 ± 0.162a	1.573 ± 0.161bc	0.353 ± 0.156a	0.628 ± 0.011a	0.033 ± 0.033a	nd
25% FC + 0.5 mM Si	3.925 ± 0.159	1.268 ± 0.123a	1.283 ± 0.215ab	0.265 ± 0.168a	0.655 ± 0.056a	0.720 ± 0.210bc	0.293 ± 0.048a
25% FC + 1 mM Si	3.925 ± 0.160	1.740 ± 0.110b	0.870 ± 0.096a	0.443 ± 0.135a	0.650 ± 0.037a	0.068 ± 0.034a	0.345 ± 0.058a
25% FC + 1.5mM Si	3.925 ± 0.161	2.150 ± 0.127c	1.658 ± 0.100c	0.810 ± 0.191b	0.688 ± 0.009a	0.808 ± 0.056c	0.945 ± 0.106b
25% FC + 2 mM Si	3.925 ± 0.162	1.308 ± 0.168a	1.005 ± 0.171a	0.340 ± 0.144a	0.653 ± 0.048a	0.513 ± 0.205b	0.760 ± 0.158b

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

nd = ไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.24, 0.26 และ 0.21 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5 mM มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี น้อยกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.24, 0.26 และ 0.21 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความ 1 mM มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี น้อยกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.25, 0.28 และ 0.23 เท่า ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 15 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มี ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.90, 0.50, 0.57 และ 0.84 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 2 mM มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี น้อยที่สุด โดยต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 2 mM มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.47 และ 0.46 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับ ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 mM มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.33 และ 0.36 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 31 และ ตาราง 13)



ภาพประกอบ 31 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพืชนิลิกอนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

ตาราง 13 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Treatment	Chlorophyll b content (mg/g F.W.) (Mean \pm SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
25% FC	3.925 \pm 0.158	1.393 \pm 0.162a	1.573 \pm 0.161bc	0.353 \pm 0.156a	0.628 \pm 0.011a	0.033 \pm 0.033a	nd
25% FC + 0.5 mM Si	3.925 \pm 0.159	1.268 \pm 0.123a	1.283 \pm 0.215ab	0.265 \pm 0.168a	0.655 \pm 0.056a	0.720 \pm 0.210bc	0.293 \pm 0.048a
25% FC + 1 mM Si	3.925 \pm 0.160	1.740 \pm 0.110b	0.870 \pm 0.096a	0.443 \pm 0.135a	0.650 \pm 0.037a	0.068 \pm 0.034a	0.345 \pm 0.058a
25% FC + 1.5mM Si	3.925 \pm 0.161	2.150 \pm 0.127c	1.658 \pm 0.100c	0.810 \pm 0.191b	0.688 \pm 0.009a	0.808 \pm 0.056c	0.945 \pm 0.106b
25% FC + 2 mM Si	3.925 \pm 0.162	1.308 \pm 0.168a	1.005 \pm 0.171a	0.340 \pm 0.144a	0.653 \pm 0.048a	0.513 \pm 0.205b	0.760 \pm 0.158b

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กหลังตัวเลขที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

nd = ไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

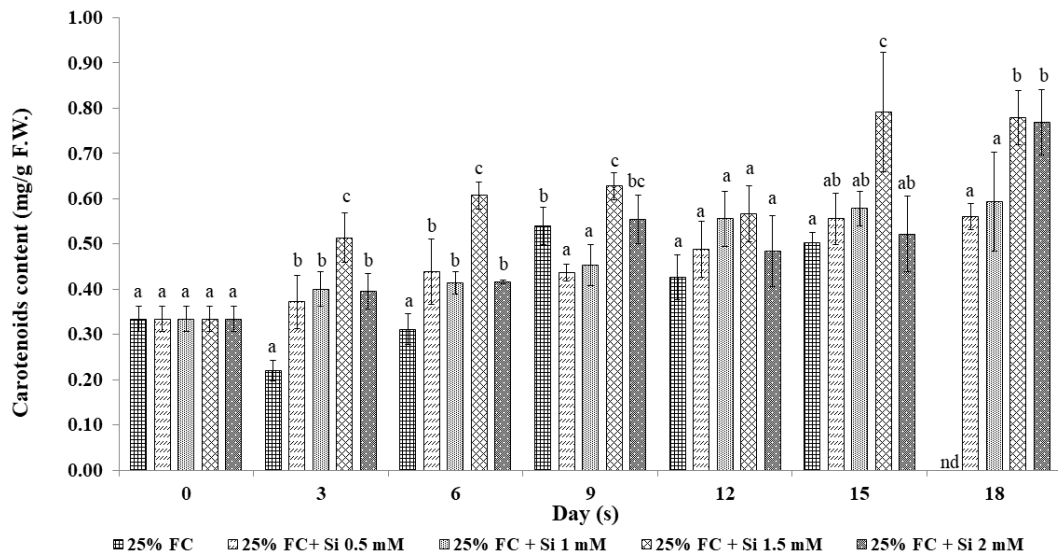
ปริมาณแคโรทีนอยด์

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มี ปริมาณแคโรทีนอยด์ มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.34, 0.38, 0.29 และ 0.30 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.69, 0.82 และ 0.80 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีปริมาณปริมาณแคโรทีนอยด์ น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1, 1.5 และ 2mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.41, 0.45, 0.57 และ 0.44 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์ น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.28, 0.22 และ 0.23 เท่า ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 6 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มี ปริมาณแคโรทีนอยด์ มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่ไม่พ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.95, 0.39, 0.47 และ 0.46 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับ ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.40, 0.33 และ 0.34 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีปริมาณปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1, 1.5 และ 2mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.29, 0.25, 0.49 และ 0.25 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์ น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.28, 0.32 และ 0.31 เท่า ตามลำดับ

mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์ น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.30, 0.27 และ 0.34 เท่า ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์ มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.39 และ 0.31 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 2 mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์มากกว่าต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.37 และ 0.30 เท่า ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.28 และ 0.27 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์ น้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.24 และ 0.23 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 32 และตาราง 14)



ภาพประกอบ 32 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC และพืชนิลิคอนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

ตาราง 14 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

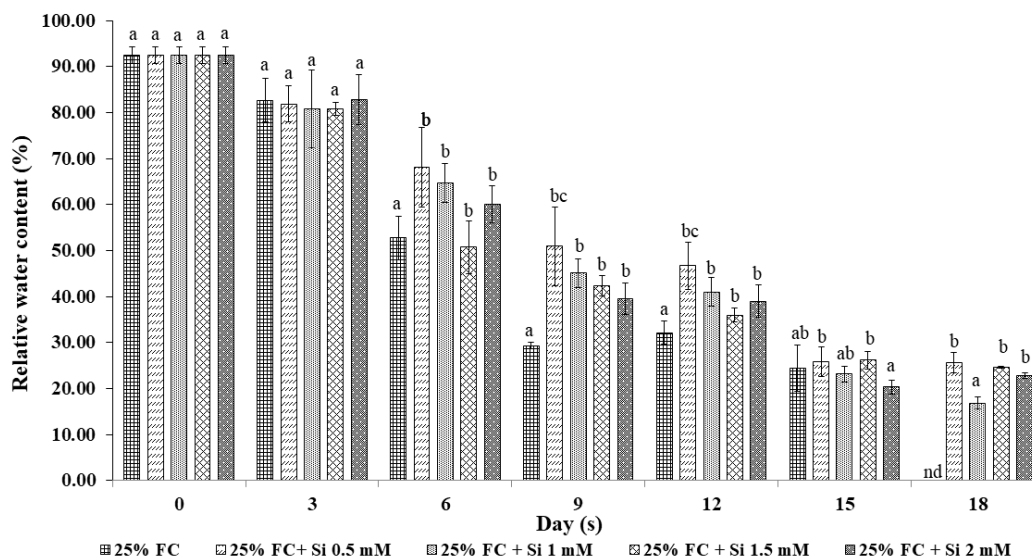
Treatment	Carotenoids content (mg/g F.W.) (Mean \pm SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
25% FC	0.335 \pm 0.028	0.220 \pm 0.023a	0.312 \pm 0.034a	0.540 \pm 0.041b	0.427 \pm 0.050	0.503 \pm 0.022a	nd
25% FC + 0.5 mM Si	0.335 \pm 0.028	0.372 \pm 0.058b	0.438 \pm 0.072b	0.437 \pm 0.019a	0.488 \pm 0.061	0.555 \pm 0.057ab	0.561 \pm 0.029a
25% FC + 1 mM Si	0.335 \pm 0.028	0.400 \pm 0.039b	0.414 \pm 0.025b	0.454 \pm 0.046a	0.556 \pm 0.061	0.579 \pm 0.038ab	0.594 \pm 0.110a
25% FC + 1.5mM Si	0.335 \pm 0.028	0.514 \pm 0.055c	0.607 \pm 0.030c	0.628 \pm 0.029c	0.567 \pm 0.062	0.791 \pm 0.131c	0.780 \pm 0.060b
25% FC + 2 mM Si	0.335 \pm 0.028	0.396 \pm 0.039b	0.417 \pm 0.004b	0.555 \pm 0.053bc	0.485 \pm 0.079	0.522 \pm 0.083ab	0.770 \pm 0.072b

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำกับตัวเลขที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

nd = ไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 15 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.5 mM มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่พ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.27 และ 0.29 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 2 mM มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.21 และ 0.22 เท่า ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5, 1.5 และ 2mM มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์มากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่พ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.52, 0.46 และ 0.35 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1 mM มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5, 1.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.34, 0.32 และ 0.26 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 33 และตาราง 15)



ภาพประกอบ 33 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ nd แสดงถึงไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

ตาราง 15 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาพแวดล้อมที่ระดับ 25% FC และพันธุ์ซิลิคอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Treatment	Relative water content (%) (Mean \pm SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
25% FC	92.54 \pm 1.850	82.71 \pm 4.757	52.74 \pm 4.776a	29.32 \pm 0.697a	32.17 \pm 2.467a	24.36 \pm 5.013ab	nd
25% FC + 0.5 mM Si	92.54 \pm 1.850	81.91 \pm 4.008	68.06 \pm 8.670b	50.91 \pm 8.533bc	46.75 \pm 5.116bc	25.84 \pm 3.195b	25.64 \pm 2.143b
25% FC + 1 mM Si	92.54 \pm 1.850	80.81 \pm 8.483	64.74 \pm 4.241b	45.10 \pm 3.181b	40.99 \pm 3.130b	23.13 \pm 1.654ab	16.88 \pm 1.389a
25% FC + 1.5mM Si	92.54 \pm 1.850	80.85 \pm 1.461	50.73 \pm 5.662a	42.32 \pm 2.153b	35.96 \pm 1.543b	26.15 \pm 1.928b	24.69 \pm 0.184b
25% FC + 2 mM Si	92.54 \pm 1.850	82.80 \pm 5.395	60.13 \pm 4.049ab	39.54 \pm 3.515b	38.96 \pm 3.536b	20.31 \pm 1.514a	22.76 \pm 0.578b

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กหลังตัวเลขที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

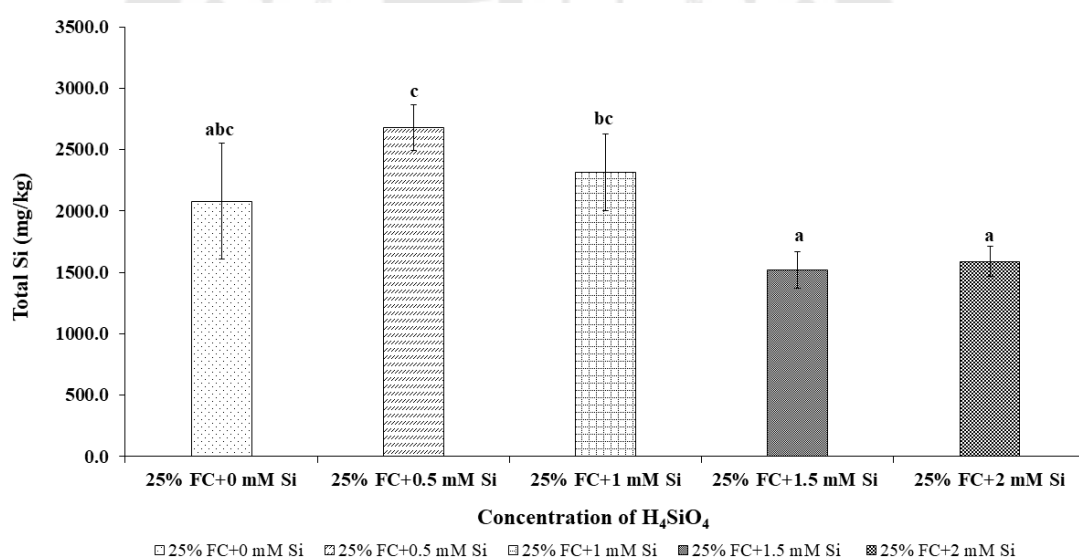
nd = ไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากต้นพืช *D. tinctoria* ตาย

การหาระดับความเข้มข้นของซิลิโคนที่เหมาะสมในพืช *Dicliptera tinctoria* (Nees) Klostel เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง

ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกันในวันแรกของการทดลอง เป็นระยะเวลา 18 วัน พบว่า ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 mM มีปริมาณซิลิโคนสะสมในต้นพืชเท่ากับ 2077.67, 2067.77, 2317.33, 1518.33 และ 1590.00 mg/kg ตามลำดับ ต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 mM มีปริมาณซิลิโคนสะสมในต้นพืชมากที่สุด โดยมากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.76 และ 0.68 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1 mM มีปริมาณซิลิโคนที่สะสมในต้นพืชมากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.53 และ 0.46 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 mM มีปริมาณซิลิโคนสะสมในต้นพืชน้อยที่สุด โดยน้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.43 และ 0.34 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวกับต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 2 mM มีปริมาณซิลิโคนที่สะสมในต้นพืชน้อยกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 mM และ 1 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.40 และ 0.31 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 32)

จากการศึกษาผลของซิลิโคนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่แตกต่างกันข้างต้น (ภาพประกอบ 26 และ 27) เพื่อประเมินผลกระทบของสภาวะเครียดจากความแล้งต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช เพื่อใช้หาระดับของซิลิโคนที่เหมาะสมเมื่อพืชได้รับความเครียดจากความแล้ง พบว่าต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า Pi ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และ ปริมาณแคโรทีนอยด์ มากที่สุดในวันที่ 3 วันที่ 6 วันที่ 9 และวันที่ 15 ของการทดลอง โดยวันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.54, 0.70, 0.24 และ 0.64 เท่า ตามลำดับ วันที่ 6 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า Pi ไม่แตกต่างจากต้นพืช

เครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่พ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.95, 0.39, 0.47 และ 0.46 เท่า ตามลำดับ วันที่ 9 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่พ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.16, 0.44, 0.38 และ 0.13 เท่า ตามลำดับ และวันที่ 15 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่พ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.57, 0.43, 0.37 และ 0.52 เท่า ตามลำดับ จากผลการทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นว่าซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมเมื่อพืชได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกระดับความเข้มข้นของซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM เพื่อนำมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป



ภาพประกอบ 34 ปริมาณซิลิคอนที่สะสมในต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.2 การศึกษาผลของซิลิโคนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สารพฤกษเคมี และสารต้านอนุมูลอิสระของพืช ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้ง

พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา ดังภาพประกอบ 35 36 และ 37 และการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา ได้แก่ ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบพืช ค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (maximum quantum efficiency of PSII photochemistry; Fv/Fm) ค่า performance index (Pi) และปริมาณรงควัตถุที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงในใบพืช (pigment content) ได้แก่ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ปริมาณแคโรทีนอยด์ ปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ ปริมาณโปรตีน ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ การเปิดปิดปากใบพืช การร่วงไหลของอิเล็กโทรไลต์ กิจกรรมของสารต้านอนุมูลอิสระอะสเคเลส และปริมาณซิลิโคน





ภาพประกอบ 35 การศึกษาผลของซาลิซิลิคอนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สารพฤกษเคมี และ สารต้านอนุมูลอิสระของพืช ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง ประกอบด้วย ต้นพืชในชุดควบคุมที่ไม่ได้พ่นซาลิซิลิคอน (A) ต้นพืชในชุดควบคุมและพ่นซาลิซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM (B) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่พ่นซาลิซิลิคอน (C) และต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซาลิซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM (D) ในวันแรกของการทดลอง



ภาพประกอบ 36 การศึกษาผลของซาลิซิลิคอนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สารพฤกษเคมี และ สารต้านอนุมูลอิสระของพืช ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง ประกอบด้วย ต้นพืชในชุดควบคุมที่ไม่ได้พ่นซาลิซิลิคอน (A) ต้นพืชในชุดควบคุมและพ่นซาลิซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM (B) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่พ่นซาลิซิลิคอน (C) และต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซาลิซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM (D) ในวันที่ 3 ของการทดลองและทำการให้น้ำกับต้นพืช (re-watering)

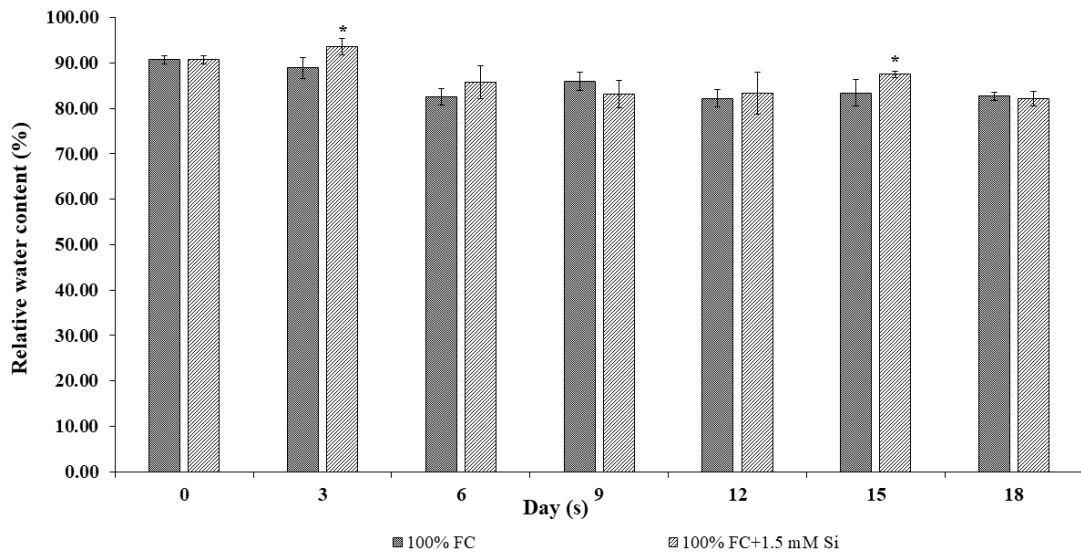


ภาพประกอบ 37 วันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับการให้น้ำ (re-watering) หลังจากได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ประกอบด้วย ต้นพืชในชุดควบคุมที่ไม่ได้พ่นซิลิโคน (A) ต้นพืชในชุดควบคุมและพ่นซิลิโคนความเข้มข้น 1.5 mM (B) ต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่พ่นซิลิโคน (C) และต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนความเข้มข้น 1.5 mM (D)

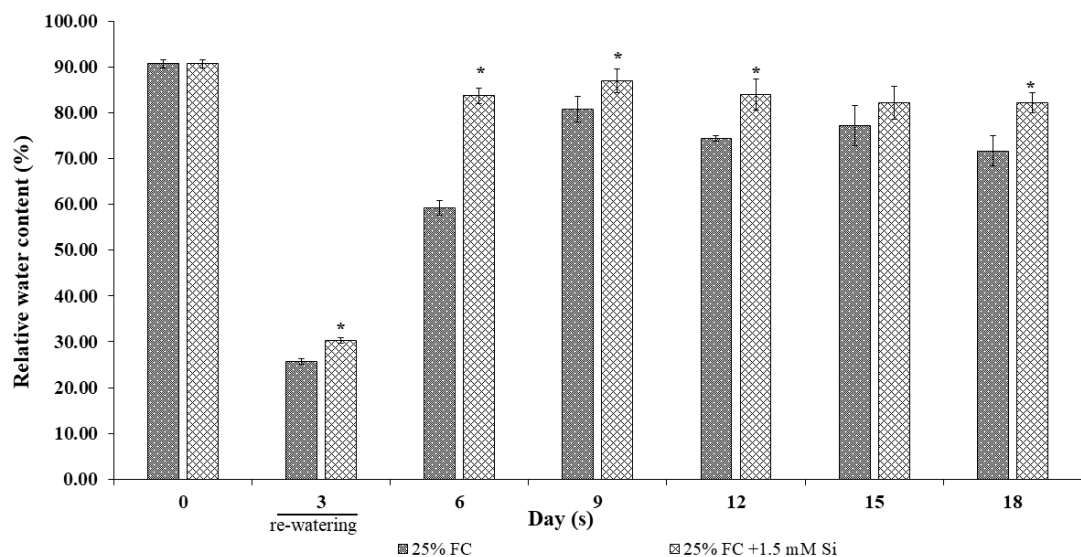
ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบพืช

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการพ่นซิลิโคนที่ระดับความเข้มข้น 1.5 mM ให้กับต้นพืช พบว่าวันที่ 3 และวันที่ 15 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์มากกว่าต้นพืชในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.05 และ 0.05 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 38 และตาราง 16)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์มากกว่าต้นที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.18 เท่า เมื่อได้ทำการให้น้ำกับต้นพืช (re-watering) ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่า วันที่ 6, 9, 12 และ 18 ของการทดลอง พบว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.41, 0.08, 0.13 และ 0.15 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 34)



ภาพประกอบ 38 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test



ภาพประกอบ 39 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

ตาราง 16 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพบชนิดโคนความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	Relative water content (%) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.795 ± 0.003	0.718 ± 0.005	0.795 ± 0.003	0.718 ± 0.005	0.795 ± 0.003	0.718 ± 0.005	0.795 ± 0.003
100% FC + 1.5 mM Si	0.795 ± 0.003	0.713 ± 0.007	0.795 ± 0.003	0.713 ± 0.007	0.795 ± 0.003	0.713 ± 0.007	0.795 ± 0.003

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ตาราง 17 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพบชนิดโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

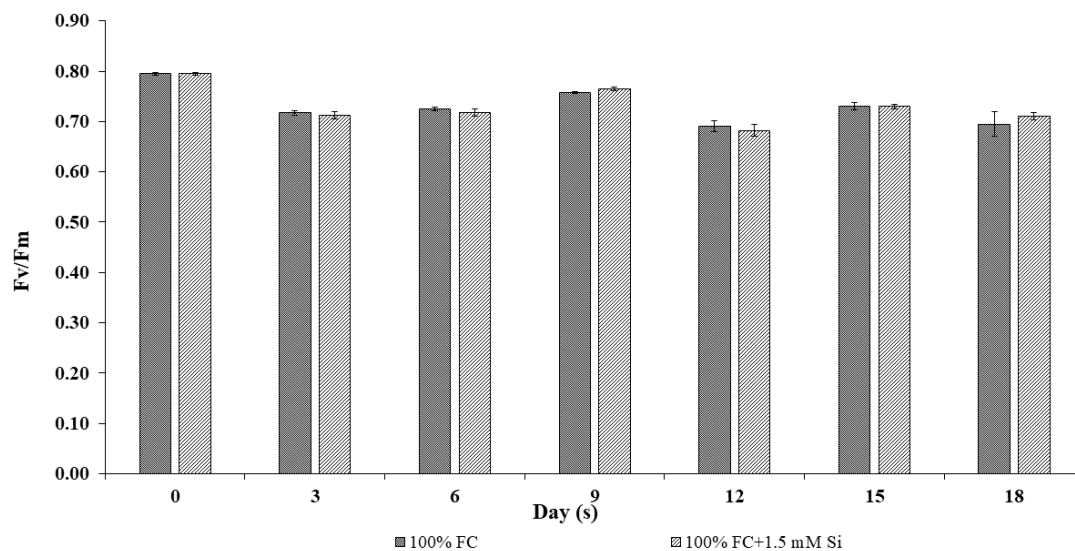
Treatment	Relative water content (%) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.795 ± 0.003	0.718 ± 0.005	0.795 ± 0.003	0.718 ± 0.005	0.795 ± 0.003	0.718 ± 0.005	0.795 ± 0.003
100% FC + 1.5 mM Si	0.795 ± 0.003	0.713 ± 0.007	0.795 ± 0.003	0.713 ± 0.007	0.795 ± 0.003	0.713 ± 0.007	0.795 ± 0.003

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

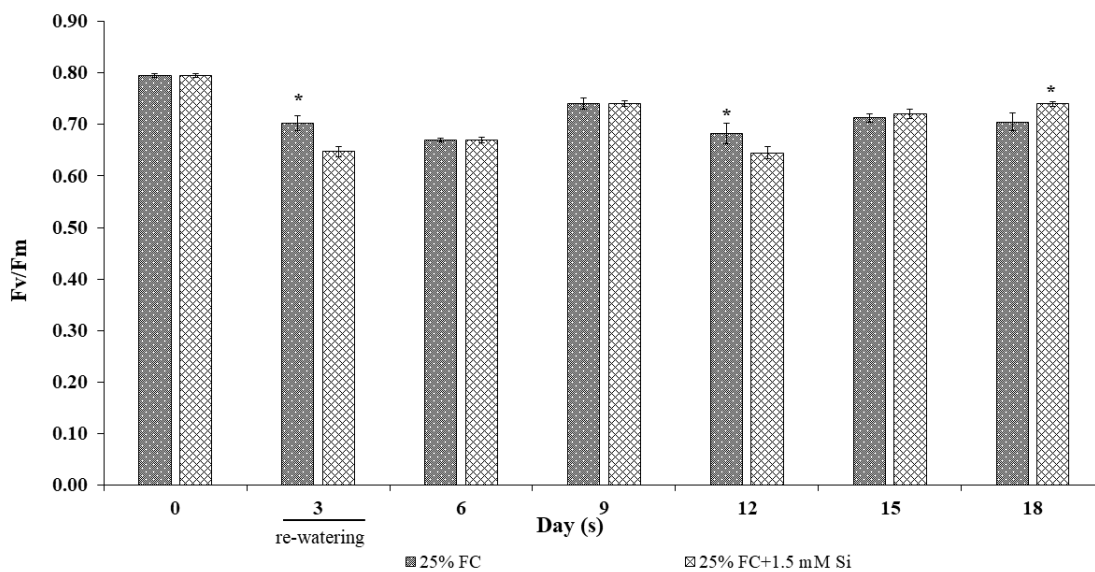
ประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (maximum quantum efficiency of PSII photochemistry; Fv/Fm)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ถึงวันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า Fv/Fm ไม่แตกต่างกัน (ภาพประกอบ 40 และตาราง 18)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีค่า Fv/Fm มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.08 เท่า เมื่อได้ทำการให้น้ำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่าในวันที่ 12 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีค่า Fv/Fm มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.06 เท่า และเมื่อได้ทำการให้น้ำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง ในวันที่ 18 ของการทดลอง พบว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า Fv/Fm มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.05 เท่า (ภาพประกอบ 41 และตาราง 19)



ภาพประกอบ 40 ค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (chlorophyll fluorescence, Fv/Fm) ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test



ภาพประกอบ 41 ค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

ตาราง 18 ค่า Fv/Fm ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพบชิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	Fv/Fm (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.795 ± 0.003	0.718 ± 0.005	0.795 ± 0.003	0.718 ± 0.005	0.795 ± 0.003	0.718 ± 0.005	0.795 ± 0.003
100% FC + 1.5 mM Si	0.795 ± 0.003	0.713 ± 0.007	0.795 ± 0.003	0.713 ± 0.007	0.795 ± 0.003	0.713 ± 0.007	0.795 ± 0.003

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ตาราง 19 Fv/Fm ของต้นพืชของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพบชิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

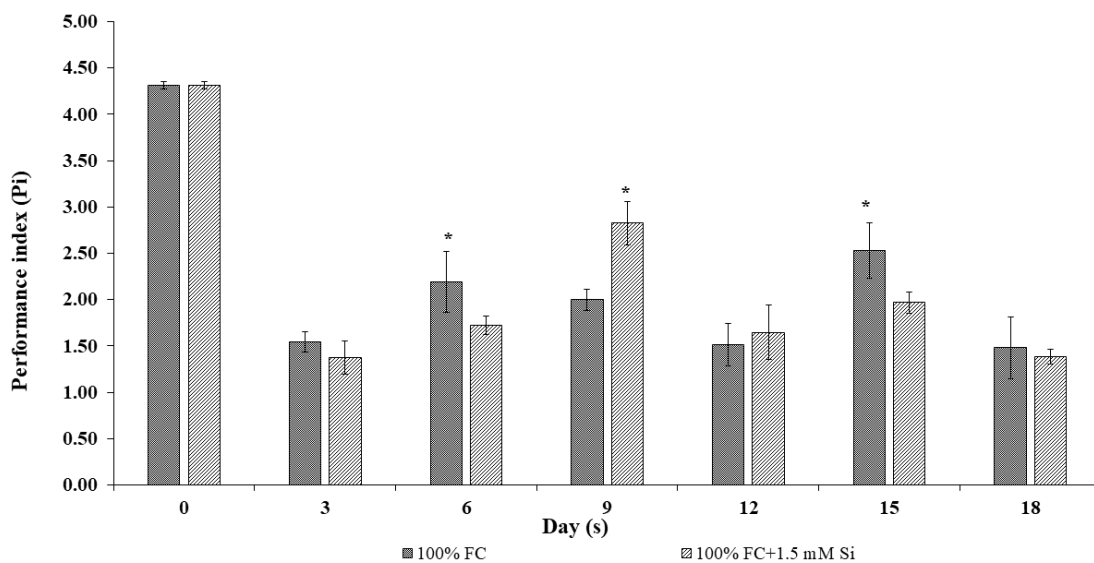
Treatment	Fv/Fm (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
25% FC	0.795 ± 0.003	0.703 ± 0.014*	0.670 ± 0.004	0.740 ± 0.011	0.683 ± 0.019*	0.713 ± 0.008	0.705 ± 0.017
25% FC + 1.5 mM Si	0.795 ± 0.003	0.648 ± 0.010	0.670 ± 0.006	0.740 ± 0.006	0.645 ± 0.012	0.720 ± 0.009	0.740 ± 0.004*

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

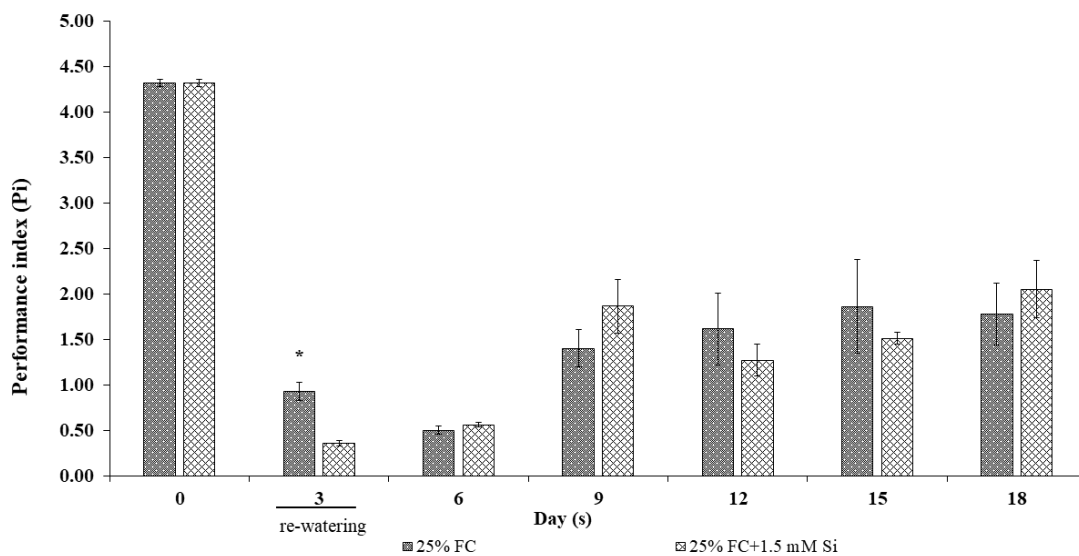
Performance index (Pi)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 6 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.27 เท่า ในวันที่ 9 ของการทดลอง พบว่าต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.41 เท่า และในวันที่ 15 ของการทดลอง พบว่าต้นพืชในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.29 เท่า (ภาพประกอบ 42 และตาราง 20)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.59 เท่า และเมื่อได้ทำการให้น้ำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่า วันที่ 6 ถึง วันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนมีค่า Pi ไม่แตกต่างกับต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM (ภาพประกอบ 43 และตาราง 21)



ภาพประกอบ 42 ค่า performance index (Pi) ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test



ภาพประกอบ 43 ค่า performance index (Pi) ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

ตาราง 20 ค่า Pi ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	Pi (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	4.315 ± 0.042	1.545 ± 0.106	2.190 ± 0.332 *	1.998 ± 0.114	1.510 ± 0.230	2.533 ± 0.297 *	1.483 ± 0.334
100% FC + 1.5 mM Si	4.315 ± 0.042	1.375 ± 0.176	1.725 ± 0.097	2.825 ± 0.231 *	1.645 ± 0.294	1.968 ± 0.111	1.385 ± 0.075

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ตาราง 21 ค่า Pi ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

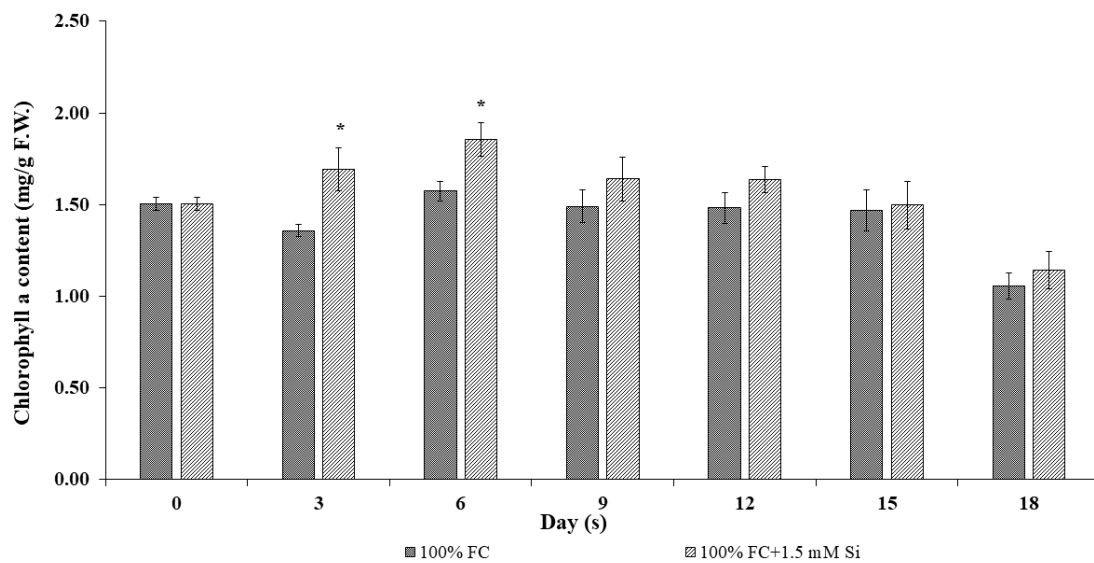
Treatment	Fv/Fm (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
25% FC	4.315 ± 0.042	0.928 ± 0.097 *	0.503 ± 0.043	1.403 ± 0.207	1.615 ± 0.397	1.863 ± 0.519	1.778 ± 0.345
25% FC + 1.5 mM Si	4.315 ± 0.042	0.358 ± 0.027	0.563 ± 0.029	1.865 ± 0.293	1.273 ± 0.170	1.513 ± 0.063	2.053 ± 0.318

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ

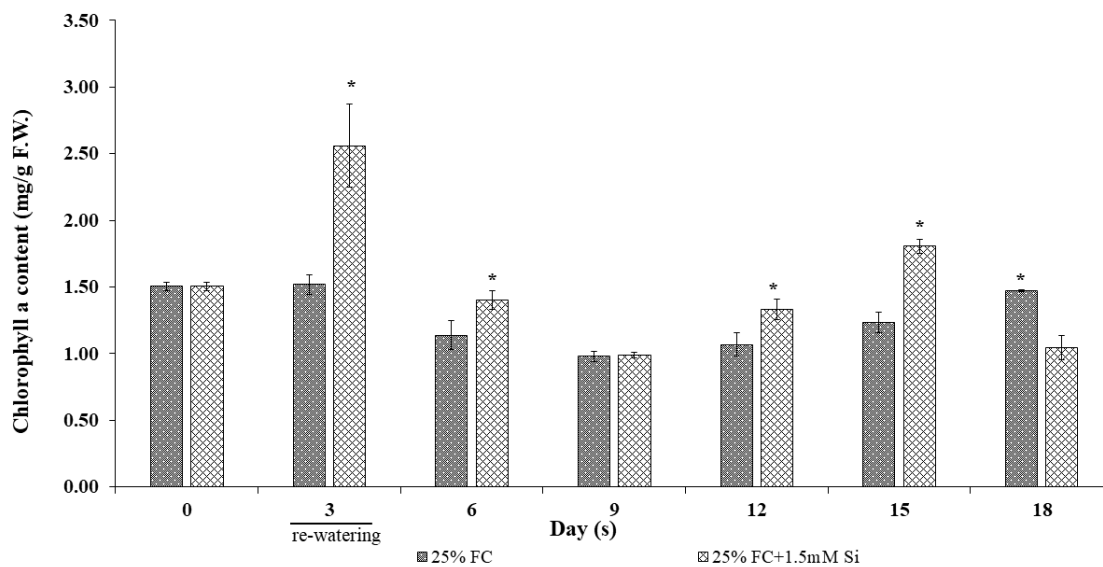
จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3, วันที่ 6 และ วันที่ 12 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.25, 0.18 และ 0.10 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 44 และตาราง 22)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.69 เท่า เมื่อได้ทำการให้น้ำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่า วันที่ 6 วันที่ 12 และ วันที่ 15 ของการทดลอง ต้นพืชได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.23, 0.25 และ 0.46 เท่า ตามลำดับ และวันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.41 เท่า (ภาพประกอบ 45 และตาราง 23)



ภาพประกอบ 44 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี

T-test



ภาพประกอบ 45 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

ตาราง 22 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	Chlorophyll a content (mg/g F.W.) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
25% FC	1.504 ± 0.034	1.359 ± 0.032	1.573 ± 0.055	1.490 ± 0.089	1.481 ± 0.084	1.468 ± 0.111	1.058 ± 0.071
25% FC + 1.5 mM Si	1.504 ± 0.034	1.694 ± 0.118 *	1.855 ± 0.092 *	1.639 ± 0.120	1.636 ± 0.073 *	1.498 ± 0.130	1.141 ± 0.101

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ตาราง 23 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

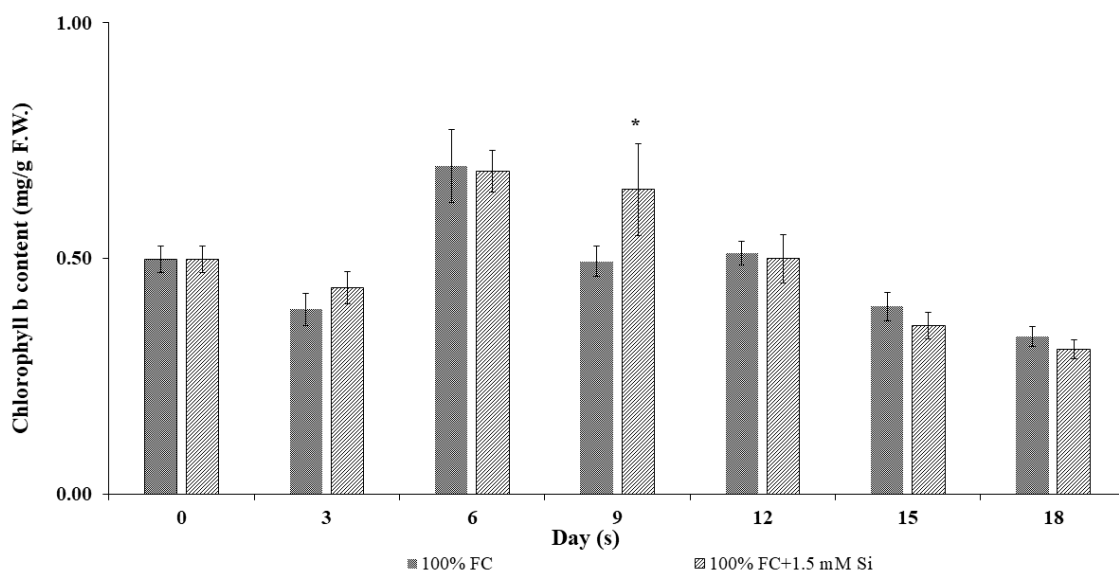
Treatment	Chlorophyll a content (mg/g F.W.) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
25% FC	1.504 ± 0.034	1.518 ± 0.076	1.138 ± 0.108	0.979 ± 0.039	1.067 ± 0.087	1.236 ± 0.078	1.475 ± 0.008*
25% FC + 1.5 mM Si	1.504 ± 0.034	2.558 ± 0.312*	1.403 ± 0.068*	0.990 ± 0.021	1.333 ± 0.074*	1.806 ± 0.053*	1.044 ± 0.089

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี

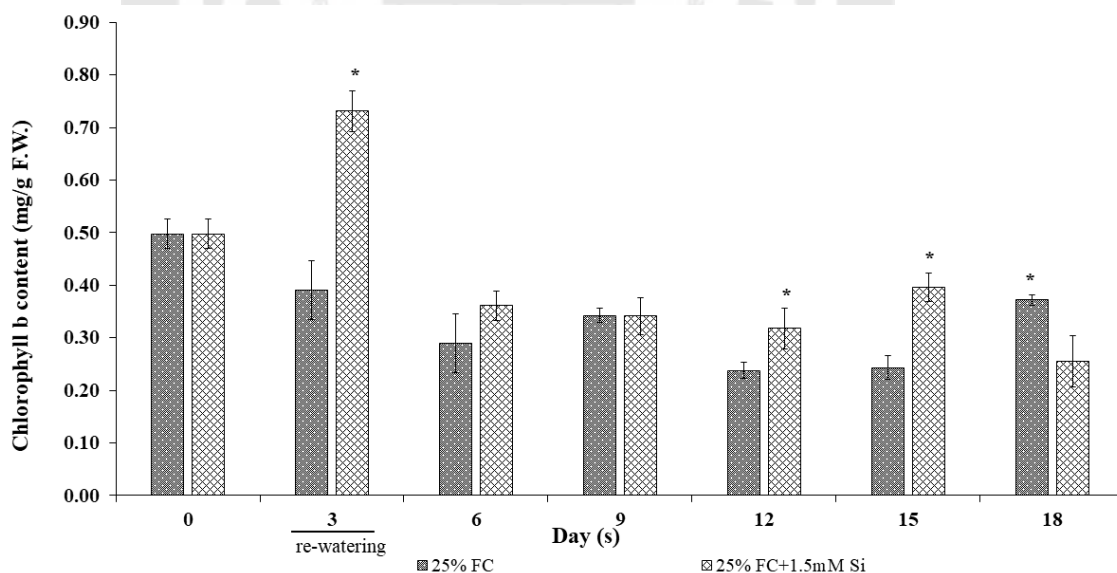
จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 9 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี มากกว่า ต้นพืชที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.31 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 46 และตาราง 24)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.87 เท่า เมื่อได้ทำการให้น้ำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่า วันที่ 12 และ วันที่ 15 ของการทดลอง ต้นพืชได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.34 และ 0.63 เท่า ตามลำดับ และวันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี มากกว่าต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.45 เท่า (ภาพประกอบ 47 และตาราง 25)



ภาพประกอบ 46 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบด้วย

วิธี T-test



ภาพประกอบ 47 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อ

เปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

ตาราง 24 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	Chlorophyll b content (mg/g F.W.) (Mean \pm SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.498 \pm 0.029	0.393 \pm 0.034	0.696 \pm 0.077	0.494 \pm 0.033	0.512 \pm 0.025	0.399 \pm 0.030	0.334 \pm 0.022
100% FC + 1.5 mM Si	0.498 \pm 0.029	0.438 \pm 0.034	0.686 \pm 0.044	0.647 \pm 0.098*	0.500 \pm 0.051	0.350 \pm 0.029	0.308 \pm 0.020

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ตาราง 25 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

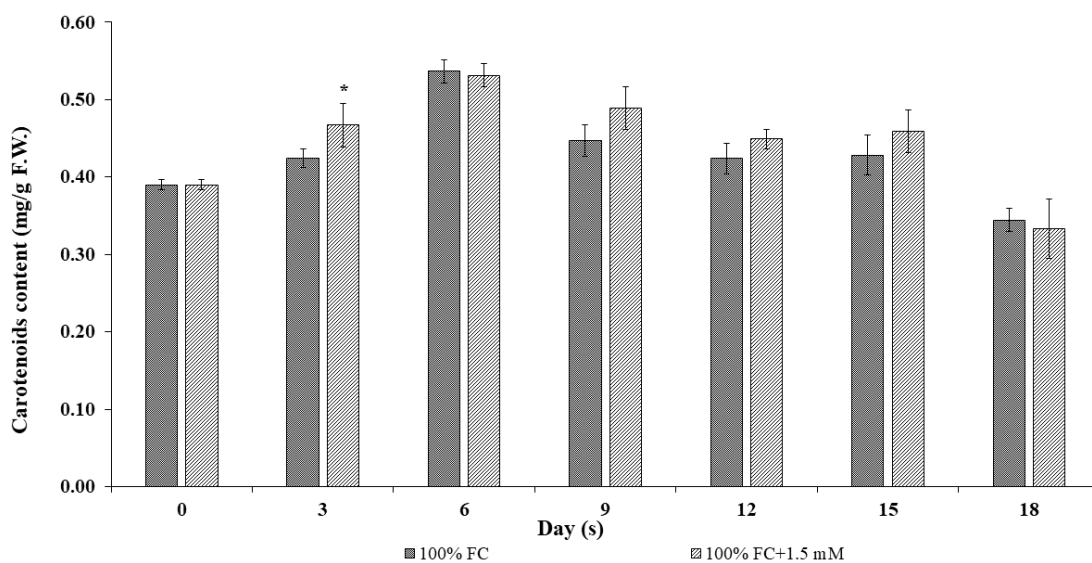
Treatment	Chlorophyll b content (mg/g F.W.) (Mean \pm SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.498 \pm 0.029	0.391 \pm 0.056	0.289 \pm 0.056	0.343 \pm 0.014	0.238 \pm 0.015	0.243 \pm 0.022	0.372 \pm 0.010*
100% FC + 1.5 mM Si	0.498 \pm 0.029	0.732 \pm 0.039*	0.361 \pm 0.028	0.341 \pm 0.035	0.318 \pm 0.039*	0.395 \pm 0.027*	0.256 \pm 0.049

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

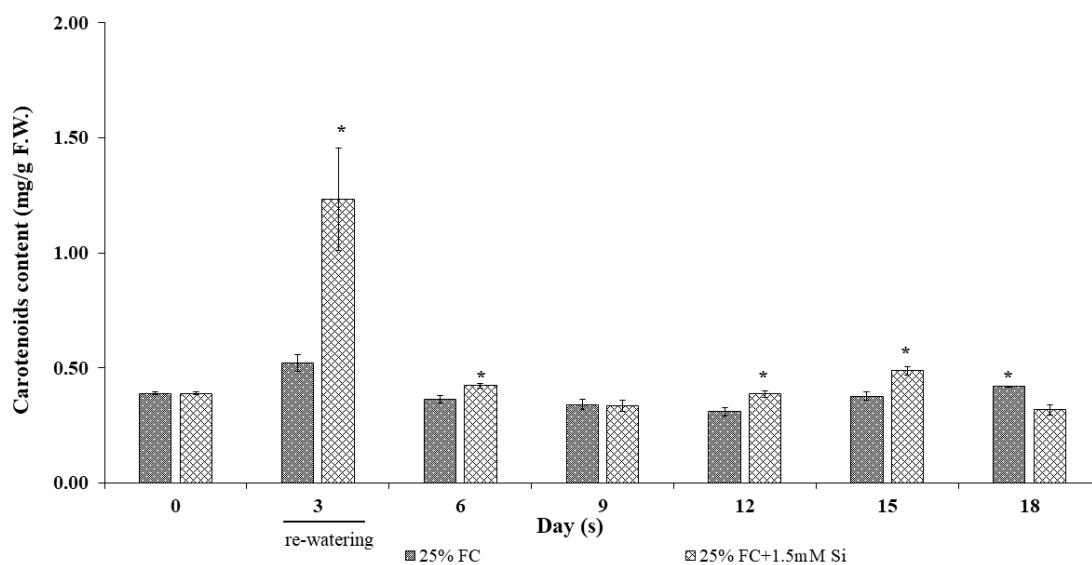
ปริมาณแคโรทีนอยด์

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.10 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 48 และตาราง 26)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.36 เท่า เมื่อได้ทำการให้น้ำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่า วันที่ 6, วันที่ 12 และ วันที่ 15 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณแคโรทีนอยด์ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.16, 0.25 และ 0.29 เท่า ตามลำดับ และวันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนมีปริมาณแคโรทีนอยด์ มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.32 เท่า (ภาพประกอบ 49 และตาราง 27)



ภาพประกอบ 48 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test



ภาพประกอบ 49 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

ตาราง 26 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	Carotenoids content (mg/g F.W.) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.390 ± 0.006	0.424 ± 0.012	0.537 ± 0.015	0.447 ± 0.021	0.424 ± 0.020	0.428 ± 0.026	0.344 ± 0.015
100% FC + 1.5 mM Si	0.390 ± 0.006	0.467 ± 0.028*	0.531 ± 0.015	0.489 ± 0.028	0.449 ± 0.013	0.459 ± 0.027	0.33 ± 0.038

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ตาราง 27 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

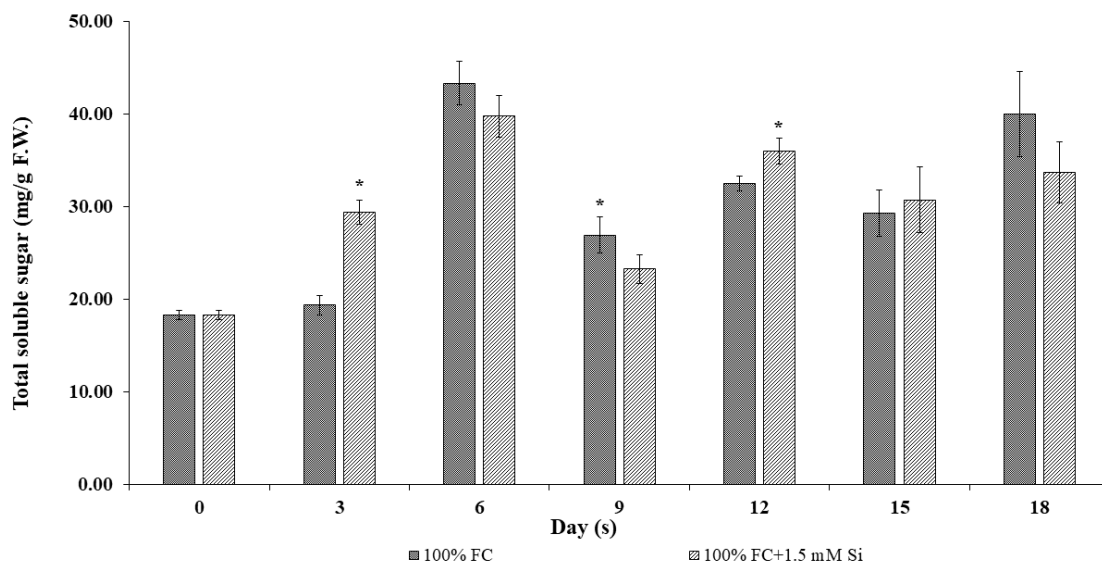
Treatment	Carotenoids content (mg/g F.W.) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.390 ± 0.006	0.522 ± 0.036	0.365 ± 0.018	0.341 ± 0.022	0.310 ± 0.020	0.378 ± 0.019	0.420 ± 0.003*
100% FC + 1.5 mM Si	0.390 ± 0.006	1.234 ± 0.221*	0.423 ± 0.010*	0.336 ± 0.023	0.387 ± 0.013*	0.488 ± 0.020*	0.318 ± 0.022

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

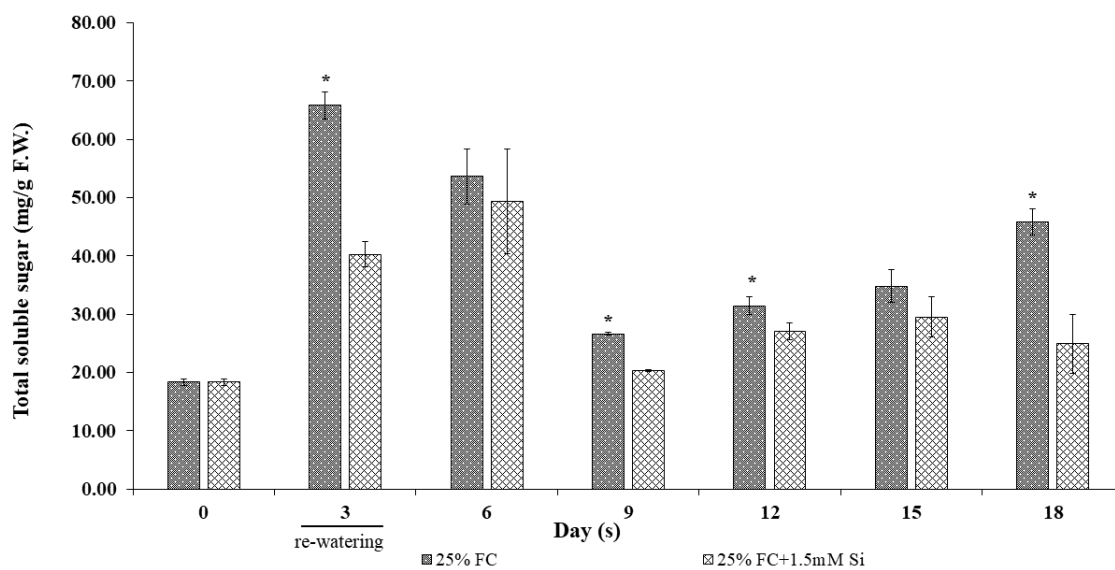
ปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.52 เท่า ขณะที่ วันที่ 9 ของการทดลอง ต้นพืชในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.16 เท่า และวันที่ 12 ของการทดลอง ต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.11 เท่า (ภาพประกอบ 50 และตาราง 28)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนมีปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ มากกว่าต้นพืชที่พ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.64 เท่า เมื่อได้ทำการให้น้ำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่า วันที่ 9, วันที่ 12 และ วันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนมีปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.31, 0.16 และ 0.84 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 51 และตาราง 29)



ภาพประกอบ 50 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test



ภาพประกอบ 51 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

ตาราง 28 ปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนความเข้มข้น 1.5mM

Treatment	Total soluble sugar content (mg/g F.W.) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	18.35 ± 0.504	19.37 ± 1.055	43.35 ± 2.328	26.96 ± 1.924*	32.49 ± 0.782	29.31 ± 2.484	40.01 ± 4.568
100% FC + 1.5 mM Si	18.35 ± 0.504	29.44 ± 1.317*	39.77 ± 2.288	23.27 ± 1.541	36.01 ± 1.426*	30.74 ± 3.571	33.67 ± 3.300

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ตาราง 29 ปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

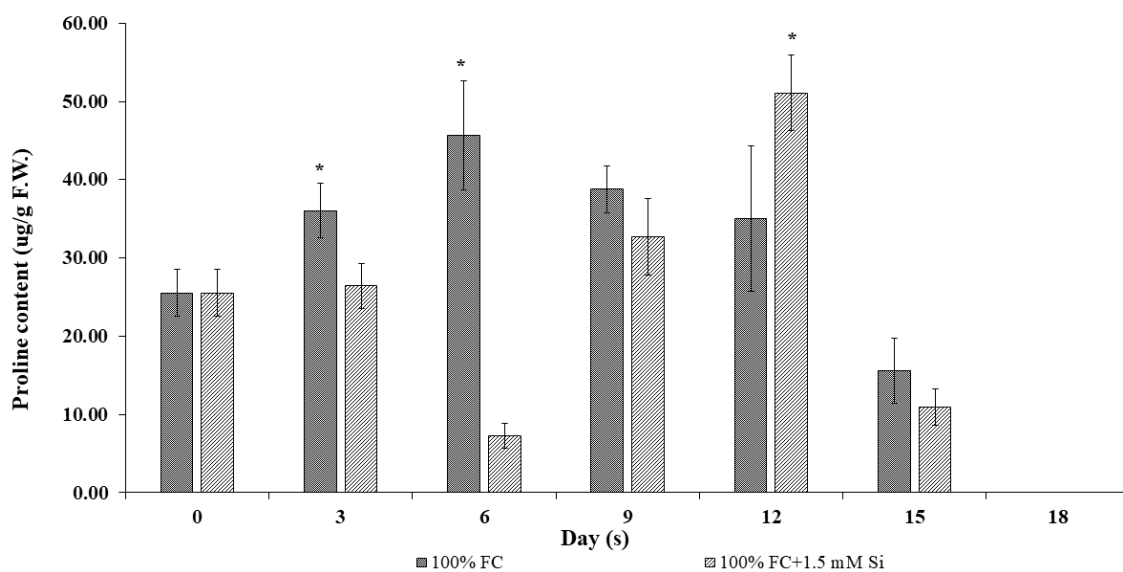
Treatment	Total soluble sugar content (mg/g F.W.) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	18.35 ± 0.504	65.84 ± 2.378*	53.68 ± 4.733	26.66 ± 0.210*	31.49 ± 1.452*	34.79 ± 2.802	45.84 ± 2.205*
100% FC + 1.5 mM Si	18.35 ± 0.504	40.26 ± 2.175	49.36 ± 8.973	20.39 ± 0.141	27.08 ± 1.385	29.53 ± 3.410	24.94 ± 5.019

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

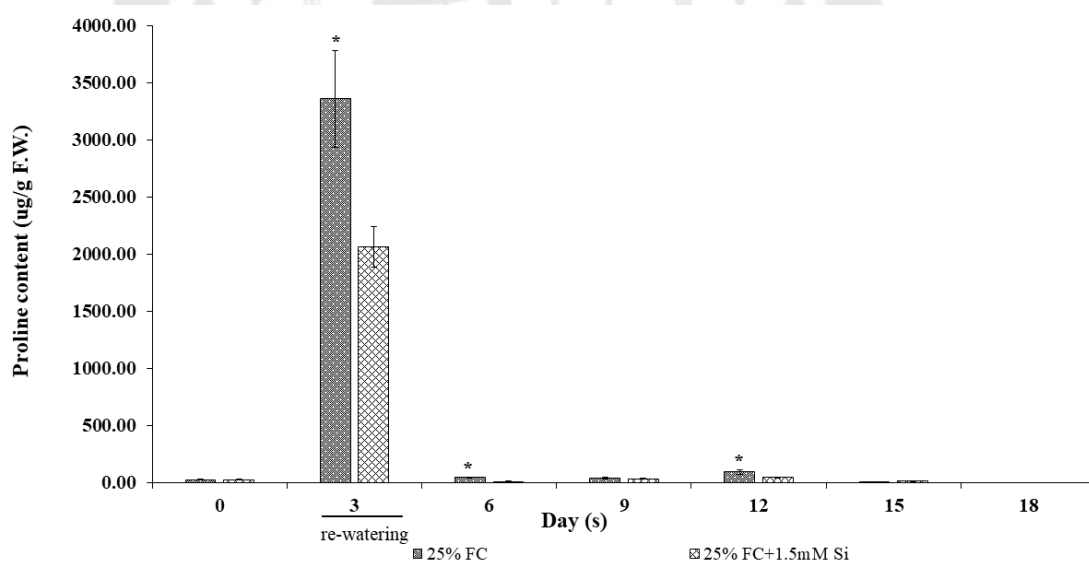
ปริมาณโพรลิน

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 และวันที่ 6 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีปริมาณโพรลินมากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.36 และ 5.30 เท่า ตามลำดับ ขณะที่วันที่ 12 ของการทดลอง ต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณโพรลิน มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.46 เท่า (ภาพประกอบ 47)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.63 เท่า เมื่อได้ทำการให้น้ำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่า วันที่ 6 และ วันที่ 12 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 3.02 และ 1.00 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 48)



ภาพประกอบ 52 ปริมาณโพรลีนของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test



ภาพประกอบ 53 ปริมาณโพรลีนของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี

T-test

ตาราง 30 ปริมาณโพรลีนของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพบชิลิตคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	Proline content ($\mu\text{g/g F.W.}$) (Mean \pm SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	25.54 \pm 3.008	36.06 \pm 3.523*	45.66 \pm 6.993*	38.79 \pm 3.005	35.02 \pm 9.311	15.57 \pm 4.187	0.000 \pm 0.000
100% FC + 1.5 mM Si	25.54 \pm 3.008	26.42 \pm 2.896	7.253 \pm 1.544	32.73 \pm 4.009	51.06 \pm 4.834*	10.95 \pm 2.351	0.000 \pm 0.000

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ตาราง 31 ปริมาณโพรลีนของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยชิลิตคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพบชิลิตคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

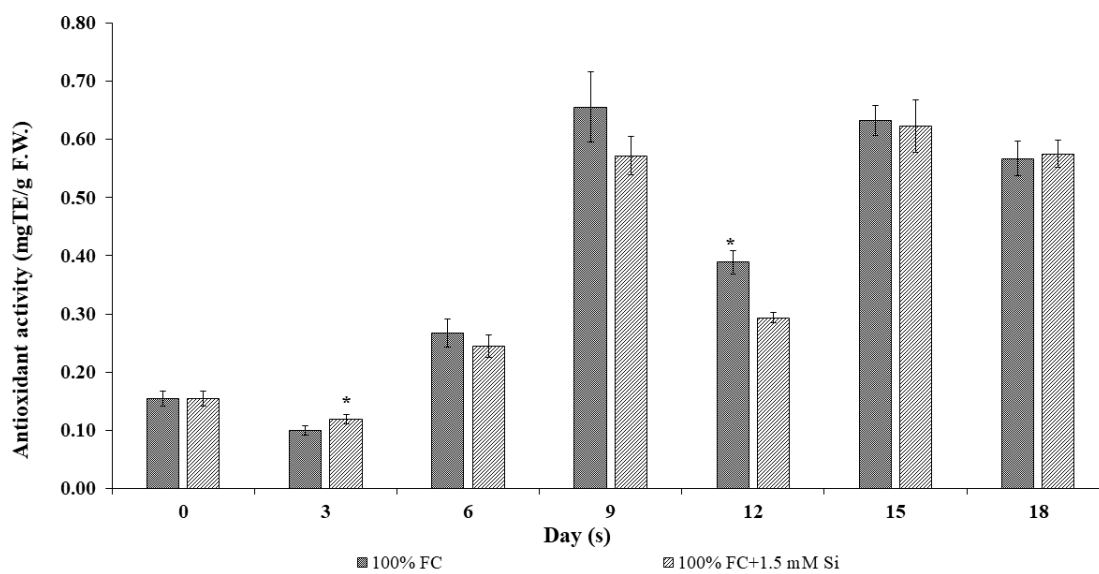
Treatment	Proline content ($\mu\text{g/g F.W.}$) (Mean \pm SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	90.74 \pm 0.910	88.90 \pm 2.324	82.50 \pm 1.773	85.99 \pm 2.037	82.23 \pm 1.914	83.42 \pm 2.869	82.71 \pm 0.891
100% FC + 1.5 mM Si	90.74 \pm 0.910	93.56 \pm 1.824*	85.83 \pm 3.640	83.19 \pm 3.006	83.31 \pm 4.646	87.48 \pm 0.650*	82.09 \pm 1.584

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

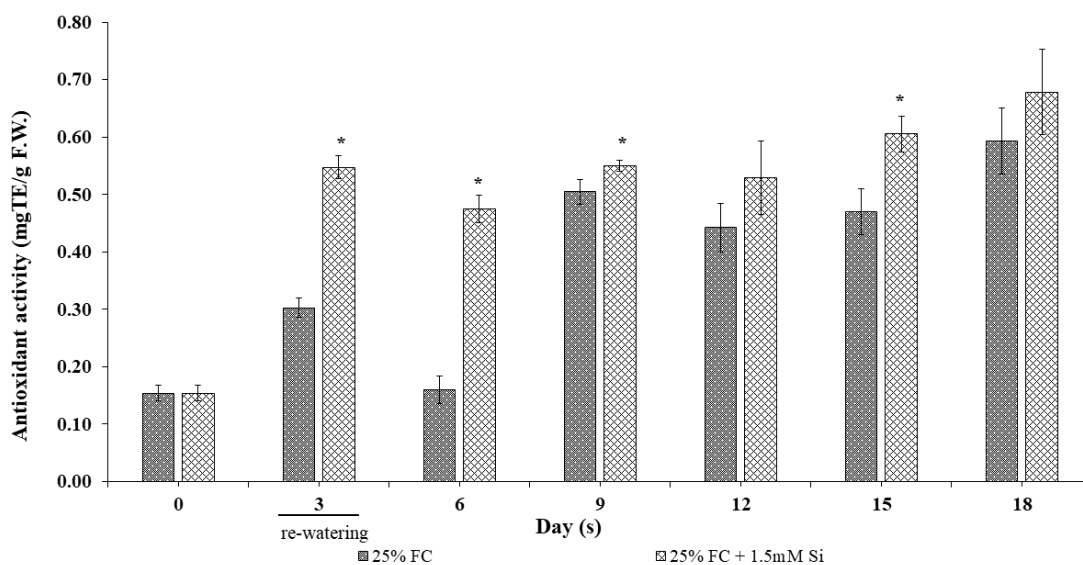
ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

จากผลการทดลองการทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH assay พบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.19 เท่า และ วันที่ 12 ของการทดลอง ต้นพืชในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ มากกว่าต้นพืชและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.36 และ 0.32 เท่า (ภาพประกอบ 54 และตาราง 32)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับการสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.81 เท่า เมื่อได้ทำการให้น้ำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่า วันที่ 6 วันที่ 9 และ วันที่ 12 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับการสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.97, 0.09 และ 0.29 เท่า ตามลำดับ(ภาพประกอบ 55 และตาราง 33)



ภาพประกอบ 54 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test



ภาพประกอบ 55 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสถานะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสถานะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

ตาราง 32 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	Antioxidant activity (mg/TE/g F.W.) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.154 ± 0.013	0.099 ± 0.008	0.268 ± 0.024	0.656 ± 0.061	0.389 ± 0.020*	0.633 ± 0.026	0.567 ± 0.030
100% FC + 1.5 mM Si	0.154 ± 0.013	0.118 ± 0.008*	0.244 ± 0.019	0.572 ± 0.033	0.294 ± 0.009	0.623 ± 0.045	0.575 ± 0.023

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ตาราง 33 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับสารพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

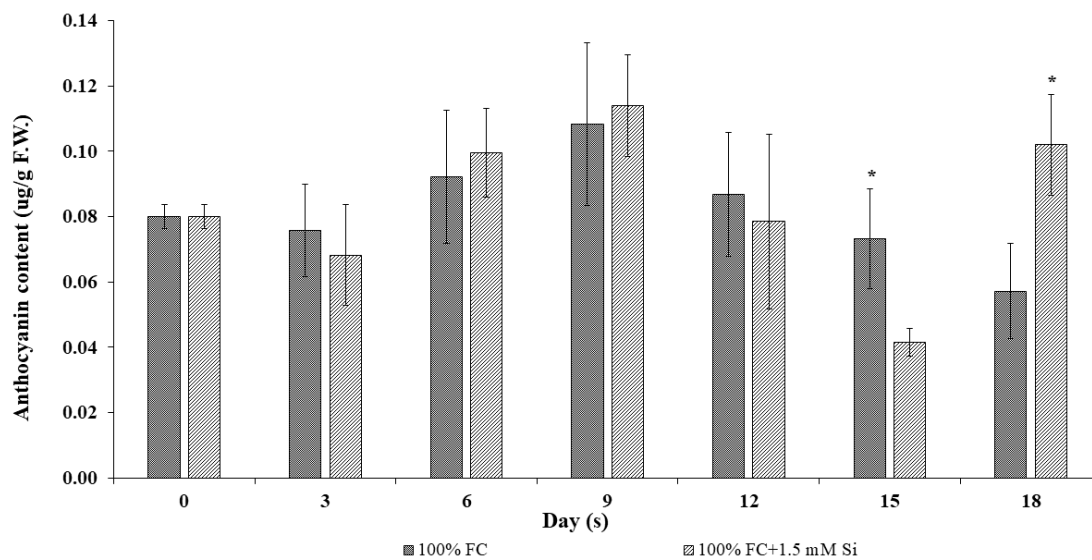
Treatment	Antioxidant activity (mg/TE/g F.W.) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.154 ± 0.013	0.303 ± 0.017	0.160 ± 0.024	0.505 ± 0.020	0.443 ± 0.042	0.470 ± 0.040	0.594 ± 0.057
100% FC + 1.5 mM Si	0.154 ± 0.013	0.548 ± 0.020*	0.475 ± 0.024*	0.551 ± 0.010*	0.529 ± 0.064	0.606 ± 0.031*	0.679 ± 0.075

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ปริมาณแอนโทไซยานิน

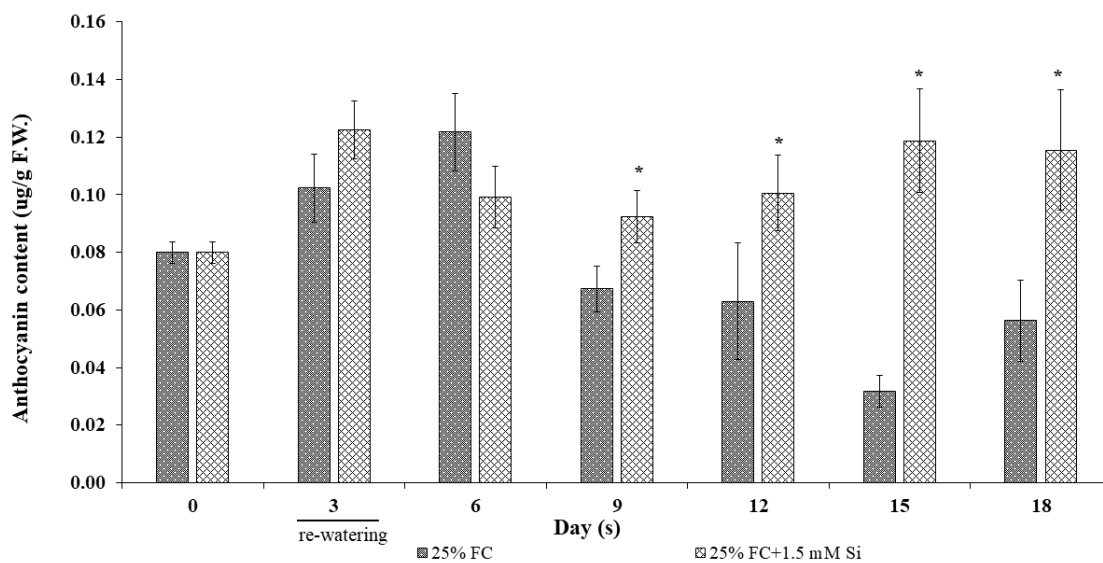
จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 15 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีการสะสมปริมาณแอนโทไซยานิน มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.74 เท่า และ วันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 1.5 mM มีการสะสมปริมาณแอนโทไซยานิน มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.79 เท่า (ภาพประกอบ 56 และตาราง 34)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคนมีปริมาณแอนโทไซยานินไม่แตกต่างกับต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 1.5 mM เมื่อทำการให้น้ำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งพบว่าวันที่ 9 วันที่ 12 วันที่ 15 และวันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีการสะสมปริมาณแอนโทไซยานิน มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.39, 0.60, 2.72 และ 1.07 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 57 และตาราง 35)



ภาพประกอบ 56 ปริมาณแอนโทไซยานินของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี

T-test



ภาพประกอบ 57 ปริมาณแอนโทไซยานินของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

ตาราง 34 ปริมาณแอนโทไซยานินของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติและต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซีดโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	Anthocyanin content ($\mu\text{g/g F.W.}$) (Mean \pm SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.080 \pm 0.004	0.076 \pm 0.0014	0.092 \pm 0.020	0.108 \pm 0.025	0.087 \pm 0.019	0.073 \pm 0.015*	0.057 \pm 0.015
100% FC + 1.5 mM Si	0.080 \pm 0.005	0.068 \pm 0.0015	0.100 \pm 0.014	0.114 \pm 0.016	0.079 \pm 0.027	0.042 \pm 0.004	0.102 \pm 0.015*

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ตาราง 35 ปริมาณแอนโทไซยานินของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซีดโคนและต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพ่นซีดโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

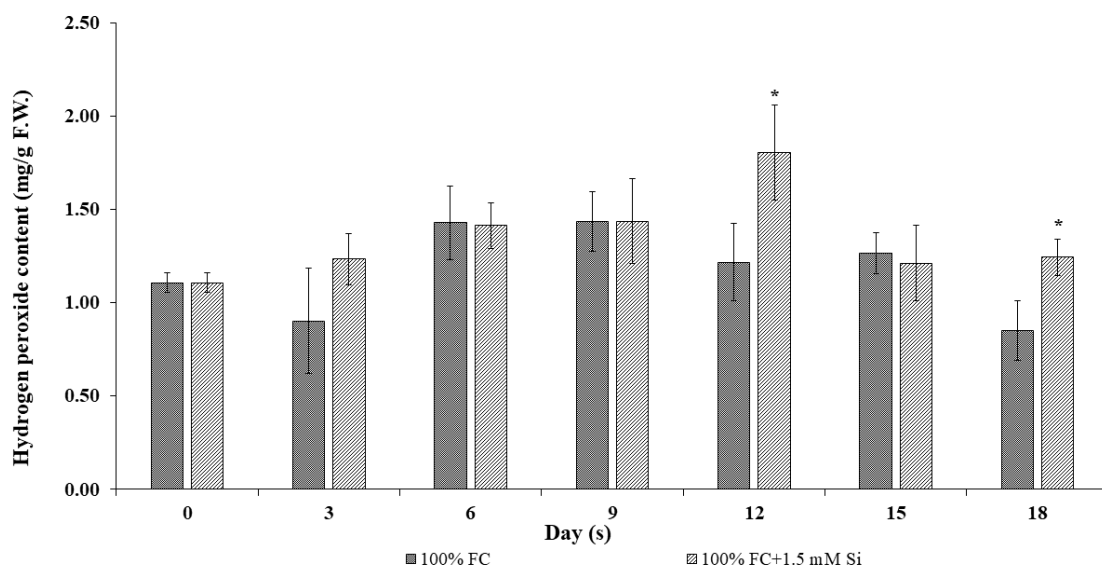
Treatment	Anthocyanin content ($\mu\text{g/g F.W.}$) (Mean \pm SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.080 \pm 0.004	0.102 \pm 0.012	0.122 \pm 0.014	0.067 \pm 0.008	0.063 \pm 0.020	0.032 \pm 0.005	0.056 \pm 0.014
100% FC + 1.5 mM Si	0.080 \pm 0.004	0.123 \pm 0.010	0.099 \pm 0.011	0.093 \pm 0.009*	0.101 \pm 0.013*	0.119 \pm 0.018*	0.116 \pm 0.021*

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

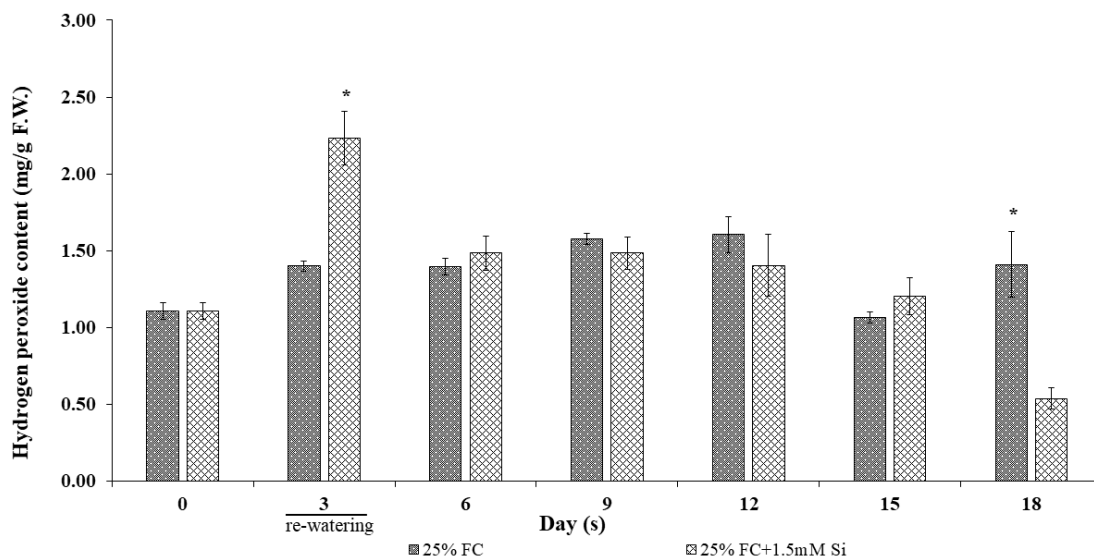
ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 12 และวันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีการสะสมปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.48 และ 0.46 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 58 และตาราง 36)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีการสะสมปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.59 เท่า เมื่อทำการให้น้ำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่าวันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีการสะสมปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.62 เท่า (ภาพประกอบ 59 และตาราง 37)



ภาพประกอบ 58 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test



ภาพประกอบ 59 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

ตาราง 36 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	Hydrogen peroxide content (mg/g F.W.) (Mean \pm SE)							
	Day after treatment (days)							
	0	3	6	9	12	15	18	
100% FC		1.107 \pm 0.052	0.903 \pm 0.282	1.429 \pm 0.196	1.435 \pm 0.159	1.218 \pm 0.206	1.264 \pm 0.110	0.851 \pm 0.161
100% FC + 1.5 mM Si		1.107 \pm 0.052	1.234 \pm 0.138	1.414 \pm 0.122	1.437 \pm 0.228	1.803 \pm 0.254*	1.212 \pm 0.203	1.244 \pm 0.098*

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ตาราง 37 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

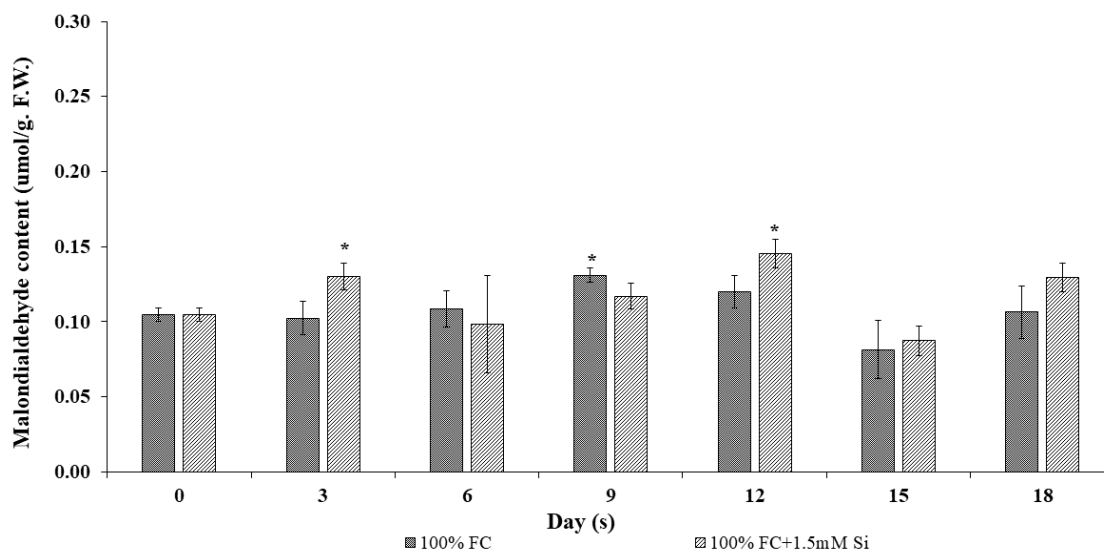
Treatment	Hydrogen peroxide content (mg/g F.W.) (Mean \pm SE)							
	Day after treatment (days)							
	0	3	6	9	12	15	18	
100% FC		1.107 \pm 0.052	1.401 \pm 0.034	1.399 \pm 0.054	1.579 \pm 0.036	1.605 \pm 0.118	1.066 \pm 0.036	1.411 \pm 0.212*
100% FC + 1.5 mM Si		1.107 \pm 0.052	2.234 \pm 0.175*	1.485 \pm 0.109	1.484 \pm 0.105	1.405 \pm 0.200	1.204 \pm 0.118	0.538 \pm 0.070

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์

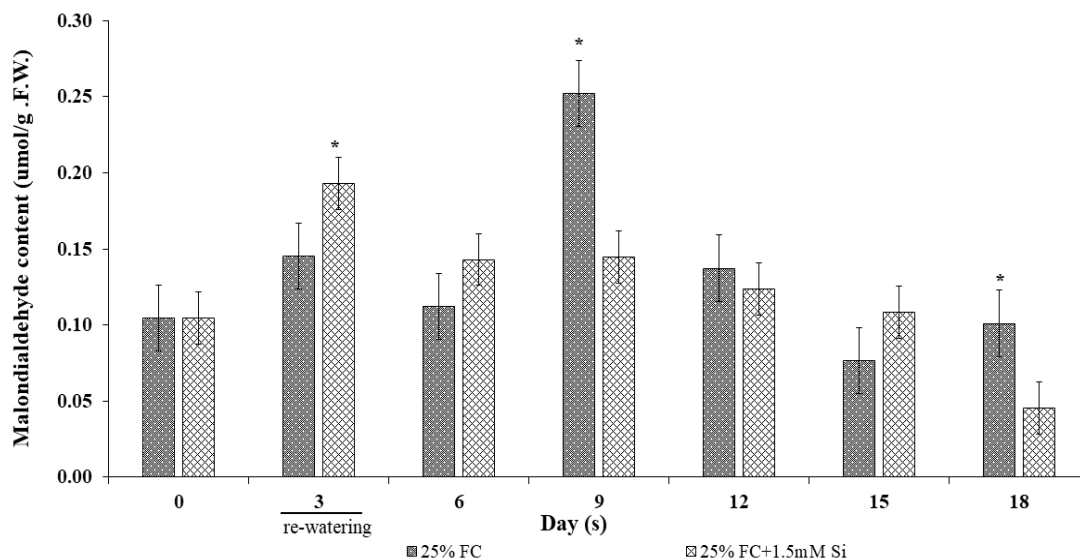
จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีการสะสมปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.26 เท่า ขณะที่วันที่ 9 ของการทดลอง ต้นพืชในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีการสะสมปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.12 เท่า และวันที่ 12 ของการทดลอง ต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีการสะสมปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.22 เท่า (ภาพประกอบ 60 และตาราง 38)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีการสะสมปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.33 เท่า เมื่อทำการให้นำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่าวันที่ 9 และวันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีการสะสมปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.74 และ 1.24 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 61 และตาราง 39)



ภาพประกอบ 60 ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และ ต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี

T-test



ภาพประกอบ 61 ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

ตาราง 38 ปริมาณมาลดอนไดอัลดีไฮด์ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	Malondialdehyde content ($\mu\text{mol/g F.W.}$) (Mean \pm SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.105 \pm 0.005	0.103 \pm 0.011	0.109 \pm 0.012	0.131 \pm 0.005*	0.120 \pm 0.011	0.082 \pm 0.019	0.107 \pm 0.017
100% FC + 1.5 mM Si	0.105 \pm 0.005	0.130 \pm 0.009*	0.099 \pm 0.032	0.117 \pm 0.009	0.146 \pm 0.009*	0.088 \pm 0.010	0.130 \pm 0.009

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ตาราง 39 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

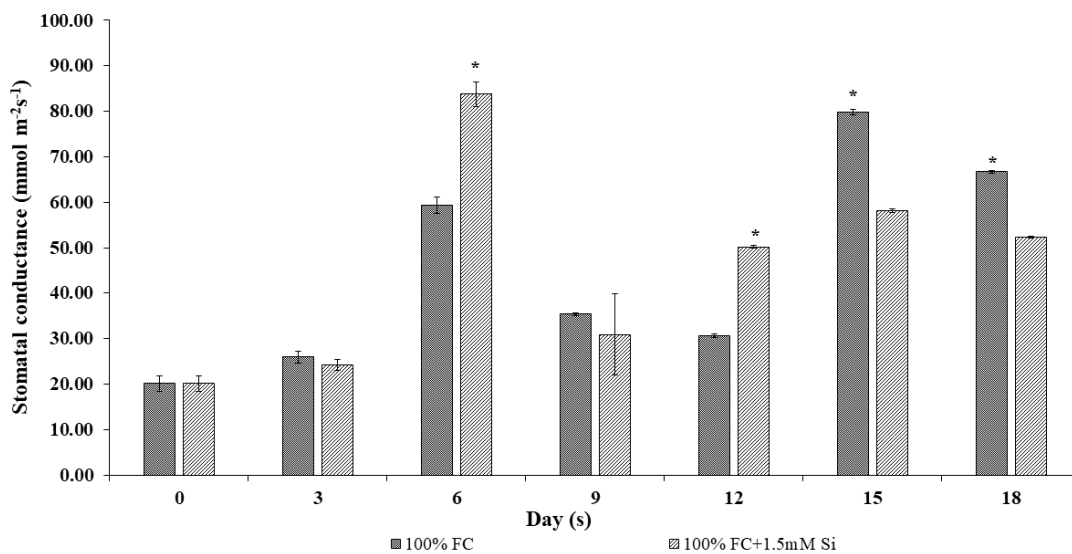
Treatment	Malondialdehyde content ($\mu\text{mol/g F.W.}$) (Mean \pm SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.105 \pm 0.005	0.145 \pm 0.005	0.112 \pm 0.011	0.252 \pm 0.022*	0.137 \pm 0.016	0.077 \pm 0.019	0.101 \pm 0.014*
100% FC + 1.5 mM Si	0.105 \pm 0.005	0.193 \pm 0.009*	0.143 \pm 0.010	0.145 \pm 0.009	0.124 \pm 0.007	0.108 \pm 0.010	0.045 \pm 0.007

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

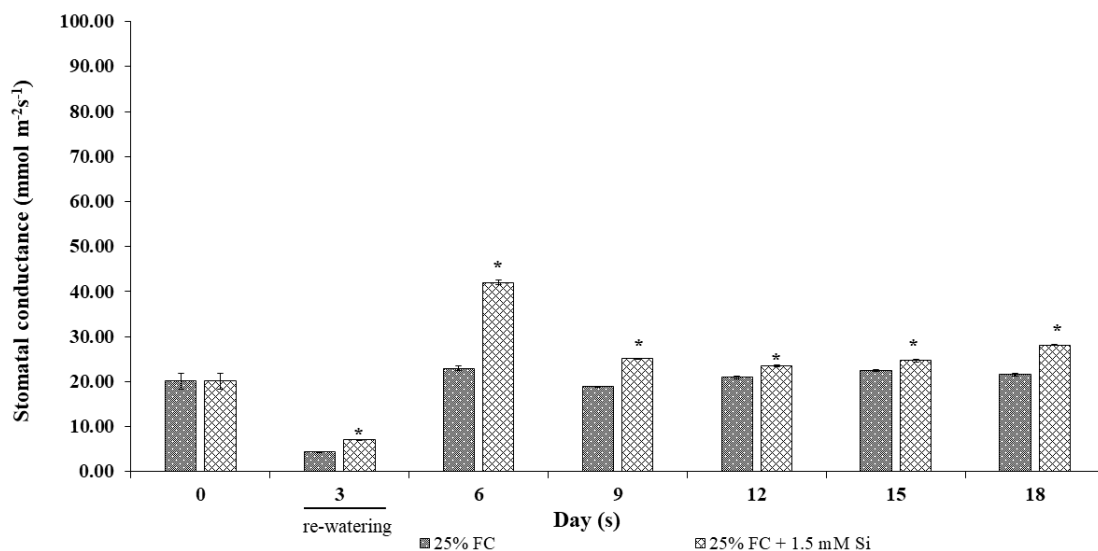
ค่า stomatal conductance

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 6 และ วันที่ 12 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า stomatal conductance มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.41 และ 0.64 เท่า ตามลำดับ ขณะที่วันที่ 15 และ วันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีค่า stomatal conductance มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.37 และ 0.28 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 62 และตาราง 40)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า stomatal conductance มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.60 เท่า เมื่อทำการให้น้ำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่าวันที่ 6 ถึงวันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ค่า stomatal conductance มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.83, 0.33, 0.16, 0.10 และ 0.31 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 63 และตาราง 41)



ภาพประกอบ 62 ค่า stomatal conductance ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test



ภาพประกอบ 63 ค่า stomatal conductance ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

ตาราง 40 ค่า stomatal conductance ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพบชิลิดคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	Stomatal conductance ($\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$) (Mean \pm SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	20.10 \pm 1.702	26.00 \pm 1.299	59.25 \pm 1.797	35.38 \pm 0.239	30.63 \pm 0.375	79.75 \pm 0.629*	66.70 \pm 0.238*
100% FC + 1.5 mM Si	20.10 \pm 1.702	24.25 \pm 1.212	83.75 \pm 2.780*	30.89 \pm 8.947	50.13 \pm 0.315*	58.13 \pm 0.427	52.30 \pm 0.238

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ตาราง 41 ค่า stomatal conductance ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยชิลิดคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพบชิลิดคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

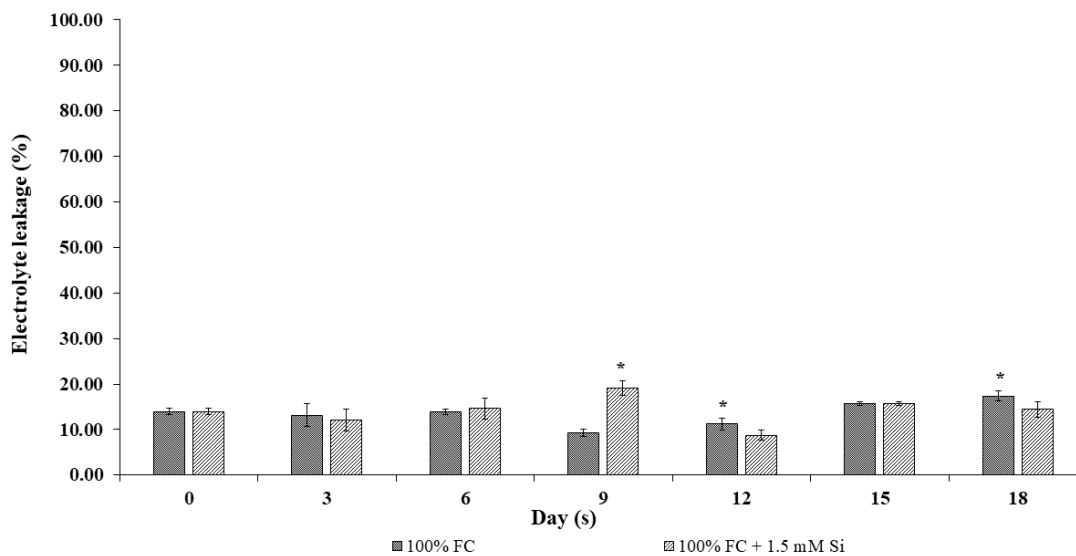
Treatment	Stomatal conductance ($\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$) (Mean \pm SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	20.10 \pm 1.702	4.380 \pm 0.043	22.95 \pm 0.512	18.83 \pm 0.025	20.30 \pm 0.351	22.45 \pm 0.206	21.55 \pm 0.263
100% FC + 1.5 mM Si	20.10 \pm 1.702	7.000 \pm 0.058*	42.00 \pm 0.540*	25.10 \pm 0.058*	23.45 \pm 0.171*	24.65 \pm 0.275*	28.13 \pm 0.125*

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

การร่วไหลของอิเล็กโทรไลต์

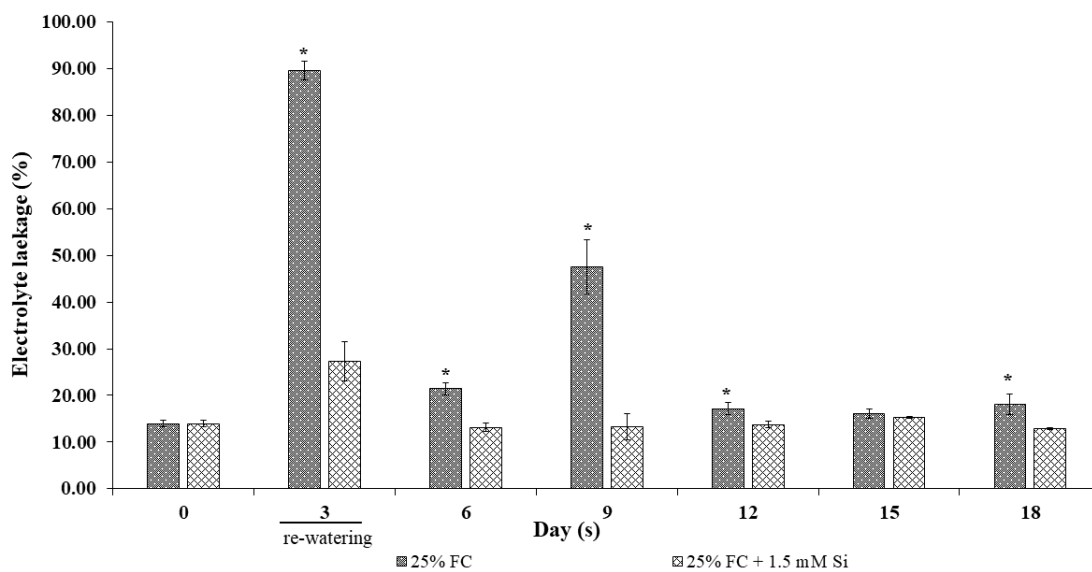
จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 9 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีการร่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ มากกว่าต้นพืชที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.05 เท่า ขณะที่วันที่ 12 และ วันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีการร่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.28 และ 0.21 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 64 และตาราง 42)

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีการร่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 2.27 เท่า เมื่อทำการให้น้ำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่าวันที่ 6 วันที่ 9 วันที่ 12 และวันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีการร่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ มากกว่าต้นพืชที่พ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.63, 2.57, 0.25 และ 0.40 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 65 และตาราง 43)



ภาพประกอบ 64 การรั่วไหลของเล็กโทรไลต์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และ ต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี

T-test



ภาพประกอบ 65 การรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการฟื้นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC และฟื้นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

ตาราง 42 การรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพบชีดิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	Electrolyte leakage (%) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	13.95 ± 0.749	13.18 ± 2.520	13.88 ± 0.602	9.300 ± 0.752	11.23 ± 1.324*	15.70 ± 0.485	17.38 ± 1.048*
100% FC + 1.5 mM Si	13.95 ± 0.749	12.08 ± 2.413	14.60 ± 2.230	19.10 ± 1.656*	8.780 ± 1.055	15.65 ± 0.450	14.40 ± 1.679

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

ตาราง 43 การรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยชีดิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ 25% FC และพบชีดิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM

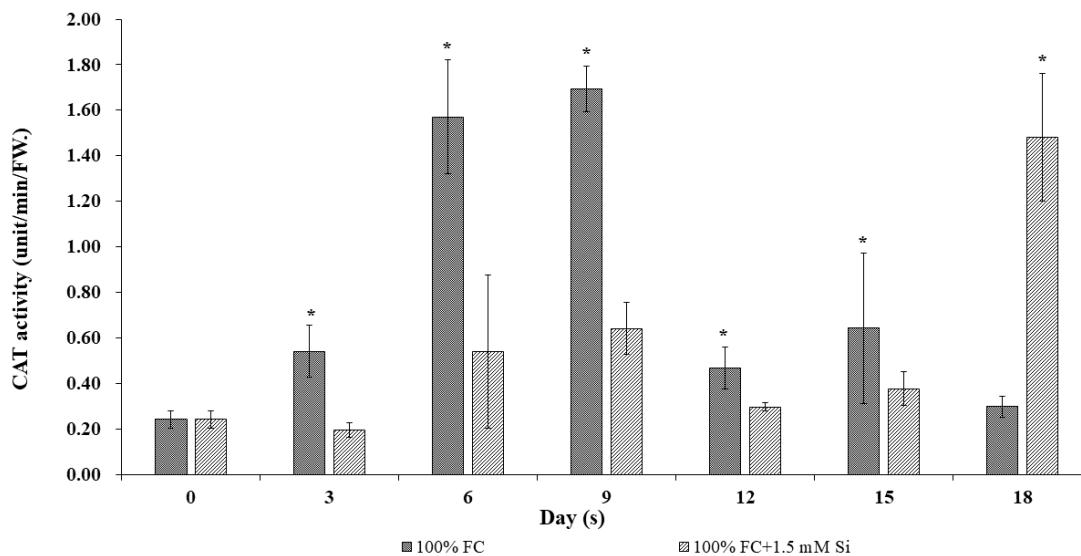
Treatment	Electrolyte leakage (%) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	13.95 ± 0.749	89.63 ± 2.054*	21.40 ± 1.344*	47.53 ± 5.859*	17.15 ± 1.300*	16.08 ± 1.046	18.03 ± 2.191*
100% FC + 1.5 mM Si	13.95 ± 0.749	27.38 ± 4.215	13.15 ± 0.851	13.30 ± 2.818	13.70 ± 0.704	15.25 ± 0.236	12.88 ± 0.284

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

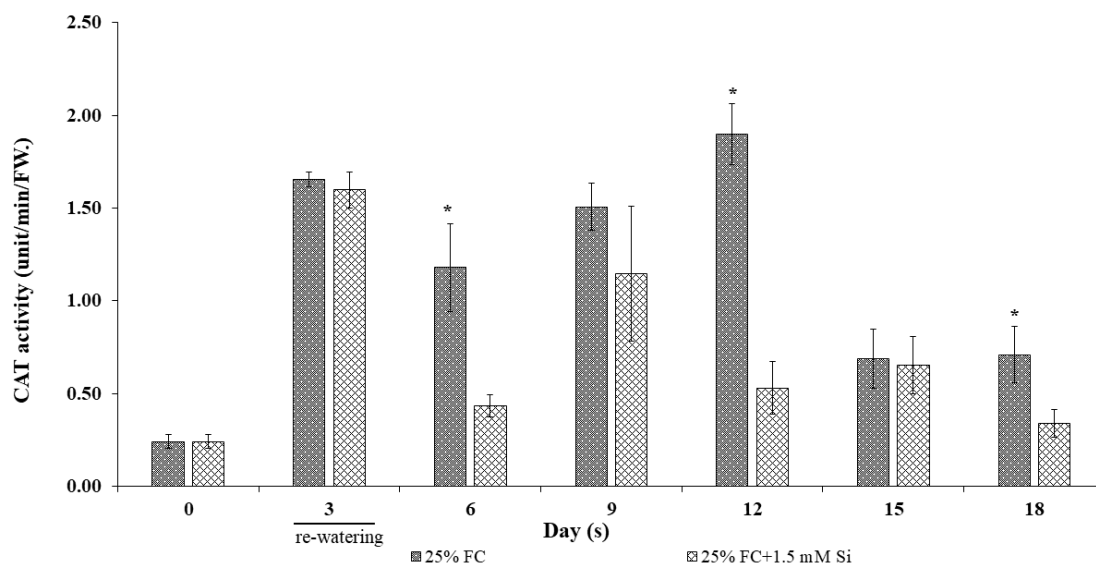
กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์อะไมเลส

จากผลการทดลองพบว่า วันที่ 3 วันที่ 6 วันที่ 9 วันที่ 12 และวันที่ 15 ของการทดลอง ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์อะไมเลสเท่ากับ 0.542, 1.577, 1.695, 0.468 และ 0.643 unit/min/F.W. ตามลำดับ ซึ่งมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์มากกว่าต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM เท่ากับ 0.194, 0.541, 0.641, 0.297 และ 0.376 unit/min/F.W. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.79, 1.90, 2.13, 0.58 และ 0.71 เท่า ตามลำดับ ขณะที่วันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์อะไมเลส เท่ากับ 1.482 unit/min/F.W. มากกว่าต้นพืชในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน เท่ากับ 0.298 unit/min/F.W. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 3.97 เท่า (ภาพประกอบ 66 และตาราง 44)

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการให้น้ำกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่าวันที่ 6 วันที่ 12 และวันที่ 18 ของการทดลอง ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FCที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์อะไมเลสเท่ากับ 1.180, 1.901 และ 0.709 unit/min/F.W. ตามลำดับ ซึ่งมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM เท่ากับ 0.433, 0.530 และ 0.339 unit/min/F.W. ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 1.73, 2.59 และ 1.09 เท่า ตามลำดับ (ภาพประกอบ 67 และตาราง 45)



ภาพประกอบ 66 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์อะซีเตเลสของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test



ภาพประกอบ 67 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์คะตะเลสของพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ± ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

ตาราง 44 กิจกรรรมการทำงานของเอนไซม์อะซีเตสเดสของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติ และสภาวะปกติและพบชนิดของความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	CAT activity (unit/min/F.W.) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.242 ± 0.038	0.542 ± 0.114*	1.571 ± 0.251*	1.695 ± 0.100*	0.468 ± 0.094*	0.643 ± 0.330*	0.298 ± 0.045
100% FC + 1.5 mM Si	0.242 ± 0.038	0.194 ± 0.031	0.541 ± 0.338	0.641 ± 0.115	0.297 ± 0.019	0.376 ± 0.074	1.482 ± 0.281*

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

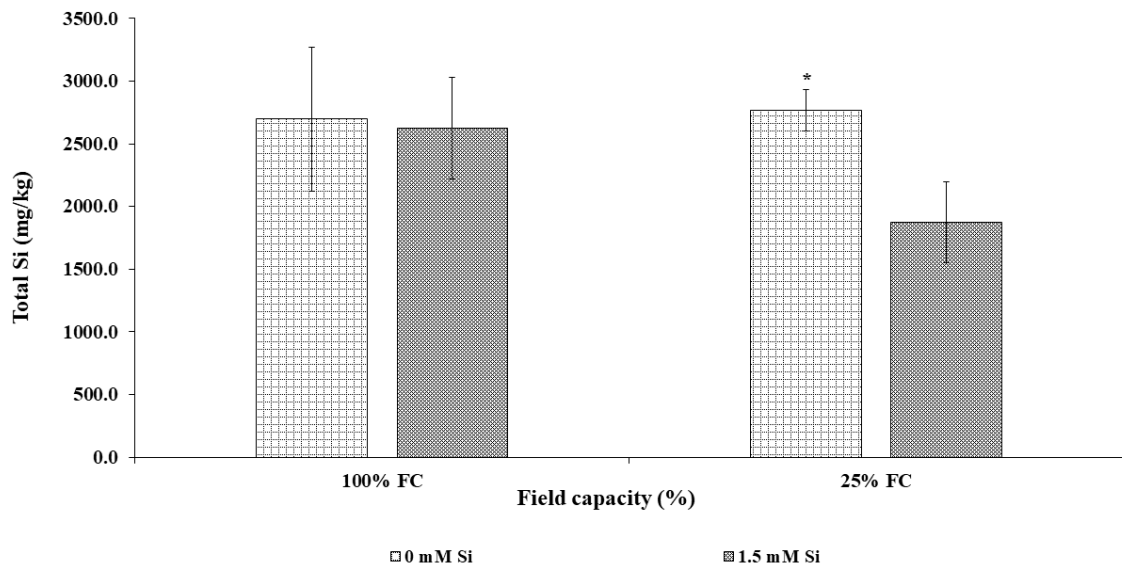
ตาราง 45 กิจกรรรมการทำงานของเอนไซม์อะซีเตสของต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับการรักษาความแห้งที่ 25% FC และพบชนิดของความเข้มข้น 1.5 mM

Treatment	CAT activity (unit/min/F.W.) (Mean ± SE)						
	Day after treatment (days)						
	0	3	6	9	12	15	18
100% FC	0.242 ± 0.038	1.653 ± 0.040	1.180 ± 0.237*	1.506 ± 0.127	1.901 ± 0.164*	0.687 ± 0.158	0.709 ± 0.152*
100% FC + 1.5 mM Si	0.242 ± 0.038	1.598 ± 0.097	0.433 ± 0.059	1.146 ± 0.364	0.530 ± 0.143	0.654 ± 0.153	0.339 ± 0.076

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี T-test

การหาปริมาณชิลิคอนที่สะสมในต้นพืช *D. tinctoria* เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งและสภาวะปกติ

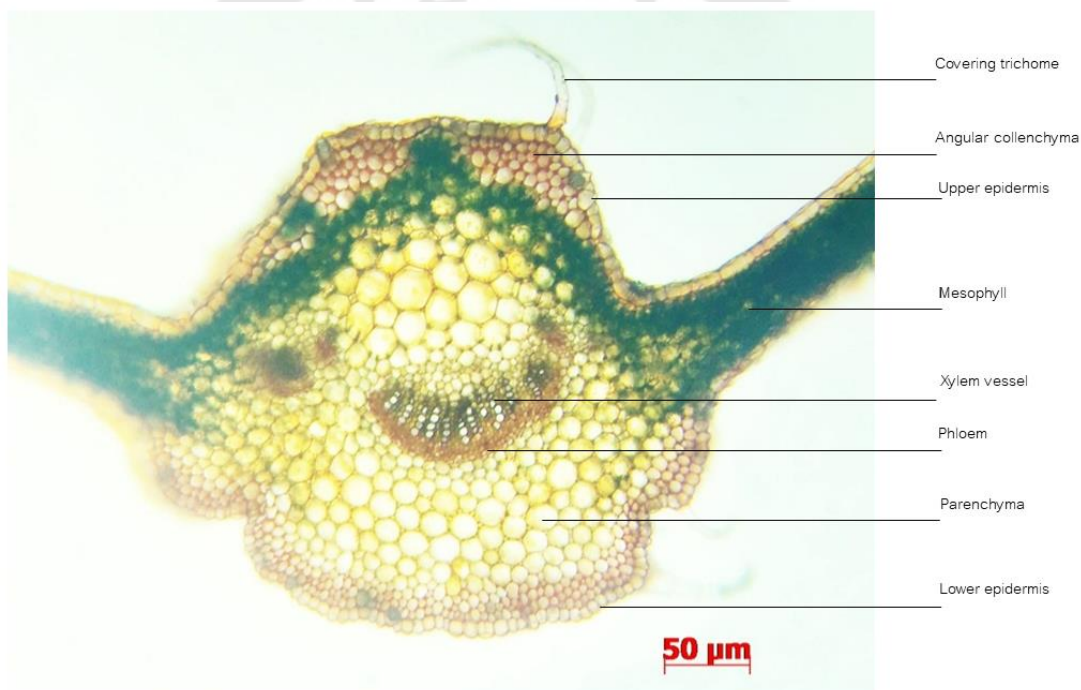
ต้นพืช *D. tinctoria* ในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณชิลิคอนสะสมในต้นพืชเท่ากับ 2697.33 และ 2625.67 mg/kg ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ต้นพืชในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณชิลิคอนที่สะสมในต้นพืชไม่แตกต่างกัน ขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณชิลิคอนสะสมในต้นพืชเท่ากับ 2766.00 และ 1871.33 mg/kg ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน มีปริมาณชิลิคอนที่สะสมในต้นพืชมากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.48 เท่า และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณชิลิคอนที่สะสมในต้นพืชน้อยกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็น 0.48 เท่า 0.32 เท่า (ภาพประกอบ 72)



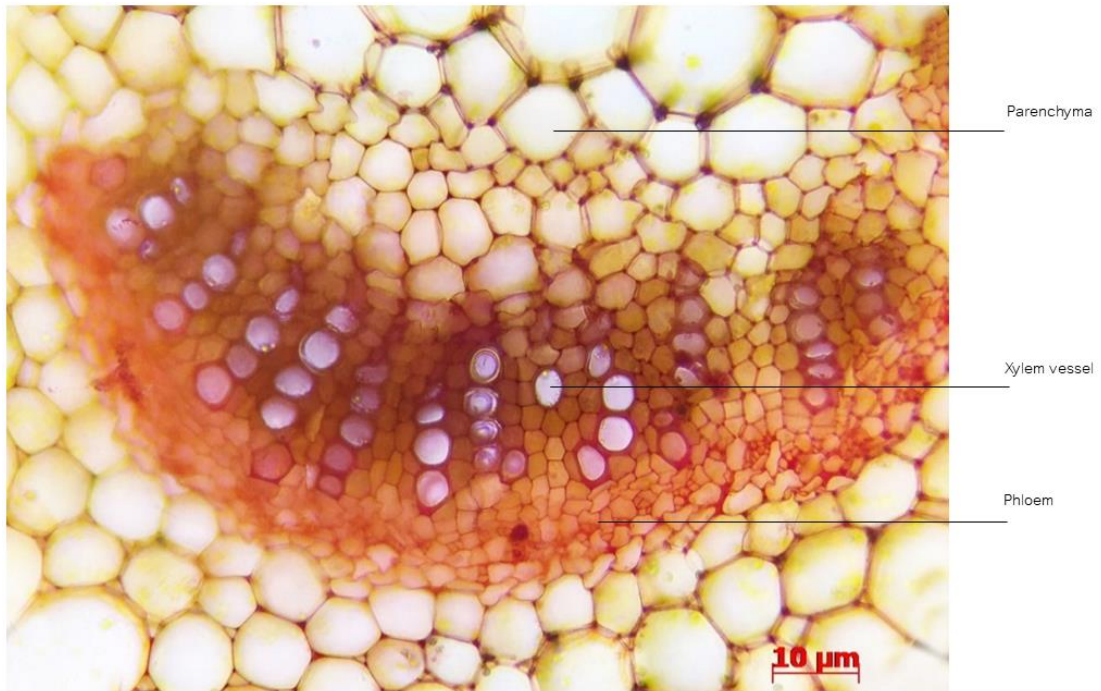
ภาพประกอบ 68 ปริมาณซิลิคอนที่สะสมในต้นพืช *D. tinctoria* อายุ 90 วัน ในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน ต้นพืชในสภาวะปกติและพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM \pm ค่าความคลาดเคลื่อน (standard error; SE) เครื่องหมาย * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี T-test

การศึกษากายวิภาคของใบภาคตัดขวางของต้นพืช *D. tinctoria*

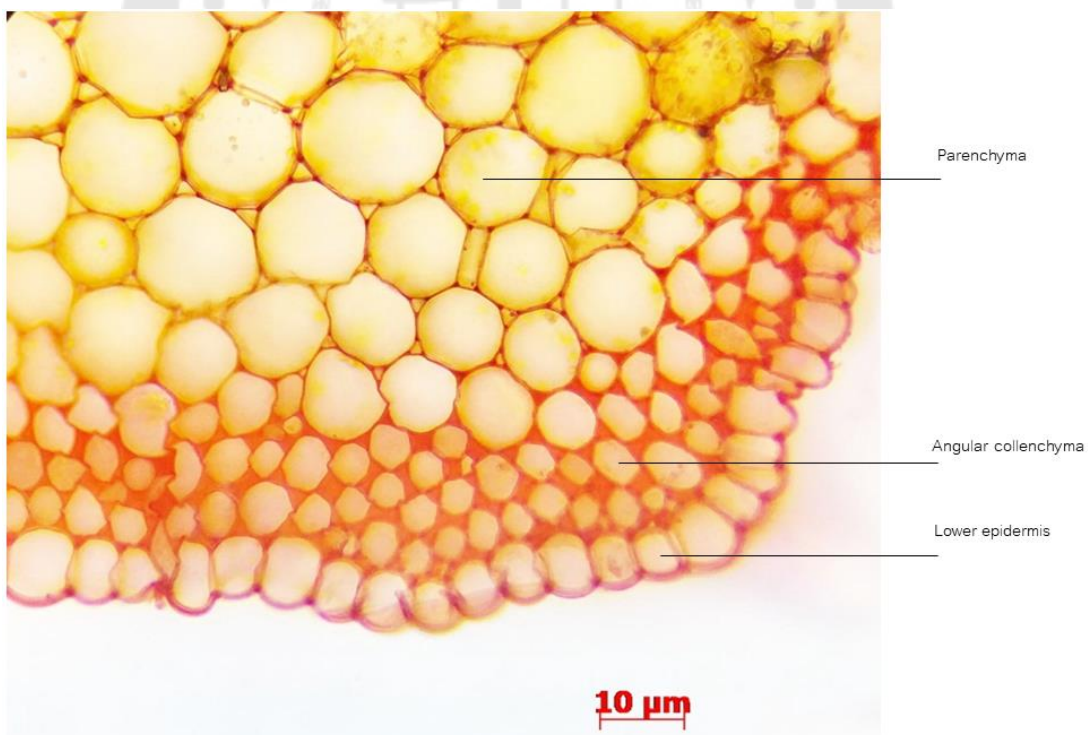
ภาคตัดขวางเส้นกลางใบของต้น *D. tinctoria* พบว่า ประกอบด้วยเซลล์ผิวชั้นบนเรียงตัวแถวเดียว มีไทรโคไมยื่นออกจากเซลล์ผิว และมีการสะสมของก้อนหินปูน (cystolith) ชั้นถัดไปเป็นเนื้อเยื่อคอลเลนไคมา เรียงเป็นกลุ่มหนาแน่นทั้งด้านบนและด้านล่าง ด้านในของเนื้อเยื่อเส้นกลางใบเป็นกลุ่มของมัดท่อลำเลียงน้ำและท่อลำเลียงอาหาร เรียงตัวเป็นรูปครึ่งทรงกลม โดยแต่ละกลุ่มมัดท่อลำเลียง ประกอบด้วย เนื้อเยื่อลำเลียงน้ำ (xylem tissue) และเนื้อเยื่อลำเลียงอาหาร (phloem) มีกลุ่มของมัดท่อลำเลียงน้ำ (xylem vessel) เรียงตัวในแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลาง แผ่นใบทั้ง 2 ด้านประกอบด้วยเนื้อเยื่อชั้น Mesophyll ที่มี Palisade เรียงตัวอยู่ทางด้านบนและ spongy เรียงตัวทางด้านล่าง ภายในมีรงควัตถุสีเขียว แสดงดังภาพประกอบ



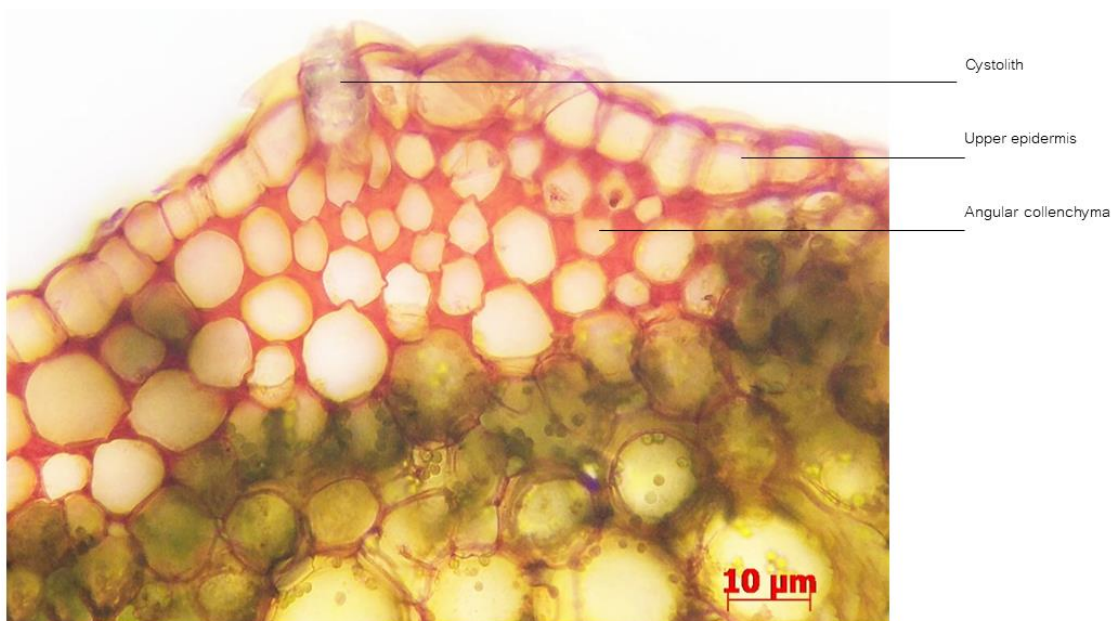
ภาพประกอบ 69 ภาคตัดขวางเส้นกลางใบของต้นพืช *D. tinctoria*



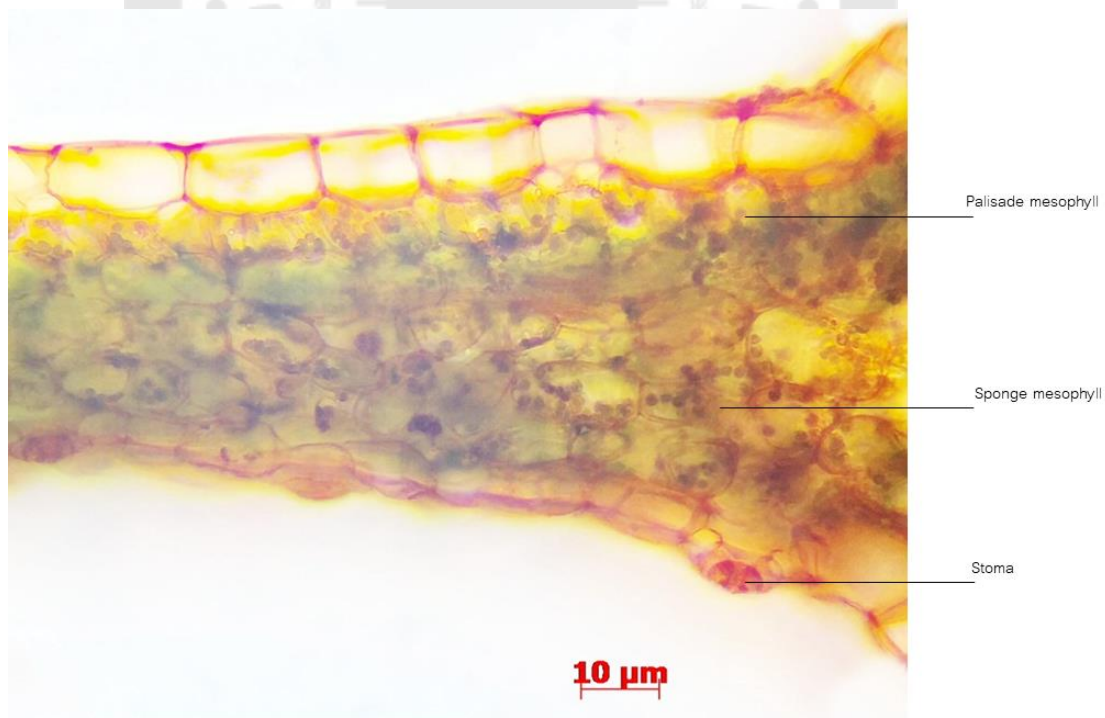
ภาพประกอบ 70 ภาคตัดขวางของต้นพืช *D. tinctoria* บริเวณมัดท่อลำเลียง



ภาพประกอบ 71 ภาคตัดขวางบริเวณเนื้อเยื่อพื้นของต้นพืช *D. tinctoria*



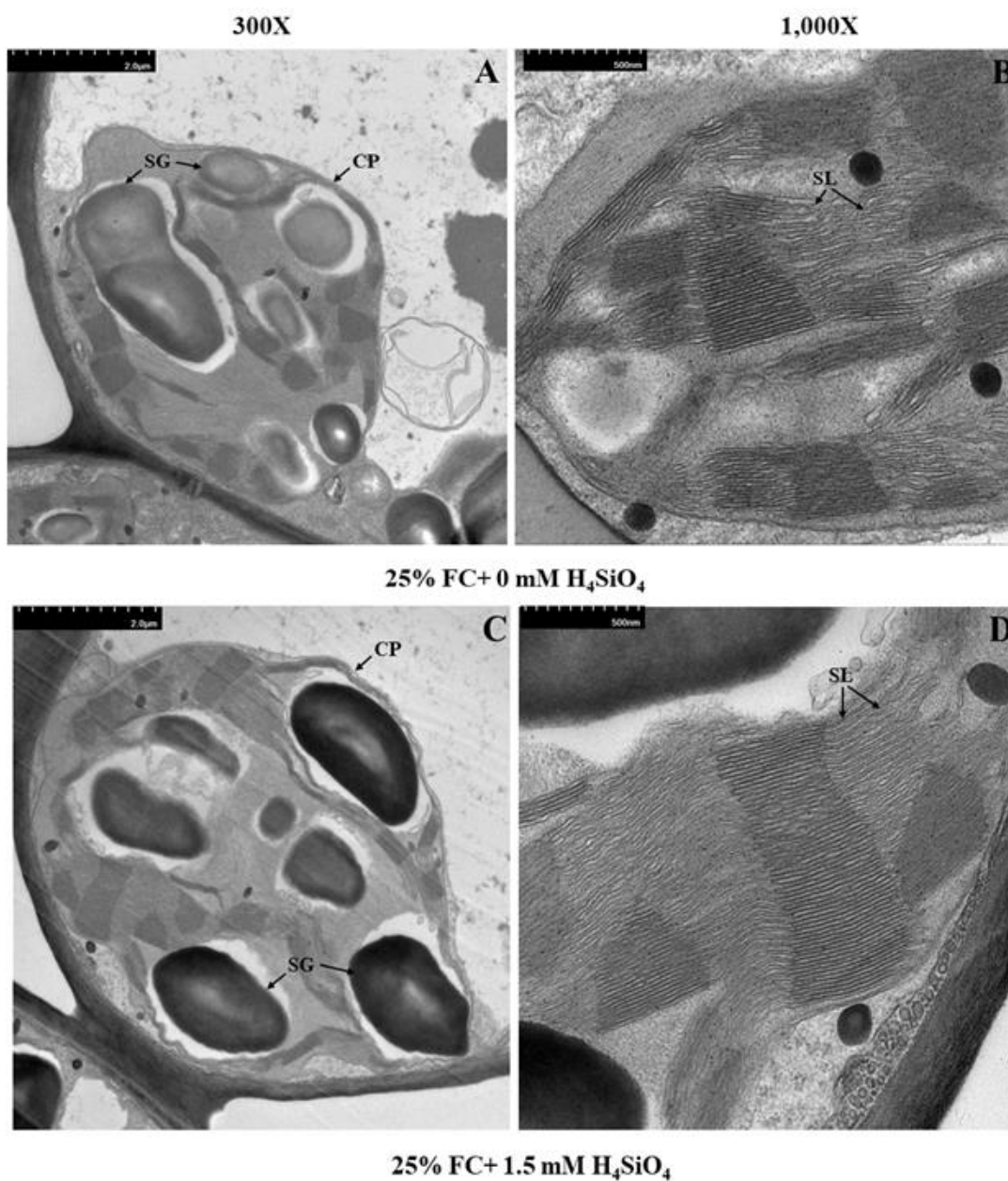
ภาพประกอบ 72 ภาคตัดขวางของต้นพืช *D. tinctoria* ที่เห็นบริเวณ cystolith ซึ่งอยู่บนชั้นอีพิเดอริมีส (upper epidermis)



ภาพประกอบ 73 ภาคตัดขวางของต้นพืช *D. tinctoria* บริเวณเนื้อเยื่อชั้นมีไซฟิลล์ (mesophyll tissue)

ผลของซิลิคอนต่อโครงสร้างคลอโรพลาสต์ในใบของต้นพืช *D. tinctoria* เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง

การศึกษากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ในใบพืช *D. tinctoria* โดยศึกษาจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope) พบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอนพบว่าโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ มีลักษณะของเมมเบรนไม่ชัดเจน และพบโครงสร้างของเม็ดแป้ง และมีสโตรมาลาเมลลาบาง และจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (ภาพประกอบ 74A และ 74B) ในขณะที่ต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM พบว่า คลอโรพลาสต์มีลักษณะของเมมเบรนของที่เห็นโครงสร้างได้ชัดเจน และมีเม็ดแป้งขนาดใหญ่และมีจำนวนมาก และโครงสร้างของสโตรมาลาเมลลามีความหนาและเรียงตัวเป็นระเบียบมากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน (ภาพประกอบ 74C และ 74D)



ภาพประกอบ 74 โครงสร้างของคลอโรพลาสต์ในใบพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิคอน (25%FC+ 0mM H₂SiO₄) (A) กำลังขยาย 3,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 10,000 เท่า (CP: chloroplast, SG: starch grain และ SL: stroma lamellae) และโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ในใบพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแห้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM (25%FC+ 0mM H₂SiO₄) (C) กำลังขยาย 3,000 เท่า และ (D) กำลังขยาย 10,000 เท่า (CP: chloroplast, SG: starch grain และ SL: stroma lamellae)

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการศึกษากการหาระดับ field capacity (FC) ของดินที่เหมาะสมต่อความสามารถในการทนต่อสภาวะเครียดจากความแล้งของต้นพืช *D. tinctoria* พบว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีค่า Fv/Fm ไม่แตกต่างกับพืชในชุดควบคุม ในวันที่ 9 และวันที่ 12 ของการทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีค่า Pi น้อยกว่าต้นพืชในชุดควบคุมและมีค่า Pi ไม่แตกต่างกับต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีความสามารถในการทนต่อสภาวะเครียดจากความแล้งได้ดี โดยค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (chlorophyll fluorescence, Fv/Fm) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษาผลกระทบของความเครียดจากสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช และในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการประเมินประสิทธิภาพของการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช *D. tinctoria* โดยศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบแสงสอง (photosystem II, PSII) ต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืชเมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง (D. Kumar, Singh, Raj, & Soni, 2020) โดยการศึกษาค่า performance index (Pi) เป็นตัวบ่งชี้ความมีชีวิตของต้นพืช โดยวัดโดยการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของศูนย์กลางปฏิกิริยาของระบบแสงสองในการรับโฟตรอนเพื่อนำไปใช้ในการกระตุ้นให้เกิดการส่งอิเล็กตรอนออกจากศูนย์กลางปฏิกิริยาของระบบแสงสองไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (QA) ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช (Mehta, Jajoo, Mathur, & Bharti, 2010) จากผลการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีค่า Fv/Fm และค่า Pi ลดลง เมื่อเทียบกับต้นพืชในชุดควบคุม เป็นระยะเวลา 12 วัน สอดคล้องกับการศึกษาในต้นมะกอก (*Olea europaea* L.) 5 พันธุ์ปลูก (cultivar) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง พบว่า ค่า Fv/Fm จะลดลงเมื่อต้นมะกอกขาดน้ำเป็นระยะเวลา 45 วัน อย่างไรก็ตามไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่า Fv/Fm ของต้นมะกอกทั้ง 5 สายพันธุ์เมื่อต้นมะกอกขาดน้ำเป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่า ค่า Fv/Fm ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกับค่า Pi พบว่า เมื่อต้นมะกอกขาดน้ำเป็นระยะเวลา 60 วัน มี ค่า Pi ลดลง แสดงให้เห็นว่า ค่า Fv/Fm และค่า Pi ลดลง เมื่อระยะเวลาของการขาดน้ำเพิ่มขึ้น (Boussadia, Omri, & Mzid, 2023) สอดคล้องกับการศึกษาในพืชสกุล *Lathyrus* จำนวน 9 จีโนไทป์ ได้แก่ *L. aphaca*, *L. cicera*, *L. clymenum*, *L. latifolius*, *L. ochrus*, *L. odoratus*, L174-A, LS87124 และ Raipur พบว่า พืช

สกุล *Lathyrus* ทั้ง 9 จีโนไทป์ ที่ได้รับน้ำปกติ มีค่า Fv/Fm คงที่ประมาณ 0.8 และค่า Fv/Fm เริ่มลดลงเมื่อปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของพืชถึงค่าต่ำกว่า 50% (ขาดน้ำรุนแรง) โดยค่า Fv/Fm อยู่ระหว่าง 0.79- 0.68 เมื่อปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของพืชต่ำกว่า 30% (ขาดน้ำรุนแรงที่สุด) ค่า Fv/Fm โดยค่า Fv/Fm อยู่ระหว่าง 0.74- 0.55 และมีค่าเป็นศูนย์ในบางจีโนไทป์ เช่นเดียวกับค่า Pi พบว่า พืชสกุล *Lathyrus* จีโนไทป์ L174-A ในสภาวะปกติมีค่า Pi เท่ากับ 3.84 เมื่อปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของพืชต่ำกว่า 30% พบว่าพืชสกุล *Lathyrus* จีโนไทป์ L174-A มีค่า Pi เท่ากับ 0.97 แสดงให้เห็นว่าค่า Pi เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ประเมินการคัดกรองจีโนไทป์ของพืชและปรับปรุงผลผลิตพืชภายใต้สภาวะเครียดจากการขาดน้ำได้ (Silvestre, de Sousa Araújo, Vaz Patto, & Marques da Silva, 2014) สอดคล้องกับการศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยาของข้าวโพด (*Zea mays* L.) 3 พันธุ์ ได้แก่ Doge, Luce และ Vero ต่อความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 30% FC พบว่ามีค่า Fv/Fm ลดลง และเมื่อทำการให้น้ำพบว่า ต้นข้าวโพดทั้ง มีค่า Fv/Fm เพิ่มขึ้น (Efeoglu, Ekmekci, & Cicek, 2009) สอดคล้องกับการศึกษาในต้นอ่อนผักกาด (*Lactuca sativa* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง พบว่าประสิทธิภาพของระบบแสงสองจะลดลง เนื่องจากค่า Fv/Fm เป็นค่าที่มีผลผลิตควอนตัมสูงสุด (maximum quantum yield) และพบว่า ค่า Fv/Fm ลดลงเมื่อระยะเวลาการขาดน้ำเพิ่มมากขึ้น (Shin, Bhandari, Jo, Song, & Lee, 2021)

จากผลการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์ ไม่แตกต่างจากต้นพืชชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ เป็นรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำหน้าที่รับและส่งพลังงานแสงในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช คลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์จึงเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสังเคราะห์ด้วยแสงและการสะสมมวลชีวภาพของพืช (Ghosh et al., 2004) สอดคล้องกับการศึกษาในต้นแอปเปิ้ล (*Malus domestica* Borkh.) 3 พันธุ์ ได้แก่ G.D.Reinders, Dugara และ Crvenka เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์รวมไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากต้นแอปเปิ้ลได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งเป็นระยะเวลา 7 วัน เมื่อเทียบกับต้นแอปเปิ้ลในชุดควบคุม เมื่อทำการทดลองเป็นระยะเวลา 12 วันต้นแอปเปิ้ลมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมลดลง ในขณะที่ปริมาณแคโรทีนอยด์ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อต้นแอปเปิ้ลที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งเป็นระยะเวลา 7 และ 12 วัน (Mihaljević et al., 2021) สอดคล้องกับการศึกษาการเจริญเติบโตและปริมาณคลอโรฟิลล์ในต้นพริก (*Capsicum*

frutescens) พบว่า เมื่อทำการทดลองเป็นระยะเวลา 15 วัน ต้นพริกที่ได้รับน้ำที่ระดับแตกต่างกัน มีปริมาณคลอโรฟิลล์ไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับต้นพริกในชุดควบคุม (Yusuf & Hamed, 2021) สอดคล้องกับการศึกษาในข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 (*Oryza sativa* L. cv. 'Pathumthani 1'; PTT1) เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งร่วมกับการพ่นด้วยสาร Forchlorfenuron (CPPU) จากผลการทดลองพบว่า ในวันที่ 7 และวันที่ 14 ของการทดลอง ต้นข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในระยะแตกกอและระยะสะสมน้ำหนักเมล็ดที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งมีปริมาณคลอโรฟิลล์คลอโรฟิลล์บี และปริมาณแคโรทีนอยด์มากกว่าต้นข้าวในชุดควบคุม และต้นข้าวที่ได้รับได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งและพ่นด้วยสาร CPPU ความเข้มข้น 5 mg/L (Gujjar et al., 2020) แสดงให้เห็นว่ารงควัตถุที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงมีความจำเป็นต่อพืชในการเก็บเกี่ยวพลังงานแสง และรงควัตถุมีแนวโน้มลดลงเมื่อได้รับความเครียดจากสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะความเครียดที่เกิดจากความแล้ง (M. Farooq, Wahid, Kobayashi, Fujita, & Basra, 2009) แคโรทีนอยด์จัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญในการต้านทานความเครียดของพืช แคโรทีนอยด์จะทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระ (R.-R. Zhang et al., 2021) จากผลการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์ลดลงเมื่อเทียบกับต้นพืชชุดควบคุม โดยปริมาณน้ำสัมพัทธ์เป็นการวัดสถานะของน้ำในพืช โดยผลการทดลองที่ได้คล้ายกับการทดลองสภาวะเครียดจากความแล้งที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการลดลงของปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งในโรงเรือนทดลองที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (Md Hasanuzzaman, Shabala, Brodribb, Zhou, & Shabala, 2019) และในมะเขือเทศ (*Solanum lycopersicum*) 3 พันธุ์ ได้แก่ Arvento, LA1994 และ LA2093 ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง (Zhou et al., 2017) นอกจากนี้ยังศึกษาใน pigeon pea (*Cajanus cajan* L. Millsp.) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งโดยใช้ PEG-6000 (R. R. Kumar, Karajol, & Naik, 2011) เป็นต้น

นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาในมันฝรั่ง (*Solanum tuberosum* L.) 2 พันธุ์ ได้แก่ Santae และ PRI-Red พบว่า สภาวะเครียดจากความแล้งทำให้ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบมันฝรั่งลดลงทั้ง 2 พันธุ์ เมื่อเทียบกับมันฝรั่งทั้ง 2 สายพันธุ์ในชุดควบคุม (Batoool et al., 2020) และการศึกษาในต้นถั่วพินัท (*Arachis hypogaea* L.) ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง โดยจำลองสภาวะแล้งด้วย PEG-6000 พบว่า ระดับความเข้มข้นของ PEG-6000 ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบต้นถั่วพินัทอายุ 40 วัน ลดลง (Shivakrishna, Reddy, & Rao, 2018) สอดคล้องกับการศึกษาในต้น Mexican marigold (*Tagetes minuta* L.) พบว่าปริมาณน้ำสัมพัทธ์

ในต้น Mexican marigold ลดลงภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้งระดับ mild, moderate และ severe ตามลำดับ (K. Babaei, Moghaddam, Farhadi, & Pirbalouti, 2021) แสดงให้เห็นว่าการลดลงของปริมาณน้ำสัมพัทธ์เป็นหนึ่งในผลที่ตามมาของสภาวะเครียดจากความแล้ง (Fathi & Tari, 2016) เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบหลักในเซลล์พืชในการรักษารูปร่าง ความคงตัวและการทำงานของเซลล์ และน้ำจะเคลื่อนที่จากความเข้มข้นของน้ำมาก (สารละลายที่มีความเข้มข้นน้อย) ผ่านเยื่อเบรอนไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของน้ำน้อย (สารละลายที่มีความเข้มข้นมาก) โดยระดับพลังงานของน้ำในสารละลายนั้นๆ เรียกว่าค่า water potential ในน้ำบริสุทธิ์ค่านี้จะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อมีสารละลายหรือการเจือปนจะมีค่าติดลบ การเคลื่อนที่ของสารจากความเข้มข้นของน้ำมากไปยังความเข้มข้นของน้ำน้อยทำให้เกิดแรงดันเต่งของเซลล์ (turgor pressure) หรือค่า pressure potential ซึ่งเป็นแรงที่เกิดจากการปะทะของน้ำและผนังเซลล์ และเกิดแรงดันภายในเซลล์เรียกว่า osmotic pressure หรือค่า osmotic potential ค่า water potential หาได้จาก osmotic potential รวมกับ pressure potential (วิไลภรณ์ บุญญกิจจินดา, 2556) เมื่อเกิดสภาวะเครียดจากความแล้งจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมในพืช และกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง เนื่องจากคลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุที่ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสง และนำพลังงานแสงไปใช้ในการสังเคราะห์สารพลังงาน เช่น ATP และ NADPH ในขั้นตอนของปฏิกิริยาแสง เพื่อนำไปใช้ในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การศึกษาในข้าวโพด (*Zea mays* L.) พันธุ์ผสม 6 พันธุ์ ได้แก่ Sc260, Sc370, Sc500, Sc647, Sc700 และ Sc704 ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC และการให้น้ำกับต้นข้าวโพดอีกครั้ง พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี เอช และแคโรทีนอยด์ลดลง เมื่อทำการให้น้ำกับต้นข้าวโพด พบว่า ต้นข้าวโพดพันธุ์ผสม Sc704 และ Sc647 มีปริมาณปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี เอช และแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น (Goodarzia Ghahfarokhi et al., 2015) การที่ปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ลดลง อาจเกิดจากความแล้งไปกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซูเปอร์ออกไซด์แอดีเคิล (O_2^-) และ ไฮดรอกซิลแอดีเคิล (OH) เป็นต้น (P. Sharma, Jha, Dubey, & Pessarakli, 2012) ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้ส่งผลต่อการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ เมื่อคลอโรฟิลล์ลดลงทำให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ (Jung, Kim, Cho, Tae, & Kang, 2000) นอกจากนี้ปริมาณน้ำสัมพัทธ์เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความเต่งของเซลล์ (cell turgidity) จากการศึกษาในต้นถั่วเหลือง (*Glycine max* L. Merrill) อายุ 14 วันที่ได้รับความเครียดจากการขาดน้ำ พบว่าเมื่อต้นถั่วเหลืองขาดน้ำเกิน 13 วัน ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบพืชลดลงมากกว่า 80% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าต้นถั่วเหลืองไม่สามารถ

เจริญเติบโตได้ (จารุณี จุงกลาง, 2549) สอดคล้องกับการศึกษาสถานะของน้ำในพืชและการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนไดออกไซด์ของใบฝ้าย (*Gossypium herbaceum* L.) จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบพืชลดลง น้อยกว่าหรือเท่ากับ 90% จะส่งผลกระทบต่อ การเปิดปิดของปากใบ และการเติบโตของเซลล์ลดลง เมื่อปริมาณน้ำสัมพัทธ์ลดลงน้อยกว่า หรือเท่ากับ 80-90% จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการหายใจและการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช เมื่อปริมาณน้ำสัมพัทธ์ลดลง น้อยกว่าหรือเท่ากับ 80% มีผลต่อการยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์ ด้วยแสงของพืช (Troughton, 1969)

จากการศึกษาผลของซิลิโคนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการของพืช *D. tinctoria* ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนที่ ระดับความเข้มข้น พบว่าต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมเมื่อพืชได้รับสภาวะเครียดจาก ความแล้ง โดยประเมินจากค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ ค่า performance index ปริมาณ คลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี แคโรทีนอยด์ และปริมาณน้ำสัมพัทธ์ เมื่อพืชเจอสภาวะเครียดจาก ความแล้งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืช ทำให้เกิดแรงดันเต่งในเซลล์ลดลง ปริมาณน้ำในใบพืชลดลง และพืชจะมีการปิดปากใบเพื่อลดการคายน้ำ นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มความเข้มข้นของปริมาณกรดแอบไซซิก และเกิดความไม่สมดุลของพลังงานในคลอโรพลาสต์ แรงดันเต่งภายในเซลล์พืชลดลงเป็นสาเหตุให้การเจริญเติบโตของพืชลดลงเมื่อพืชได้รับสภาวะ เครียดจากความแล้ง เนื่องจากกการขยายขนาดของเซลล์เกี่ยวข้องกับแรงดันเต่ง (Bray, 2007) นอกจากนี้ความแล้งชักนำให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดขึ้นลดลง เนื่องจากกระบวนการ ตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ของพืชเกิดขึ้นได้ลดลง เพราะพืชมีการปรับตัวโดยพืชมีการหุบปากใบเพื่อ ลดการสูญเสียน้ำออกจากเซลล์ ทำให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์แพร่เข้าสู่เซลล์ได้ลดลง คลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ซึ่งเป็นรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำ หน้าที่รับและส่งพลังงานแสงเป็นทอด ๆ ไปยังศูนย์กลางปฏิกิริยาของระบบแสงสอง อิเล็กตรอนจะ ถูกกระตุ้นให้มีพลังงานสูงขึ้นและปลดปล่อยพลังงานออกมา 3 แบบ คือ พลังงานแสงไปใช้ใน กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง พลังงานความร้อน และฟลูออเรสเซนซ์ ดังนั้นการประเมิน ประสิทธิภาพการทำงานของระบบแสงสองในพืช จึงมีการนำคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์มาใช้ ตรวจสอบระดับความเครียดของพืชต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งวัดจากการทำงานของ ศูนย์กลางปฏิกิริยาแสงสอง (Banks, 2019) การเรืองแสงเริ่มจาก F_0 (minimum fluorescence) ซึ่งเป็นการเรืองแสงต่ำสุดไปถึง F_m (maximum fluorescence) ซึ่งเป็นการเรืองแสงสูงสุด และส่วน

ต่างของการเรืองแสงคือ F_v (variable fluorescence intensity) คำนวณได้จากค่า $F_m - F_0$ และการคำนวณค่า F_v/F_m ได้จาก $(F_m - F_0)/F_m$ ซึ่งค่า F_v/F_m เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ตรวจสอบประสิทธิภาพการถ่ายทอดพลังงานในคลอโรพลาสต์ (นงลักษณ์ พยัคษศิรินาวิณ et al., 2557) และใช้ในการประเมินความเสียหายของระบบแสงสองและความเป็นไปได้ในการเกิด photoinhibition (Ahmed, Nawata, Hosokawa, Domae, & Sakuratani, 2002) ดังนั้นการวัดค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์จึงทำให้ทราบถึงความผิดปกติของพืชจากความเครียดทางกายภาพและชีวภาพ นอกจากนี้ยังสามารถประเมินค่า F_v/F_m หลังการเก็บเกี่ยวของไม้ตัดดอกที่มีใบติดอยู่เมื่อได้รับความเครียดจากอุณหภูมิต่ำ (Pompodakis, Terry, Joyce, Lydakis, & Papadimitriou, 2005) ผลไม้ที่มีผลสีเขียวรวมถึงใบพืชหลังการเก็บเกี่ยวได้ (Gorbe & Calatayud, 2012) ค่า Performance index (P_i) เป็นการวัดปริมาณการทำงานโดยรวมของอิเล็กตรอนผ่านระบบแสงสอง ซึ่งค่า P_i เป็นพารามิเตอร์ที่วัดต่อความสมดุลของพืช และใช้ประเมินค่าฟลักซ์พลังงานเฉพาะต่อศูนย์กลางปฏิกิริยาแสง เช่น การดูดกลืนพลังงาน (Absorption flux per reaction center, ABS/RC), การดักจับพลังงาน (Trapped energy flux per reaction center, TR_0/RC), การขนส่งอิเล็กตรอน (Electron transport per reaction center, ET_0/RC) การลดลงของตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย (Reducing end electron acceptors at the PSI acceptor side per reaction center, Re_0/RC) และการกระจายของพลังงาน (Total energy dissipated per reaction center, DI_0/RC) เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลเกี่ยวกับการตอบสนองกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงภายใต้สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน (Ceusters et al., 2019) สอดคล้องกับการศึกษาประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้นอ่อนควินัว (*Chenopodium quinoa* Willd.) หลังจากได้รับกับความเครียดจากความแล้งโดยติดตามช่วงเวลาการให้น้ำกับต้นพืช จากผลการทดลองพบว่าต้นอ่อนควินัวขาดน้ำที่ระดับ 15% FC เป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ ชักนำไปให้มีค่า ABS/RC ค่า TR_0/RC และค่า DI_0/RC สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และมีค่า ET_0/RC ไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับชุดควบคุม (Manaa et al., 2021) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเครียดจากความแล้งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการดูดกลืนพลังงาน การดักจับพลังงาน การขนส่งอิเล็กตรอน การลดลงของตัวรับอิเล็กตรอนตัว และการกระจายของพลังงาน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบแสงสองลดลง (Khatri & Rathore, 2019) ดังนั้น ค่า P_i จึงเป็นดัชนีชี้วัดความมีชีวิตของต้นพืชต่อความเครียดจากสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากค่า P_i เป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของศูนย์กลางปฏิกิริยาแสงต่อคลอโรฟิลล์ เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและการขนส่งอิเล็กตรอน ดังนั้น ค่า P_i จึงวัดต่อหน่วยรับพลังงานแสง ประสิทธิภาพการดักจับพลังงาน หรือการ

ขนส่งอิเล็กตรอนเกินกว่า QA สามารถรับได้ เช่น การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นดัชนีที่ต่อความเครียดจากความแล้งของข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) พบว่า ข้าวสาลีที่ปลูกในฤดูหนาวมีค่า Pi ลดลงภายใต้ความเครียดจากความแล้ง นอกจากนี้ความต้านทานต่อความแห้งแล้งของข้าวสาลีที่บันทึกด้วยค่า Pi ยังมีความสอดคล้องกับค่า Pi ที่ประเมินโดยผลผลิตของเมล็ด (Zivcak, Brestic, Olsovska, & Slamka, 2008) จากผลการทดลองพบว่า ต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีค่า Fv/Fm และค่า Pi มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน และต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นซิลิโคนที่ความเข้มข้น 0.5 mM, 1 mM และ 2 mM ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับการศึกษาที่มีรายงานการให้ซิลิโคนทางใบช่วยเพิ่มการเจริญเติบโต การแลกเปลี่ยนแก๊สในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การตอบสนองของสารต้านอนุมูลอิสระและความต้านทานต่อการให้น้ำอย่างจำกัดในอ้อย (*Saccharum officinarum* L.) โดยการพ่นซิลิโคนในรูป $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ความเข้มข้น 100 ppm ที่ระดับ 50% FC โดยพ่นซิลิโคนในรูป $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ จำนวน 3 ครั้ง คือ ต้นอ้อยอายุ 30 วัน 60 วัน และ 90 วัน จากผลการทดลองพบว่า ต้นอ้อยที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC ที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีค่า Fv/Fm ลดลง 11-14% ในวันที่ 30, 60 และ 90 วันหลังจากได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งและค่า Fv/Fm ลดลงต่ำสุดประมาณ 14% ในวันที่ 90 หลังจากได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง ขณะที่ต้นอ้อยที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC และได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 100 ppm ในวันที่ 30, 60 และ 90 วันหลังจากได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง พบว่า ค่า Fv/Fm ลดลง 10-13% แสดงให้เห็นว่าการพ่นซิลิโคนทางใบช่วยลดความรุนแรงการยับยั้งการเจริญเติบโตที่เกิดจากสภาวะเครียดจากความแล้ง และรักษากระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้นอ้อยให้มีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้ง (Krishan K. Verma et al., 2021) สอดคล้องกับการศึกษาผลของซิลิโคนต่อการดูดกลืนแสง การทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ และโครงสร้างภายในของคลอโรพลาสต์ในโคมะเขือเทศ (*Lycopersicon esculentum* Mill.) ภายใต้การถูกกระตุ้นจากความแล้ง โดยแช่ซิลิโคนในรูป Na_2SiO_3 ใน 1% (w/v) PEG6000 พบว่า ต้นโคมะเขือเทศที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ความเข้มข้น 1% (w/v) PEG6000 และไม่ได้แช่ซิลิโคน มีค่า Fv/Fm ลดลงอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ต้นโคมะเขือเทศที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ 1% (w/v) PEG6000 และแช่ต้นโคมะเขือเทศด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 1.2 mM มีค่า Fv/Fm สูงกว่า แสดงให้เห็นว่าซิลิโคนช่วยเพิ่มค่า Fv/Fm ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง (Cao et al.,

2015) โดยซิลิคอนสามารถช่วยบรรเทาผลกระทบที่เกิดจากความแล้งต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากซิลิคอนที่สะสมในเซลล์อีพิเดอร์มิส (epidermal cell) ของใบพืชจะอยู่ในรูปของซิลิกา โดยซิลิกาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการนำแสงโดยช่วยส่งผ่านแสงไปยังเนื้อเยื่อมีโซฟิลล์ ซึ่งเป็นที่อยู่ของคลอโรพลาสต์ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช (Maghsoudi, Emam, & Ashraf, 2015) สอดคล้องกับการใช้ซิลิคอนปรับปรุงประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงโดยพบว่าซิลิคอนมีบทบาทในการช่วยปรับองค์ประกอบโปรตีนของเยื่อหุ้มไทลาคอยด์ในข้าว (*Oryza sativa* L.) ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้ง โดยใช้ซิลิคอนในรูป $(\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O})$ จากผลการทดลองพบว่า ต้นข้าวที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ความเข้มข้น 125 g/l PEG-6000 ที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิคอน มีค่า P_i น้อยกว่าต้นข้าวที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ความเข้มข้น 125 g/l PEG-6000 และพ่นซิลิคอนความเข้มข้น 0.5 mM แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ซิลิคอนอาจเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่งอิเล็กตรอน ช่วยส่งเสริมกิจกรรมของศูนย์กลางปฏิกิริยาแสงสองและปรับปรุงความสามารถในการส่งต่ออิเล็กตรอนเป็นทอด ๆ ของต้นข้าวภายใต้สภาวะที่พืชขาดน้ำ ซึ่งอาจเป็นความสามารถในการปรับตัวของข้าวต่อสภาวะเครียดจากความแล้ง (Wang, Zhang, Jiang, & Chen, 2019) สอดคล้องกับการประยุกต์ใช้ซีลีเนียมและซิลิคอนในการช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตและโครงสร้างทางกายวิภาค สารต้านอนุมูลอิสระและผลผลิตของข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) ที่ปลูกในดินที่ได้รับสภาวะเครียดจากความเค็ม โดยพ่นซีลีเนียมและซิลิคอนในรูปโซเดียมซีลีเนต (Na_2SeO_4) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ตามลำดับพบว่าต้นข้าวสาลีที่ได้รับสภาวะเครียดจากความเค็มและพ่นด้วยซีลีเนียมและซิลิคอนร่วมกัน ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช เช่น F_v/F_m และ P_i ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ ความคงตัวของเมมเบรน มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับต้นข้าวสาลีที่ได้รับสภาวะเครียดจากความเค็มที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซีลีเนียมและซิลิคอนร่วมกัน (Taha, Seleiman, Shami, Alhammad, & Mahdi, 2021) แสดงให้เห็นว่าการใช้ซีลีเนียมร่วมกับซิลิคอนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชภายใต้สภาวะเครียดจากความเค็ม โดยการใช้ซีลีเนียมร่วมกับซิลิคอนช่วยควบคุมการทำงานของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงโดยลดการสร้างอนุมูลอิสระ ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้จะเป็นตัวบ่งชี้การสังเคราะห์อนุมูลอิสระที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง นอกจากนี้การใช้ซีลีเนียมร่วมกับซิลิคอนช่วยปกป้องโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ให้มีความสมบูรณ์จากการถูกทำลายจากความเครียดที่เกิดจากความเค็ม (Jiang et al., 2017) รักษาระดับของน้ำภายในเซลล์ และป้องกันการเสื่อมสลายของคลอโรฟิลล์ในพืชจากปัจจัยทางกายภาพได้ (Feng, Wei, & Tu, 2013)

คลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์เป็นส่วนประกอบสำคัญที่พบได้ในคลอโรพลาสต์ ซึ่งทำหน้าที่เก็บเกี่ยวพลังงานแสง (light-harvesting) การถ่ายโอนพลังงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และทำหน้าที่เป็น photoprotection ให้กับพืช (Brotosudarmo, Limantara, & Chandra, 2018) สอดคล้องกับการศึกษาการใช้ซิลิคอนทางใบช่วยต้านทานความแห้งแล้งของข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) ด้วยการเพิ่มศักยภาพทางสรีรวิทยาและการต้านอนุมูลอิสระโดยใช้ซิลิคอนในรูปโพแทสเซียมซิลิเกต ($K_2Si_2O_5$) พบว่าการใช้โพแทสเซียมซิลิเกตส่งผลดีต่อกระบวนการเมแทบอลิซึม การช่วยให้ใบข้าวสาลีมีความแข็งแรงและเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ เพื่อให้มีประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงดีขึ้น (Aurangzaib et al., 2021) สอดคล้องกับการศึกษาการประเมินการใช้ซิลิคอนทางใบในเยอบีรา (*Gerbera jamesonii* L. cv. Ruby Red) ภายใต้สภาวะขาดน้ำ โดยใช้ซิลิคอนในรูปโซเดียมเมตาซิลิเกต (Na_2SiO_3) พบว่าต้นเยอบีราที่ได้รับ ความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 60% FC และพ่นด้วยน้ำ มีปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์ลดลง เมื่อเทียบกับต้นเยอบีราในชุดควบคุมที่ได้รับน้ำปกติ อย่างไรก็ตามต้นเยอบีราที่ได้รับ ความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 60% FC และพ่นด้วยซิลิคอนที่ ความเข้มข้น 40 mg Si L^{-1} มีปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับต้นเยอบีราที่ได้รับ ความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 60% FC และพ่นด้วยน้ำ (Ahsan et al., 2023) การสะสมปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืชยังบ่งบอกถึงสภาวะเครียดของพืช จากความเข้มข้นของสีเขียวที่อยู่บนใบพืช (Dehghanipoodeh, Ghobadi, Baninasab, Gheysari, & Shiranibidabadi, 2018) จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าต้นเยอบีราที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 60% FC มีค่าคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ลดลงเมื่อเทียบกับต้นพืชในชุดควบคุมที่ได้รับน้ำปกติ การลดลงของรงควัตถุอาจเชื่อมโยงกับการลดลงของกรดอะมิโนเมทาไทโอนีนและซิสเตอีนภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้งซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโปรตีนในคลอโรพลาสต์ (Parveen et al., 2019) นอกจากนี้แคโรทีนอยด์จัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นสารเมแทบอลิต์ในการดูดกลืนแสงที่มากเกินไปเพื่อป้องกันอันตรายให้กับพืช (Dhami, Tissue, & Cazzonelli, 2018) การใช้ซิลิคอนทางใบจึงช่วยลดความเสียหายต่อรงควัตถุในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ช่วยเพิ่มปริมาณแคโรทีนอยด์ในเนื้อเยื่อใบได้อย่างมีนัยสำคัญ ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้ง (Seif et al., 2021) สอดคล้องกับการศึกษาการใช้ซิลิคอนช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและคุณค่าทางโภชนาการของสตรอว์เบอร์รี่ (*Fragaria x ananassa* cv. Kaorino) ภายใต้สภาวะปกติและสภาวะการขาดน้ำ โดยใช้ซิลิคอนในรูปโซเดียมเมตาซิลิเกต (Na_2SiO_3) พบว่าซิลิคอนช่วยเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์รวมและปริมาณคลอโรฟิลล์ บี (X.

Xu, Zou, Li, Sun, & Liu, 2023) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ซิลิโคนทางใบให้กับต้นสตอรว์เบอร์รี่ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง ช่วยเพิ่มกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งอาจจะเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคโรทีนอยด์ที่ซ่อมแซมการทำงานของเมมเบรน เสริมสร้างความสามารถในการเก็บเกี่ยวและส่งออกพลังงานแสง (Domonkos, Kis, Gombos, & Ughy, 2013) เนื่องจากแคโรทีนอยด์สามารถป้องกันเยื่อหุ้มไทลาคอยด์โดยช่วยกำจัดอนุมูลอิสระ และกระจายพลังงานส่วนเกินที่เกิดขึ้นในระบบแสงสอง (Son, Hart, & Schlau-Cohen, 2021) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์รวมสวนทางกลับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแคโรทีนอยด์ที่เพิ่มขึ้นในต้นสตอรว์เบอร์รี่ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง การเพิ่มขึ้นของปริมาณแคโรทีนอยด์จะชดเชยการทำงานที่เกิดจากการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์รวม เนื่องจากแคโรทีนอยด์สามารถส่งออกพลังงานกระตุ้นให้กับคลอโรฟิลล์ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแสง (Collini, 2019)

ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ เป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญของความเครียดจากความแล้ง ปริมาณน้ำสัมพัทธ์และการคายน้ำของพืชจะลดลงอย่างมากในพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง พืชที่ทนต่อความแล้งจะมีประสิทธิภาพการใช้น้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพันธุ์พืชที่อ่อนแอต่อความแล้ง เนื่องจากการเพิ่มการสะสมของมวลชีวภาพและการลดลงของคายน้ำเนื่องจากการปิดปากใบ (S. Sharma, Villamor, & Verslues, 2011) การลดลงของปริมาณน้ำสัมพัทธ์เป็นหนึ่งในการตอบสนองต่อความแล้งได้เร็วที่สุดและจะตามมาด้วยค่า water potential ที่ต่ำลงเนื่องจากสภาพสภาวะละลายภายนอกเซลล์มีความเข้มข้นมากกว่าสภาวะละลายภายในเซลล์ น้ำจากภายในเซลล์จะออกซิซึมออกไปนอกเซลล์จนถึงจุดสมดุล ทำให้เซลล์หดตัวเนื่องจากสูญเสียแรงดันเต่ง (turgor pressure) ซึ่งส่งผลต่อเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ (Noctor, Mhamdi, & Foyer, 2014) นอกจากนี้การปิดปากใบเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิของใบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โปรตีนเสียสภาพและเกิดความเสียหายของสภาพคงตัวของเมมเบรน การสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง การดูดซึมแร่ธาตุและการสังเคราะห์กรดอะมิโนลดลง (Khan, Hussain, Raza, Farooq, & Jabran, 2015) จากผลการทดลองพบว่าต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 25% FC และพ่นด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 1.5 mM มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์มากกว่าต้นพืชที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ 25% FC ที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน สอดคล้องกับการศึกษาการประเมินการประยุกต์ใช้ซิลิโคนและโพรลีนต่ออนุมูลอิสระในสภาวะเครียดจากความแล้งของ sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cv. Samba โดยใช้ซิลิโคนในรูปกรดซิลิซิก (H_4SiO_4) ทำการทดลองใน 2 ฤดูกาลคือ ฤดูหนาวปี 2018/2019 และ 2019/2020 พบว่า sugar beet ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งและใช้ซิลิโคนร่วมกับโพรลีน มีปริมาณน้ำ

สัมพันธ์มากกว่าต้น sugar beet ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง (AlKahtani et al., 2021) แสดงให้เห็นว่าซิลิโคนมีประสิทธิภาพในการบรรเทาความเครียดจากความแล้งโดยการเพิ่มความสามารถในการรักษาสภาพน้ำภายในเซลล์ เนื่องจากซิลิโคนจะเข้าไปสะสมบริเวณผนังเซลล์ ท่อลำเลียงน้ำเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเซลล์พืช (Yonny, Sukendah, Edi, & Djoko, 2020) และควบคุมการเปิดปิดปากใบ ส่งผลทำให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และโพรลีนมีบทบาทในการลดผลกระทบจากความแล้งของ sugar beet เนื่องจากโพรลีนจัดเป็นสาร osmoprotectant ในการปรับค่าศักย์ของน้ำในเซลล์พืช เพื่อลดการสูญเสียน้ำที่ออกจากเซลล์พืช และเยื่อหุ้มเซลล์ที่ช่วยให้พืชทนต่อความเครียดได้ดีขึ้น (Ashraf & Foolad, 2007) สอดคล้องกับการศึกษาซิลิโคนช่วยลดผลกระทบจากความแล้งในต้นคาโนลา (*Brassica napus* L.) โดยใช้ซิลิโคนในรูปโซเดียมซิลิเกต ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) โดยปลูกต้นคาโนลาในดินที่ได้รับน้ำปกติ และในสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 40% FC จากผลการทดลองพบว่าความเครียดจากความแล้งทำให้ปริมาณน้ำสัมพันธ์ลดลง การพ่นด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 4 mM ช่วยรักษาปริมาณน้ำในเซลล์ทำให้มีปริมาณน้ำสัมพันธ์มากที่สุดเมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่ได้รับน้ำปกติ (Bukhari et al., 2021) สอดคล้องกับการศึกษาการใช้ซิลิโคนทางใบต่อการเจริญเติบโตและลักษณะทางสรีรวิทยาของดอกคำฝอย (*Carthamus tinctorius* L.) ภายใต้สภาวะเครียดจากความเค็ม โดยพ่นซิลิโคนในรูปโพแทสเซียมซิลิเกต พบว่าต้นอ่อนดอกคำฝอยที่ได้รับความเค็ม และพ่นด้วยซิลิโคน มีปริมาณน้ำสัมพันธ์มากกว่าต้นอ่อนดอกคำฝอยในชุดควบคุมที่ได้รับความเค็มที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน (Jam et al., 2023) แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากการพ่นด้วยซิลิโคนเกิดจาก ซิลิโคนจะตกตะกอนอยู่ในรูปของซิลิกาใน apoplast ของผนังเซลล์ชั้นอพิเดอริมิสของใบพืชเพื่อลดการสูญเสียน้ำทางปากใบ (Zhu, Gong, & Yin, 2019)

จากผลการทดลองตอนทดลองที่ 2.1 ผู้วิจัยได้ทำการหาระดับความเข้มข้นของซิลิคอนที่เหมาะสมในการนำมาใช้ศึกษาการตอบสนองของทางสรีรวิทยาของต้นพืช *D. tinctoria* ที่ได้รับความเครียดจากสภาวะแล้ง พบว่าซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM มีความเหมาะสมเมื่อพืชได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง จึงนำซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM มาใช้ศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยาภายใต้ความเครียดจากความแล้ง การศึกษาในต้นอ่อนถั่วลันเตา (*Pisum sativum* L.) อายุ 33 วัน ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 30% FC และใช้ซิลิคอนด้วยนาโนซิลิกา (SiO_2 NPs) 2 วิธีคือ การรด (watering) และการพ่น (spraying) ด้วยนาโนซิลิกาที่ความเข้มข้น 0, 12.5, 25 และ 50 ppm พบว่าเมื่อต้นอ่อนถั่วลันเตาได้รับความเครียดจากความแล้ง ส่งผลให้ปริมาณน้ำสัมพัทธ์และพื้นที่ใบลดลง เมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่ได้รับน้ำปกติ ขณะที่ต้นอ่อนถั่วลันเตาที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 30% FC และรดหรือพ่นด้วยด้วย SiO_2 NPs ความเข้มข้น 50 ppm ช่วยเพิ่มปริมาณน้ำสัมพัทธ์และพื้นที่ใบเมื่อเทียบกับต้นอ่อนถั่วลันเตาที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้รับการรดหรือพ่นด้วยซิลิคอน (Sutuliene et al., 2022) แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำสัมพัทธ์และพื้นที่ใบของถั่วลันเตาลดลงเมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง แต่การรดหรือการพ่นด้วย SiO_2 NPs จะช่วยเพิ่มปริมาณน้ำสัมพัทธ์และพื้นที่ใบของถั่วลันเตา โดยเยื่อหุ้มเซลล์ของพืชเป็นที่แรกในเซลล์ที่ได้รับอิทธิพลจากความแล้ง และความสามารถในการป้องกันความสมบูรณ์ของเยื่อหุ้มเซลล์ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความทนทานของพืชต่อความเครียดจากความแล้ง (Rehman et al., 2016) ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้งพบว่าพืชจะมีค่า water potential จะลดลงและพืชจะมีกลไกในการป้องกันตัวเองโดยลดการคายน้ำด้วยการปิดปากใบ เพิ่มค่า stomatal resistance และลดค่า stomatal conductivity (Sutuliene et al., 2022) และการใช้ซิลิคอนยังมีบทบาทในการช่วยลดการคายน้ำของใบและลำต้น โดยมีการสะสมซิลิคอนในรูป phytolith ได้ชั้นอิพิเดอร์มิส ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ลดการสูญเสียน้ำจากชั้นคิวติเคิลลดลง (Mateos-Naranjo, Andrades-Moreno, & Davy, 2013) นอกจากนี้การทดลองในต้นสตรอว์เบอร์รี่ โดยให้พืชได้รับความเครียดจากความแล้ง ร่วมกับการพ่นด้วยซีลีเนียมและนาโนซิลิกา พบว่า การพ่นด้วย Se/SiO_2 100 mg L⁻¹ มีปริมาณน้ำสัมพัทธ์มากกว่าต้นสตรอว์เบอร์รี่ที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง (Zahedi, Moharrami, Sarikhani, & Padervand, 2020) แสดงให้เห็นว่าการพ่นด้วย Se/SiO_2 เพิ่มปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในต้นสตรอว์เบอร์รี่ และช่วยเพิ่มสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (superoxide dismutase, SOD) แอสคอร์เบตเพอร์ออกซิเดส (ascorbate peroxidase, APX) และ กลูต้าไธโอน

(glutathione, GSH) และลดอนุมูลอิสระในพืชซึ่งจะไปช่วยเพิ่มความเสถียรของเยื่อหุ้มเซลล์และค่า water potential ภายใต้สภาวะปกติและสภาวะเครียดจากความแล้ง (Tang et al., 2015) การศึกษาค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์โดยศึกษาได้จากค่า Fv/Fm และค่า Pi เพื่อใช้ประเมินผลกระทบที่เกิดจากความเครียดจากความแล้ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในข้าวโพด (*Zea mays* L.) 2 ระยะ คือ ระยะแตกใบอ่อน (jointing stage) และระยะการออกช่อดอกเพศผู้ (tasseling stage) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง พบว่า การพ่นด้วยซิลิคอนที่ความเข้มข้น 15 g L^{-1} ในต้นข้าวโพดที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีค่า Fv/Fm และ Pi สูงขึ้น (J. Xu, Guo, & Liu, 2022) การใช้ซิลิคอนสามารถช่วยลดความเสียหายของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของใบข้าวโพดภายใต้ความเครียดจากความแล้ง โดยช่วยลดข้อจำกัดในการจัดหา CO_2 ในคลอโรพลาสต์ และช่วยให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดได้ดีขึ้นภายใต้ความเครียดจากความแล้งซึ่งเป็นประโยชน์ต่อรงควัตถุในใบข้าวโพดเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงที่จับได้เปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้มีพลังงานเพียงพอต่อการนำ CO_2 ไปใช้ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงและทนทานต่อความเครียดจากความแล้งได้ดีขึ้นและเพิ่มน้ำหนักแห้งของพืช (S.-h. Zhang, Xu, Sun, Zhang, & Li, 2018) สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ในข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare* L.) เมื่อได้รับสภาวะเครียดจากความเค็มที่ความเข้มข้น 200 mM พบว่า ซิลิคอนความเข้มข้น 0.1% และ 0.2% ช่วยเพิ่มค่า Fv/Fm และค่า Pi เมื่อเทียบกับต้นข้าวบาร์เลย์ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความเค็มที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิคอน (Stadnik, Tobiasz-Salach, & Mazurek, 2022) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าซิลิคอนในรูปไฮเดรตสามารถแทรกซึมในช่องว่างระหว่างเซลล์และปากใบของพืชได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากสามารถเพิ่มค่าการแลกเปลี่ยนแก๊สและประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้ดีขึ้น การพ่นด้วยซิลิคอนเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของพืชเมื่อเจอกับสภาวะเครียดจากความเค็ม (Laane, 2018)

คลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์จัดเป็นรงควัตถุที่มีความจำเป็นต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในต้นมะม่วง (*Mangifera indica* L.) 4 พันธุ์ ได้แก่ Ewaise, Hindy, Misk Ewaise และ Fagri Kalan เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งร่วมกับการใช้ซิลิคอนในรูป potassium silicate (K_2SiO_3) 1.5 mM จากผลการทดลองพบว่า ต้นมะม่วงที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและไม่ได้พ่นซิลิคอนมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และแคโรทีนอยด์ลดลง ในมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ การใช้ซิลิคอนที่ความเข้มข้น 1.5 mM ช่วยเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และแคโรทีนอยด์ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อต้นมะม่วงได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง (Helaly, El-Hoseiny, El-Sheery, Rastogi, &

Kalaji, 2017) เนื่องจากการลดลงของรงควัตถุภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้งเกี่ยวข้องกับ เอนไซม์ที่ใช้ย่อยโปรตีน เช่น คลอโรฟิลล์เลส (chlorophyllase) ซึ่งทำหน้าที่ย่อยสลายคลอโรฟิลล์ และอาจเกิดจากการแตกตัวของเยื่อหุ้มเซลล์และความเสียหายของคลอโรฟิลล์ โดยอนุมูลอิสระใน พืช เมื่อพืชเกิดความเครียดจากออกซิเดชันจะส่งผลต่อการเกิดการชราของพืช (senescence) และความสามารถของ membrane permeability ลดลง ส่งผลให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เกิดขึ้นลดลง (Qin & Tian, 2005) การเพิ่มขึ้นของปริมาณของแคโรทีนอยด์ ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานินในมะม่วงที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง ร่วมกับการเสริมด้วยซิลิโคน ซึ่งเป็นกลไก ของสารสีในการช่วยให้มะม่วงสามารถเพิ่มความทนทาน ต่อการขาดน้ำได้ดีขึ้น รวมถึงการ ควบคุมเมแทบอลิซึมในต้นพืช เช่น การปรับฮอร์โมน เพื่อให้เซลล์พืชสามารถคงตัวอยู่ได้แม้ใน สภาวะขาดน้ำ (Hattori, Sonobe, Inanaga, An, & Morita, 2008) สอดคล้องกับการรายงานก่อน หน้านี้ใน แคนตาลูป (*Cucumis melo* L.) ที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 75% และ 50% FC และพ่นซิลิโคนในรูปกรดซิลิสิก (silicic acid) ความเข้มข้น 400 Kg ha⁻¹ พบว่าเมื่อต้น แคนตาลูปได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชด้านความสูง จำนวน ของใบ ค่าความเขียวของใบ และน้ำหนักแห้งของส่วนรากและลำต้นลดลงเมื่อเทียบกับต้นแคนตา ลูปที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง และพ่นด้วยซิลิโคนที่ความเข้มข้น 400 Kg ha⁻¹ แสดงให้ เห็นว่าการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชลดลงอย่างมากในสภาวะเครียดจากความแล้งที่ระดับ 50% FC อาจเกิดการปิดปากใบเพื่อลดการคายน้ำ ส่งผลต่อการแพร่ของ CO₂ เข้าสู่ปากใบพืชได้ น้อยลง และรงควัตถุที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ทำหน้าที่รับและส่งต่อพลังงานแสงได้ไม่มี ประสิทธิภาพ จึงทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง (M. Farooq et al., 2009) การใช้ซิลิโคน จึงช่วยให้แคนตาลูปมีการเจริญเติบโตของพืชด้านความสูง จำนวนของใบ ค่าความเขียวของใบ และน้ำหนักแห้งของส่วนรากและลำต้นเพิ่มขึ้น (Alam, Hariyanto, Ullah, Salin, & Datta, 2021)

โพรลินและน้ำตาลที่สะสมภายในเซลล์เพื่อตอบสนองต่อสภาวะเครียดต่างๆ ซึ่งจัดเป็น สารออสโมโพรเทคแทนต์ที่ช่วยป้องกันอันตรายให้กับเซลล์พืช (Gurrieri, Merico, Trost, Forlani, & Sparla, 2020) การศึกษาในต้นข้าวโพด (*Zea mays* L.) 2 พันธุ์ ได้แก่ Pearl และ Malka ที่ ได้รับความเครียดจากความแล้งร่วมกับการใช้ด้วยซิลิโคนในรูปไฮเดียมเมตาซิลิเกต พบว่า ข้าวโพดที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ระดับ 60% FC และได้รับซิลิโคน มีการสะสมโพรลิน และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้น้อยกว่าต้นข้าวโพดที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ ไม่ได้รับซิลิโคน (Parveen et al., 2019) แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของการสะสมโพรลินและ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในข้าวโพดที่ได้รับความเครียดจากความแล้งอาจเกี่ยวข้องกับ

กับการกำจัดอนุมูลอิสระ ความคงตัวของเมมเบรน และความเสถียรของกิจกรรมของเอนไซม์ต่าง ๆ และการปรับออสโมติกเพื่อกระตุ้นให้พืชทนทานต่อความแล้งได้ดีขึ้น (Blum, 2017) อย่างไรก็ตาม การศึกษาในข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งด้วย PEG6000 ร่วมกับการเติม 1 mM โซเดียมซัลเฟต พบว่า ต้นข้าวสาลีที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง มีการสะสมโพรลีนและปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้มากกว่าต้นข้าวสาลีที่ได้รับความเครียดจากความแล้งร่วมกับการเติม 1 mM โซเดียมซัลเฟต แสดงให้เห็นว่า การสะสมสารออสโมโพรเทคแทนต์ เช่น โพรลีนที่มากขึ้นเป็นกระบวนการที่บ่งบอกถึงการบาดเจ็บจากความเครียดจากความแล้ง (Pei et al., 2010) มีการรายงานก่อนหน้านี้ในชะเอมเทศ (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch. Ex DC) ที่ได้รับความเครียดจากความเค็มและความเครียดจากความแล้ง ร่วมกับการใช้ซิลิคอนในรูปซิลิเกต พบว่า ต้นชะเอมเทศที่ได้รับความเครียดจากความเค็มร่วมกับความเครียดจากความแล้งและได้รับซิลิคอนมีการสะสมโพรลีนและปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ไม่แตกต่างกับต้นชะเอมเทศที่ได้รับความเครียดจากความเค็มที่ไม่ได้รับซิลิคอน (W. Zhang et al., 2018) ซึ่งจากผลการทดลองที่มีรายงานก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าโพรลีนและน้ำตาล จัดเป็นสารออสโมโพรเทคแทนต์ในพืช โดยโพรลีนจัดเป็นสารแอสโมไลต์และเป็น signal molecule ที่สำคัญที่อยู่ในไซโทซอล (cytosol) และยังมีส่วนช่วยในการปกป้องเมมเบรนโปรตีนและเอนไซม์จากความเครียดต่าง ๆ (M. Singh, Kumar, Singh, Singh, & Prasad, 2015) รักษาความสมดุลของระดับภายในเซลล์กับสิ่งแวดล้อมเมื่ออยู่ในสภาวะขาดน้ำและรักษาสมดุลของ $NAD^+/NADH$ เมื่อพืชอยู่ในสภาวะเครียดจากความแล้งและความเค็ม (Verma, 1999) และน้ำตาล ทำหน้าที่ให้คาร์บอนและพลังงานสำหรับการทำงานที่ปกติของเมแทบอลิซึมของเซลล์ และควบคุมการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช น้ำตาลจัดเป็นสารป้องกันออสโมติกซึ่งทำงานควบคุมการปรับออสโมติกในเซลล์พืช ป้องกันเมมเบรนเสียหายและกำจัดความเป็นพิษของอนุมูลอิสระและความเครียดจากสิ่งแวดล้อม (M. Singh et al., 2015) มีการรายงานก่อนหน้านี้พบว่า การสะสมของน้ำตาลในรูปรีดักชันที่สูงขึ้น เช่น กลูโคส (glucose) ซูโครส (sucrose) และฟรุคโตส (fructose) ทำหน้าที่เป็นสารออสโมโพรเทคแทนต์ที่สำคัญภายใต้ความเครียดจากความแล้ง (Koyro, Ahmad, & Geissler, 2012; Van den Ende & Valluru, 2009) สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ในมะเขือเทศ (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Ailsa Craig.) 2 พันธุ์ คือ wild type และ *flacca* ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่พบว่า ต้นมะเขือเทศพันธุ์ *flacca* ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และการสะสมโพรลีนสูงกว่าต้นมะเขือเทศ wild type ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารดังกล่าวสามารถช่วยป้องกันการคายน้ำและปรับสมดุล

ภายในเซลล์ ทำให้ค่า stomatal conductance ในพืชสูงขึ้นและลดปริมาณกรดแอบไซซิก ดังนั้น การสะสมของน้ำตาลกลูโคส ซูโครส และโพสเฟต จึงมีบทบาทสำคัญในการรักษาอัตราการเติบโต ระหว่างพืชได้รับความเครียดจากการขาดน้ำและเมื่อได้รับน้ำอีกครั้ง (re-watering) (Zivanovic et al., 2020)

สารต้านอนุมูลอิสระ มีความสำคัญต่อการกำจัดอนุมูลอิสระโดยสามารถยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากความเครียดจากออกซิเดชัน เพื่อป้องกันความเสียหายภายในเซลล์ (โอบา วัชระคุปต์, 2549) สารต้านอนุมูลอิสระมีกลไกการทำงานเพื่อต้านอนุมูลอิสระ เช่น การยับยั้งการทำงานของออกซิเจนที่ออกฤทธิ์ การดักจับอนุมูลอิสระ และการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เป็นต้น (ชมภู, ไกรพุม, อุยะตุง, & พรพรม, 2563) สอดคล้องกับการศึกษาใน Kentucky bluegrass (*Poa Pratensis* L.) เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งและใช้ซิลิโคนในรูปแบบซิลิเกต พบว่า ต้น kentucky bluegrass ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้พ่นซิลิโคน มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลง อย่างไรก็ตามการพ่นด้วยซิลิโคนความเข้มข้น 0.1 และ 1.0 mM ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของต้น kentucky bluegrass เมื่อเทียบกับต้นพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นเป็นองค์ประกอบของกลไกการป้องกันที่ร่วมกับระดับของสารต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นเพื่อกำจัดอนุมูลอิสระที่ถูกผลิตจากความเครียดจากออกซิเดชัน ดังนั้นความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระจึงสามารถนำมาประเมินความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของพืชรวมทั้งต้น Kentucky bluegrass ภายใต้ความเครียดจากความแล้ง (Bae, Hong, Choi, Lee, & Park, 2017) โดยความเครียดจากออกซิเดชันในรูปแบบ lipid peroxidation เกิดขึ้นได้เมื่อความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระโดย ROS เช่น H_2O_2 และ O_2^- (Fu & Huang, 2001) สอดคล้องกับการศึกษาใน พีเวอร์พีว (*Tanacetum parthenium* L. Schultz Bip) เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้งร่วมกับการพ่นด้วยนาโนซิลิโคน พบว่า ต้นพีเวอร์พีวที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้พ่นซิลิโคนมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระน้อยกว่า ต้นพีเวอร์พีวที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและพ่นด้วยซิลิโคน (Esmaili, Tavallali, Amiri, Bazrafshan, & Sharafzadeh, 2022) อย่างไรก็ตามปริมาณ ROS ที่มากขึ้น ส่งผลต่อการตอบสนองทางความเครียดชีวภาพและกายภาพ ส่งผลให้เกิดความเสียหายของเซลล์ (Sakamoto & Murata, 2002) เมื่อพืชที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง ปริมาณอนุมูลอิสระที่สูงขึ้น เช่น H_2O_2 ทำให้เกิด lipid peroxidation ของเมมเบรน เกิดการย่อยสลายของโปรตีน และการสูญเสียรงควัตถุที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และระบบแสงเกิดความเสียหาย การใช้ซิลิโคนอาจ

ปรับปรุงการเจริญเติบโตและมวลชีวภาพของพืช ในขณะที่เดียวกันก็สามารถปรับความสมดุลของน้ำในเซลล์ให้เหมาะสมเพื่อลดความเสียหายจากออกซิเดชันการใช้ซิลิโคนจึงช่วยลดความเครียดจากออกซิเดชันโดยลดการสร้างอนุมูลอิสระและเพิ่มโมเลกุลของสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น CAT, SOD, APX และ GSH เป็นต้น การเกิด lipid peroxidation และรักษาความสมบูรณ์ของเมมเบรน (Rastogi et al., 2021) สอดคล้องกับการศึกษาใน ต้นโหระพา (*Ocimum basilicum* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความเค็มร่วมกับการพ่นด้วยซิลิโคน พบว่า เมื่อเพิ่มระดับความเค็มส่งผลให้ต้นโหระพามีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลงเมื่อเทียบกับต้นโหระพาในสภาวะปกติ การพ่นด้วยซิลิโคนทำให้ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของต้นโหระพาลดลงเมื่อได้รับความเครียดจากความเค็ม เมื่อเทียบกับต้นโหระพาที่ได้รับความเครียดจากความเค็มและไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน ขณะที่ต้นโหระพาที่ได้รับความเครียดจากความเค็ม และพ่นด้วยซิลิโคนมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าต้นโหระพาที่ได้รับความเครียดจากความเค็มและไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคน (Robotjazi, Roshandel, & Hooshmand, 2020)

แอนโทไซยานิน จัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ไม่ใช่เอนไซม์ ซึ่งมีบทบาทในสำคัญในการป้องกันความเสียหายที่เกิดจากอนุมูลอิสระเมื่อพืชได้รับความเครียดจากความแล้ง สอดคล้องกับการศึกษาในสตรอว์เบอร์รี (*Fragaria x ananassa* Duch) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง ร่วมกับการใช้นาโนซิลิเนียมและนาโนซิลิกา Se/SiO₂-NPs พบว่า ต้นสตรอว์เบอร์รีที่ได้รับความเครียดจากความแล้งที่ได้รับการพ่นด้วย Se/SiO₂-NPs มีปริมาณแอนโทไซยานินมากกว่าต้นสตรอว์เบอร์รีที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง (Zahedi et al., 2020) โดยแอนโทไซยานินจัดเป็นสารประกอบในกลุ่มฟีนอลซึ่งเป็นสาร secondary metabolites และมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ โดยสารต้านอนุมูลอิสระมีบทบาทในการป้องกันความเครียดจากออกซิเดชันในพืช (Hoekstra, Golovina, & Buitink, 2001) โดย -OH ที่ติดอยู่กับวงแหวนอะโรมาติกจะลดความเสียหายจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยการกำจัดอนุมูลอิสระและโลหะคีเลต โดยทั่วไปการเพิ่มขึ้นของ secondary metabolites มีส่วนช่วยในการปรับปรุงการตอบสนองของเซลล์ต่อความเครียดจากออกซิเดชัน นอกเหนือจากการต้านอนุมูลอิสระและช่วยให้พืชมีผลผลิตที่ดี (Medrano-Macias et al., 2018) สอดคล้องกับการศึกษาในข้าวสาลี (*Triticum aestivum* cv. Homa) ที่ได้รับความเครียดจากความเค็มร่วมกับการใช้โซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) พบว่า เมื่อต้นข้าวสาลีได้รับความเครียดจากความเค็มและไม่ได้พ่นด้วยซิลิโคนมีปริมาณแอนโทไซยานินมากกว่าต้นข้าวสาลีที่ได้รับความเครียดจากความเค็ม (Hajiboland, Cherghvareh, & Dashtebani, 2016) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแอนโทไซยานินถูกชักนำจากปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น

ความเย็น น้ำ และความเครียดจากออกซิเดชันโดยแอนโทไซยานินในเยื่อพืชยังมีหน้าที่เป็นตัวดูดซับอันตรายจากระดับความยาวคลื่นของรังสี และเป็นสารที่เป็นตัวปรับแรงดันออกซิเดชันในเซลล์ (Chalker-Scott, 1999)

อนุมูลอิสระเป็นโมเลกุลที่ไม่เสถียรและมีความไวในการเกิดปฏิกิริยาจึงพยายามจับคู่กับโมเลกุลอื่น เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน และ ไฮโดรเพอร์ รอกซิล และ ไนโตรเจนไดออกไซด์ เป็นต้น (โสภา วัชรคุปต์, 2549) ซึ่งจะชักนำให้พืชเกิดกระบวนการ lipid peroxidation ทำให้ lipid membrane ได้รับความเสียหาย เกิดการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ สอดคล้องกับการศึกษาในต้นอ่อนชะเอมจีน (*Glycyrrhiza uralensis*) ที่ได้รับความเครียดจากความเค็มที่ร่วมกับความเครียดจากความแห้งจาก PEG6000 และพ่นซิลิโคนในรูปแบบ โฟแทสเซียมซิลิเกต (K_2SiO_3) พบว่า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และมาลอนไดอัลดีไฮด์ในต้นชะเอมจีนเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความเครียดจากความเค็มและความแห้งเมื่อเทียบกับต้นชะเอมจีนในชุดควบคุมที่ได้รับน้ำปกติ การพ่นด้วยซิลิโคนช่วยลดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และมาลอนไดอัลดีไฮด์ในต้นชะเอมจีนที่ได้รับความเครียดจากความเค็มและความแห้ง (W. Zhang et al., 2017) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ โดยศึกษาต้นอ่อนข้าว (*Oryza sativa* L. cv. Donjin) ร่วมกับการใช้ซิลิโคนในรูปแบบโซเดียมซิลิเกต พบว่า ต้นข้าวในชุดควบคุมมีปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์มากกว่าต้นข้าวในชุดควบคุมที่ได้รับซิลิโคน (Kim et al., 2014) โดยระดับของ lipid peroxidation บ่งบอกถึงความเสียหายจากความเครียดจากออกซิเดชันต่อเมมเบรน การสะสมซิลิโคนในข้าวถูกเป็นการสร้างเกราะป้องกันอันตรายโดยสร้างชั้นบาง ๆ ขนาด 2.5 μm . ได้ชั้นอีพิเดอร์มิส (Currie & Perry, 2007) โดยการสะสมของซิลิโคนจะอยู่ในรูปซิลิกา หรือ silica body (phytoliths) ซึ่งสะสมอยู่บริเวณอีพิเดอร์มิส และท่อลำเลียง การสะสมของซิลิโคนนี้ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงอย่างมากใน lipid membrane เมื่อเทียบกับต้นพืชที่ได้รับการบาดเจ็บและไม่ได้รับซิลิโคน (J. Ma & Yamaji, 2008) ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ เป็นดัชนีบ่งบอกระดับความรุนแรงของการเกิดความเครียดจากออกซิเดชัน เนื่องจากพืชไม่สามารถกำจัดอนุมูลอิสระ ซึ่งจะชักนำให้เกิดกระบวนการ lipid peroxidation ซึ่งได้มาลอนไดอัลดีไฮด์เป็นผลิตภัณฑ์ (Navari-Izzo & Rascio, 1999) สอดคล้องกับการศึกษาในต้นอ่อนข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความแห้งโดยใช้ PEG6000 ร่วมกับการใช้ซิลิโคนในรูปแบบโซเดียมซิลิเกต พบว่า ต้นอ่อนข้าวสาลีที่ได้รับความเครียดจากความแห้งและไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มาลอนไดอัลดีไฮด์ และการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์มากกว่าต้นพืชในชุดควบคุมที่ได้รับน้ำปกติ เมื่อได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนพบว่าต้นอ่อนข้าวสาลีที่ได้รับความเครียดจากความแห้งมีปริมาณ

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มาลอนไดอัลดีไฮด์ และการร่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ ลดลงเมื่อเทียบกับต้นอ่อนข้าวสาลีที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน (Pei et al., 2010) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ใน chickpea (*Cicer arietinum* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและได้รับซิลิโคนทางรากในรูปไซโตเดียมซิลิเกต (Gunes, Pilbeam, Inal, Bagci, & Coban, 2007) การศึกษาในต้นทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งร่วมกับการใช้ซิลิโคนในรูปไซโตเดียมซิลิเกตทางราก (Gunes, Pilbeam, Inal, & Coban, 2008) และศึกษาในต้นถั่วลิ้นเต่า (*Pisum sativum* L. cv. Olympia) ที่ได้รับความเครียดจากความเค็มร่วมกับการใช้ซิลิโคนในรูปโพแทสเซียมซิลิเกต (Shahid et al., 2015)

Stomatal conductance เป็นค่าที่วัดการเปิดปิดของปากใบและสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้สถานะของน้ำในพืช ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับค่า water potential และการลดลงของค่า stomatal conductance เกิดจากการลดลงของค่า water potential ภายในเซลล์ ทำให้พืชมีกลไกการตอบสนองต่อการขาดน้ำโดยการปิดปากใบเพื่อลดการคายน้ำ ส่งผลให้ค่า stomatal conductance ลดลง (Giménez, Gallardo, & Thompson, 2013) การศึกษาก่อนหน้านี้ในอ้อย (*Saccharum officinarum* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งร่วมกับการพ่นด้วยซิลิโคนในรูปแคลเซียมเมตาซิลิเกต พบว่า ความเครียดจากความแล้งลดค่า stomatal conductance ในพืช 31-41% ขณะที่การจำกัดการให้น้ำที่ระดับ 50%-45% FC ร่วมกับการพ่นด้วยซิลิโคนช่วยลดเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของค่า stomatal conductance ลงเมื่อเทียบกับต้นอ้อยในชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน (Krishan K. Verma et al., 2021) การศึกษาในข้าวโพด (*Zea mays* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งร่วมกับการพ่นด้วยซิลิโคนในรูปไซโตเดียมซิลิเกต พบว่า ค่า stomatal conductance ลดลงในข้าวโพดที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคนเมื่อเทียบกับต้นข้าวโพดที่ได้น้ำปกติ ขณะที่ต้นข้าวโพดที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและพ่นซิลิโคนมีค่า stomatal conductance เมื่อเทียบกับต้นข้าวโพดที่ได้รับสภาวะเครียดจากความแล้งที่ไม่ได้รับการพ่นด้วยซิลิโคน (Abd El-Mageed, Shaaban, Abd El-Mageed, Semida, & Rady, 2021) สอดคล้องกับการศึกษาในถั่วลิ้นเต่า (*Pisum sativum* L. cv. Olympia) ที่ได้รับความเครียดจากความเค็ม ร่วมกับการใช้ซิลิโคนในรูปโพแทสเซียมซิลิเกต พบว่า ค่า stomatal conductance ลดลง เมื่อต้นถั่วลิ้นเต่าได้รับความเครียดจากความเค็มที่ไม่ได้รับซิลิโคนเมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่ได้น้ำปกติ การใช้ซิลิโคนช่วยเพิ่มค่า stomatal conductance เมื่อเทียบกับต้นถั่วลิ้นเต่าที่ได้รับความเครียดจากความเค็มและไม่ได้รับซิลิโคน (Shahid et al., 2015) โดยค่า stomatal conductance (g_s) เป็นตัววัดระดับการเปิดปิดปากใบและใช้เป็นตัวบ่งชี้

สถานะของน้ำในพืชได้โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า porometer โดยค่า g_s เกี่ยวข้องกับค่า water potential ในใบพืช g_s มีบทบาทสำคัญในการควบคุมสมดุลน้ำของพืช การปิดปากใบยังช่วยลดการขยายตัวและอัตราการการเติบโตของเซลล์ ซึ่งส่งผลให้มวลชีวภาพและผลผลิตลดลงอย่างมาก เมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง (Nemeskéri, Molnár, Vigh, Nagy, & Dobos, 2015) นอกจากนี้การลดลงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงอาจเกิดจากข้อจำกัดของปากใบเป็นหลัก ส่งผลให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชลดลง การใช้ซิลิโคนจึงช่วยให้ข้าวฟ่าง (*Sorghum bicolor* L. Moench) ที่ได้รับความเครียดจากความแล้งด้วย PEG6000 ร่วมกับการแช่ด้วยซิลิโคน มีค่า g_s ค่า assimilation rate และค่า transpiration rate สูงขึ้น เมื่อเทียบกับต้นข้าวฟ่างที่ได้รับความเครียดจากความแล้งและไม่ได้รับซิลิโคน (Sonobe et al., 2010) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ซิลิโคนส่งผลต่อสถานะของน้ำในพืชโดยอาจเชื่อมโยงกับการลดการคายน้ำโดยซิลิโคนจะสะสมอยู่ในรูป polar monosilicic acid หรือในรูป polymerized silicic acid ในชั้นอพิเดอริส โดยการสร้างพันธะไฮโดรเจน ระหว่างน้ำกับซิลิกาไฮเดรต ($SiO_2 \cdot nH_2O$) จึงทำให้โมเลกุลของน้ำหลุดมาจากผิวใบได้ยากขึ้น (Liang et al., 2008)

อนุมูลอิสระที่สะสมในพืชสามารถถูกกำจัดได้หลายวิธี หนึ่งในกำจัดอนุมูลอิสระคือการกำจัดอนุมูลอิสระด้วยเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส ทำหน้าที่ในการกำจัดซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน เพื่อเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และน้ำ เอนไซม์คะตะเลส ทำหน้าที่เปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เป็นน้ำและออกซิเจน และเอนไซม์เอสคอร์เบส เพอร์ออกซิเดส ทำหน้าที่กำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผ่านวิถีวิตามินซีกลูตาไธโอน หรือ Hallinell-Asada pathway (วีรศิลป์ สอนจัญ, 2557) การศึกษาก่อนหน้านี้ในต้นอ่อนถั่วเหลือง (*Glycine max* L. cv.Zhonghuang13) ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้งด้วย PEG6000 และรังสียูวีบี ร่วมกับการใช้ซิลิโคน พบว่า ต้นอ่อนถั่วเหลืองที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง มีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์คะตะเลสมากกว่าต้นอ่อนถั่วเหลืองในชุดควบคุมที่ได้รับน้ำปกติ ขณะที่ต้นอ่อนถั่วเหลืองที่ได้รับรังสียูวีบีและได้รับความเครียดจากความแล้งและพ่นด้วยซิลิโคน มีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์คะตะเลสลดลงเมื่อเทียบกับต้นอ่อนถั่วเหลืองที่ได้รับความเครียดจากความแล้ง (Shen et al., 2010) ความเครียดจากความแล้งทำให้กระบวนการเมแทบอลิซึมของพืชถูกรบกวนและนำไปสู่การบาดเจ็บจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยการเพิ่มการผลิตอนุมูลอิสระ เช่น H_2O_2 , O_2^- การต้านทานของพืชต่อปัจจัยความเครียดเกี่ยวข้องกับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ การเพิ่มขึ้นของความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอาจป้องกันความเสียหายให้กับพืชได้ (Monk, Fagerstedt, & Crawford, 1989) ผลกระทบอย่างหนึ่งของการสะสมอนุมูลอิสระภายใน

เซลล์พืชภายใต้ความเครียดจากความแล้ง คือการเกิด lipid peroxidation ผ่านการออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งนำไปสู่ความเสียหายของเยื่อหุ้มเซลล์และการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์และเอนไซม์คะตะเลสจัดเป็นเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระที่ทำหน้าที่จับอนุมูลอิสระ โดยคะตะเลสเป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยน H_2O_2 เป็นน้ำและออกซิเจน (Gong, Zhu, Chen, Wang, & Zhang, 2005b) สอดคล้องกับการศึกษาใน borage (*Borago officinalis* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความเค็มและเติมซิลิคอนในรูปของโซเดียมซิลิเกตลงในสารละลายธาตุอาหารพืชพบว่า ต้น borage ที่ได้รับความเครียดจากความเค็มและได้รับซิลิคอน มีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์คะตะเลสลดลงเมื่อเทียบกับต้น borage ที่ได้รับความเครียดจากความเค็มและไม่ได้รับซิลิคอน (Torabi, Majd, & Enteshari, 2015)

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองพบว่า 25% FC เป็นระดับ field capacity ของดินที่เหมาะสมต่อการจำลองสภาวะแล้งในพืช *D. tinctoria* และการพ่นด้วยซิลิคอนความเข้มข้น 1.5 mM เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมเมื่อพืชได้รับสภาวะเครียดจากความแล้ง ซึ่งซิลิคอนที่ระดับความเข้มข้น 1.5 mM มีบทบาทช่วยเพิ่มกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ และสารพฤกษเคมีในพืช ได้แก่ ปริมาณแอนโทไซยานิน ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และค่า stomatal conductance และช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการสะสมปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่ซิลิคอนส่งผลทำให้พืช *D. tinctoria* มีการสะสมปริมาณโพรงน้ำและน้ำตาล และกิจกรรมของเอนไซม์คะตะเลสลดลง อีกทั้งยังช่วยรักษาสภาพของโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ให้มีความสมบูรณ์ภายใต้สภาวะเครียดจากความแล้งได้ ดังนั้นจากผลการทดลองนี้ จึงสามารถใช้ซิลิคอนที่ระดับความเข้มข้น 1.5 mM เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการช่วยเพิ่มความสามารถในการทนแล้งของพืช *D. tinctoria* ในการจัดการระบบการเพาะปลูกได้

ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองพบว่าการใช้ซิลิคอนในรูปกรดซิลิซิกต่อต้นพืช *D. tinctoria* พบว่าต้นพืชมีความสามารถในการทนแล้งได้ดี จึงควรมีการศึกษาการใช้ซิลิคอนในรูปของกรดซิลิซิกในพืชหลาย ๆ ชนิดในสภาวะความเครียดที่แตกต่างกัน นอกจากนี้หากต้นพืชขาดน้ำจะมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น อากาศใบเหี่ยว ใบเหลืองมากกว่า 75% แนะนำให้เกษตรกรฉีดพ่นสารซิลิคอนในรูปกรดซิลิซิก เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อต้นพืชขาดน้ำและเพื่อต่อยอด ส่งเสริมให้เป็นพืชอาหารที่มีคุณประโยชน์ทางโภชนาการต่อไป

บรรณานุกรม

- Abd El-Mageed, T. A., Shaaban, A., Abd El-Mageed, S. A., Semida, W. M., & Rady, M. O. (2021). Silicon defensive role in maize (*Zea mays* L.) against drought stress and metals-contaminated irrigation water. *Silicon*, *13*, 2165-2176.
- Abdelaal, K. A., EL-Maghraby, L. M., Elansary, H., Hafez, Y. M., Ibrahim, E. I., El-Banna, M., . . . Elkelish, A. (2020). Treatment of Sweet Pepper with Stress Tolerance-Inducing Compounds Alleviates Salinity Stress Oxidative Damage by Mediating the Physio-Biochemical Activities and Antioxidant Systems. *Agronomy*, *10*(1), 1-15. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/1/26>
- Ahmad, A., Khan, W. U., Shah, A. A., Yasin, N. A., Naz, S., Ali, A., . . . Batool, A. I. (2021). Synergistic effects of nitric oxide and silicon on promoting plant growth, oxidative stress tolerance and reduction of arsenic uptake in *Brassica juncea*. *Chemosphere*, *262*, 128384.
- Ahmed, S., Nawata, E., Hosokawa, M., Domae, Y., & Sakuratani, T. (2002). Alterations in photosynthesis and some antioxidant enzymatic activities of mungbean subjected to waterlogging. *Plant Science*, *163*(1), 117-123.
- Ahsan, M., Valipour, M., Nawaz, F., Raheel, M., Abbas, H. T., Sajid, M., . . . Casini, R. (2023). Evaluation of Silicon Supplementation for Drought Stress under Water-Deficit Conditions: An Application of Sustainable Agriculture. *Agronomy*, *13*(2), 1-16.
- Alam, A., Hariyanto, B., Ullah, H., Salin, K. R., & Datta, A. (2021). Effects of silicon on growth, yield and fruit quality of cantaloupe under drought stress. *Silicon*, *13*, 1-10.
- Alamri, S., Hu, Y., Mukherjee, S., Aftab, T., Fahad, S., Raza, A., . . . Siddiqui, M. H. (2020). Silicon-induced postponement of leaf senescence is accompanied by modulation of antioxidative defense and ion homeostasis in mustard (*Brassica juncea*) seedlings exposed to salinity and drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, *157*, 47-59. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0981942820304885>

- AlKahtani, M. D., Hafez, Y. M., Attia, K., Rashwan, E., Husnain, L. A., AlGwaiz, H. I., & Abdelaal, K. A. (2021). Evaluation of silicon and proline application on the oxidative machinery in drought-stressed sugar beet. *Antioxidants*, 10(3), 1-19.
- Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206-216.
- Aurangzaib, M., Ahmad, Z., Jalil, M. I., Nawaz, F., Shaheen, M. R., Ahmad, M., . . . Tabassum, M. A. (2021). Foliar spray of silicon confers drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) by enhancing morpho-physiological and antioxidant potential. *Silicon*, 1-15.
- 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, 1-9.
- Babaei, S., Niknam, V., & Behmanesh, M. (2021). Comparative effects of nitric oxide and salicylic acid on salinity tolerance in saffron (*Crocus sativus*). *An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 155(1), 73-82.
- Bae, E. J., Hong, A. R., Choi, S. M., Lee, K. S., & Park, Y. B. (2017). Silicon pretreatment alleviates drought stress and increases antioxidative activity in Kentucky Bluegrass. *International Turfgrass Society Research Journal*, 13(1), 591-600.
- Baghbani-Arani, A., Modarres-Sanavy, S. A. M., Mashhadi-Akbar-Boojari, M., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2017). Towards improving the agronomic performance, chlorophyll fluorescence parameters and pigments in fenugreek using zeolite and vermicompost under deficit water stress. *Industrial Crops and Products*, 109, 346-357.
- Balasundram, N., Sundram, K., & Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*, 99(1), 191-203. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814605006242>
- Banerjee, A., Dasgupta, N., & De, B. (2005). In vitro study of antioxidant activity of *Syzygium cumini* fruit. *Food Chemistry*, 90(4), 727-733.

- Banks, J. M. (2019). *Identification of drought tolerant amenity trees*. University of Reading,
- Barrs, H., & Weatherley, P. (1962). A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian Journal of Biological Sciences.*, 15(3), 413-428.
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil.*, 39(1), 205-207.
- Batool, T., Ali, S., Seleiman, M. F., Naveed, N. H., Ali, A., Ahmed, K., . . . Alotaibi, M. (2020). Plant growth promoting rhizobacteria alleviates drought stress in potato in response to suppressive oxidative stress and antioxidant enzymes activities. *Scientific Reports*, 10(1), 1-19.
- Benavente-Garcia, O., Castillo, J., Lorente, J., Ortuño, A., & Del Rio, J. (2000). Antioxidant activity of phenolics extracted from *Olea europaea* L. leaves. *Food Chemistry.*, 68(4), 457-462.
- 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(4), 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.
- Boussadia, O., Omri, A., & Mzid, N. (2023). Eco-physiological behavior of five Tunisian olive tree cultivars under drought stress. *Agronomy*, 13(3), 1-11.
- Bravo, L. (1998). Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance. *Nutrition Reviews.*, 56(11), 317-333.
- Bray, E. A. (2007). Plant response to water-deficit stress. In *Life science* (pp. 1-7).
- Brotosudarmo, T. H. P., Limantara, L., & Chandra, R. D. (2018). Chloroplast pigments: Structure, function, assembly and characterization. In *Plant Growth and Regulation-Alterations to Sustain Unfavorable Conditions*: IntechOpen.
- Bukhari, M. A., Sharif, M. S., Ahmad, Z., Barutçular, C., Afzal, M., Hossain, A., & Sabagh, A. E. (2021). Silicon mitigates the adverse effect of drought in canola (*Brassica napus* L.) through promoting the physiological and antioxidants activity. *Silicon*, 13,

3817-3826.

- Cao, B.-I., Ma, Q., Zhao, Q., Wang, L., & Xu, K. (2015). Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress. *Scientia Horticulturae*, *194*, 53-62.
- Carillo, P., & Gibon, Y. (2011). Protocol: extraction and determination of proline. *PrometheusWiki*.
- Ceusters, N., Valcke, R., Frans, M., Claes, J. E., Van den Ende, W., & Ceusters, J. (2019). Performance index and PSII connectivity under drought and contrasting light regimes in the CAM orchid *Phalaenopsis*. *Frontiers in plant science*, *10*, 1-15.
- Chalker-Scott, L. (1999). Environmental significance of anthocyanins in plant stress responses. *Photochemistry and photobiology*, *70*(1), 1-9.
- Chavoushi, M., Najafi, F., Salimi, A., & Angaji, S. A. (2020). Effect of salicylic acid and sodium nitroprusside on growth parameters, photosynthetic pigments and secondary metabolites of safflower under drought stress. *Scientia Horticulturae*, *259*, 108823.
- Chen, W., Yao, X., Cai, K., & Chen, J. (2011). Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biological Trace Element Research*, *142*(1), 67-76.
- Collini, E. (2019). Carotenoids in photosynthesis: the revenge of the “accessory” pigments. *Chem*, *5*(3), 494-495.
- Cook, B. I., Smerdon, J. E., Seager, R., & Coats, S. (2014). Global warming and 21st century drying. *Climate Dynamics*, *43*(9), 2607-2627.
- Craufurd, P., & Peacock, J. (1993). Effect of heat and drought stress on sorghum (*Sorghum bicolor*). II. Grain yield. *Experimental Agriculture*, *29*(1), 77-86.
- Currie, H. A., & Perry, C. C. (2007). Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. *Annals of botany*, *100*(7), 1383-1389.
- Daryanto, S., Wang, L., & Jacinthe, P.-A. (2016). Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. *PLOS ONE*, *11*(5), 1-15.
- Datta, S., Taghvaeian, S., & Stivers, J. (2017). Understanding soil water content and

- thresholds for irrigation management. from Oklahoma State University
- Dehghanipoodeh, S., Ghobadi, C., Baninasab, B., Gheysari, M., & Shiranibidabadi, S. (2018). Effect of silicon on growth and development of strawberry under water deficit conditions. *Horticultural Plant Journal*, 4(6), 226-232.
- Deshmukh, R., & Bélanger, R. R. (2016). Molecular evolution of aquaporins and silicon influx in plants. *Functional Ecology*, 30(8), 1277-1285.
- Dhami, N., Tissue, D. T., & Cazzonelli, C. I. (2018). Leaf-age dependent response of carotenoid accumulation to elevated CO₂ in Arabidopsis. *Archives of biochemistry and biophysics*, 647, 67-75.
- Dionisio-Sese, M. L., & Tobita, S. (1998). Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Science*, 135(1), 1-9.
- Do, T., & Nguyen, T. (2007). *Some results of study on Peristrophe bivalvis (Acanthaceae)*. Paper presented at the The 2nd National Scientific Conference on Ecological and Biological Resources.
- Domonkos, I., Kis, M., Gombos, Z., & Ughy, B. (2013). Carotenoids, versatile components of oxygenic photosynthesis. *Progress in lipid research*, 52(4), 539-561.
- Doncheva, S., Poschenrieder, C., Stoyanova, Z., Georgieva, K., Velichkova, M., & Barceló, J. (2009). Silicon amelioration of manganese toxicity in Mn-sensitive and Mn-tolerant maize varieties. *Environmental and Experimental Botany*, 65(2-3), 189-197.
- Efeoglu, B., Ekmekci, Y., & Cicek, N. (2009). Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery. *South African Journal of Botany*, 75(1), 34-42.
- Eppel, A., Keren, N., Salomon, E., Volis, S., & Rachmilevitch, S. (2013). The response of *Hordeum spontaneum* desert ecotype to drought and excessive light intensity is characterized by induction of O₂ dependent photochemical activity and anthocyanin accumulation. *Plant Science*, 201-202, 74-80. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168945212002476>
- Esmaili, S., Tavallali, V., Amiri, B., Bazrafshan, F., & Sharafzadeh, S. (2022). Foliar application of nano-silicon complexes on growth, oxidative damage and bioactive

- compounds of feverfew under drought stress. *Silicon*, 14(16), 10245-10256.
- Farajzadeh Memari-Tabrizi, E., Yousefpour-Dokhanieh, A., & Babashpour-Asl, M. (2021). Foliar-applied silicon nanoparticles mitigate cadmium stress through physio-chemical changes to improve growth, antioxidant capacity, and essential oil profile of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 165, 71-79. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0981942821002473>
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Sustainable agriculture*, 153-188.
- Farooq, M. A., Ali, S., Hameed, A., Ishaque, W., Mahmood, K., & Iqbal, Z. (2013). Alleviation of cadmium toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes; suppressed cadmium uptake and oxidative stress in cotton. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 96, 242-249. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651313003047>
- Fathi, A., & Tari, D. B. (2016). Effect of drought stress and its mechanism in plants. *International Journal of Life Sciences*, 10(1), 1-6.
- Feng, R., Wei, C., & Tu, S. (2013). The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. *Environmental and Experimental Botany*, 87, 58-68.
- Fu, J., & Huang, B. (2001). Involvement of antioxidants and lipid peroxidation in the adaptation of two cool-season grasses to localized drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, 45(2), 105-114.
- Ghiselli, A., Nardini, M., Baldi, A., & Scaccini, C. (1998). Antioxidant activity of different phenolic fractions separated from an Italian red wine. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(2), 361-367.
- Ghosh, P., Ramesh, P., Bandyopadhyay, K., Tripathi, A., Hati, K., Misra, A., & Acharya, C. (2004). Comparative effectiveness of cattle manure, poultry manure, phosphocompost and fertilizer-NPK on three cropping systems in vertisols of semi-arid tropics. I. Crop yields and system performance. *Bioresource technology*, 95(1), 77-83.

- Giménez, C., Gallardo, M., & Thompson, R. B. (2013). Plant–Water Relations☆. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*: Elsevier.
- Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S., & Zhang, C. (2005a). Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science.*, 169(2), 313-321.
- Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S., & Zhang, C. (2005b). Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science*, 169(2), 313-321.
- Goodarzian Ghahfarokhi, M., Mansurifar, S., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Saeidi, M., Jamshidi, A. M., & Ghasemi, E. (2015). Effects of drought stress and rewatering on antioxidant systems and relative water content in different growth stages of maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(4), 493-506.
- Gorbe, E., & Calatayud, A. (2012). Applications of chlorophyll fluorescence imaging technique in horticultural research: A review. *Scientia Horticulturae*, 138, 24-35.
- Gujjar, R. S., Banyen, P., Chuekong, W., Worakan, P., Roytrakul, S., & Supaibulwatana, K. (2020). A synthetic cytokinin improves photosynthesis in rice under drought stress by modulating the abundance of proteins related to stomatal conductance, chlorophyll contents, and rubisco activity. *Plants*, 9(9), 1-21.
- Gull, A., Lone, A. A., & Wani, N. U. I. (2019). *Biotic and abiotic stresses in plants* (A. B. d. Oliveira Ed.). United Kingdom: IntechOpen.
- Gunes, A., Pilbeam, D. J., Inal, A., Bagci, E. G., & Coban, S. (2007). Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress. *Journal of Plant Interactions*, 2(2), 105-113.
- Gunes, A., Pilbeam, D. J., Inal, A., & Coban, S. (2008). Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(13-14), 1885-1903.
- Gurrieri, L., Merico, M., Trost, P., Forlani, G., & Sparla, F. (2020). Impact of drought on soluble sugars and free proline content in selected *Arabidopsis* mutants. *Biology*, 9(11), 367.
- Hajiboland, R., Cherghvareh, L., & Dashtebani, F. (2016). Effect of silicon supplementation

- on wheat plants under salt stress. *Journal of Plant Process and Function*, 5(18), 1-12.
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Anee, T. I., Khan, M. I. R., & Fujita, M. (2018). Silicon mediated regulation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress tolerance in *Brassica napus* L. *South African Journal of Botany*, 115, 50-57. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254629917308876>
- Hasanuzzaman, M., Shabala, L., Brodribb, T. J., Zhou, M., & Shabala, S. (2019). Understanding physiological and morphological traits contributing to drought tolerance in barley. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 205(2), 129-140.
- Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H., An, P., Morita, S., Luxová, M., & Lux, A. (2005). Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum*, 123(4), 459-466.
- Hattori, T., Sonobe, K., Inanaga, S., An, P., & Morita, S. (2008). Effects of silicon on photosynthesis of young cucumber seedlings under osmotic stress. *Journal of Plant Nutrition*, 31(6), 1046-1058.
- Hazrati, S., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Modarres-Sanavy, S. A. M., Mokhtassi-Bidgoli, A., & Nicola, S. (2016). Effects of water stress and light intensity on chlorophyll fluorescence parameters and pigments of *Aloe vera* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 106, 141-148.
- Helaly, M. N., El-Hoseiny, H., El-Sheery, N. I., Rastogi, A., & Kalaji, H. M. (2017). Regulation and physiological role of silicon in alleviating drought stress of mango. *Plant Physiology and Biochemistry*, 118, 31-44.
- Heyne, E., & Brunson, A. M. (1940). Genetic studies of heat and drought tolerance in maize 1. *Agronomy Journal*, 32(10), 803-814.
- Hoekstra, F. A., Golovina, E. A., & Buitink, J. (2001). Mechanisms of plant desiccation tolerance. *Trends in Plant Science*, 6(9), 431-438.
doi:[https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(01\)02052-0](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(01)02052-0)
- Hussain, S., Shuxian, L., Mumtaz, M., Shafiq, I., Iqbal, N., Brestic, M., . . . Wenyu, Y.

- (2021). Foliar application of silicon improves stem strength under low light stress by regulating lignin biosynthesis genes in soybean (*Glycine max* L. Merr.). *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123256. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389420312450>
- Iturbe-Ormaetxe, I., Escuredo, P. R., Arrese-Igor, C., & Becana, M. (1998). Oxidative damage in pea plants exposed to water deficit or paraquat. *Plant Physiology*, 116(1), 173-181.
- Jam, B. J., Shekari, F., Andalibi, B., Fotovat, R., Jafarian, V., Najafi, J., . . . Mastinu, A. (2023). Impact of silicon foliar application on the growth and physiological traits of *Carthamus tinctorius* L. exposed to salt stress. *Silicon*, 15(3), 1235-1245.
- Jiang, C., Zu, C., Lu, D., Zheng, Q., Shen, J., Wang, H., & Li, D. (2017). Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na⁺ accumulation and antioxidative capacity of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. *Scientific Reports*, 7(1), 1-14.
- Jideani, V. A., & Diedericks, C. F. (2014). Nutritional, therapeutic, and prophylactic properties of *Vigna subterranea* and *Moringa oleifera*. *Antioxidant- Antidiabetic Agents and Human Health*, 8, 187-201.
- Johansen, D. A. (1940). *Plant Microtechnique*. New York: McGraw-Hill Book Co.,
- Jung, S., Kim, J. S., Cho, K. Y., Tae, G. S., & Kang, B. G. (2000). Antioxidant responses of cucumber (*Cucumis sativus*) to photoinhibition and oxidative stress induced by norflurazon under high and low PPFs. *Plant Science*, 153(2), 145-154.
- Junglee, S., Urban, L., Sallanon, H., & Lopez-Lauri, F. (2014). Optimized assay for hydrogen peroxide determination in plant tissue using potassium iodide. *American Journal of Analytical Chemistry*, 5(11), 730.
- Kamiloglu, S., Capanoglu, E., Grootaert, C., & Van Camp, J. (2015). Anthocyanin absorption and metabolism by human intestinal Caco-2 cells- A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(9), 21555-21574.
- Khan, M. B., Hussain, M., Raza, A., Farooq, S., & Jabran, K. (2015). Seed priming with CaCl₂ and ridge planting for improved drought resistance in maize. *Turkish*

Journal of Agriculture and Forestry, 39(2), 193-203.

- Khatri, K., & Rathore, M. (2019). Photosystem photochemistry, prompt and delayed fluorescence, photosynthetic responses and electron flow in tobacco under drought and salt stress. *Photosynthetica*, 57(1), 61-74.
- Khue, D. B., Sao Mai, D., Tuan, P. M., Oanh, D. T. B., & Van, L. T. H. (2014). Peristrophe roxburghiana - A review. *Food Science and Technology*, 15(1), 1-9.
- Kim, Y.-H., Khan, A. L., Waqas, M., Jeong, H.-J., Kim, D.-H., Shin, J. S., . . . Lee, I.-J. (2014). Regulation of jasmonic acid biosynthesis by silicon application during physical injury to *Oryza sativa* L. *Journal of plant research*, 127, 525-532.
- Koyro, H.-W., Ahmad, P., & Geissler, N. (2012). Abiotic stress responses in plants: an overview. *Environmental adaptations and stress tolerance of plants in the era of climate change*, 1-28.
- Krishan K. Verma, Song Xiu-Peng, Zeng Yuan, Guo Dao-Jun, Singh Munna, Rajput Vishnu D, . . . Li Dong-Ping. (2021). Foliar application of silicon boosts growth, photosynthetic leaf gas exchange, antioxidative response and resistance to limited water irrigation in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 582-592.
- Kumar, D., Singh, H., Raj, S., & Soni, V. (2020). Chlorophyll a fluorescence kinetics of mung bean (*Vigna radiata* L.) grown under artificial continuous light. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 24, 100813.
- Kumar, R. R., Karajol, K., & Naik, G. (2011). Effect of polyethylene glycol induced water stress on physiological and biochemical responses in pigeonpea (*Cajanus cajan* L. Millsp.). *Recent Research in Science and Technology*, 3(1), 148-152.
- Laane, H.-M. (2018). The effects of foliar sprays with different silicon compounds. *Plants*, 7(2), 1-22.
- Lee, S., Sohn, E., Hamayun, M., Yoon, J., & Lee, I. (2010). Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. *Agroforestry Systems*, 80(3), 333-340.
- Liang, Y., Zhu, J., Li, Z., Chu, G., Ding, Y., Zhang, J., & Sun, W. (2008). Role of silicon in

- enhancing resistance to freezing stress in two contrasting winter wheat cultivars. *Environmental and Experimental Botany*, 64(3), 286-294.
- Liu, J.-J., Lin, S.-H., Xu, P.-L., Wang, X.-J., & Bai, J.-G. (2009). Effects of exogenous silicon on the activities of antioxidant enzymes and lipid peroxidation in chilling-stressed cucumber leaves. *Agricultural Sciences in China*, 8(9), 1075-1086.
- Ma, J., & Yamaji, N. (2008). Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and molecular life sciences*, 65, 3049-3057.
- Ma, J. F., Yamaji, N., Tamai, K., & Mitani, N. (2007). Genotypic difference in silicon uptake and expression of silicon transporter genes in rice. *Plant Physiology*, 145(3), 919-924.
- Maghsoudi, K., Emam, Y., & Ashraf, M. (2015). Influence of foliar application of silicon on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and growth in water-stressed wheat cultivars differing in drought tolerance. *Turkish Journal of Botany*, 39(4), 625-634.
- Maghsoudi, K., Emam, Y., & Pessaraki, M. (2016). Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 39(7), 1001-1015.
- Makbul, S., Güler, N. S., Durmuş, N., & Güven, S. (2011). Changes in anatomical and physiological parameters of soybean under drought stress. *Turkish Journal of Botany*, 35(4), 369-377.
- Makinde, A., & Akande, F. (2012). Effects of lead and simulated acid rain on chlorophyll contents of selected tropical mosses. *Ife Journal of Science*, 14(2), 309-313.
- 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), 1-13.
- Mateos-Naranjo, E., Andrades-Moreno, L., & Davy, A. J. (2013). Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*. *Plant*

Physiology and Biochemistry, 63, 115-121.

- Medrano-Macías, J., Mendoza-Villarreal, R., Robledo-Torres, V., Fuentes-Lara, L. O., Ramírez-Godina, F., Pérez-Rodríguez, M. Á., & Benavides-Mendoza, A. (2018). The use of iodine, selenium, and silicon in plant nutrition for the increase of antioxidants in fruits and vegetables. *Antioxid. In Foods Its Appl*, 155-168.
- Mehta, P., Jajoo, A., Mathur, S., & Bharti, S. (2010). Chlorophyll a fluorescence study revealing effects of high salt stress on Photosystem II in wheat leaves. *Plant physiology and biochemistry*, 48(1), 16-20.
- Merwad, A.-R. M. A., Desoky, E.-S. M., & Rady, M. M. (2018). Response of water deficit-stressed *Vigna unguiculata* performances to silicon, proline or methionine foliar application. *Scientia Horticulturae*, 228, 132-144. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030442381730612X>
- Metivier, R., Francis, F., & Clydesdale, F. (1980). Solvent extraction of anthocyanins from wine pomace. *Journal of Food Science*, 45(4), 1099-1100.
- Mihaljević, I., Viljevac Vuletić, M., Šimić, D., Tomaš, V., Horvat, D., Josipović, M., . . . Vuković, D. (2021). Comparative study of drought stress effects on traditional and modern apple cultivars. *Plants*, 10(3), 2-17.
- Mittler, R. (2006). Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trends in Plant Science.*, 11(1), 15-19.
- Mojica, L., Berhow, M., & Gonzalez de Mejia, E. (2017). Black bean anthocyanin rich extracts as food colorants: Physicochemical stability and antidiabetes potential. *Food Chemistry.*, 229, 628-639. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814617303369>
- Monk, L. S., Fagerstedt, K. V., & Crawford, R. M. (1989). Oxygen toxicity and superoxide dismutase as an antioxidant in physiological stress. *Physiologia Plantarum*, 76(3), 456-459.
- 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.

- 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. doi:10.1093/jxb/ert208
- Nakabayashi, R., Yonekura-Sakakibara, K., Urano, K., Suzuki, M., Yamada, Y., Nishizawa, T., . . . Shinozaki, K. (2014). Enhancement of oxidative and drought tolerance in *Arabidopsis* by overaccumulation of antioxidant flavonoids. *The Plant Journal*, 77(3), 367-379.
- Navari-Izzo, F., & Rascio, N. (1999). Plant response to water-deficit conditions. *Handbook of plant and crop stress*, 231-270.
- Nayar, P., Misra, A., & Patnaik, S. (1975). Rapid microdetermination of silicon in rice plant. *Plant and Soil*, 42(2), 491-494.
- Nemeskéri, E., Molnár, K., Vígh, R., Nagy, J., & Dobos, A. (2015). Relationships between stomatal behaviour, spectral traits and water use and productivity of green peas (*Pisum sativum* L.) in dry seasons. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37, 1-16.
- Noctor, G., Mhamdi, A., & Foyer, C. H. (2014). The roles of reactive oxygen metabolism in drought: not so cut and dried. *Plant physiology*, 164(4), 1636-1648.
- Ow, L. F., Yeo, T., & Sim, E. (2011). Identification of drought-tolerant plants for roadside greening- An evaluation of chlorophyll fluorescence as an indicator to screen for drought tolerance. *Urban Forestry & Urban Greening*, 10(3), 177-184.
- Parveen, A., Liu, W., Hussain, S., Asghar, J., Perveen, S., & Xiong, Y. (2019). Silicon priming regulates morpho-physiological growth and oxidative metabolism in maize under drought stress. *Plants*, 8(10), 1-14.
- Pei, Z., Ming, D., Liu, D., Wan, G., Geng, X., Gong, H., & Zhou, W. (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.
- Pham, H. N. T., Tang Nguyen, V., Van Vuong, Q., Bowyer, M. C., & Scarlett, C. J. (2017). Bioactive compound yield and antioxidant capacity of *Helicteres hirsuta* Lour. stem as affected by various solvents and drying methods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(1), 1-9.

- Pompodakis, N. E., Terry, L. A., Joyce, D. C., Lydakakis, D. E., & Papadimitriou, M. D. (2005). Effect of seasonal variation and storage temperature on leaf chlorophyll fluorescence and vase life of cut roses. *Postharvest Biology and Technology*, 36(1), 1-8.
- Qin, G. Z., & Tian, S. P. (2005). Enhancement of biocontrol activity of *Cryptococcus laurentii* by silicon and the possible mechanisms involved. *Phytopathology*, 95(1), 69-75.
- Quan, N., Khang, D., Dep, L., Minh, T., Nobukazu, N., & Xuan, T. (2016). The potential use of a food-dyeing plant *Peristrophe bivalvis* (L.) Merr. *International Journal of Pharmacology, Phytochemistry and Ethnomedicine*, 4, 14-26.
- Rabino, I., & Mancinelli, A. L. (1986). Light, temperature, and anthocyanin production. *Plant Physiology*, 81(3), 922-924.
- Rastogi, A., Yadav, S., Hussain, S., Kataria, S., Hajihashemi, S., Kumari, P., . . . Brestic, M. (2021). Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants...? *Plant Physiology and Biochemistry*, 169, 40-48.
- Rehman, S. U., Bilal, M., Rana, R. M., Tahir, M. N., Shah, M. K. N., Ayalew, H., & Yan, G. (2016). Cell membrane stability and chlorophyll content variation in wheat (*Triticum aestivum*) genotypes under conditions of heat and drought. *Crop and Pasture Science*, 67(7), 712-718.
- Robotjazi, R., Roshandel, P., & Hooshmand, S. d. (2020). Benefits of silicon nutrition on growth, physiological and phytochemical attributes of basil upon salinity stress. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 7(1), 37-50.
- Robbins, N. S., & Pharr, D. M. (1987). Regulation of photosynthetic carbon metabolism in cucumber by light intensity and photosynthetic period. *Plant Physiology*, 85(2), 592-597.
- Sakamoto, A., & Murata, N. (2002). The role of glycine betaine in the protection of plants from stress: clues from transgenic plants. *Plant, cell & environment*, 25(2), 163-171.
- Sancho, R. A. S., & Pastore, G. M. (2012). Evaluation of the effects of anthocyanins in type

- 2 diabetes. *Food Research International*, 46(1), 378-386.
- Sarker, U., & Oba, S. (2018). Drought stress enhances nutritional and bioactive compounds, phenolic acids and antioxidant capacity of *Amaranthus* leafy vegetable. *BMC Plant Biology*, 18(1), 1-15.
- Seif, M., Aliniaiefard, S., Arab, M., Mehrjerdi, M. Z., Shomali, A., Fanourakis, D., . . . Woltering, E. (2021). Monochromatic red light during plant growth decreases the size and improves the functionality of stomata in chrysanthemum. *Functional Plant Biology*, 48(5), 515-528.
- Shahid, M. A., Balal, R. M., Pervez, M. A., Abbas, T., AQUEEL, M. A., JAVAID, M., & Garcia-Sanchez, F. (2015). Foliar spray of phyto-extracts supplemented with silicon: an efficacious strategy to alleviate the salinity-induced deleterious effects in pea (*Pisum sativum* L.). *Turkish Journal of Botany*, 39(3), 408-419.
- Shahidi, F., & Naczk, M. (1995). *Food phenolics*: Technomic Pub. Co.
- Shahzad, S., Ali, S., Ahmad, R., Ercisli, S., & Anjum, M. A. (2021). Foliar Application of Silicon Enhances Growth, Flower Yield, Quality and Postharvest Life of Tuberose (*Polianthes tuberosa* L.) under Saline Conditions by Improving Antioxidant Defense Mechanism. *Silicon*, 1-8.
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., & Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of botany*, 2012.
- Sharma, S., Villamor, J. G., & Verslues, P. E. (2011). Essential role of tissue-specific proline synthesis and catabolism in growth and redox balance at low water potential. *Plant physiology*, 157(1), 292-304.
- Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A. E., & Li, J. (2010). Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. *Journal of plant physiology*, 167(15), 1248-1252.
- 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), 1-16.

- Shivakrishna, P., Reddy, K. A., & Rao, D. M. (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.
- Silvestre, S., de Sousa Araújo, S., Vaz Patto, M. C., & Marques da Silva, J. (2014). Performance index: an expeditious tool to screen for improved drought resistance in the Lathyrus genus. *Journal of integrative plant biology*, 56(7), 610-621.
- Singh, M., Kumar, J., Singh, S., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2015). Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 14, 407-426.
- Singh, P., Tomer, N., Kumar, S., & Sinha, D. (2010). MHD oblique stagnation-point flow towards a stretching sheet with heat transfer. *International Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 6(13), 94-111.
- Son, M., Hart, S. M., & Schlau-Cohen, G. S. (2021). Investigating carotenoid photophysics in photosynthesis with 2D electronic spectroscopy. *Trends in Chemistry*, 3(9), 733-746.
- Song, J., Wang, Y., Pan, Y., Pang, J., Zhang, X., Fan, J., & Zhang, Y. (2019). The influence of nitrogen availability on anatomical and physiological responses of *Populus alba* × *P. glandulosa* to drought stress. *BMC Plant Biology*, 19(1), 1-12.
- Sonobe, K., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., Eneji, A. E., Kobayashi, S., . . . Inanaga, S. (2010). Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. *Journal of Plant Nutrition*, 34(1), 71-82.
- Stadnik, B., Tobiasz-Salach, R., & Mazurek, M. (2022). Physiological and epigenetic reaction of barley (*Hordeum vulgare* L.) to the foliar application of silicon under soil salinity conditions. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3), 1-20.
- 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 solvents. *Res J Chem Sci*, 2231, 63-69.
- Sutulienė, R., Ragelienė, L., Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Urbutis, M., & Miliauskienė, J. (2022). The response of antioxidant system of drought-stressed green pea (*Pisum*

- sativum* L.) affected by watering and foliar spray with silica nanoparticles. *Horticulturae*, 8(1), 35.
- Tadesse, S., Abebe, A., Chebude, Y., Garcia, I. V., & Yohannes, T. (2012). Natural dye-sensitized solar cells using pigments extracted from *Syzygium guineense*. *Journal of Photonics for Energy*, 2(1), 027001.
- Taha, R. S., Seleiman, M. F., Shami, A., Alhammad, B. A., & Mahdi, A. H. (2021). Integrated application of selenium and silicon enhances growth and anatomical structure, antioxidant defense system and yield of wheat grown in salt-stressed soil. *Plants*, 10(6), 2-19.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Plant physiology* (3 rd ed.). Sunderland: Sinauer Associates.
- Tang, H., Liu, Y., Gong, X., Zeng, G., Zheng, B., Wang, D., . . . Zeng, X. (2015). Effects of selenium and silicon on enhancing antioxidative capacity in ramie (*Boehmeria nivea* (L.) Gaud.) under cadmium stress. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 1-10.
- Tankari, M., Wang, C., Ma, H., Li, X., Li, L., Soothar, R. K., . . . Liu, F. (2021). Drought priming improved water status, photosynthesis and water productivity of cowpea during post-anthesis drought stress. *Agricultural Water Management*, 245, 106565.
- Thussaganpanit, J., Jutamane, K., Kaveeta, L., Chai-arree, W., Pankean, P., Homvisasevongsa, S., & Suksamrarn, A. (2015). Comparative effects of brassinosteroid and brassinosteroid mimic on improving photosynthesis, lipid peroxidation, and rice seed set under heat stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 34(2), 320-331.
- Torabi, F., Majd, A., & Enteshari, S. (2015). The effect of silicon on alleviation of salt stress in borage (*Borago officinalis* L.). *Soil science and plant nutrition*, 61(5), 788-798.
- Tripathi, P., Na, C.-I., & Kim, Y. (2021). Effect of silicon fertilizer treatment on nodule formation and yield in soybean (*Glycine max* L.). *European Journal of Agronomy*, 122, 1-8.
- Troughton, J. (1969). Plant water status and carbon dioxide exchange of cotton leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 22(2), 289-302.

- Trovato, M., Mattioli, R., & Costantino, P. (2008). Multiple roles of proline in plant stress tolerance and development. *Rendiconti Lincei*, 19(4), 325-346.
- Vaculík, M., Pavlovič, A., & Lux, A. (2015). Silicon alleviates cadmium toxicity by enhanced photosynthetic rate and modified bundle sheath's cell chloroplasts ultrastructure in maize. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 120, 66-73.
- Van den Ende, W., & Valluru, R. (2009). Sucrose, sucrosyl oligosaccharides, and oxidative stress: scavenging and salvaging? *Journal of Experimental Botany*, 60(1), 9-18.
- Van Hung Mai, V. H. L., & Do, H. C. (2020). Extraction and Evaluation of Pharmacological Activity of Pigments from Purple Cam *Peristrophe bivalvis* (L.) Merr. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 11(8), 114-117.
- 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(1), 59-66.
- Verma, D. (1999). Osmotic stress tolerance in plants: role of proline and sulfur metabolisms. *Molecular responses to cold, drought, heat and salt stress in higher plants*, 153-168.
- Verslues, P. E., & Sharma, S. (2010). Proline metabolism and its implications for plant-environment interaction. *The Arabidopsis Book American Society of Plant Biologists*, 8.
- Wang, Y., Zhang, B., Jiang, D., & Chen, G. (2019). Silicon improves photosynthetic performance by optimizing thylakoid membrane protein components in rice under drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, 158, 117-124.
- Xu, J., Guo, L., & Liu, L. (2022). Exogenous silicon alleviates drought stress in maize by improving growth, photosynthetic and antioxidant metabolism. *Environmental and Experimental Botany*, 201, 1-19.
- Xu, X., Zou, G., Li, Y., Sun, Y., & Liu, F. (2023). Silicon application improves strawberry plant antioxidation ability and fruit nutrition under both full and deficit irrigation. *Scientia Horticulturae*, 309, 1-11.
- Yamaji, N., Chiba, Y., Mitani-Ueno, N., & Ma, J. F. (2012). Functional characterization of a

- silicon transporter gene implicated in silicon distribution in barley. *Plant Physiology.*, 160(3), 1491-1497.
- Yemm, E., & Willis, A. (1954). The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. *Biochemical Journal.*, 57(3), 508-514.
- Yonny, K., Sukendah, S., Edi, P., & Djoko, P. (2020). Stomatal behaviour of soybean under drought stress with silicon application. *Agri-Bio Research*, 1(25), 103-109.
- Yusuf, N., & Hamed, N. (2021). Effects of water deficit on the growth and chlorophyll content of *Capsicum frutescens*. *J. Sustain. Sci. Manag*, 16, 148-158.
- 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), 1-18.
- Zhang, R.-R., Wang, Y.-H., Li, T., Tan, G.-F., Tao, J.-P., Su, X.-J., . . . Xiong, A.-S. (2021). Effects of simulated drought stress on carotenoid contents and expression of related genes in carrot taproots. *Protoplasma*, 258, 379-390.
- Zhang, S.-h., Xu, X.-f., Sun, Y.-m., Zhang, J.-l., & Li, C.-z. (2018). Influence of drought hardening on the resistance physiology of potato seedlings under drought stress. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(2), 336-347.
- Zhang, W., Xie, Z., Wang, L., Li, M., Lang, D., & Zhang, X. (2017). Silicon alleviates salt and drought stress of *Glycyrrhiza uralensis* seedling by altering antioxidant metabolism and osmotic adjustment. *Journal of plant research*, 130, 611-624.
- Zhang, W., Yu, X., Li, M., Lang, D., Zhang, X., & Xie, Z. (2018). Silicon promotes growth and root yield of *Glycyrrhiza uralensis* under salt and drought stresses through enhancing osmotic adjustment and regulating antioxidant metabolism. *Crop Protection*, 107, 1-11.
- Zhou, R., Yu, X., Ottosen, C.-O., Rosenqvist, E., Zhao, L., Wang, Y., . . . Wu, Z. (2017). Drought stress had a predominant effect over heat stress on three tomato cultivars subjected to combined stress. *BMC plant biology*, 17(1), 1-13.
- Zhu, Y.-X., Gong, H.-J., & Yin, J.-L. (2019). Role of silicon in mediating salt tolerance in plants: a review. *Plants*, 8(6), 1-22.

Zivanovic, B., Milic Komic, S., Tosti, T., Vidovic, M., Prokic, L., & Veljovic Jovanovic, S. (2020). Leaf soluble sugars and free amino acids as important components of abscisic acid—Mediated drought response in tomato. *Plants*, 9(9), 1-17.

Zivcak, M., Brestic, M., Olsovska, K., & Slamka, P. (2008). Performance index as a sensitive indicator of water stress in *Triticum aestivum* L. *Plant Soil Environ*, 54(4), 133-139.

กรมชลประทาน. (2562). แผนการบริหารจัดการน้ำและการเพาะปลูกพืชที่ฤดูแล้งในเขตชลประทานปี 2562/63. กรุงเทพฯ: สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา

จารุณี ฐงกลาง. (2549). การเปลี่ยนแปลงทางด้านสรีระและชีวเคมีของถั่วเหลืองภายใต้สภาวะการขาดน้ำ (*Physiological and biochemical changes under water stress in soybean (Glycine max (L.) Merr.)*) Retrieved from

จิรัศย์ เจนพาณิชย์. (2555). *Biology for high school students* (พิมพ์ครั้งที่ 15 ed.). กรุงเทพฯ: ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชมภู, จ., ไกรพุด, ธ., อุษะตุง, ส., & พรพรม, ท. (2563). ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพของผิวหนังของดอกวัชพืชในวงศ์ *Asteraceae* บางชนิด: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ณัฐฐสิน ตลิ่งไธสง. (2551). ภายศึกษาเปรียบเทียบกายวิภาคศาสตร์ของพืชในสกุล *Lagerstroemia* L. (ปริญญาานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต). มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ.

ธนบูรณ์ พลากุลมณฑล. (2563). ประสิทธิภาพของสาร 7,8-dihydro-8 α -20-hydroxyecdysone (DHECD) ต่อการชักนำความสามารถในการทนแล้งของมะเขือเทศเชอร์รี่ (*Solanum lycopersicum* L. cv. CH154). (ปริญญาานิพนธ์มหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ.

ธนากร แสงสง่า. (2557). พีจีพีอาร์: บทบาทในการส่งเสริมและป้องกันพืชภายใต้สภาวะเครียด. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 22(4), 553-570.

นงลักษณ์ พยัคฆศิรินาวิน, อุบล ชินวัง, & สุวัฒน์ ธีระพงษ์ธนากร. (2557). การประยุกต์ใช้เทคนิคคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์กับพืชสวน. *เกษตรราชภัฏ*, 13(2), 37-46.

ประกร รามกุล. (2553). นวัตกรรมตัวดูดซับแทนนินในการแยกโลหะจากสารละลาย. *วิศวกรรมสาร* มก. , 23(72), 17-29.

ปริญนันท์ บัวสด. (2549). การตรวจสอบความสามารถในการเป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ของเตี๋ยอง

- ดื่มชาโดยวิธีไฮคลิกโวลแทมเมตรี. (ปริญญานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- ปิยะดา ธีระกุลพิศุทธิ์. (2552). ความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมของข้าวหอม และข้าวทนเค็มและการตอบสนองทางสรีรวิทยาต่อความเค็ม. In: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ยงยุทธ โอสดสภา. (2558). ธาตุอาหารพืช (พิมพ์ครั้งที่ 4 ed.). กรุงเทพฯ สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ระวีวรรณ แก้วอมตวงศ์. (2555). ผลิตภัณฑ์ธรรมชาติฟลาโวนอยด์. อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- วิไลภรณ์ บุญญกิจจินดา. (2556). สรีรวิทยาของพืช. นครปฐม: โครงการตำราคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์.
- วีรศิลป์ สอนจัญญ, คนพล จุฑามณี, ลิลลี่ กาวีตะ, วิจิตร ใจอารีย์, อภิชาติ สุขสำราญ, & ธีรพัฒน์ เทพแก้ว. (2556). ผลของบราสซิโนสเตียรอยด์ต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงและลิพิดเพอรอกซิเดชันของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ภายใต้ภาวะเครียดจากความร้อน. วารสารพฤกษศาสตร์ไทย, 5, 183-190.
- วีรศิลป์ สอนจัญญ. (2557). ผลของบราสซิโนสเตียรอยด์ที่มีต่อการกระบวนการทางสรีรวิทยาบางประการและผลผลิตของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ภายใต้ความเครียดจากความร้อน. (ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- เวณี วัฒนเดชเสรี. (2561). ผลของซิลิกอนจากอุตสาหกรรมซีเมนต์ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ภายใต้ระดับการให้น้ำที่แตกต่างกัน. (ปริญญานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี.
- ศรีนัดดา บำเพ็ญผล. (2554). การเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอโรฟิลล์และประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของใบผักโขม ภายใต้สภาพได้รับแสงสลบกับการพร่างแสง. (ปริญญานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์. (2548). สรีรวิทยาของพืช (พิมพ์ครั้งที่ 4 ed.). กรุงเทพฯ: ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สัมพันธ์ วงศ์นาวา. (2547). เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ : สเปกโทรเมตรีแบบกระจายพลังงาน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักเศรษฐกิจการเกษตร. (2562). สารสนเทศเศรษฐกิจการเกษตรรายสินค้าปี 2562 กรุงเทพฯ: สำนักเศรษฐกิจการเกษตร

สำราญ พิมราช, เหล็กไหล จันทะบุตร, พรพิชญ์ ธรรมปัทม์, & สุพันธ์ บุตรศาสตร์. (2563).

ความสัมพันธ์ระหว่างการสะสมปริมาณซิลิคอนกับการให้ผลผลิตของข้าว. วารสารเกษตร
พระวรุณ, 17(2), 209-222.

สุชฎมาภรณ์ แสงงาม, ธนบูรณ์ พลากุลมณฑล, คณิน คงเอียง, & อภิชาติ สุขสำราญ. (2561). การเพิ่ม
ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของมะเขือเทศเชอร์รี่พันธุ์ CH154 ภายใต้สภาวะเครียด
จากความแล้ง ด้วยสารบราสซิโนสเตรอยด์มีมิก. แก่นเกษตร 46(ฉบับพิเศษ), 328-332.

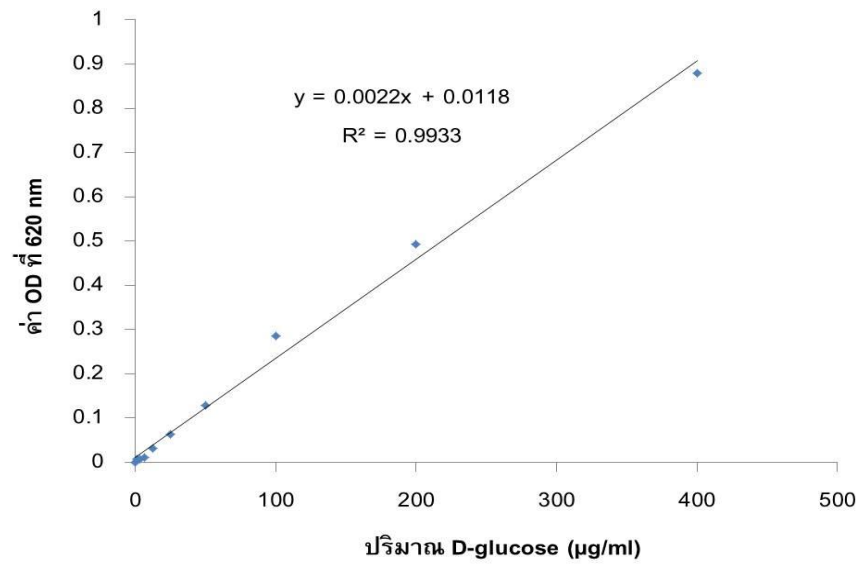
สุวิชา ดีหะสิงห์. (2550). การสกัดและการทำให้สารแอนโทไซยานินในลูกหว่าบรีสุทธี. (ปริญญาานิพนธ์
ปริญญาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

โสภา วัชรคุปต์. (2549). สารต้านอนุมูลอิสระ นนทบุรี: พี.เอส.พรินท์.

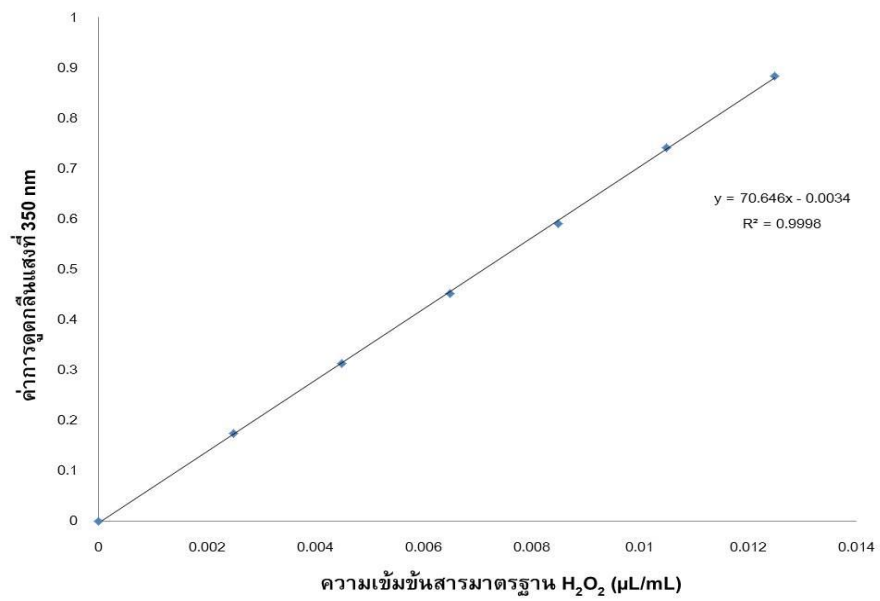




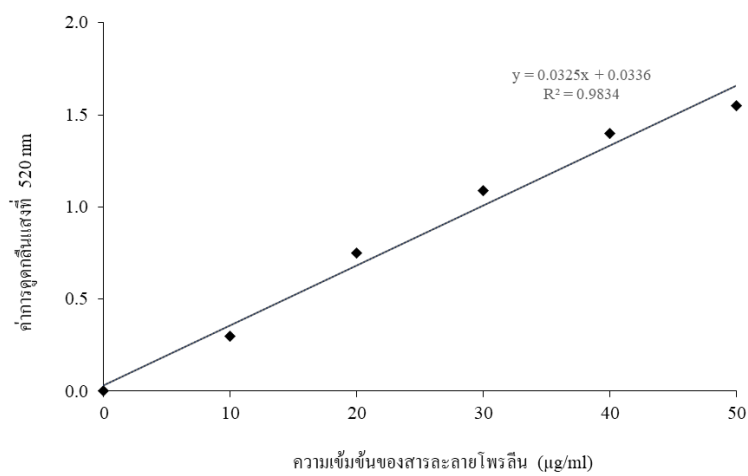
ภาคผนวก



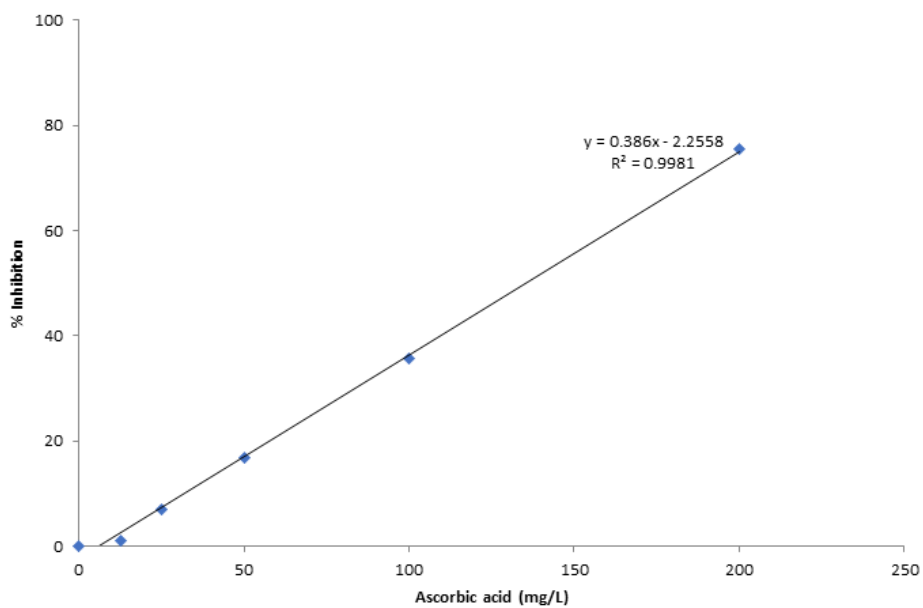
ภาพประกอบ 75 กราฟมาตรฐานกลูโคส



ภาพประกอบ 76 กราฟมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)



ภาพประกอบ 77 กราฟมาตรฐานโพรรีน



ภาพประกอบ 78 กราฟมาตรฐานความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

ตาราง 46 การผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโพสลิ้น

ความเข้มข้นของสารเคมี	การเตรียมสารเคมี
3% sulfosalicylic acid	ชั่ง sulfosalicylic acid 3 g ละลายและปรับปริมาตรรวมด้วยน้ำ 100 ml
Acid ninhydrin	ชั่ง 1.25 g ninhydrin ผสมกับ 30 ml glacial acetic acid และ 20 ml 6 M phosphoric acid
Glacial acetic acid	100% glacial acetic acid
Toluene	100% toluene
6 M phosphoric acid	เตรียม 6 M phosphoric acid 100 ml จาก 85% phosphoric acid (8.67 M) 69.20 ml เติมน้ำและปรับปริมาตรด้วยน้ำ 30.80 ml

ตาราง 47 การผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้

ความเข้มข้นของสารเคมี	การเตรียมสารเคมี
80% ethanol	เตรียม 80% ethanol 1,000 ml จาก 100% ethanol 800 ml เติมและปรับปริมาตรด้วยน้ำ 200 ml
70% sulfuric acid (H ₂ SO ₄)	เตรียม 70% H ₂ SO ₄ 1,000 ml จาก 98% H ₂ SO ₄ 714.28 ml เติมน้ำและปรับปริมาตรด้วยน้ำ 285.72 ml
Anthrone reagent	ชั่ง anthrone 0.05 g ละลายใน 70% H ₂ SO ₄

ตาราง 48 การผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน

ความเข้มข้นของสารเคมี	การเตรียมสารเคมี
Acidic methanol	acidic methanol 100 ml เตรียมจาก 100% methanol 80 ml, ascorbic acid 0.16 g, t-butyl hydroquinone 0.16 g, HCl 0.037 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำ 19.6 ml

ตาราง 49 การผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

ความเข้มข้นของสารเคมี	การเตรียมสารเคมี
80% ethanol	เตรียม 80% ethanol 100 ml จาก 100% ethanol 80 ml เติมและปรับปริมาตรด้วยน้ำ 20 ml
0.2 m M DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)	เตรียม 0.2 mM DPPH 100 ml จาก ชั่ง DPPH 0.0079 g ละลายใน 80% ethanol 100 ml
ตาราง 50 การผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H ₂ O ₂)	
ความเข้มข้นของสารเคมี	การเตรียมสารเคมี
10 mM potassium phosphate buffer	เตรียม 10 mM potassium phosphate buffer ปริมาตร 1,000 ml โดยชั่ง potassium dihydrogen phosphate (KH ₂ PO ₄) 0.834 g และชั่ง dipotassium phosphate (K ₂ HPO ₄) 0.673 g ละลายด้วยน้ำ 500 ml ปรับ pH ด้วยสารละลาย HCl หรือ NaOH ให้ได้ pH 7.0 และปรับปริมาตรด้วยน้ำ 500 ml
0.1% Trichloroacetic acid (TCA)	ชั่ง TCA 0.1 g ละลายและปรับปริมาตรรวมด้วยน้ำ 100 ml
1M Potassium iodide (KI)	ชั่ง KI 16.6 g ละลายและปรับปริมาตรรวมด้วยน้ำ 100 ml

ตาราง 51 การผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์

ความเข้มข้นของสารเคมี	การเตรียมสารเคมี
20% Trichloroacetic acid (TCA)	ชั่ง TCA 20 กรัม ละลายและปรับปริมาตรรวมด้วยน้ำ 100 ml
0.1% Trichloroacetic acid (TCA)	ชั่ง TCA 0.1 กรัม ละลายและปรับปริมาตรรวมด้วยน้ำ 100 ml
0.5% Thiobarbituric acid (TBA)	ชั่ง TBA 0.5 กรัม ละลายและปรับปริมาตรรวมด้วย 20% TCA 100 ml

ตาราง 52 การผสมสารเคมีต่างๆ เพื่อวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์อะไมเลส

ความเข้มข้นของสารเคมี	การเตรียมสารเคมี
10 mM potassium phosphate buffer	เตรียม 10 mM potassium phosphate buffer ปริมาตร 1,000 ml โดยชั่ง potassium dihydrogen phosphate (KH_2PO_4) 0.834 g และชั่ง dipotassium phosphate (K_2HPO_4) 0.673 g ละลายด้วยน้ำ 500 ml ปรับ pH ด้วยสารละลาย HCl หรือ NaOH ให้ได้ pH 7.0 และปรับปริมาตรด้วยน้ำ 500 ml
4% Polyvinylpyrrolidone (PVP)	ชั่ง PVP 4 g ละลายใน 10 mM potassium phosphate buffer 100 ml
0.3% H_2O_2	เตรียม 0.3% H_2O_2 25 ml ปิเปต 30% H_2O_2 0.75 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำ 24.25 ml

ประวัติผู้เขียน

