



การตอบสนองของปะการังต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและแสง  
Responses of Coral Holobiont to Elevated Temperature and Light

พิมพรัก ม่วงแก้ว  
Pimrak Moungkeaw

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรทะเลและชายฝั่ง  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree  
of Master of Science in Marine and Coastal Resources Management

Prince of Songkla University

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การตอบสนองของปะการังต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและแสง  
Responses of Coral Holobiont to Elevated Temperature and Light

พิมพรัก ม่วงแก้ว  
Pimrak MOUNGKEAW

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรทะเลและชายฝั่ง  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree  
of Master of Science in Marine and Coastal Resources Management  
Prince of Songkla University

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การตอบสนองของปะการังต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและแสง  
 ผู้เขียน นางสาวพิมพ์รัก ม่วงแก้ว  
 สาขาวิชา การจัดการทรัพยากรทะเลและชายฝั่ง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธินี สีนุชก)

.....ประธานกรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร. ธรรมศักดิ์ ยี่มิน)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พลชาติ โชติการ)

.....  
 (ดร. เมธิณี อยู่เจริญ)

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธินี สีนุชก)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
 ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรทะเล  
 และชายฝั่ง

.....  
 (ศาสตราจารย์ ดร. ดำรงค์ศักดิ์ ฟ้ารุ่งสา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธินี สีนุชก)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ .....

(ดร. เมธิณี อยู่เจริญ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ .....

(นางสาวพิมพ์รัก ม่วงแก้ว)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ .....

(นางสาวพิมพ์รัก ม่วงแก้ว)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การตอบสนองของปะการังต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและแสง  
ผู้เขียน นางสาวพิมพ์รัก ม่วงแก้ว  
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรทะเลและชายฝั่ง  
ปีที่สำเร็จการศึกษา 2564

### บทคัดย่อ

ปรากฏการณ์ปะการังฟอกขาวในระดับโลกและระดับภูมิภาคส่งผลอย่างร้ายแรงต่อการตายของปะการังและความสามารถในการฟื้นตัวของปะการัง การฟอกขาวของปะการังในน่านน้ำไทยในแต่ละพื้นที่มีการตอบสนองต่อการฟอกขาวที่แตกต่างกันตามประสบการณ์ของการได้รับความเครียดจากอุณหภูมิ (thermal history) หรือสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยในระดับเซลล์และภายนอกเซลล์ปะการังและซูแซนเทลลีสามารถปรับตัวหรือต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและแสงต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงและการเจริญเติบโตของซูแซนเทลลีที่มาจากสภาพแวดล้อมต่างกันและศึกษาแนวโน้มการฟื้นตัวของปะการัง เมื่อได้รับความเครียดจากแสงและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของปะการัง *Pocillopora acuta* โดยเลือกพื้นที่ศึกษาบริเวณเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา จังหวัดภูเก็ต ซึ่งทั้งสองพื้นที่ศึกษามีสภาพแวดล้อมที่ต่างกันและนำชิ้นส่วนของปะการังมาชักนำความเครียดด้วยการทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงและการทดลองซีดจำกัดของอุณหภูมิ จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ความหนาแน่นของซูแซนเทลลี และปริมาณรงควัตถุภายในเซลล์ซูแซนเทลลีของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษาลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อมีการชักนำความเครียด โดยเฉพาะชุดการทดลอง HTAL ชุดการทดลอง HTHL และชุดการทดลอง 33°C ที่ได้รับการสะสมความเครียดอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจัยของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อปะการัง ส่วนแสงเป็นปัจจัยรองลงมาที่ส่งผลกระทบต่อแนวปะการัง นอกจากนี้ยังส่งผลให้การเจริญเติบโตของปะการังค่อย ๆ ช้าลงจนในที่สุดปะการังอ่อนแอ สีของเนื้อเยื่อซีดลงและตายในที่สุด โดยเฉพาะปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน อย่างไรก็ตามปะการังบริเวณแหลมพันวาสามารถฟื้นตัวได้เมื่อสภาพแวดล้อมกลับเข้าสู่สภาวะปกติ และปะการังบริเวณแหลมพันวามีความต้านทานมากกว่าปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน เมื่อได้รับแรงกดดันของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมเดียวกันจึงส่งผลให้แนวโน้มการฟื้นตัวและสามารถอยู่รอดหลังปรากฏการณ์ปะการังฟอกขาว

**Thesis Title** Responses of Coral Holobiont to Elevated Temperature and Light  
**Author** Ms. Pimrak Moungkeaw  
**Major Program** Master of Science Program in Marine and Coastal Resources  
Management  
**Academic Year** 2021

## ABSTRACT

Coral bleaching events in global and regional scales have seriously affected on coral mortality and their ability to recover. There is spatial variability in bleaching response in Thai's water reefs based on their thermal history or environmental conditions. In cellular scale, coral and its zooxanthellae would be able to adapt or resist to environmental conditions such as higher sea surface temperature and light. The aim of this study was to investigate the effects of elevated temperature and light on photosynthesis and growth of zooxanthellae from different environmental conditions and Study the trend of coral recovery when exposed to light stress and increased temperature of *Pocillopora acuta*. Coral nubbins from different environmental condition, Maiton Island and Panwa Cape, Phuket, Thailand were collected and exposed to two experimental sets: increasing of temperature and light response experiment and limiting of temperature experiment. The results showed that synergistic effects of stress were observed on *P. acuta* from both sites decreased photosynthesis performance, loss of zooxanthellae association and reduction of chlorophyll concentration, especially HTAL, HTHL and 33°C treatments. They were always elevated temperature which was the main factor affecting coral and minor factor was light. In addition, coral growth was gradually reduced, weakened, discolored and some corals nubbins were covered with algae, especially, coral nubbins from Maiton Island. However, coral nubbins from Panwa Cape showed an ability to recover when temperature was reduced. Therefore, we suggested that corals from Panwa Cape was more resistant than Maiton Island under same stressors leading to difference capacity to survive after coral bleaching event.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์เป็นอย่างดีได้ด้วยความช่วยเหลือและการให้คำปรึกษาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธินี สีนุชถ ดร. เมธิณี อยู่เจริญ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านสำหรับคำแนะนำในทุกขั้นตอน ทั้งรายวิชาสัมมนา การวางแผนการทำงาน การออกแบบการทดลอง การเขียนรายงานและรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ประสบการณ์การเข้าร่วมงานประชุมวิชาการต่าง ๆ ตลอดจนการนำเสนอวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สถาบันทรัพยากรทะเลและชายฝั่ง คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม และสถานวิจัยสมุทรศาสตร์ชายฝั่งและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่มอบโอกาส ให้องค์ความรู้แนวทางในการศึกษาและค้นคว้าข้อมูลมาโดยตลอด ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อนนักศึกษาที่มีส่วนเกี่ยวข้องในให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งและขอบคุณทุกท่านอย่างยิ่งทั้งที่ได้กล่าวถึงและไม่ได้กล่าวถึงที่ได้มีส่วนช่วยเหลือและสนับสนุนมาโดยตลอด และขอขอบคุณตัวเองที่ได้พยายามจนในที่สุดวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์และหากมีข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

พิมพ์รัก ม่วงแก้ว



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่	
1. บทนำ	
1.1. หลักการและเหตุผล	1
1.2. การตรวจเอกสาร	4
1.2.1. ปะการังและแนวปะการัง	4
1.2.2. ซูแซนเทลลี	7
1.2.3. ความสัมพันธ์ระหว่างปะการังและซูแซนเทลลี	9
1.2.4. ผลกระทบของอุณหภูมิน้ำทะเลสูงขึ้นต่อปะการังและซูแซนเทลลี	10
1.2.5. ความสามารถในการปรับตัวของปะการังและซูแซนเทลลี	12
1.2.6. Pulse Amplitude Modulated (PAM) fluorometry	14
1.3. คำถามวิจัย	18
1.4. สมมติฐาน	18
1.5. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	19
1.6. ขอบเขตงานวิจัย	19
1.7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	19
2. วิธีการวิจัย	
2.1. การคัดเลือกพื้นที่ศึกษา	20
2.2. การเก็บตัวอย่างปะการังจากธรรมชาติ	22
2.3. การเตรียมตัวสำหรับการปรับตัวของปะการัง	22
2.4. การออกแบบการทดลองที่ 1	23
2.4.1. การเตรียมตัวทดลอง	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2. การเตรียมชิ้นส่วนปะการัง	24
2.4.3. การทดลองและการชักนำความเครียด	25
2.5. การออกแบบการทดลองที่ 2	26
2.5.1. การเตรียมตู้ทดลอง	26
2.5.2. การเตรียมชิ้นส่วนปะการัง	27
2.5.3. การทดลองและการชักนำความเครียด	28
2.6. การวัดอัตราการเจริญเติบโตของปะการัง	28
2.7. การวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง	30
2.8. การเก็บตัวอย่างชิ้นส่วนปะการัง	32
2.9. การเตรียมตัวอย่างปะการัง	32
2.10. การวิเคราะห์ตัวอย่าง	32
2.10.1. ความหนาแน่นของซูแซนเทลลี	32
2.10.2. ปริมาณ chlorophyll <i>a</i> และ chlorophyll <i>c</i> <sub>2</sub>	33
2.10.3. พื้นที่ผิวของชิ้นส่วนปะการัง	34
2.11. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	34
3. ผลการศึกษา	
3.1. การเจริญเติบโตของปะการัง	35
3.2. ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของปะการัง	37
3.2.1. Maximum Quantum Yield (MQY)	37
3.2.2. Effective Quantum Yield (EQY)	40
3.2.3. relative Electron Transport Rate (rETR)	43
3.2.4. $\alpha$ , $I_k$ และ $rETR_{max}$	51
3.3. ซูแซนเทลลีและรงควัตถุภายในเซลล์	59
4. วิเคราะห์ผลการศึกษา	
4.1. ผลกระทบจากอุณหภูมิและแสงต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของปะการัง	69
4.2. ผลกระทบจากอุณหภูมิและแสงต่อการเจริญเติบโตของปะการัง	72

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3. ความสามารถในการปรับตัว	73
4.4. การจัดการแนวปะการังต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและกิจกรรมของมนุษย์	75
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	78
เอกสารอ้างอิง	80
ภาคผนวก	89
ประวัติผู้เขียน	99

**รายการตาราง**

ตาราง	หน้า
1. ข้อมูลคุณภาพน้ำ (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) วัดจากพื้นที่ศึกษาแนวปะการัง เกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา	21
2. คุณภาพน้ำทะเลในตู้ทดลอง	23
3. แผนการทดลองการชักนำความเครียดแก่ปะการัง โดยการปรับอุณหภูมิแต่ละชุดการทดลอง	26
4. แผนการทดลองการชักนำความเครียดแก่ปะการัง โดยการปรับอุณหภูมิแต่ละชุดการทดลอง	28

## รายการภาพประกอบ

ภาพ	หน้า
1. การสลับระหว่าง vegetative cyst และ zoospore motile (Stat et al., 2006)	8
2. ความเข้มแสงที่มีส่งผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของชูแซนเทลลี (Osinga et al., 2008)	9
3. กระบวนการฟอกขาวภายใน chloroplast ของชูแซนเทลลี (Fournier, 2013)	11
4. ขั้นตอนการเกิดตัวแปรต่าง ๆ ของการวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (Maxwell & Johnson, 2000)	16
5. ผลต่อความเข้มแสงต่าง ๆ ต่อ Rapid Light Curve (RLCs) สภาพแวดล้อมแสงน้อย (วงกลมสีดำ) และสภาพแวดล้อมที่มีแสงมาก (สามเหลี่ยม) (Ralph & Gademann, 2005)	18
6. ก. พื้นที่ศึกษาในจังหวัดภูเก็ต ข. แนวปะการังแหลมพันวา ค. แนวปะการังเกาะไม้ท่อน	21
7. ปะการังชนิด <i>P. acuta</i> ที่มาจากพื้นที่ศึกษา ได้แก่ ก. แนวปะการังแหลมพันวา ข. แนวปะการังเกาะไม้ท่อน	22
8. ตู้ขนาด 250 ลิตร สำหรับการปรับตัวของปะการัง	23
9. ตู้ทดลองขนาด 70 ลิตร จำนวน 4 ตู้ ที่ถูกควบคุมให้มีสถานะของอุณหภูมิและความเข้มแสงที่แตกต่างกัน	24
10. ก. การวางชิ้นส่วนปะการังในตู้ทดลองขนาด 70 ลิตร โดยมีชิ้นส่วนปะการังจากทั้งสองพื้นที่ศึกษา ข. การวางชิ้นส่วนปะการังในแต่ละตู้ทดลองที่มีสถานะของอุณหภูมิและความเข้มแสงที่แตกต่างกัน	25
11. ตู้ทดลองขนาด 70 ลิตร จำนวน 4 ตู้ ที่ถูกควบคุมปัจจัยของความเข้มแสงและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	26
12. ก. การวางชิ้นส่วนปะการังในตู้ทดลองขนาด 70 ลิตร โดยมีชิ้นส่วนปะการังจากทั้งสองพื้นที่ศึกษา ข. การวางชิ้นส่วนปะการังในแต่ละตู้ทดลองที่มีสถานะของอุณหภูมิและความเข้มแสงที่แตกต่างกัน	27
13. การวัดอัตราการเจริญเติบโตที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละวันด้วยวิธี Buoyant Weight Technique (Jokiel, 1978; Walsh et al., 2012)	29
14. วัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงด้วยอุปกรณ์ Pulse Amplitude Modulated (PAM) Fluorometry (Walz, Germany) ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ร่วมกับโปรแกรม WinControl	32

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
15. วิธีการนับเซลล์ซูแซนเทลลี hemocytometer	33
16. อัตราการเจริญเติบโต (Mean $\pm$ S.D.) ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา	36
17. การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (Maximum Quantum Yield: MQY) (Mean $\pm$ S.D.)	38
18. การทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (Maximum Quantum Yield: MQY) (Mean $\pm$ S.D.)	36
19. การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (Effective Quantum Yield: EQY) (Mean $\pm$ S.D.)	41
20. การทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (Effective Quantum Yield: EQY) (Mean $\pm$ S.D.)	43
21. การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงต่ออัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอน (relative Electron Transport Rate: rETR) (Mean $\pm$ S.D.)	46
22. การทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิต่ออัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอน (relative Electron Transport Rate: rETR) (Mean $\pm$ S.D.)	44
23. การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงต่อ $\alpha$ , $I_k$ และ $rETR_{max}$ (Mean $\pm$ S.D.)	51
24. การทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิต่อ $\alpha$ , $I_k$ และ $rETR_{max}$ (Mean $\pm$ S.D.)	58
25. การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงต่อความหนาแน่นของซูแซนเทลลี ปริมาณ Chlorophyll $a$ และ Chlorophyll $c_2$ และอัตราส่วนของปริมาณคลอโรฟิลล์ (Mean $\pm$ S.D.)	63
26. การทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของซูแซนเทลลี ปริมาณ Chlorophyll $a$ และ Chlorophyll $c_2$ และอัตราส่วนของปริมาณคลอโรฟิลล์ (Mean $\pm$ S.D.)	68

## บทที่ 1

### บทนำ (Introduction)

#### 1.1. หลักการและเหตุผล

ความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกัน (symbiosis) ระหว่างสาหร่ายเซลล์เดียวครอบครัว Symbiodiniaceae หรือซูแซนเทลลี (zooxanthellae) และสัตว์ในกลุ่ม Cnidaria เป็นความจำเพาะที่เอื้อประโยชน์ระหว่างสาหร่ายกับเจ้าบ้าน (host) (Baker, 2003; Fournier, 2013) ความสัมพันธ์ดังกล่าวสำคัญอย่างยิ่งในปะการังกลุ่มที่สร้างแนวปะการัง ซึ่งไม่สามารถขาดบทบาทของซูแซนเทลลีได้ เนื่องจากปะการังต้องการสารอาหาร เช่น กรดอะมิโน ไขมัน ออกซิเจน จากการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลี ในขณะที่ซูแซนเทลลีได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสจากการขับของเสียของปะการัง (Magnone et al., 2011) ปะการังแต่ละชนิดมีองค์ประกอบชนิดและปริมาณของซูแซนเทลลีอยู่ในเนื้อเยื่อปะการังแตกต่างกัน (Baker, 2003; Rouzé et al., 2017) ขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมที่ปะการังอาศัยอยู่ เช่น ระดับความเข้มแสง อุณหภูมิ หรือความลึก เป็นต้น (Bongaerts et al., 2015)

ระบบนิเวศแนวปะการังเป็นระบบนิเวศที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ที่เกิดจากการเจริญเติบโตของกลุ่มปะการังแข็งที่มีหน้าที่สำคัญในการสร้างความหลากหลายทางชีวภาพ และนิเวศบริการให้แก่สิ่งมีชีวิตที่เข้ามาใช้ประโยชน์ เช่น แหล่งที่อยู่อาศัย แหล่งอาหาร และมีหน้าที่หลักในการเป็นผู้ผลิตขั้นต้นของสายใยอาหาร รวมไปถึงเป็นผู้ให้ประโยชน์กับมนุษย์ เช่น ประชากร 500 ล้านคน ได้ประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น ในการเป็นแหล่งอาหาร เศรษฐกิจ การท่องเที่ยว และยารักษาโรค โดย 394 ชนิดพันธุ์ที่อาศัยในแนวปะการังถูกนำมาใช้เป็นยารักษาโรค และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ต่าง ๆ เช่น ยารักษาโรคมะเร็ง ครีมกันแดด อีกทั้งแนวปะการังยังเป็นตัวช่วยในการป้องกันการกัดเซาะของชายฝั่ง โดยการเป็นแนวกำแพงกันคลื่น รวมถึงชะลอความรุนแรงของลมพายุ (Wilkinson, 2004; Miththapala, 2008; Wild et al., 2011) อย่างไรก็ตามปัจจุบันแนวปะการังมีความเสื่อมโทรม เนื่องจากการกระทำของมนุษย์ที่เป็นตัวการหลักในการขับเคลื่อนให้เกิดภัยคุกคามกับแนวปะการัง โดยมีเหตุปัจจัยจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก รวมถึงภาวะทะเลเป็นกรดที่มีสาเหตุจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ซึ่งเป็นภัยคุกคามในระดับ large-scale นอกจากนี้ยังมีภัยคุกคามที่เป็นระดับ local-scale เช่น มลพิษ การทำประมงเกินความจำเป็น (over-fishing) การใช้เครื่องมือ

ประมงผิดประเภท การสิ่งก่อสร้างและการพัฒนาชายฝั่ง การสะสมปริมาณตะกอน และการเพิ่มขึ้นของปริมาณแร่ธาตุอาหาร (Baird et al., 2008; Riegl et al., 2009; Hawkins, 2014; Hughes et al., 2017; Wear, 2016) ด้วยเหตุการณ์ที่กล่าวไปข้างต้นนำไปสู่ผลกระทบต่อเนื่องแก่ระบบนิเวศแนวปะการังที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์ปะการังฟอกขาว”

ปะการังเป็นสัตว์ที่มีสาหร่ายไดโนแฟลกเจลเลต (ซูแซนเทลลี) อาศัยอยู่ภายในเนื้อเยื่อในภาวะพึ่งพาอาศัยกัน โดยสาหร่ายไดโนแฟลกเจลเลตได้รับสารอาหารจากการขับของเสียจากปะการัง ในขณะที่เดียวกันปะการังได้รับสารอาหารจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายไดโนแฟลกเจลเลต ประมาณ 95% เพื่อนำไปสร้างโครงสร้างหินปูนที่ซับซ้อนจนเกิดเป็นระบบนิเวศที่มีความหลากหลายมากที่สุดใต้มหาสมุทร (Hoegh-Guldberg, 1999; Founier, 2013; กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2556) อย่างไรก็ตาม สิ่งมีชีวิตที่มีภาวะพึ่งพาอาศัยเหล่านี้ได้รับผลกระทบภายใต้ปัจจัยคุกคามต่าง ๆ จนนำไปสู่ความเครียดและการเปลี่ยนแปลงกลไกภายในเซลล์ เช่น กลไกที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง การกำจัดของเสียออกจากเซลล์ โดยนำไปสู่การเกิดปะการังฟอกขาว (Hawkins, 2014) กล่าวคือปะการังสูญเสียซูแซนเทลลีในสภาวะที่เกิดความเครียด โดยมีการขับซูแซนเทลลีออกจากเซลล์เพื่อลดความเสียหายภายในร่างกาย หรือย่อยซูแซนเทลลีเพื่อนำสารอาหารไปสร้างพลังงานให้กับปะการังเอง (Lesser & Farrell, 2004; Tchernov et al., 2004; Baird et al., 2008) เมื่อสภาพแวดล้อมกลับคืนสู่ภาวะปกติ ปะการังสามารถฟื้นคืนจากการฟอกขาวได้ แต่หากเกิดความเครียดสะสมเป็นเวลานานและเกินขีดจำกัด ทำให้ปะการังไม่สามารถมีชีวิตรอดได้ (Hughes et al., 2003) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า แนวปะการังในแต่ละพื้นที่ได้รับผลกระทบจากการฟอกขาวมากน้อยแตกต่างกัน เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยในเรื่องชนิดของปะการังที่ทนทาน หรือเปราะบางต่อการฟอกขาวในพื้นที่นั้น ๆ แล้วยังเกี่ยวข้องกับความสามารถในการปรับตัวของปะการังและซูแซนเทลลีด้วย (LaJeunesse et al., 2003; Fautin & Buddemeier, 2004; Putschim, 2017)

สมมติฐานการปรับตัวต่อการฟอกขาว (Adaptive Bleaching Hypothesis) เป็นสมมติฐานที่ว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากรซูแซนเทลลีภายในเนื้อเยื่อปะการังระหว่างเกิดการฟอกขาว (Buddemeier, & Fautin, 1993; Fautin & Buddemeier, 2004) กล่าวคือ ปะการังมีการปรับตัว เมื่ออยู่ในภาวะเครียด โดยมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของซูแซนเทลลี เช่น การกลับมาของประชากร (repopulation) ซูแซนเทลลีที่มีความสามารถในการต้านทาน หรือทนทานต่อภาวะเครียดของสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยมากมายที่สามารถยืนยันกลไกการเปลี่ยนแปลง และสนับสนุนสมมติฐานการปรับตัวต่อการฟอกขาวเกี่ยวกับชนิดของซูแซนเทลลี (*Symbiodinium*



clade) ที่สามารถต้านทาน หรือทนทานต่อแสง อุณหภูมิ และสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป (Weis, 2008; Finney et al., 2010; Lien et al., 2013; Ros et al., 2016) การมีรงควัตถุที่สามารถเพิ่มความต้านทานต่อการฟอกขาว รวมไปถึงการปรับตัวของเนื้อเยื่อปะการังที่สามารถหดเนื้อเยื่อ เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากแสงหรือรังสีที่ส่องลงมา (Venn et al., 2008) กลไกดังกล่าวเป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยให้ปะการังรอดชีวิตจากปรากฏการณ์ปะการังฟอกขาว ในทางคล้ายคลึงกันปะการังที่อยู่ในสภาพแวดล้อมได้รับความเครียดอย่างต่อเนื่อง หรือมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมตลอดเวลา เช่น ปริมาณตะกอนสูงที่มาจากการพัฒนาชายฝั่ง ความเค็มที่แปรผันจากปริมาณน้ำฝน สารอาหารและมลพิษที่ถูกชะล้างลงสู่ทะเล และ/หรือการได้รับแสงในปริมาณมากในช่วงน้ำลง ย่อมมีกลไกและรูปแบบที่คล้ายคลึงกับสมมติฐานการปรับตัวต่อการฟอกขาว (Adaptive Bleaching Hypothesis) เพื่อสร้างความต้านทานและความทนทานได้ (Brown, 1997; Fautin & Buddemeier, 2004; Fournier, 2013; Lien et al., 2013)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถในการต้านทาน แนวโน้มการฟื้นตัวและการปรับตัวของปะการังและซูแซนเทลลีที่ได้รับภัยคุกคามและปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ น้ำทะเลและแสงที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของปะการัง ไม่ว่าจะเป็นประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง การเจริญเติบโต กลไกภายในเซลล์และการฟอกขาว ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีกว่าระดับผลกระทบที่ปะการังและซูแซนเทลลีได้รับในแต่ละพื้นที่ไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภัยคุกคามและปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน รวมถึงชนิดของปะการังและซูแซนเทลลีเองด้วย นอกจากเหตุผลที่กล่าวไปข้างต้นแล้ว ยังพบว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการศึกษา ติดตาม เผื่อระวังการเกิดปรากฏการณ์ปรากฏการณ์การปะการังฟอกขาวอย่างสม่ำเสมอ แต่พบว่ายังมีการศึกษาและงานวิจัยที่ค่อนข้างน้อยเกี่ยวกับด้านสรีรวิทยาและกลไกการตอบสนอง ฟื้นตัวและปรับตัวของปะการังและซูแซนเทลลีต่อปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม และนำองค์ความรู้จากการศึกษานี้จะสามารถนำมาประเมินจากการตอบสนองและการฟื้นตัวของปะการังและซูแซนเทลลี รวมถึงนำมาบูรณาการกับแนวทางบริหารจัดการแนวปะการังในเชิงการป้องกัน บรรเทา และรับมือกับสถานการณ์ปะการังฟอกขาวในอนาคต

## 1.2. การตรวจเอกสาร

### 1.2.1. ปะการังและแนวปะการัง

ปะการังแข็ง (stony coral) ถูกจัดจำแนกหมวดหมู่สิ่งมีชีวิตตามหลักอนุกรมวิธาน ดังนี้  
Kingdom Animalia

Phylum Cnidaria

Class Anthozoa

Subclass Hexacorallia

Order Scleractinia

ปะการังมีลักษณะทั่วไปเช่นเดียวกับสิ่งมีชีวิตในกลุ่มไนดาเรีย กล่าวคือเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีการเกาะกลุ่มเป็นเนื้อเยื่อ และมีสมมาตรร่างกายแบบรัศมี ส่วนใหญ่มักเกาะอยู่กับที่และเคลื่อนที่ไม่ได้ สำหรับบางชนิดสามารถเคลื่อนที่ได้หรือเคลื่อนที่ได้ในบางช่วงของวัฏจักรชีวิต ปะการังมีเนื้อเยื่อ 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นอีพิตีเดอริส (epidermis) และชั้นแกสโตรเดอริส (gastrodermis) โดยที่ระหว่างสองชั้นนี้ยังถูกคั่นด้วยชั้นที่เป็นวุ้น (mesoglea) ปะการังเป็นผู้ล่าที่ใช้หนวดและเข็มพิษ (nematocyst) ในการล่าเหยื่อและจับอาหาร หรือใช้ในการป้องกันตัว นอกจากการใช้เข็มพิษแล้ว ปะการังยังใช้กลไกอื่น ๆ ในการล่าเหยื่อและจับอาหาร ได้แก่ การกินอาหารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำโดยใช้หนวด การดูดซึมสารอาหาร เช่น ไนโตรเจน แคลเซียม แมกนีเซียม โดยผ่านการแพร่ และการกินอาหารที่อาศัยการสังเคราะห์ด้วยแสงจากสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวที่อาศัยอยู่ในเนื้อเยื่อ (Knowlton & Jackson, 2001; สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2556) ปะการังในอันดับ Scleractinia จัดเป็นกลุ่มปะการังแท้ที่มีโพลิป (polyp) อยู่รวมกันเป็นจำนวนมากจนเกิดเป็นโคโลนี (colony) และแต่ละตัวของโพลิปที่อยู่ในช่องหินปูน (corallite) สามารถเชื่อมต่อกันและเรียงตัวกันเป็นชั้น ๆ เพื่อแลกเปลี่ยนแร่ธาตุและอาหาร (Miththapala, 2008) การเรียงตัวกันเป็นชั้น ๆ นี้ นำไปสู่การสร้างโครงสร้างแข็งที่ประกอบไปด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จนเกิดเป็นโคโลนีปะการัง จนกระทั่งนำไปสู่การสร้างแนวปะการัง (hermatypic coral)

แนวปะการังที่มีการสร้างแนวมีสิ่งมีชีวิตเรียกว่าชุมชนเทลลีอาศัยอยู่ในเนื้อเยื่อปะการังแบบพึ่งพาอาศัยกันและชุมชนเทลลีเป็นสิ่งมีชีวิตที่ต้องการปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อการผลิตอาหารและการเจริญเติบโต ดังนั้นแนวปะการังจำเป็นต้องอาศัยปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม (Miththapala, 2008) ได้แก่

1. แสงแดด: บริเวณที่มีความลึกที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแนวปะการังจะถูกจำกัดด้วยปริมาณของแสงแดดที่ส่องลงมา
2. ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 18 – 30°C
3. ค่าความเค็มระหว่าง 27 – 33 ppt.
4. ความชุ่มชื้นในช่วงที่แคบ

ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมเหล่านี้ ทำให้ปะการังเจริญเติบโตและสร้างแนวปะการัง และแพร่กระจายได้ตามเงื่อนไขของปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม หากเกิดการรบกวนทำให้ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป เช่น อุณหภูมิน้ำทะเลสูงขึ้น ความเค็มน้ำทะเลลดลง ปริมาณตะกอนสะสม ทำให้แสงแดดส่องลงมาได้น้อย มีผลให้ปะการังเจริญเติบโตช้า ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลี และอาจตายในที่สุด (Baird et al., 2008; Oliver et al., 2008; Venn et al., 2008) แนวปะการังสามารถพบได้ในบริเวณน้ำตื้นหรือบริเวณน้ำลึก ใกล้แนวชายฝั่ง ชายฝั่งบริเวณหมู่เกาะและไหล่ทวีปบริเวณเขตร้อน (tropical) และกึ่งเขตร้อน (subtropical) มากกว่า 100 ประเทศทั่วโลกที่ตั้งอยู่ระหว่างเส้นละติจูด 30°C เหนือ และ 30°C ใต้ ได้แก่ บริเวณมหาสมุทรแอตแลนติก อินเดีย แปซิฟิก ทะเลแดง อ่าวเปอร์เซีย นอกจากนี้ปะการังยังสามารถพบได้ในบริเวณที่ห่างจากเส้นศูนย์สูตรในในที่ที่กระแสน้ำอุ่นไหลออกจากบริเวณเส้นศูนย์สูตร เช่น ฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา และทางตอนใต้ของประเทศญี่ปุ่น และทั่วโลกถูกแนวปะการังครอบคลุมด้วยพื้นที่ประมาณ 284,300 ตารางกิโลเมตร (Miththapala, 2008; Coral Reef Alliance, 2019; กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2556) แนวปะการังสามารถเจริญเติบโตและแพร่กระจายได้ตามเงื่อนไขต่าง ๆ ของปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็น แสงแดด อุณหภูมิ ความเค็ม และความชุ่มชื้น จึงทำให้พบแนวปะการังในบริเวณชายฝั่ง หมู่เกาะและไหล่ทวีป (Miththapala, 2008) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะธรณีวิทยาทางสมุทรศาสตร์ที่เป็นตัวจำแนกประเภทของการเกิดแนวปะการัง โดยปะการังสามารถเจริญเติบโตได้รอบ ๆ โครงสร้างที่โผล่มาจากส่วนใดส่วนหนึ่งของมหาสมุทร และโครงสร้างเหล่านี้จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขทางปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น โครงสร้างเหล่านี้ เช่น ภูเขาไฟ ภูเขาใต้ทะเล จำเป็นต้องอยู่ในระดับความลึกที่เหมาะสมต่อการอยู่รอดของปะการัง และสามารถจำแนกประเภทของการเกิดแนวปะการังได้ 3 ประเภท (Khaled Bin Sultan Living Oceans Foundation, 2014) ดังนี้

1. Fringing reefs เป็นแนวปะการังที่อยู่ใกล้บริเวณชายฝั่งของทวีปหรือหมู่เกาะหรือบริเวณแนวลาดชันบนไหล่ทวีปหรือรอบ ๆ ทะเลนอก เช่น แนวปะการังในประเทศไทย หมู่เกาะ Mangareva ในมหาสมุทรแปซิฟิก

2. Barrier reefs เป็นแนวปะการังที่เกิดบริเวณนอกชายฝั่งและขนานไปกับชายฝั่ง ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล แนวปะการังที่มีชื่อเสียงที่สุดในโลก ได้แก่ Great Barrier Reef ประเทศออสเตรเลีย แนวปะการังมีความยาวประมาณ 2,000 กิโลเมตร
3. Atoll เป็นแนวปะการังรูปวงรีหรือรูปเกือบวงรีที่ถูกล้อมรอบไปด้วยทะเลสาบน้ำเค็ม มีหาดทรายที่เกิดจากการย่อยสลายของซากปะการัง และแนวปะการังประเภทนี้อยู่ห่างไกลจากแนวชายฝั่งมาก ส่วนใหญ่เกิดบนเกาะภูเขาไฟใต้มหาสมุทร เช่น เกาะ Tuamotu Archipelago และเกาะ Austral ในมหาสมุทรแปซิฟิก

วิวัฒนาการของปะการังกลุ่ม Scleractinian ถูกวิเคราะห์และพิสูจน์ด้วยประวัติศาสตร์ทางธรณีวิทยา (geological history) Riegl et al. (2009) และ LaJeunesse et al. (2018) กล่าวว่าวิวัฒนาการของปะการังกลุ่ม Scleractinian กำเนิดมาตั้งแต่ประมาณเมื่อ 200 ล้านปีที่แล้ว สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของเปลือกโลก และการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของคลื่นของในมหาสมุทร เหล่านี้ได้รับอิทธิพลมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก รวมไปถึงการสูญพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตที่มีผลกับวิวัฒนาการ และความหลากหลายของปะการังที่แตกต่างกันตามลักษณะชีวภูมิศาสตร์ รวมถึงสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ สอดคล้องกับทฤษฎีของ Charles Darwin ในเรื่องที่เกี่ยวข้อง natural selection genetic drift และ mutations สิ่งสำคัญของเหตุการณ์ข้างต้น โดยเฉพาะการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก ทำให้เกิดทะเล The Pan-tropical Tethys ที่เกิดจากมหาทวีปกอนด์วานาเหนือ (gondwana) แยกจากมหาทวีปอเรเชียใต้ (laurasia) โดยพบฟอสซิลปะการังกลุ่มแรกที่กำเนิดในมหายุค Paleozoic บริเวณประเทศจีนและสกอตแลนด์ ต่อมาในมหายุค Mesozoic ช่วงตอนกลางและตอนปลายของยุค Triassic พบว่าปะการังมีการแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็วและเป็นช่วงเวลาประมาณ 20 – 25 ล้านปีที่ปะการังสามารถแพร่กระจายได้ดีที่สุดและมีความหลากหลายมากที่สุด และพบฟอสซิลเป็นจำนวนมากรอบ ๆ แถบเส้นศูนย์สูตรของมหาสมุทร Panthalassa (the equatorial panthalassa ocean rim) โดยลักษณะฟอสซิลปะการังที่พบในยุคนี้มีลักษณะโครงสร้างเล็ก (micro-structures) ซึ่งเป็นบรรพบุรุษของปะการังที่ห่างไกลจากปะการังในปัจจุบันเป็นอย่างมาก จากนั้นปะการังในยุค Triassic ได้ล่มสลายลงเป็นเวลาประมาณ 6 – 8 ล้านปี และเริ่มกำเนิดปะการังอีกครั้งในยุค Jurassic “Jurassic reefs” โดยมีการกำเนิดปะการังกลุ่ม Scleractinian ที่มีความหลากหลายอย่างน้อย 150 สกุลที่บันทึกได้บริเวณ European Tethys และ 51 สกุลบริเวณ Panthalassa ซึ่งหนึ่งในนั้นเป็นบรรพบุรุษปะการังกลุ่ม Fungiina และ Faviina และต่อมาในมหายุค Coenozoic พบว่า 1 ใน 3 ของ Families และมากกว่า 70% ของสกุลปะการังได้มีการสูญพันธุ์หรือเมื่อประมาณ 65 ล้านปีที่แล้วในยุค Cretaceous เหลือเพียง 30% เท่านั้นที่สามารถ

รอดชีวิต ปัจจุบัน โลกกำลังเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลให้ปะการังอาจสูญพันธุ์ได้ภายในปี ค.ศ. 2040 และพบว่าทั่วโลกมีชนิดพันธุ์ของปะการังที่สร้างแนวได้ทั้งหมด 845 ชนิด (IUCN, 2008) สำหรับประเทศไทยพบทั้งหมด 389 ชนิด ซึ่งเป็นประเภทแนวปะการังที่ก่อตัวริมฝั่ง (fringing reef) ทั้งหมด และชนิดพันธุ์ของปะการังที่เด่น ได้แก่ *Porites* spp. และ *Acropora* spp. (กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2556)

### 1.2.2. ซูแซนเทลลี

ซูแซนเทลลีพบได้ในสิ่งมีชีวิตที่มีความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกันที่อาศัยอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เป็นมหาสมุทร (Stat et al., 2012) เป็นสิ่งมีชีวิตลักษณะเซลล์เดียวที่มีรูปร่างทรงกลมสีเหลือง-น้ำตาล สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงและสร้างพลังงานได้ (Allemand & Furla, 2018) และได้ถูกจัดจำแนกตามหลักอนุกรมวิธาน ดังนี้

Empire Eukaryota

Phylum Myzozoa

Subphylum Myzozoa

Infraphylum Dinoflagellata

Class Dinophyceae

Order Suessiales

Family Symbiodiniaceae

Genus *Symbiodinium*

Genus *Effrenium*

Genus *Gerakladium*

Genus *Durusdinium*

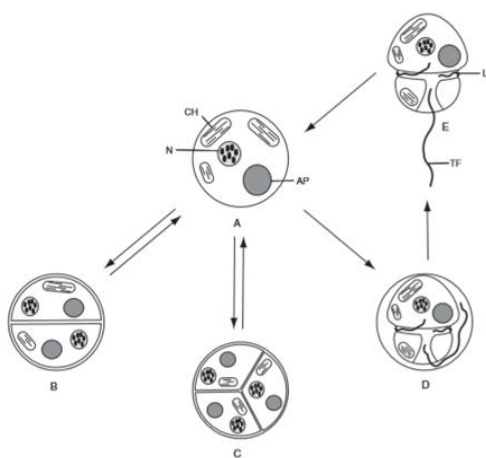
Genus *Breviolum*

Genus *Fugacium*

Genus *Cladocopium*

ภายในซูแซนเทลลีประกอบไปด้วยอวัยวะเซลล์ (organelle) ที่เรียกว่า คลอโรพลาสต์ (chloroplast) ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์ด้วยแสง และมีอวัยวะเซลล์ที่ซ้อนทับกันอยู่เรียกว่า ไทลาคอยด์ (thylakoid membrane) หรือลามেলা (lamella) ซึ่งเป็นที่อยู่ของรงควัตถุ (pigment) สีเหลือง-น้ำตาล (diadinoxanthin, peridinin) ประกอบไปด้วย chlorophyll *a* และ *c*<sub>2</sub> (Fournier, 2013) และ

นิวเคลียส (nucleus) ซูแซนเทลลีสามารถสลับไปมาได้ระหว่างระยะ vegetative cyst (non-motile stage) และ zoospore motile (motile stage) ดังภาพที่ 1 ระยะ vegetative cyst มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 – 15  $\mu\text{m}$ . มีการควบคุมการแบ่งเซลล์ได้ ซึ่งจะพบในระยะที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (non-motile stage) โดยการแบ่งเซลล์แบบไม่อาศัยเพศ (asexual reproduction) ที่ได้เซลล์ลูก 2 หรือ 3 เซลล์ (daughter cells) และระยะ zoospore motile ซึ่งเป็นระยะที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (motile stage) ได้จะมีการแบ่งเซลล์แบบอาศัยเพศ (sexual reproduction) (Stat et al., 2006) ซูแซนเทลลียังมีลักษณะเฉพาะในเรื่องของขนาดของเซลล์ระยะ vegetative จำนวนโครโมโซม ขนาดของคลอโรพลาสต์ สรีรวิทยาเกี่ยวกับปรับตัวต่อแสง (photo adaptive physiology) และกระบวนการสร้างและสลาย (metabolism) นอกจากนี้ยังมีความหลากหลายและความแปรผันทางพันธุกรรม ปัจจุบันพบว่าซูแซนเทลลีที่มีความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกับกลุ่ม Cnidarian ถูกแยกชนิดด้วยเทคนิคทางพันธุศาสตร์ระดับโมเลกุลได้หลากหลายชนิดหรือ clade เช่น clade A B C D และ E (Stat et al., 2006; LaJeunesse et al., 2018)

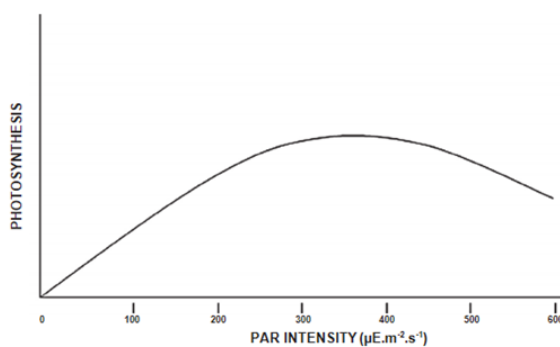


**ภาพที่ 1** แสดงการสลับระหว่าง vegetative cyst และ zoospore motile (A) vegetative cyst (non-motile stage) (B) การแบ่งเซลล์ของ vegetative cyst ได้เซลล์ลูก 2 เซลล์ (C) การแบ่งเซลล์ของ vegetative cyst ได้เซลล์ลูก 3 เซลล์ (D) การพัฒนาของ zoospore และ (E) zoospore (motile stage) โดยที่ CH = chloroplast, N= nucleus, AP = accumulation product, LF = longitudinal flagella, TF = transverse flagella (Stat et al., 2006)

### 1.2.3. ความสัมพันธ์ระหว่างปะการังและซูแซนเทลลี

กลุ่มปะการังแข็งเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีความใกล้ชิดกับสิ่งมีชีวิตจำพวก micro-organisms โดยเฉพาะอย่างยิ่งซูแซนเทลลี และสามารถพบความสัมพันธ์ในลักษณะนี้ได้เป็นสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในกลุ่ม Cnidaria Foraminifera และ Mollusca เป็นต้น (Baker, 2003; Fournier, 2013) การเอื้อประโยชน์กันด้วยกลไกต่าง ๆ ได้แก่ การสังเคราะห์ด้วยแสง การตรึงไนโตรเจน การย่อยสลายสารอาหารที่ซับซ้อน และการป้องกันการติดเชื้อจากเชื้อโรค (Rosenberg et al., 2007) เรียกว่า ความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกัน (symbiotic relationship) ในกรณีของปะการังและซูแซนเทลลี โดยซูแซนเทลลีอาศัยอยู่บริเวณเนื้อเยื่อชั้นใน (endoderm) ของปะการังมีหน้าที่ในการผลิตสารอาหาร เช่น กรดอะมิโน น้ำตาล คาร์โบเดรต โปรตีน และถ่ายทอดพลังงานไปยังปะการังได้ถึง 95% (Fournier, 2013) และซูแซนเทลลีได้รับสารอาหาร เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย และฟอสเฟตจากการขับถ่ายของปะการัง เพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงและสร้างสารอาหารต่อไป (Hoegh-Guldberg, 1999; Miththapala, 2008) การเอื้อประโยชน์ต่อกันของสิ่งมีชีวิตทั้งสองฝ่ายนำไปสู่การก่อให้เกิดสายใยอาหารที่ซับซ้อนในแนวปะการัง (Hoegh-Guldberg, 1999)

นอกจากนี้แสงเป็นปัจจัยหลักที่สนับสนุนความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกันระหว่างปะการังและซูแซนเทลลี ดังนั้นสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของปะการังจึงมีความจำเพาะเจาะจง ได้แก่ พื้นที่น้ำตื้นที่มีความลึกน้อยกว่า 60 เมตร อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 18°C – 30°C มีความเค็มและค่า pH อยู่ในช่วงที่แคบ (Miththapala, 2008) มีความเข้มแสงเพียงพอต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลี ค่าความเข้มแสงอยู่ที่ประมาณ 300  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$  และไม่ควรมากเกิน 800  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$  โดยจากงานวิจัยพบว่าความเข้มแสงที่มากเกิน 800  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$  ทำให้เกิดการยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลี (Osinga et al., 2008) ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงความเข้มแสงที่มีส่งผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลี (Osinga et al., 2008)

#### 1.2.4. ผลกระทบของอุณหภูมิน้ำทะเลสูงขึ้นต่อปะการังและซูแซนเทลลี

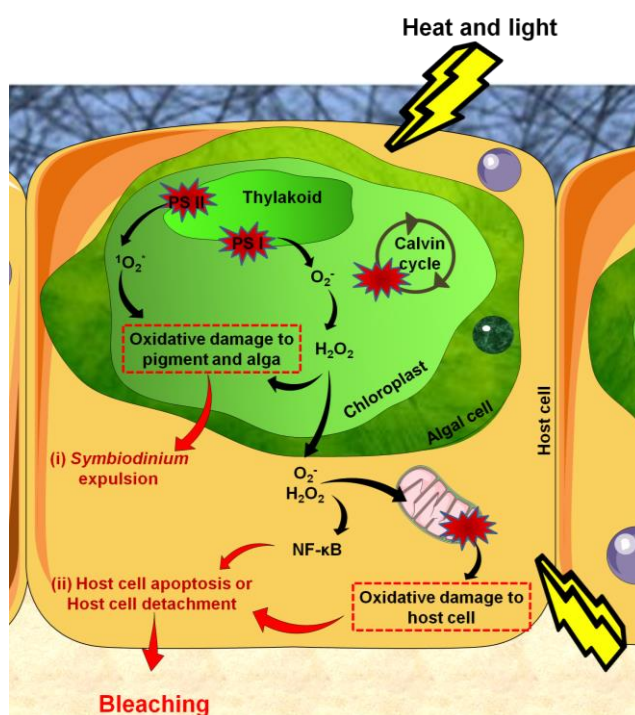
การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก (global climate change) ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ทั้งบนบกและทะเล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำทะเล เป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของแนวปะการังและทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟอกขาว (Edwards & Gomez, 2007) ปรากฏการณ์ปะการังฟอกขาวถูกบันทึกครั้งแรกของโลกในปี ค.ศ. 1931 หลังจากนั้นพบการเกิดปะการังฟอกขาวขึ้นอีกหลายพื้นที่ทั้งในระดับภูมิภาคและระดับโลก ในช่วงปี ค.ศ. 1982 – 1983 มีสาเหตุมาจากอุณหภูมิน้ำทะเลสูงขึ้น (Brown, 1997; Oliver et al., 2008; Yeemin et al., 2009) อย่างไรก็ตามพบว่าเกิดการเกิดปะการังฟอกขาวที่รุนแรงและมีผลกระทบกับแนวปะการังทั่วโลกครั้งแรกในปี ค.ศ. 1998 เกี่ยวข้องโดยตรงกับปรากฏการณ์ El Nino (Glynn, 1988; Brown, 1997; Wilkinson, 1998; Yeemin et al., 2009) ปะการังฟอกขาวที่รุนแรงครั้งต่อมาเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 2010 และ 2015/16 ตามลำดับ (Tun et al., 2010; Heron et al., 2017)

สำหรับประเทศไทยได้มีการรายงานปรากฏการณ์ฟอกขาวครั้งสำคัญไว้ในปี ค.ศ. 1991 1995 1998 2003 2010 และ 2015/16 (Putchim, 2017) พบการฟอกขาวทั้งบริเวณทะเลอันดามันและอ่าวไทย ส่วนใหญ่แล้วมีสาเหตุจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำทะเล ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดภาวะความเครียดและก่อให้เกิดการสูญเสียซูแซนเทลลี ปัจจัยรองลงมา ได้แก่ รังสีจากดวงอาทิตย์ โดยส่วนใหญ่พบว่าทั้งสองปัจจัยดังกล่าวมักเกิดควบคู่กันและมีความเชื่อมโยงกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Brown, 1997; Douglas, 2003; Hughes et al., 2017) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่สามารถส่งผลให้ปะการังเกิดความเครียดและเกิดการฟอกขาวได้เช่นกัน แต่อาจเกิดในพื้นที่และส่งผลกระทบต่อปะการังไม่มากนัก ได้แก่ ความเค็มน้ำทะเลลดลง ปริมาณตะกอน ความเข้มข้นของสารอาหารสูง เป็นต้น (Baird et al., 2008)

กลไกของปะการังฟอกขาวเกิดจากปะการังได้รับความเครียดจากปัจจัยภายนอกที่กล่าวไปข้างต้น ความเครียดดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลี โดยสร้างความเสียหายที่บริเวณ D1 Protein ใน PS II, thylakoid membrane และวัฏจักรแคลวิน (Calvin cycle) และการเพิ่มขึ้นของ Reactive Oxygen Species (ROS) ส่งผลให้มีการผลิต Reactive Oxygen Species (ROS) ในปริมาณมากเกินไป โดยสภาวะปกติแล้วซูแซนเทลลีมีการผลิต ROS และมีกระบวนการกำจัดด้วยการเปลี่ยนรูปเป็น peroxide และ oxygen ตามลำดับ จากนั้นถูกขับไปยังเซลล์ของปะการัง แต่ในสภาวะเครียดปฏิกิริยาการกำจัด ROS มีประสิทธิภาพลดลง ในขณะที่ oxygen ถูกผลิตได้ในปริมาณน้อยมาก ทำให้ ROS แพร่กระจายในเนื้อเยื่อปะการังจนทำให้เซลล์ของปะการังถูกทำลายและเกิดการตายของเซลล์ (Venn et al., 2008) (ภาพที่ 3) ในระหว่างที่เซลล์



ปะการังและซูแซนเทลลีถูกทำลายนั้น ภายในยังมีกลไกซ่อมแซมเซลล์ เช่น Fluorescent Pigment (FP) และ Mycosporine Amino Acid (MAA) ที่ช่วยลดความรุนแรงและความเสียหายจากภาวะเครียดได้ (Baird et al., 2008; Weis, 2008) แต่หากความเครียดนั้นเกิดต่อเนื่องกันเป็นเวลานานจนเกินขีดจำกัดที่สามารถทนได้ ปะการังจะแสดงอาการสูญเสียซูแซนเทลลี ทำให้สีของเนื้อเยื่อปะการังซีดลง (discolouration) ลักษณะดังกล่าวจึงถูกเรียกว่า “ปะการังฟอกขาว”



ภาพที่ 3 แสดงกระบวนการฟอกขาวภายใน chloroplast ของซูแซนเทลลี (Fournier, 2013)

นอกจากนี้การเกิดการฟอกขาวส่งผลต่อกลไกภายในเซลล์ของซูแซนเทลลี เช่น ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่อยู่ในเนื้อเยื่อของปะการังลดลง และแสดงออกมาภายนอกเซลล์ เช่น สีของเนื้อเยื่อปะการังพบว่าเนื้อเยื่อมีสีซีดลงหรืออ่อนแอลง รวมถึงส่งผลต่อการเจริญเติบโตของปะการังอีกด้วย ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าปะการังสามารถเจริญเติบโตได้โดยการเพิ่มขนาดของโครงสร้างที่เกิดจากการสะสมของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) ผ่านปฏิกิริยาเคมี (2HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + Ca<sup>2+</sup> → CaCO<sub>3</sub> + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O) ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเยื่อโพลิปปะการัง (Khaled bin Sultan Living Oceans Foundation, 2014) เมื่อเกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงซึ่งจะเกิดในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ความแปรปรวนของการสะสมแคลเซียมคาร์บอเนตมีความสัมพันธ์กับ

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่เกี่ยวข้องกับอัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอนในระบบการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งเป็นตัวขับเคลื่อนหลักและมีหน้าที่ที่สำคัญของการสร้างแคลเซียมคาร์บอเนต เช่น กระบวนการปั๊ม  $H^+$  ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง อีกทั้งยังเกี่ยวข้องกับการยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ส่งผลต่อการสะสมแคลเซียมคาร์บอเนต และกระบวนการหายใจ (Buapet & Sinutok, 2021) แต่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเซลล์ที่นำไปสู่การสะสมความเครียด เช่น ความเครียดจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ น้ำทะเล การลดลงของค่า pH ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และน้ำทะเล ( $H_2O$ ) เกิดเป็นกรดคาร์บอนิก ( $H_2CO_3$ ) ส่งผลให้ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ในน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้น และค่า pH มีความเป็นกรดมากขึ้น และจากงานวิจัยของ Sinutok และคณะ (2011) Woods Hole Oceanographic Institution (2018) พบว่าค่า pH ที่ลดลงส่งผลให้เกิดของการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้การเจริญเติบโตของปะการังลดลง การยับยั้งการสร้างแคลเซียมคาร์บอเนต และทำให้กิ่งปะการังเปราะบาง แตกหักง่าย และน้ำหนักของปะการังลดลง

#### 1.2.5. ความสามารถในการปรับตัวของปะการังและซูแซนเทลลี

เมื่อปะการังและซูแซนเทลลีได้รับผลกระทบจากภัยคุกคามต่าง ๆ ทั้งจากธรรมชาติหรือกิจกรรมของมนุษย์ (Hughes et al., 2017; IUCN, 2008) ทำให้เกิดภาวะเครียดและแสดงอาการฟอกขาว การปรับตัวเพื่อเพิ่มโอกาสในการอยู่รอดจึงเป็นกลไกที่จำเป็นในการดำรงเผ่าพันธุ์ท่ามกลางสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง สมมติฐานการปรับตัวต่อการฟอกขาว (Adaptive Bleaching Hypothesis) โดย Weis (2008) กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงพลวัตของสาหร่ายซูแซนเทลลีที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสังคมทั้งในเชิงเวลาและพื้นที่ รวมถึงความจำเพาะ (specific) ระหว่างชนิดปะการังและสาหร่ายซูแซนเทลลีด้วย (Fautin & Buddemeier, 2004)

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าความสามารถในการปรับตัวเกี่ยวข้องทั้งกลไกภายในและภายนอกของปะการังและซูแซนเทลลี ได้แก่ กลไกการป้องกันจากแสง (photoprotection mechanism) เกิดจากการเปลี่ยนรงควัตถุในซูแซนเทลลีจาก diadinoxanthin ไปเป็น diatoxanthin (คล้ายคลึงกับ xanthophylls) ที่สามารถปลดปล่อยพลังงานกระตุ้นใน light harvesting บริเวณ reaction centers กระจายออกมาในรูปแบบความร้อนที่เป็น non-photochemical quenching ดังนั้นจึงสามารถช่วยป้องกันหรือต่อต้านการถูกทำลายของเนื้อเยื่อและ oxidative damage ได้ (Gorbunov et al., 2001; Venn et al., 2008) กลไกยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสง (photoinhibition) เป็นกลไกทางสรีรวิทยาที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการ

สังเคราะห์ด้วยแสง โดยพบว่าปะการังที่อาศัยอยู่บริเวณน้ำตื้น (shallow water) เกิดกระบวนการยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสงประมาณ 10% หรือ 20% บริเวณ reaction centers ตลอดเวลา (Gorbunov et al., 2001) โดยทั่วไปกลไกการป้องกันจากแสง (photoprotection mechanism) และกลไกที่ยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสง (photoinhibition) มักเกิดพร้อมกันและสมดุลกัน (Franklin et al., 1996) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงระบบการซ่อมแซมภายในเซลล์จากการเพิ่มขึ้นของ Mycosporine Amino Acid (MAA) ที่ช่วยให้ซูแซนเทลลีต้านทาน (resistance) ต่อแสงได้มากขึ้น รวมไปถึงการเกี่ยวพันต่อปะการังโดยการถ่ายโอน MAA และออกซิเจนจากซูแซนเทลลีไปสู่เนื้อเยื่อปะการัง และปะการังมีการถ่ายโอนคาร์บอนไดร็อกไซด์และแอมโมเนียให้แก่ซูแซนเทลลี เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงและกระบวนการเผาผลาญพลังงาน (Allemand & Furla, 2018; Baird et al., 2008)

สำหรับกลไกภายนอกมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางสังคมของซูแซนเทลลีภายในโคโลนีของปะการังที่แสดงถึงการแข่งขันกันระหว่าง clade (Baker, 2001) เช่น การปรับตัวตามความเข้มของแสงในระดับความลึกต่าง ๆ โดยบริเวณน้ำตื้นจะพบชุมชนของซูแซนเทลลีหลากหลายกว่าบริเวณน้ำลึกทั้งในบริเวณทะเลแคริบเบียนและแปซิฟิก (Baker, 2003; Bongaerts et al., 2015) รวมถึงความสามารถของปะการังเองภายใต้สภาวะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำทะเลและแสงหรือรังสี ส่งผลให้เกิดการรับซูแซนเทลลีชนิดใหม่ หรือเปลี่ยนถ่ายบางส่วนเพื่อทำให้ปะการังฟื้นตัวได้อย่างรวดเร็ว (Gorbunov et al., 2001; Bongaerts et al., 2015) งานวิจัยของ Finney et al. (2010) และ Lien et al. (2013) ได้สนับสนุนกรณีความทนทานของซูแซนเทลลีต่อการเปลี่ยนแปลงทางสิ่งแวดล้อม เช่น ปะการังที่อยู่บริเวณแหล่งท่องเที่ยวหรือโรงงานอุตสาหกรรมใกล้ชายฝั่ง พื้นที่ที่มีแร่ธาตุและตะกอนสูง รวมไปถึงพื้นที่ที่อุณหภูมิที่สูงกว่าปกติ พบว่ามีองค์ประกอบของซูแซนเทลลี clade D เป็นชนิดเด่นที่สามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมดังกล่าวได้

จากเหตุการณ์การฟอกขาวทั่วโลกที่มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ทำให้ทราบว่าปะการังมีความต้านทานในด้านกลไกทางสรีรวิทยาที่มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงและสามารถอยู่รอดได้ เช่น *Acropora hyacinthus* เป็นปะการังประจำถิ่น (native habitat) และเป็นปะการังที่มีความเปราะบางต่อความเครียดจากสิ่งแวดล้อม ได้มีการทดลองโดยเก็บตัวอย่างปะการังในพื้นที่ที่มีความแปรปรวนของกระแสน้ำและอุณหภูมิประมาณ 30 – 35°C จากบริเวณอุทยานแห่งชาติอเมริกัน ซามัว เกาะโอฟู มหาสมุทรแปซิฟิก เพื่อนำมาทดสอบการต้านทานต่อความร้อน โดยกำหนดอุณหภูมิสูงสุดที่ 29 – 34°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และทิ้งปะการังไว้ที่ 34°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าปะการังมีความต้านทานต่ออุณหภูมิ Palumbi และคณะ (2014) และ Lesser และ

Farrell (2004) ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของรงสีและอุณหภูมิของ *Monostrea faveolata* ได้ทำการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 26 – 32°C และลดอุณหภูมิลงจนปะการังเข้าสู่ช่วงฟื้นตัว (recovery) และวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงพบว่า ในช่วงแรกของการทดลองประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงจนเกิดการฟอกขาว และเมื่อลดอุณหภูมิลงจนปะการังเข้าสู่ช่วงฟื้นตัว ปะการังมีการปรับตัวโดยค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้น

### 1.2.6. Pulse Amplitude Modulated (PAM) fluorometry

Pulse Amplitude Modulated (PAM) fluorometry เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงจากการเรืองแสงของคลอโรฟิลล์ในสิ่งมีชีวิตที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ (Beereil et al., 1998; Caroselli et al., 2015) และนิยมใช้ในการวัดการตอบสนองต่อสภาวะแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต ปัจจุบันได้มีการพัฒนาโดยบริษัท The Heinz Walz GmbH ประเทศเยอรมนี และมีการใช้เครื่องมืออย่างแพร่หลายทั่วโลก ทั้งแบบใช้พกพาภาคพื้นดินและใต้น้ำ ได้แก่ PHYTO-PAM-II สามารถวิเคราะห์การสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช หรือกลุ่มสาหร่ายและแพลงก์ตอนที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ เช่น สาหร่ายสีเขียว (green algae), cyanobacteria, diatom, dinoflagellate เป็นต้น โดยใช้หลายความยาวคลื่น กระตุ้น JUNIOR-PAM และ MINI-PAM-II มีหลักการเดียวกัน แต่พัฒนาเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการปฏิบัติงานมากขึ้น DIVING-PAM-II เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ใต้น้ำได้ที่สะดวกในการเก็บข้อมูลภาคสนามสำหรับการวิเคราะห์ใต้น้ำ เช่น หญ้าทะเล และปะการัง ในการวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงจำเป็นต้องใช้ควบคู่กับโปรแกรม WinControl Software ปัจจุบันมีการใช้เครื่องมือประเภทนี้ในงานวิจัยปะการังด้านต่าง ๆ เช่น ประเมินและติดตามสุขภาพปะการัง ตรวจสอบประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของปะการัง เมื่อได้รับความเครียดจากสิ่งแวดล้อมทั้งในภาคสนามและห้องปฏิบัติการ (Beer et al., 1998; Jones et al., 2000) เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวจะไม่ทำลายตัวอย่าง และมีความรวดเร็วในการวัดพารามิเตอร์ที่สนใจ (Maxwell & Johnson, 2000; Belshe et al., 2007)

โดยทั่วไปรงสีต่าง ๆ เช่น carotenoid, chlorophyll *a* และ *b* จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม มีการเกาะตัวอยู่กับโปรตีนหลายชนิดบนไทลาคอยด์ ซึ่งกลุ่มของโปรตีนบนไทลาคอยด์ที่มีรงสีอยู่ประกอบอยู่ด้วยเรียกว่า ระบบแสง (photosystem) ส่วนใหญ่มีระบบแสง 2 ระบบคือ ระบบแสงที่หนึ่ง (photosystem I) และระบบแสงที่สอง (photosystem II) ซึ่งระบบแสงทั้งสองจะทำหน้าที่ร่วมกัน เพื่อให้สามารถเกิดการส่งพลังงานในการสร้าง ATP และ NADPH หลักการการวิเคราะห์

ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงเกี่ยวข้องกับการดูดกลืนพลังงานแสงของคลอโรฟิลล์ และเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมี (จิริสย์ เจนพานิซย์, 2552) ซึ่งจะใช้การวัดปริมาณ chlorophyll fluorescence ในระบบแสงที่สอง ดังนี้ เมื่อระบบแสงได้รับพลังงาน โดยการดูดกลืนแสงของรงควัตถุที่อยู่ในระบบแสง จะมีการส่งถ่ายพลังงานที่ได้รับสู่ศูนย์กลางปฏิกิริยา (reaction center) กล่าวคือ โมเลกุลของ chlorophyll *a* ได้รับพลังงานในช่วงคลื่นที่พอเหมาะ ทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลถูกกระตุ้นให้อยู่ในชั้นของระดับพลังงานที่สูงขึ้น (excited state) พร้อมทั้งจะถ่ายทอดอิเล็กตรอนนี้ให้กับตัวรับอิเล็กตรอนตัวถัดไป ทั้งนี้การใช้พลังงานในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง พลังงานจะถูกปล่อยออกมาได้ 3 รูปแบบ ได้แก่

- 1.) พลังงานที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนในสถานะที่ถูกกระตุ้น (excited state) ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photochemistry) เป็นการเคลื่อนย้ายพลังงานของรงควัตถุภายในคลอโรพลาสต์โดยตรง

- 2.) fluorescence เป็นการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของการเรืองแสงซึ่งจะเกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนที่ดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 680 นาโนเมตร

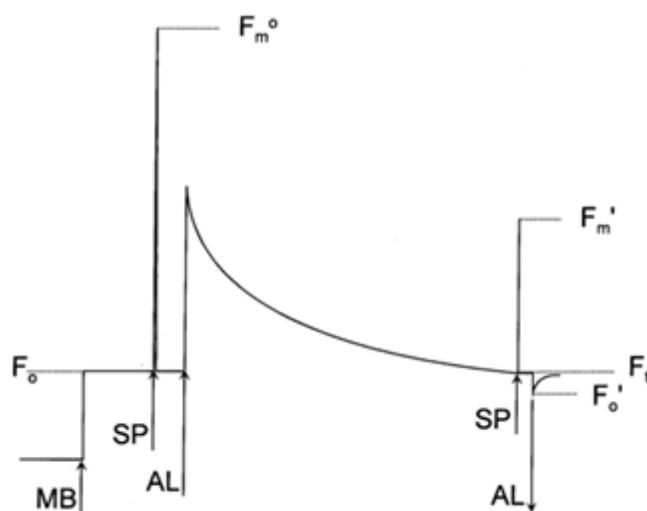
- 3.) ความร้อนเกิดได้ 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่อิเล็กตรอนกลับลงมาสู่สถานะถูกกระตุ้น (excited state) ที่มีระดับพลังงานต่ำที่สุด และช่วงที่อิเล็กตรอนกลับสู่สถานะพื้น (ground state)

กระบวนการดังกล่าวเกิดในลักษณะสวนทางกัน โดยหากกระบวนการใดเพิ่มประสิทธิภาพจะทำให้อีก 2 กระบวนการที่เหลือลดลงในสภาวะที่ศูนย์กลางปฏิกิริยาปิด พลังงานแสงที่ยังได้รับกลายเป็นส่วนเกิน ซึ่งจะต้องถูกกำจัดทิ้งในรูปความร้อน และแผ่เป็นรังสี fluorescence จึงสามารถวัดระดับ fluorescence ที่สูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามของสภาวะที่ศูนย์กลางปฏิกิริยาเปิด สามารถเปิดรับอิเล็กตรอนได้อีก fluorescence จะลดลง (Maxwell & Johnson, 2000; Walz, 2007) ซึ่งการลดระดับของ fluorescence ที่เป็นการลดโดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เรียกว่า photochemical quenching (qP) ส่วนการลดโดยวิธีอื่น ๆ เช่น การปลดปล่อยสู่ในรูปของความร้อน เรียกว่า non-photochemical quenching (NPQ) (จินดารัตน์ วัดจินดา, 2549)

หลักการของ Pulse Amplitude Modulated (PAM) สามารถวัด chlorophyll *a* fluorescence โดยใช้ fluorometer (Maxwell & Johnson, 2000; Ralph et al., 2005) การประมาณค่าการสังเคราะห์ด้วยแสงขึ้นอยู่กับการวัดวิเคราะห์ค่า saturation pulse quenching และการเลือกค่าสัญญาณการเรืองแสง (amplification of a fluorescence signal) ซึ่งเป็นค่าของแสงแต่ละค่าที่เรืองแสงออกไป (Xianzhe, 2012) โดยเครื่องมือจะยิงแสงที่ความเข้มแสงต่ำก่อน ซึ่งจะเกิดค่า  $F_0$  (dark adapted minimum fluorescence) หลังจากนั้นยิงแสงที่ความเข้มแสงสูงมาก

ขึ้น เพื่อให้มีการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจันศูนย์กลางปฏิกิริยาของระบบแสงที่สองที่อยู่ในสภาพปิดหมด ค่าที่ได้ก็คือ  $F_m$  (light adapted maximum fluorescence) และค่าของผลต่างของ  $F_0$  และ  $F_m$  คือ  $F_v$  (variable fluorescence;  $F_v = F_m - F_0$ ) ซึ่งสามารถวัดพารามิเตอร์ ได้แก่ Effective Quantum Yield of PSII ( $\Delta F/F_m'$ ) และ Maximum Quantum Yield of PSII ( $F_v/F_m$ ) ดังภาพที่ 4 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อเครื่องยิงแสงออกไปค่าแรกที่แสดงก็คือ  $F_0$  ต่อจากนั้นเครื่องก็จะยิงแสงอีกครั้งจะได้ค่า maximum fluorescence ( $F_m$ ) และทำให้ค่า actinic light (AL) สูงจากนั้นจะถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงจนกระทั่งเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ทำการยิงแสงอีกครั้ง (SP) จะได้ค่า maximum fluorescence ( $F_m'$ ) และทำให้ค่า actinic light (AL) ต่ำลง และเกิดค่า  $F_t$  (Maxwell & Johnson, 2000) นอกจากนี้พลังงานแสงจะถูกดูดซับโดยการเก็บเกี่ยวแสง (light harvesting complex) ในระบบแสงที่สองที่ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน (Maxwell & Johnson, 2000) ได้แก่

- 1.) การถ่ายโอนไปยังศูนย์กลางปฏิกิริยา (reaction center) และเกิดการขับเคลื่อนเพื่อสังเคราะห์ด้วยแสง
- 2.) เกิดการกระจายของของโมเลกุลในรูปแบบของการไม่ใช้สารเคมี non-photochemical quenching (NPQ) ซึ่งก็คือความร้อน
- 3.) ปลดปล่อยความยาวคลื่นอีกครั้งจาก chlorophyll fluorescence

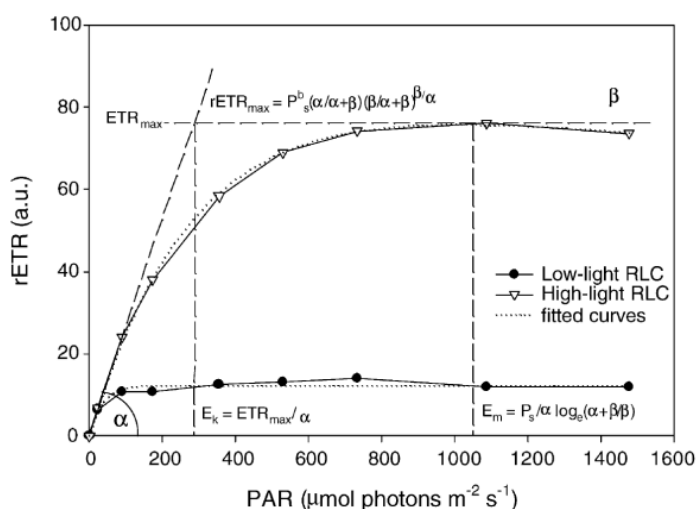


ภาพที่ 4 ขั้นตอนการเกิดตัวแปรต่าง ๆ ของการวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (Maxwell & Johnson, 2000)

Maximum Quantum Yield of PSII ( $F_v/F_m$ ) แสดงถึงความสามารถของระบบแสงที่สองในคลอโรพลาสต์ที่ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์และถ่ายทอดไปสู่ระบบแสงที่สอง และเป็นประสิทธิภาพสูงสุดที่แสงถูกดูดซับโดยระบบแสงที่สอง โดยใช้กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ของแสงเพื่อทำปฏิกิริยาเคมี (photochemistry) และประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของปฏิกิริยาแสง (light reaction) ค่านี้จะเป็นค่าที่บ่งชี้ความเครียดของสิ่งมีชีวิต (Caroselli, Falini, Goffredo, Dubinsky, & Levy, 2015; Maxwell & Johnson, 2000) สำหรับการวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงจำเป็นต้องทำ dark-adaptation หรือวัดในช่วงเวลาที่ตัวอย่างผ่านการอยู่ในที่มืด เช่น ช่วงเวลา 05.00 น. ซึ่งจะทำให้ศูนย์กลางของปฏิกิริยาในระบบแสงที่สอง (reaction center of photosystem II) เปิดและได้ผ่อนคลาย (Belshe, Durako, & Blum, 2007)

Effective Quantum Yield of PSII ( $\Delta F/F_m'$ ) เป็นการวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงภายใต้ภาวะแสงปกติซึ่งเป็นค่าสัดส่วนการดูดกลืนพลังงานแสง ตั้งแต่การเริ่มต้นถึงสิ้นสุดของการใช้ photochemistry อีกทั้ง Effective Quantum Yield of PSII ( $\Delta F/F_m'$ ) ยังเป็นสัดส่วนของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนแสงโดยคลอโรฟิลล์ และส่งต่อไปยังระบบแสงที่สองเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีใน สภาพที่แสงปกติ นอกจากนี้ค่า Effective Quantum Yield of PSII ( $\Delta F/F_m'$ ) ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงความเข้มแสงที่มีช่วงเวลาห่างเท่า ๆ กัน นำไปสู่การสร้าง Rapid Light Curve (RLCs) ซึ่งเป็นตัวกำหนดความสามารถในการสังเคราะห์ด้วยแสงที่แสดงออกในลักษณะของความอิ่มตัวของการขนถ่ายอิเล็กตรอน (saturation of electron transport) ที่อาศัยช่วงความเข้มแสงที่ต่ำสุดไปจนถึงช่วงความเข้มแสงที่สูงที่สุด โดยยิงแสงที่มีความเข้มแสงสูง (0.8 s Saturating pulse;  $>4500 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) ดังนั้นจึงสามารถนำไปคำนวณอัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอน (relative Electron Transport Rate: rETR) และเกิดจากการแผ่รังสีของความเข้มแสงที่ต่ำที่สุดจนถึงค่าความเข้มแสงที่สูงสุด (Photosynthetic Active Radiation: PAR) ที่มีหน่วยเป็น  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  รวมถึงค่า maximum relative Electron Transport Rate ( $rETR_{\text{max}}$ ), minimum saturating irradiance ( $I_k$  หรือ  $E_k$ ) และ initial slope ( $\alpha$ ) (Belshe et al., 2007; Maxwell & Johnson, 2000; Ralph & Gademann, 2005) (ภาพที่ 5) ซึ่งค่า maximum relative electron transport rate ( $rETR_{\text{max}}$ ) เป็นอัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่าความเข้มแสงถึงค่าหนึ่งที่สูงเกิดกว่าจะรับได้ ทำให้อัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอนเกิดการอิ่มตัวและลดลง เพราะเกิดการยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสง ค่า minimum saturating irradiance ( $I_k$  หรือ  $E_k$ ) เป็นจุดเริ่มต้นของเส้นโค้งซึ่งความชันเชิงเส้นของเส้นโค้งตัดกับเส้นแนวนอนกับค่า ( $rETR_{\text{max}}$ ) และค่า  $I_k$  ก็ลดลงด้วยเช่นเดียวกันเมื่อค่าความเข้มแสงถึงค่าหนึ่งที่สูงเกิดกว่าจะรับได้ และค่า initial slope ( $\alpha$ ) เกิดขึ้น

จากค่าเริ่มต้นเมื่อเกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและค่า initial slope ( $\alpha$ ) จะแปรผกผันกับค่า  $rETR_{max}$  และ  $I_k$  โดยดัชนีดังกล่าวถูกใช้เป็นตัวกำหนดลักษณะการปรับตัวของสิ่งมีชีวิตที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้



ภาพที่ 5 ผลต่อความเข้มแสงต่าง ๆ ต่อ Rapid Light Curve (RLCs) สภาพแวดล้อมแสงน้อย (วงกลมสีดำ) และสภาพแวดล้อมที่มีแสงมาก (สามเหลี่ยม) (Ralph & Gademann, 2005)

### 1.3. คำถามวิจัย

1.3.1. ปะการังและซูแซนเทลลีที่มาจากสภาพแวดล้อมต่างกันได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิและแสงแตกต่างกันหรือไม่

1.3.2. ปะการังและซูแซนเทลลีที่มาจากสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน มีการตอบสนองทางสรีรวิทยาแตกต่างกันอย่างไร

### 1.4. สมมติฐาน

1.4.1. ปะการังและซูแซนเทลลีที่มาจากสภาพแวดล้อมแตกต่างกันจะได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิและแสงที่แตกต่างกัน

1.4.2. ปะการังและซูแซนเทลลีที่มาจากสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน มีการตอบสนองทางสรีรวิทยาแตกต่างกัน



### 1.5. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.5.1. ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและแสงต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลีที่มาจากสภาพแวดล้อมต่างกัน

1.5.2. ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและแสงต่อการเจริญเติบโตของปะการังที่มาจากสภาพแวดล้อมต่างกัน

1.5.3. ศึกษาแนวโน้มการฟื้นตัวของปะการัง เมื่อได้รับความเครียดจากแสงและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

### 1.6. ขอบเขตงานวิจัย

พื้นที่ศึกษาบริเวณแนวปะการังแหลมพันวา บริเวณหน้าศูนย์วิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งทะเลอันดามันและด้านตะวันตกของเกาะไม้ท่อน โดยคัดเลือกและเก็บตัวอย่างปะการังชนิด *Pocillopora acuta* จากแนวปะการังชันลาดชัน (reef slope) และทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินการตอบสนองของปะการังต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม

### 1.7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

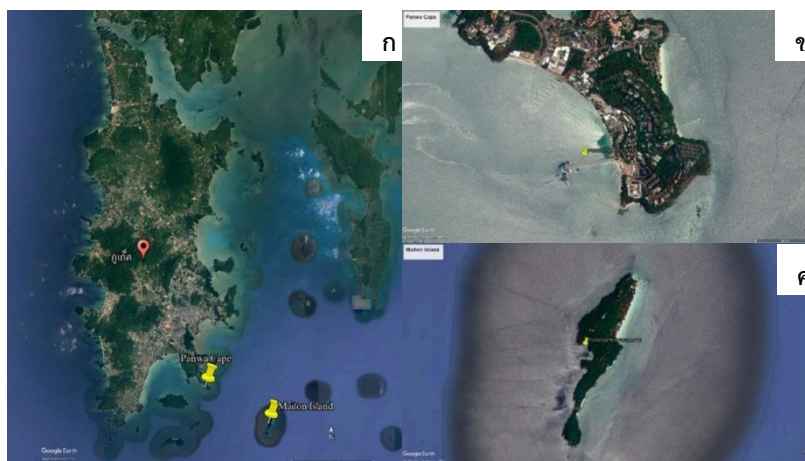
แนวโน้มการฟื้นตัวของปะการังและซูแซนเทลลีที่มาจากสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน โดยประเมินจากการตอบสนองและการฟื้นตัวของปะการังและซูแซนเทลลี เมื่อได้รับผลกระทบของความเครียดจากอุณหภูมิและแสงที่เพิ่มขึ้น และนำองค์ความรู้ที่ได้ไปบูรณาการกับแนวทางการบริหารจัดการแนวปะการังในเชิงการป้องกัน บรรเทา และการรับมือกับสถานการณ์ปะการังฟอกขาวในอนาคต และการส่งเสริมการอนุรักษ์และฟื้นฟูแนวปะการัง

## บทที่ 2

### วิธีการวิจัย (Research Methodology)

#### 2.1. การคัดเลือกพื้นที่ศึกษา

สำรวจพื้นที่บริเวณแนวปะการังจังหวัดภูเก็ตในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 ภูเก็ตเป็นจังหวัดที่ติดชายฝั่งทะเลและมีกิจกรรมของมนุษย์เป็นจำนวนมาก ทำให้มีการพัฒนาชายฝั่งและสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ มากมาย เหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบกับแนวปะการัง ประกอบกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของปะการังและนำไปสู่การเกิดการฟอกขาว โดยได้เลือกพื้นที่ศึกษา 2 พื้นที่ ได้แก่ แนวปะการังบริเวณแหลมพันวา บริเวณหน้าศูนย์วิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งทะเลอันดามัน ( $7^{\circ}48'6.26''N$ ;  $98^{\circ}24'23.75''E$ ) และแนวปะการังบริเวณด้านตะวันตกของเกาะไม้ท่อน ( $7^{\circ}45'43.94''N$ ;  $98^{\circ}28'35.37''E$ ) พร้อมทั้งเก็บข้อมูลคุณภาพน้ำทางกายภาพ (ตารางที่ 1) และพบว่าทั้งสองพื้นที่ศึกษามีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งคุณภาพน้ำและกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ โดยแนวปะการังบริเวณแหลมพันวาเป็นพื้นที่ที่อยู่ใกล้ชายฝั่งที่มีการพัฒนาชายฝั่ง ทั้งแหล่งท่องเที่ยวและท่าเรือ ทำให้แนวปะการังบริเวณแหลมพันวามีสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เช่น การไหลบ่าของน้ำจืด ปริมาณตะกอนสูงและน้ำขุ่น (Yucharoen et al., 2013) แร่ธาตุต่าง ๆ ไหลลงมายังแนวปะการัง (ภาพที่ 5 ข.) ซึ่งตรงกันข้ามกับแนวปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนที่อยู่ห่างจากแผ่นดินใหญ่ของภูเก็ตประมาณ 8 กิโลเมตร ซึ่งมีลักษณะเป็นแนวปะการังรอบเกาะที่น้ำทะเลค่อนข้างใส (Thongtham & Chansang, 2008) และเกิดการรบกวนจากกิจกรรมของมนุษย์น้อยกว่าแนวปะการังบริเวณแหลมพันวา (ภาพที่ 6 ค.)



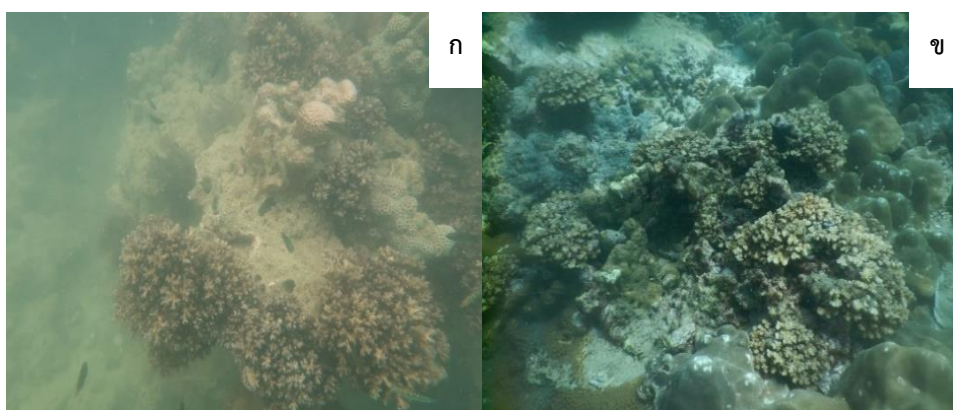
ภาพที่ 6 ก. พื้นที่ศึกษาในจังหวัดภูเก็ต ข. แนวปะการังแหลมพันวา ค. แนวปะการังเกาะไม้ท่อน

ตารางที่ 1 ข้อมูลคุณภาพน้ำ (ค่าเฉลี่ย  $\pm$  ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) วัดจากพื้นที่ศึกษาแนวปะการังเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา

ปัจจัยคุณภาพน้ำ	เกาะไม้ท่อน	แหลมพันวา
อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$28.09 \pm 0.10$	$28.17 \pm 0.09$
ความเค็ม (ppt)	$32.73 \pm 0.01$	$32.69 \pm 0.05$
ความเป็นกรด - ด่าง	$8.79 \pm 0.10$	$7.96 \pm 0.05$
ออกซิเจนละลายน้ำ ( $\text{mg l}^{-1}$ )	$5.62 \pm 0.05$	$5.61 \pm 0.13$
ความโปร่งใส (m)	$6.25 \pm 0.25$	$3.20 \pm 0.70$
ความเข้มแสง ( $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	$483.25 \pm 16.73$	$49.50 \pm 4.75$
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ( $\text{mg l}^{-1}$ )	$31,634.33 \pm 8.65$	$32,597.67 \pm 36.86$
สารแขวนลอยทั้งหมด ( $\text{mg l}^{-1}$ )	$28.93 \pm 1.29$	$33.55 \pm 0.68$
คลอโรฟิลล์ ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	$0.13 \pm 0.06$	$0.25 \pm 0.03$
ไนไตรท์ ( $\mu\text{g-atm N-NO}_2 \text{l}^{-1}$ )	$0.07 \pm 0.01$	$0.04 \pm 0.01$
ไนเตรต ( $\mu\text{g-atm N-NO}_3 \text{l}^{-1}$ )	$0.48 \pm 0.11$	$0.41 \pm 0.05$
แอมโมเนีย ( $\mu\text{g-atm N-NH}_3 \text{l}^{-1}$ )	$1.08 \pm 0.13$	$2.48 \pm 0.09$
ฟอสเฟต ( $\mu\text{g-atm P-PO}_4 \text{l}^{-1}$ )	$0.23 \pm 0.14$	$0.49 \pm 0.02$

## 2.2. การเก็บตัวอย่างปะการังจากธรรมชาติ

คัดเลือกและเก็บตัวอย่างปะการังชนิด *P. acuta* (จำแนกโดยเทคนิคทางชีวโมเลกุลอ้างอิง Nakajima et al., 2017) จากแนวปะการังชันลาดชัน (reef slope) ของทั้งสองพื้นที่ศึกษาที่มีความลึกประมาณ 6 – 10 ม. (ภาพที่ 7) ที่มีสุขภาพดี โดยใช้แผนภูมิสุขภาพปะการัง (coral health chart) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการประเมินและติดตามสุขภาพของปะการังที่ขึ้นอยู่กับสีที่แท้จริงของปะการังที่มีความสัมพันธ์กับรงควัตถุที่อยู่ภายในซูแซนเทลลี (Siebeck et al., 2006)



ภาพที่ 7 แสดงปะการังชนิด *P. acuta* ที่มาจากพื้นที่ศึกษา ได้แก่ ก. แนวปะการังบริเวณแหลมพันวา ข. แนวปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน

## 2.3. การเตรียมตู้สำหรับการปรับตัวของปะการัง

เตรียมตู้ขนาด 250 ลิตร จำนวน 1 ตู้ พร้อมด้วยอุปกรณ์สำหรับหมუნเวียนน้ำทะเล (ปั้มน้ำ) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ อุปกรณ์การกรองของเสีย (แบบหยาบและแบบละเอียด) และน้ำทะเลที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน และควบคุมสภาพแวดล้อมภายในตู้ให้เลียนแบบตามธรรมชาติมากที่สุด โดยกำหนดเงื่อนไขในตู้ปรับตัวของปะการัง ได้แก่ อุณหภูมิ 27°C (อ้างอิงค่าเฉลี่ยระยะยาวของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณเกาะภูเก็ตของ Yucharoen et al., 2021) ความเค็ม 32 ppt ความเป็นกรดต่าง 8.3 ระดับความเข้มแสง 150  $\mu\text{mol photons m}^{-1}\text{s}^{-1}$  และรอบแสงที่มีแสง:มืด เปิดและปิดไฟอย่างละ 12 ชั่วโมง จากนั้นนำปะการังที่คัดเลือกมาจากพื้นที่ศึกษามาใส่ในตู้ขนาด 250 ลิตร เพื่อให้ปะการังได้ใช้เวลาในการปรับตัวประมาณ 2 สัปดาห์ ก่อนเริ่มดำเนินการทดลอง (ภาพที่ 8) นอกจากนี้มีการตรวจคุณภาพน้ำทะเลภายในตู้อย่างต่อเนื่องและปรับให้อยู่ในค่าที่เหมาะสม (ตารางที่ 2)



ภาพที่ 8 แสดงตู้ขนาด 250 ลิตร สำหรับการปรับตัวของปะการัง

ตารางที่ 2 คุณภาพน้ำทะเลในตู้ทดลอง

ปัจจัย	ค่าที่วัดได้
สภาพต่าง	8 – 12.6 dKH หรือ 90 – 180 mg l <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>
แคลเซียม (Ca)	440 ppm
แมกนีเซียม (Mg)	1,390 ppm
ไนเตรต (NO <sub>3</sub> )	0 ≤ X ≤ 0.3 ppm
ฟอสเฟส (PO <sub>4</sub> )	< 0.01 ppm

ที่มา: สหภาพ ดอกแก้ว และพงษ์เชษฐ พิชิตกุล (ม.ป.ป.); [www.aquaticamarine.com/knowledge-center](http://www.aquaticamarine.com/knowledge-center)

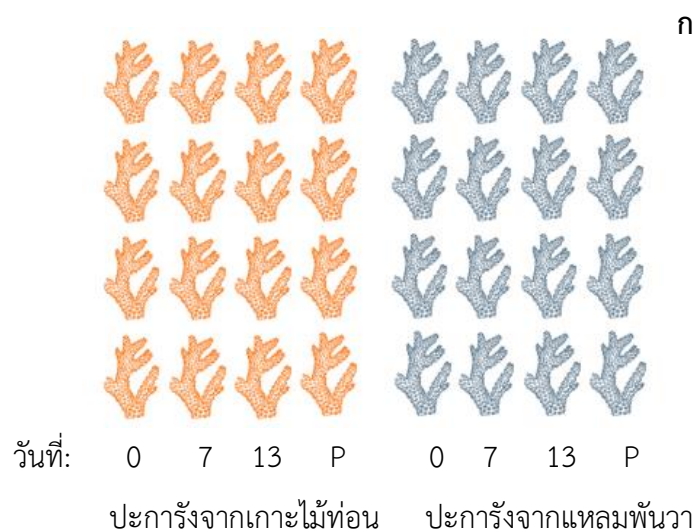
## 2.4. การออกแบบการทดลองที่ 1

2.4.1. การเตรียมตู้ทดลอง: เตรียมตู้ทดลองขนาด 70 ลิตร ก่อนเริ่มการทดลองประมาณ 2 สัปดาห์ โดยควบคุมปัจจัยของอุณหภูมิและความเข้มแสงที่แตกต่างกันจำนวน 4 ตู้การทดลองก่อนเริ่มการทดลอง (ภาพที่ 9)

<b>ATAL</b> อุณหภูมิ 27°C ความเข้มแสง 150 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$	<b>ATHL</b> อุณหภูมิ 27°C ความเข้มแสง 300 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$
<b>HTAL</b> อุณหภูมิ 33°C ความเข้มแสง 150 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$	<b>HTHL</b> อุณหภูมิ 33°C ความเข้มแสง 300 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$

ภาพที่ 9 แสดงตู้ทดลองขนาด 70 ลิตร จำนวน 4 ตู้ ที่ถูกควบคุมให้มีสภาวะของอุณหภูมิและความเข้มแสงที่แตกต่างกัน

**2.4.2. การเตรียมชิ้นส่วนปะการัง:** นำปะการังจากตู้ขนาด 250 ลิตร มาแบ่งชิ้นส่วนขนาดเล็กความยาวประมาณ 3 – 5 เซนติเมตร โดยใช้กรรไกรตัดกระดูกและจัดเรียงลงตู้ทดลอง ซึ่งในแต่ละตู้กำหนดให้มีชิ้นส่วนปะการังจากทั้งสองพื้นที่ศึกษา จำนวนชิ้นส่วนปะการัง ( $n = 4$ ) ในแต่ละตู้ถูกนำมาจาก 4 โคลนี จัดเรียงเป็น 4 แถว (ภาพที่ 10) สำหรับวัดอัตราการเจริญเติบโตของปะการังและประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (แถว P) และเก็บตัวอย่าง (destructive sampling) ไปวิเคราะห์ความหนาแน่นของซูแซนเทลลีและปริมาณรงควัตถุภายในเซลล์ 3 ช่วงเวลาในวันที่ 0, 7 และ 13





ภาพที่ 10 แสดง ก. การวางชิ้นส่วนปะการังในตู้ทดลองขนาด 70 ลิตร โดยมีชิ้นส่วนปะการังจากทั้งสองพื้นที่ศึกษา ข. การวางชิ้นส่วนปะการังในแต่ละตู้ทดลองที่มีสภาวะของอุณหภูมิและความเข้มแสงที่แตกต่างกัน

**2.4.3. การทดลองและการชักนำความเครียด:** เมื่อเตรียมชิ้นส่วนปะการังและวางตำแหน่งเรียบร้อยแล้ว ก่อนเริ่มดำเนินการทดลอง (วันที่ 0) กำหนดทุกตู้การทดลองให้มีอุณหภูมิ 27°C จากนั้นเมื่อเริ่มการทดลอง ได้แก่ วันที่ 1 ถึง วันที่ 7 ทำการปรับอุณหภูมิเพิ่มวันละ 1°C ตั้งแต่อุณหภูมิ 27°C จนถึง 33°C และวันที่ 8 ถึง วันที่ 13 ทำการลดอุณหภูมิวันละ 1°C ตั้งแต่อุณหภูมิ 33°C จนถึง 27°C ในชุดการทดลอง HTAL: High Temperature, Ambient Light (อุณหภูมิ 33°C ความเข้มแสง  $150 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) และ HTHL: High Temperature, High Light (อุณหภูมิ 33°C ความเข้มแสง  $300 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) ตามแผนการชักนำความเครียดของปะการัง (ตารางที่ 3) โดยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิวันละ 1°C เนื่องจากการฟอกขาวเป็นการตอบสนองที่ทำให้ปะการังและซูแซนเทลลีเกิดการเปลี่ยนแปลงกลไกภายในเซลล์และแสดงออกมาภายนอกเซลล์ และปรากฏการณ์ปะการังฟอกขาวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียง 1°C สามารถทำให้เกิดการฟอกขาวได้ (Heron et al., 2017) ด้วยเหตุผลนี้จึงเป็นที่มาของการออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบการตอบสนองของปะการังต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงและ/หรืออุณหภูมิ

ตารางที่ 3 แผนการทดลองการชักนำความเครียดแก่ปะการัง โดยการปรับอุณหภูมิแต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	อุณหภูมิในแต่ละวัน (°C)													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ATAL	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
ATHL	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
HTAL	27	28	29	30	31	32	33	33	32	31	30	29	28	27
HTHL	27	28	29	30	31	32	33	33	32	31	30	29	28	27

สัญลักษณ์ ATAL: อุณหภูมิ 27°C ความเข้มแสง 150  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$

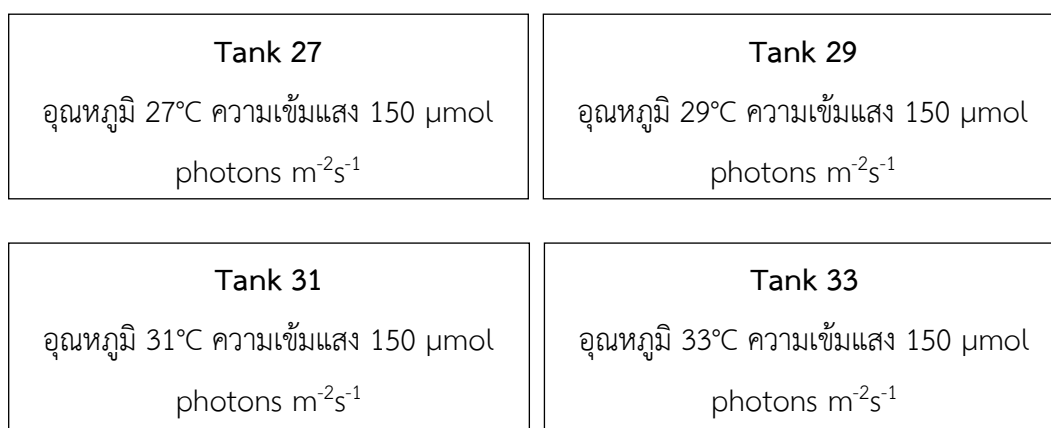
ATHL: อุณหภูมิ 27°C ความเข้มแสง 300  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$

HTAL: อุณหภูมิ 33°C ความเข้มแสง 150  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$

HTHL: อุณหภูมิ 33°C ความเข้มแสง 300  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$

## 2.5. การออกแบบการทดลองที่ 2

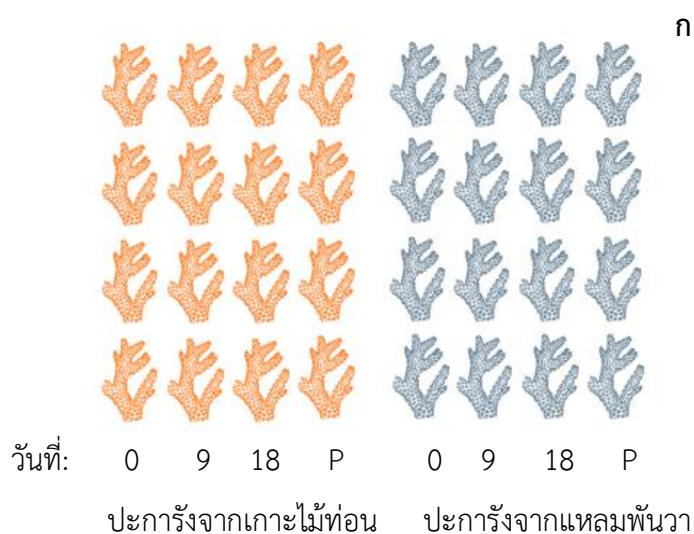
2.5.1. การเตรียมตู้ทดลอง: เตรียมตู้ทดลองขนาด 70 ลิตร ก่อนเริ่มการทดลองประมาณ 2 สัปดาห์ โดยควบคุมปัจจัยของอุณหภูมิและความเข้มแสงที่แตกต่างกันจำนวน 4 ตู้การทดลองก่อนเริ่มการทดลอง (ภาพที่ 11)



ภาพที่ 11 แสดงตู้ทดลองขนาด 70 ลิตร จำนวน 4 ตู้ ที่ถูกควบคุมปัจจัยของความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ต่างกัน



**2.5.2. การเตรียมชิ้นส่วนปะการัง:** นำปะการังจากตู้ขนาด 250 ลิตร มาแบ่งชิ้นส่วนขนาด เล็กความยาวประมาณ 3 – 5 เซนติเมตร โดยใช้กรรไกรตัดกระดูกและจัดเรียงลงตู้ทดลอง ซึ่งในแต่ละตู้กำหนดให้มีชิ้นส่วนปะการังจากทั้งสองพื้นที่ศึกษา จำนวนชิ้นส่วนปะการัง ( $n = 4$ ) ในแต่ละตู้ถูก นำมาจาก 4 โคโลนี จัดเรียงเป็น 4 แถว (ภาพที่ 12) สำหรับวัดอัตราการเจริญเติบโตของปะการังและ ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (แถว P) และเก็บตัวอย่าง (destructive sampling) ไป วิเคราะห์ความหนาแน่นของซูแซนเทลลีและปริมาณรงควัตถุภายในเซลล์ 3 ช่วงเวลาในวันที่ 0, 9 และ 18



ภาพที่ 12 แสดง ก. การวางชิ้นส่วนปะการังในตู้ทดลองขนาด 70 ลิตร โดยมีชิ้นส่วนปะการังจากทั้งสองพื้นที่ศึกษา ข. การวางชิ้นส่วนปะการังในแต่ละตู้ทดลองที่มีสภาวะของอุณหภูมิและความเข้มแสงที่แตกต่างกัน

**2.5.3. การทดลองและการชักนำความเครียด:** เมื่อเตรียมชิ้นส่วนปะการังและวางตำแหน่งเรียบร้อยแล้ว ก่อนเริ่มดำเนินการทดลอง (วันที่ 0) กำหนดทุกตู้การทดลองให้มีอุณหภูมิ 27°C จากนั้นเมื่อเริ่มการทดลอง โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงเครียด (stress phase) วันที่ 1 ถึง วันที่ 9 ที่อุณหภูมิ 27°C 29°C 31°C และ 33°C ตามลำดับ และช่วงฟื้นตัว (recovery phase) ได้แก่ วันที่ 10 ถึง วันที่ 18 ทำการลดอุณหภูมิทุกตู้การทดลองเป็นอุณหภูมิ 27°C (ตารางที่ 4) การให้อุณหภูมิแบบเพิ่มขึ้นเฉียบพลันของการทดลองนี้เนื่องจากต้องการหลีกเลี่ยงการเพิ่มอุณหภูมิทีละน้อย (gradual temperature stress) และสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของปะการังในช่วงฟื้นตัวได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

**ตารางที่ 4** แผนการทดลองการชักนำความเครียดแก่ปะการัง โดยการปรับอุณหภูมิแต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	อุณหภูมิในแต่ละวัน (°C)																		
	in	ช่วงเครียด (stress phase)									ช่วงฟื้นตัว (recovery phase)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
29	27	29	29	29	29	29	29	29	29	29	27	27	27	27	27	27	27	27	27
31	27	31	31	31	31	31	31	31	31	31	27	27	27	27	27	27	27	27	27
33	27	33	33	33	33	33	33	33	33	33	27	27	27	27	27	27	27	27	27

สัญลักษณ์ Tank 27: อุณหภูมิ 27°C ความเข้มแสง 150  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Tank 29: อุณหภูมิ 29°C ความเข้มแสง 150  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Tank 31: อุณหภูมิ 31°C ความเข้มแสง 150  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Tank 33: อุณหภูมิ 33°C ความเข้มแสง 150  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$

## 2.6. การวัดอัตราการเจริญเติบโตของปะการัง

วัดอัตราการเจริญเติบโตที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละวันด้วยวิธี Buoyant Weight Technique โดยการนำชิ้นส่วนปะการังไปชั่งน้ำหนักในน้ำทะเล (Jokiel, 1978; Walsh et al., 2012) (ภาพที่ 13) โดยก่อนนำชิ้นส่วนปะการังลงไปชั่งต้องทำการวัดอุณหภูมิ น้ำทะเล (°C) ค่าความเค็ม (ppt) และ pH เนื่องจากน้ำหนักเปียกไม่ได้คำนึงถึงแรงโน้มถ่วงโลก แต่คำนึงถึงน้ำทะเลที่มีความหนาแน่น อุณหภูมิ และความเค็มที่มีผลต่อน้ำหนักชิ้นส่วนปะการังที่นำไปชั่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$DW = WW / (1 - (\text{ค่าความหนาแน่นของน้ำทะเล} / (1000 \times \text{ความหนาแน่นของ } P. \textit{acuta})))$$

โดย DW = Dry weight (น้ำหนักแห้งที่ชั่งในอากาศ)

WW = Wet weight (น้ำหนักเปียกที่ชั่งใต้น้ำ)

ความหนาแน่นของน้ำทะเล = 1025 กก./ลบ.ซม.

ความหนาแน่นของ *P. Acuta* = 2.93 กรัม/ลบ.ซม.

สำหรับการทดลองที่ 1 วัดอัตราการเจริญเติบโตในวันที่ 0, 7 และ 13 ของการทดลองที่ 1 และวันที่ 0, 9 และ 18 ของการทดลองที่ 2 จากนั้นเมื่อได้ค่า DW มาในแต่ละวันแล้วนำไปคำนวณอัตราการเจริญเติบโต (% Day<sup>-1</sup>) (Griffin, 2009) ดังสมการ

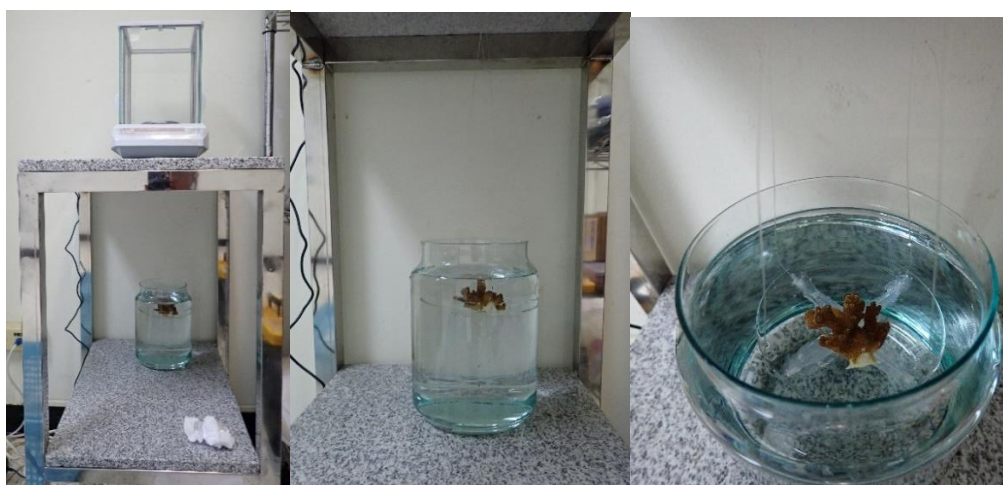
$$G (\% \text{ Day}^{-1}) = (((a / b) ^ (1 / (c))) - 1) \times 100$$

โดย G = อัตราการเจริญเติบโต (%)

a = final dry weight (g) (DW ที่วัดในแต่ละวัน)

b = initial dry weight (g) (DW ที่วัดในแต่ละวัน)

c = จำนวนวันที่วัดระหว่าง a และ b



ภาพที่ 13 แสดงการวัดอัตราการเจริญเติบโตที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละวันด้วยวิธี Buoyant Weight Technique (Jokiel, 1978; Walsh et al., 2012)

## 2.7. การวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง

วัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงด้วยอุปกรณ์ Pulse Amplitude Modulated (PAM) Fluorometry (Walz, Germany) ที่เชื่อมต่อดับคอมพิวเตอร์ร่วมกับโปรแกรม WinControl Version 3.26 (ภาพที่ 14) ตั้งแต่วันที่เริ่มการทดลองจนถึงสิ้นสุดการทดลอง สำหรับการทดลองที่ 1 ทำการวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงในวันที่ 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11 และ 13 ของการทดลอง และการทดลองที่ 2 ทำการวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงในวันที่ 0, 1, 3, 5, 7, 9, 10, 12, 14, 16 และ 18 และคำนวณค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงด้วยสมการ ดังนี้

Maximum Quantum Yield (MQY) of Photosystem II: ( $F_v/F_m$ ) วัดในช่วงเวลาก่อนที่รอบไฟจะเปิดด้วยค่าความเข้มแสงที่สูง (0.8s Saturating Pulse,  $>4500 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_v / F_m = (F_m - F_0) / F_m$$

โดย  $F_0$  = Dark Adapted Minimum Fluorescence  
 $F_m$  = Dark Adapted Maximum Fluorescence

Effective Quantum Yield (MQY) of Photosystem II: ( $\Delta F / F_m'$ ) ค่าความเข้มแสงที่สูง (0.8s Saturating Pulse,  $>4500 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta F / F_m' = (F_m' - F_t) / F_m'$$

โดย  $F_t$  = Light Adapted Minimum Fluorescence  
 $F_m'$  = Light Adapted Maximum Fluorescence

Rapid Light Curve (RLCs) เป็นค่าที่เกิดจาก Effective Quantum Yield (EQY) of Photosystem II: ( $\Delta F/F_m'$ ) และมีค่าความเข้มแสงตั้งแต่ช่วงแสงที่ต่ำจนถึงช่วงแสงที่สูงที่สุด สำหรับการศึกษานี้มีการตั้งค่าความเข้มแสง ( $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) ได้แก่ 0, 66, 90, 125, 190, 285, 420, 625, และ 820,  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$  ตามลำดับ โดยแต่ละค่าความเข้มแสงห่างกันช่วงละ 10 วินาที จากนั้นโปรแกรม WinControl แสดงค่าอัตราการขนส่งอิเล็กตรอน (Electron

Transport Rate: rETR), maximum relative Electron Transport Rate (rETR<sub>max</sub>), minimum saturating irradiance (I<sub>k</sub>) และ initial slope (α) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณด้วยโปรแกรม Sigmaplot Version 12.5 (Ralph & Gademann, 2005) และสามารถคำนวณดังนี้

$$rETR = (\Delta F/F_m') \times PAR \times 0.5 \times 0.84$$

โดย  $\Delta F/F_m'$  = Effective Quantum Yield of Photosystem II: ( $\Delta F/F_m'$ )

PAR = Photosynthetic Active Radiation

0.5 = ค่าคงที่ของระบบการสังเคราะห์ด้วยแสงที่สองที่ดูดกลืนโฟตอน

0.84 = ค่าการดูดซับแสงที่ได้รับการยอมรับ

$$rETR_{max} = P_s (\alpha / [\alpha + \beta]) (\beta / [\alpha + \beta] \beta / \alpha)$$

$$I_k = rETR_{max} / \alpha$$

โดย P<sub>s</sub> = ค่าคงที่จากประสิทธิภาพสูงสุดของ rETR

α = ค่าความชันของกราฟ RLCs ก่อนถึงจุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์ด้วยแสง

β = ค่าความชันของกราฟ RLCs หลังจากจุดอิ่มตัวของการสังเคราะห์ด้วยแสง



ภาพที่ 14 แสดงวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงด้วยอุปกรณ์ Pulse Amplitude Modulated (PAM) Fluorometry (Walz, Germany) ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ร่วมกับโปรแกรม WinControl

## 2.8. การเก็บตัวอย่างชิ้นส่วนปะการัง

เก็บตัวอย่างปะการังจากตู้ทดลองแบบ destructive sampling ในวันที่ 0 (T0) 7 (T1) และ 13 (T2) ของแผนการทดลองที่ 1 และวันที่ 0 (T0) 9 (T1) และ 18 (T2) ของแผนการทดลองที่ 2 โดยจุ่มชิ้นส่วนปะการังในไนโตรเจนเหลว (snap freeze) และเก็บที่ตู้แช่อุณหภูมิต่ำ  $-20^{\circ}\text{C}$  เพื่อนำชิ้นส่วนของปะการังไปวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความหนาแน่นของซูแซนเทลลีต่อพื้นที่ผิวของชิ้นส่วนปะการัง และปริมาณรงควัตถุภายในเซลล์ต่อพื้นที่ผิวของชิ้นส่วนปะการัง

## 2.9 การเตรียมตัวอย่างปะการัง

นำชิ้นส่วนของปะการังที่เก็บรักษาไว้ที่  $-20^{\circ}\text{C}$  มากำจัดเนื้อเยื่อปะการัง โดยใช้เครื่องเป่าลมและน้ำทะเลที่ฆ่าเชื้อแล้วจนได้ปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenize) ซึ่งตัวอย่างที่ได้นำไปวิเคราะห์ความหนาแน่นของซูแซนเทลลี ปริมาณรงควัตถุภายในเซลล์

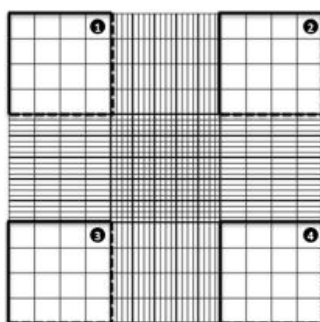
## 2.10. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

**2.10.1. ความหนาแน่นของซูแซนเทลลี:** นำตัวอย่างจากข้อ 2.9 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร มาสุ่มนับจำนวนซูแซนเทลลีด้วย hemocytometer จำนวน 3 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่างและนับเซลล์ซูแซนเทลลีที่ปรากฏในช่อง 1, 2, 3 และ 4 (ภาพที่ 15) และนำมาเทียบกับปริมาตรของ hemocytometer (1 ช่อง =  $0.1\ \mu\text{l}$  หรือ  $0.0001\ \text{ml}$  หรือ  $10^{-4}\ \text{ml}$ ) สามารถคำนวณได้ดังนี้

ความหนาแน่นของซูแซนเทลลี = (ผลรวมของจำนวนที่นับเซลล์/จำนวนช่องที่นับ)/ $10^{-4}$  × ปริมาตรทั้งหมด

จากนั้นคำนวณความหนาแน่นของซูแซนเทลลีต่อพื้นที่ผิวของปะการังตามวิธีของ Al-hammady (2013) ดังนี้

ความหนาแน่นของซูแซนเทลลีต่อพื้นที่ผิวปะการัง = จำนวนเซลล์ต่อปริมาตร / พื้นที่ผิว



ภาพที่ 15 วิธีการนับเซลล์ซูแซนเทลลี hemocytometer

**2.10.2. ปริมาตรควัตถุภายในเซลล์:** นำตัวอย่างจากข้อ 2.9 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร มาวิเคราะห์ chlorophyll *a* และ chlorophyll *c*<sub>2</sub> มาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (centrifuge) ที่ความเร็ว 4,000 rpm 5 นาที จากนั้นเทส่วนที่เป็นน้ำใส (supernatant) ทิ้งและเก็บตัวอย่างที่ตกตะกอนด้านล่างและเติม acetone เข้มข้น 90% ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร (vortex mixer) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C ให้พ้นแสง 24 ชั่วโมง จากนั้นปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (centrifuge) ที่ความเร็ว 4,000 rpm 5 นาทีอีกครั้ง และวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 750 664 และ 630 nm. ตามลำดับคำนวณปริมาณ chlorophyll *a* และ *c*<sub>2</sub> ต่อหน่วย  $\mu\text{g ml}^{-1}$  ตามวิธีของ Ritchie (2006) จากนั้นคำนวณปริมาณ chlorophyll *a* และ *c*<sub>2</sub> ต่อพื้นที่ผิวของปะการัง

$$\text{chlorophyll } a = 11.4754 \times (A_{664 \text{ nm.}} - A_{750 \text{ nm.}}) - 0.4574 \times (A_{630 \text{ nm.}} - A_{750 \text{ nm.}})$$

$$\text{chlorophyll } c_2 = 23.390 \times (A_{630 \text{ nm.}} - A_{750 \text{ nm.}}) - 3.5322 (A_{664 \text{ nm.}} - A_{750 \text{ nm.}})$$

**2.10.3. พื้นที่ผิวของชิ้นส่วนปะการัง:** พื้นที่ผิวของชิ้นส่วนปะการังเป็นการทำตามวิธีของ Veal et al. (2010) โดยการสร้างพื้นที่ผิวมาตรฐานที่มีรูปทรงกระบอกตั้งแต่ 1 – 100 ตารางเซนติเมตร นำไปจุ่มขี้ผึ้ง (wax) ที่ละลายไว้ที่อุณหภูมิ 65°C ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องและชั่งน้ำหนักทรงกระบอกแต่ละขนาดเพื่อนำไปสร้าง standard curve ระหว่างค่าน้ำหนักและพื้นที่ผิว จากนั้นนำชิ้นส่วนโครงร่างแข็งของปะการังมาแช่ในสารฟอกขาวและตากให้แห้ง เมื่อแห้งแล้วนำชิ้นส่วนปะการังไปชั่งน้ำหนักและนำไปจุ่มขี้ผึ้ง (wax) ที่ละลายไว้ ณ อุณหภูมิ 65°C ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องและชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปเทียบค่าพื้นที่ผิวจาก standard curve

### 2.11. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ความหนาแน่นของซูแซนเทลลีต่อพื้นที่ผิวของปะการัง ปริมาตรควัตถุภายในเซลล์ต่อพื้นที่ผิวของปะการัง มาทดสอบการแจกแจงด้วยวิธี Kolmogorov-Smirnov test และ Homogeneity of Variance ด้วย Levene's test และวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลดังกล่าวระหว่างชุดการทดลองและพื้นที่ศึกษาด้วยสถิติแบบพาราเมตริก (Parametric statistics) one-way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ 95% รวมถึงเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มทดลองด้วย Post-Hoc test



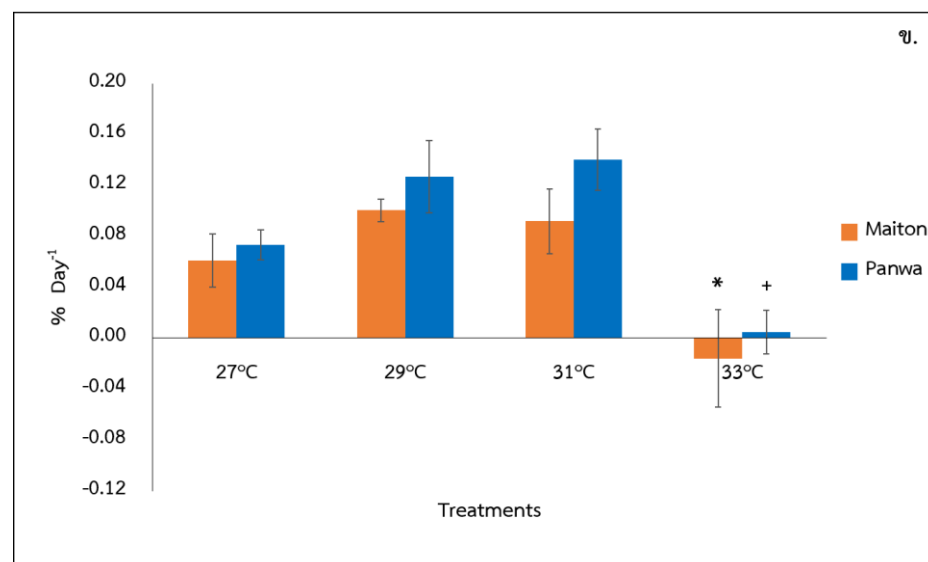
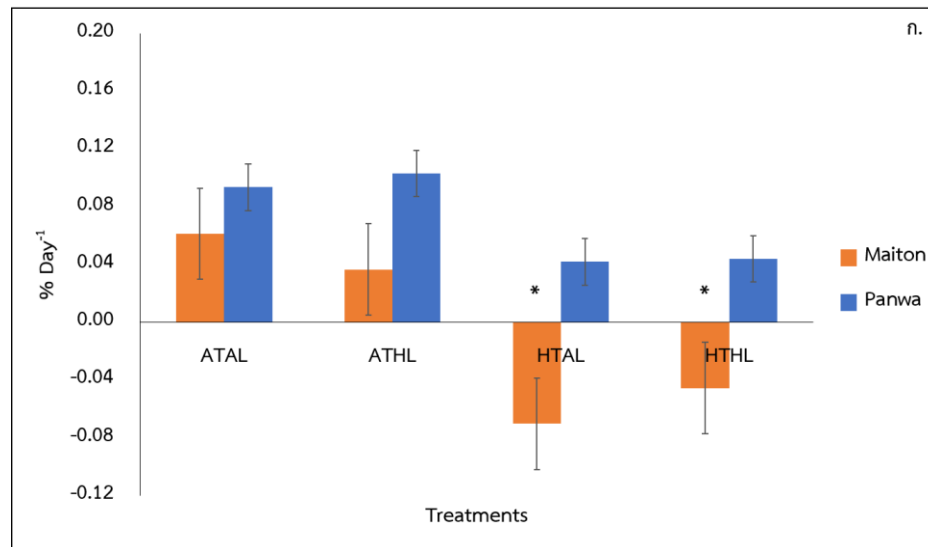
## บทที่ 3

### ผลการศึกษา (Results)

#### 3.1. การเจริญเติบโตของปะการัง

จากการทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงของปะการังจากทั้งสองพื้นที่ศึกษาพบว่า อัตราการเจริญเติบโตของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนของชุดควบคุม (ATAL) มีอัตราการเจริญเติบโตของปะการัง  $0.06 \pm 0.02 \text{ \% day}^{-1}$  รองลงมาเป็นชุดการทดลอง ATHL ( $0.04 \pm 0.01 \text{ \% day}^{-1}$ ) HTHL ( $-0.05 \pm 0.04 \text{ \% day}^{-1}$ ) และ HTAL ( $-0.07 \pm 0.03 \text{ \% day}^{-1}$ ) และพบว่าชุดการทดลอง HTAL มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับชุดควบคุม (ATAL) ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 16 ก.) ขณะที่ปะการังบริเวณแหลมพันวาของชุดควบคุม (ATAL) มีอัตราการเจริญเติบโต  $0.10 \pm 0.03 \text{ \% day}^{-1}$  รองลงมาเป็นชุดการทดลอง ATAL ( $0.09 \pm 0.01 \text{ \% day}^{-1}$ ) HTHL ( $0.04 \pm 0.02 \text{ \% day}^{-1}$ ) และ HTAL ( $0.04 \pm 0.02 \text{ \% day}^{-1}$ ) อย่างไรก็ตามอัตราการเจริญเติบโตของปะการังบริเวณแหลมพันวาของชุดการทดลอง ATHL HTAL และ HTHL ไม่มีความแตกต่างกันกับชุดควบคุม (ATAL) (ภาพที่ 16 ก.)

การทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิต่ออัตราการเจริญเติบโตของปะการังจากทั้งสองพื้นที่ศึกษาพบว่าอัตราการเจริญเติบโตของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนของชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) มีอัตราการเจริญเติบโตของปะการัง  $0.06 \pm 0.02 \text{ \% day}^{-1}$  และชุดการทดลอง  $29^{\circ}\text{C}$  มีอัตราการเจริญเติบโตของปะการังมากที่สุด ( $0.10 \pm 0.03 \text{ \% day}^{-1}$ ) รองลงมาเป็นชุดการทดลอง  $31^{\circ}\text{C}$  ( $0.09 \pm 0.03 \text{ \% day}^{-1}$ ) และชุดการทดลอง  $33^{\circ}\text{C}$  ( $-0.02 \pm 0.02 \text{ \% day}^{-1}$ ) และพบว่าชุดการทดลอง  $33^{\circ}\text{C}$  มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 16 ข.) ขณะที่ปะการังแหลมพันวาชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) มีอัตราการเจริญเติบโต  $0.07 \pm 0.04 \text{ \% day}^{-1}$  และชุดการทดลอง  $31^{\circ}\text{C}$  มีอัตราการเจริญเติบโตของปะการังมากที่สุด ( $0.14 \pm 0.03 \text{ \% day}^{-1}$ ) รองลงมาเป็นชุดการทดลอง  $29^{\circ}\text{C}$  ( $0.13 \pm 0.02 \text{ \% day}^{-1}$ ) และชุดการทดลอง  $33^{\circ}\text{C}$  ( $0.01 \pm 0.01 \text{ \% day}^{-1}$ ) อย่างไรก็ตามอัตราการเจริญเติบโตของปะการังบริเวณแหลมพันวาสำหรับชุดการทดลอง  $29^{\circ}\text{C}$  และ  $31^{\circ}\text{C}$  ไม่มีความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) แต่พบว่าชุดการทดลอง  $33^{\circ}\text{C}$  มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 16 ข.)

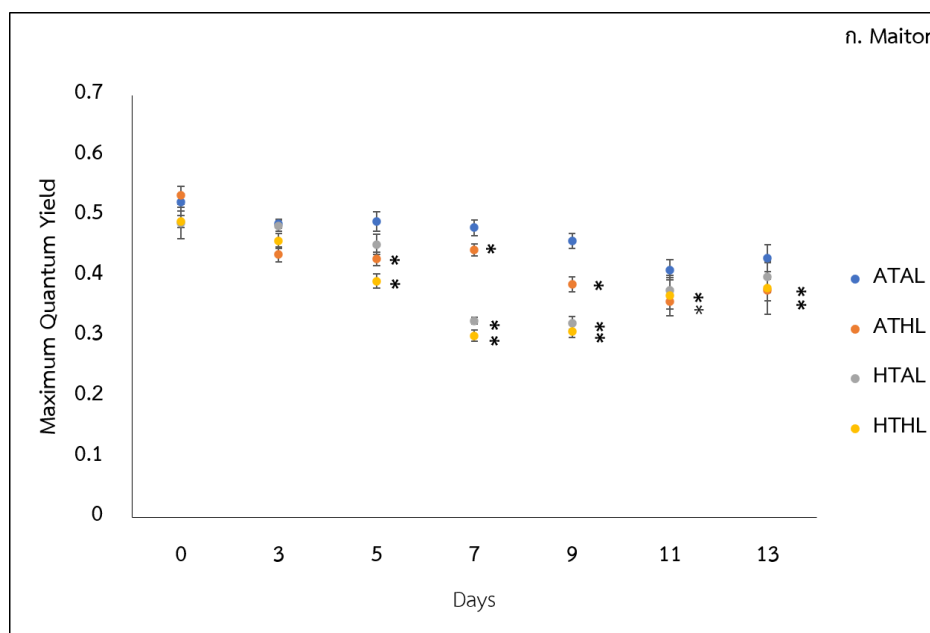


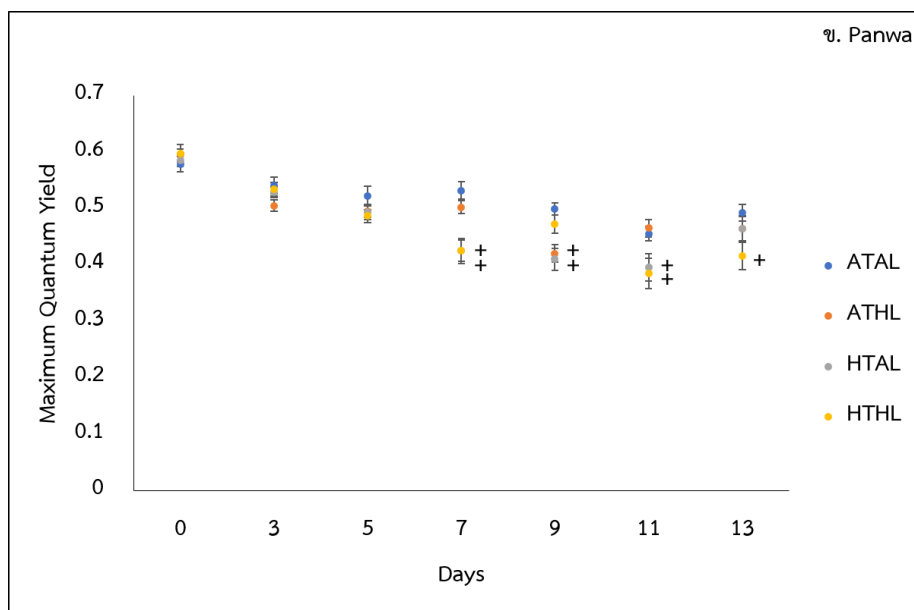
ภาพที่ 16 อัตราการเจริญเติบโต (Mean  $\pm$  S.D.) ของประชากรบริเวณเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา ก. การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสง และ ข. การทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิ โดย \* และ + แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดทดลอง (ATHL HTAL และ HTHL) กับชุดควบคุม (ATAL) ของประชากรบริเวณเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา ตามลำดับ ที่ทดสอบโดยสถิติ one-way ANOVA และ Post Hoc Turkey's Test ( $p < 0.05$ )

## 3.2. ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของปะการัง

### 3.2.1. Maximum Quantum Yield (MQY)

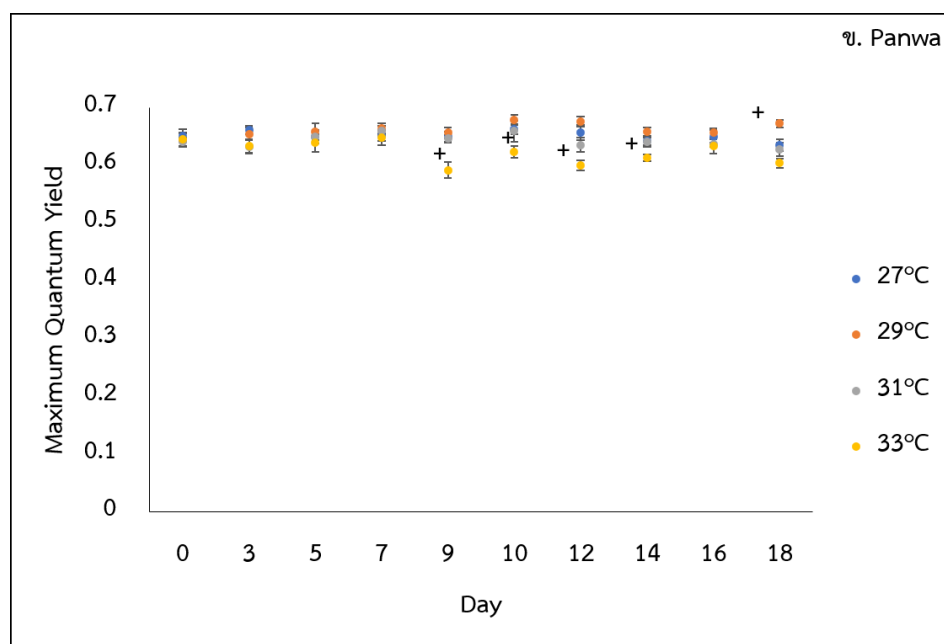
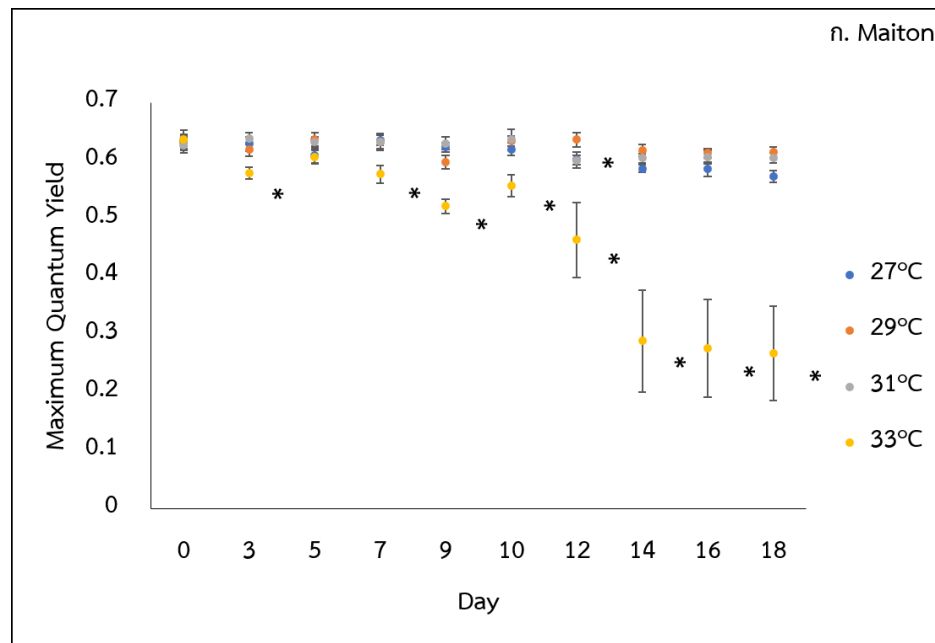
จากการทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษา ได้แก่ เกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา พบว่าชุดควบคุม (ATAL) มีค่า Maximum Quantum Yield (MQY) ค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง ( $0.52 \pm 0.01 - 0.41 \pm 0.02$  และ  $0.58 \pm 0.01 - 0.46 \pm 0.01$  ตามลำดับ) และวันที่ 3 ของการทดลองมีการชักนำความเครียดแก่ปะการัง โดยการเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มแสงที่สูงส่งผลให้ชุดการทดลอง ATHL HTAL และ HTHL ของสองพื้นที่ศึกษามีค่า MQY เริ่มลดลง จนกระทั่งวันที่ 5 และ 7 ของการทดลอง ค่า MQY ค่อย ๆ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 17 ก. และภาพที่ 17 ข.) และวันที่ 9 ของการทดลอง ค่า MQY ของชุดการทดลอง HTAL และ HTHL ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในทางกลับกันค่า MQY ของชุดการทดลอง ATHL ลดลงจนถึงวันที่ 11 และยังคงมีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 19 ก. และภาพที่ 17 ข.) ปะการังบริเวณแหลมพันวามีค่า MQY ลดลงช่วงวันที่ 9 และ 10 เท่านั้น แต่วันที่ 11 ค่า MQY เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะปกติ ( $27^{\circ}\text{C}$ ) และวันที่ 13 ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษาเพิ่มขึ้น





ภาพที่ 17 การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (Maximum Quantum Yield: MQY) (Mean  $\pm$  S.D.) ของ ก. ปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน และ ข. ปะการังบริเวณแหลมพันวา โดย \* และ + แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดทดลอง (ATHL HTAL และ HTHL) กับชุดควบคุม (ATAL) ของปะการังจากเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา ตามลำดับ ที่ทดสอบโดยสถิติ one-way ANOVA และ Post Hoc Turkey's Test ( $p < 0.05$ )

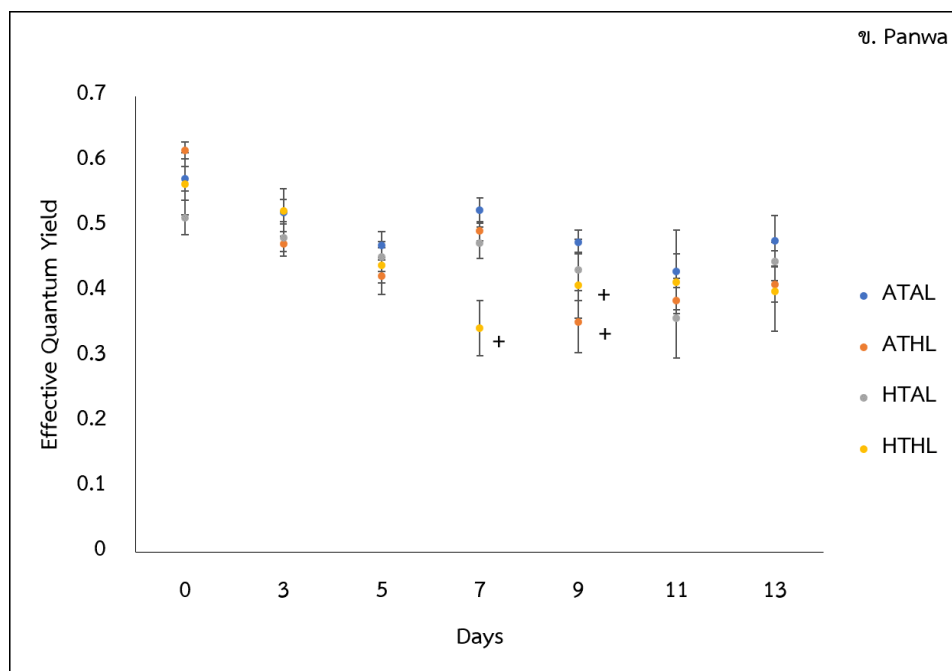
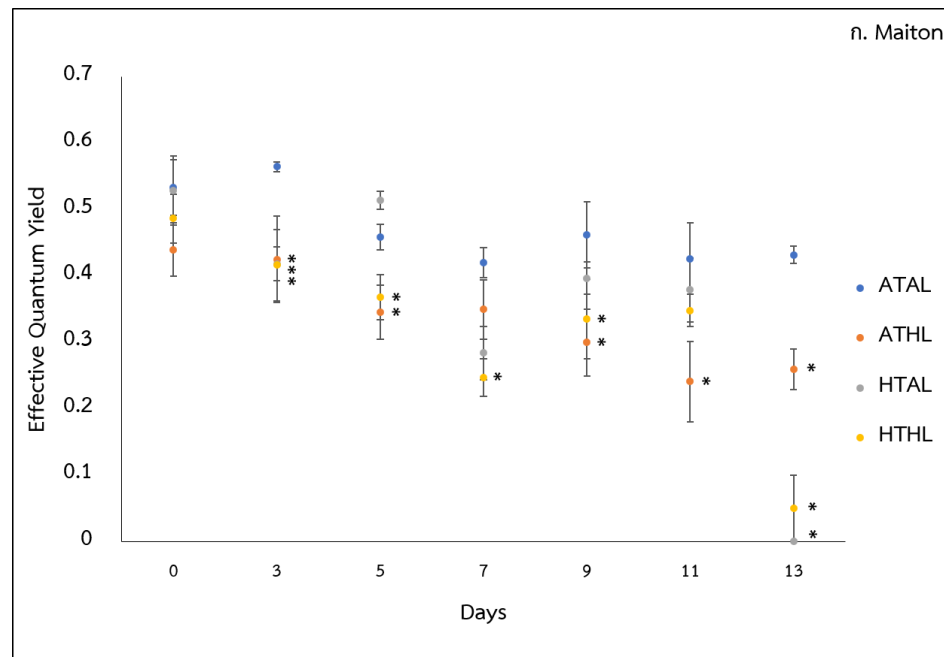
การทดลองชี้แจงจำกัดของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษา ได้แก่ เกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา พบว่าชุดควบคุม (27°C) ( $0.63 \pm 0.01 - 0.57 \pm 0.01$  และ  $0.66 \pm 0.01 - 0.64 \pm 0.01$  ตามลำดับ) ชุดการทดลอง 29°C ( $0.64 \pm 0.01 - 0.60 \pm 0.01$  และ  $0.68 \pm 0.01 - 0.64 \pm 0.01$  ตามลำดับ) และชุดการทดลอง 31°C ( $0.64 \pm 0.01 - 0.60 \pm 0.01$  และ  $0.66 \pm 0.01 - 0.63 \pm 0.01$  ตามลำดับ) มีค่า Maximum Quantum Yield (MQY) ค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลองและพบว่าปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนของชุดการทดลอง 33°C มีค่า MQY ลดลงตั้งแต่วันที่ 3 และลดลงอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดลอง โดยแตกต่างกับชุดควบคุม (27°C) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 18 ก.) ในทางตรงกันข้ามปะการังบริเวณแหลมพันวาในชุดการทดลอง 33°C มีค่า MQY ค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่ 0 – 8 ของการทดลองและไม่มีความแตกต่างกับชุดควบคุม (27°C) แม้ว่าได้รับความเครียด แต่ค่า MQY ลดลงในวันที่ 9 – 14 ของการทดลองและมีความแตกต่างกับชุดควบคุม (27°C) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 18 ข.) หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นในวันที่ 16 – 18 โดยไม่มีความแตกต่างกับชุดควบคุม (27°C)



ภาพที่ 18 การทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (Maximum Quantum Yield: MQY) (Mean  $\pm$  S.D.) ของ ก. ปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน และ ข. ปะการังบริเวณแหลมพันวา โดย \* และ + แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดทดลอง (29°C 31°C และ 33°C) กับชุดควบคุม (27°C) ของปะการังจากเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา ตามลำดับ ที่ทดสอบโดยสถิติ one-way ANOVA และ Post Hoc Turkey's Test ( $p < 0.05$ )

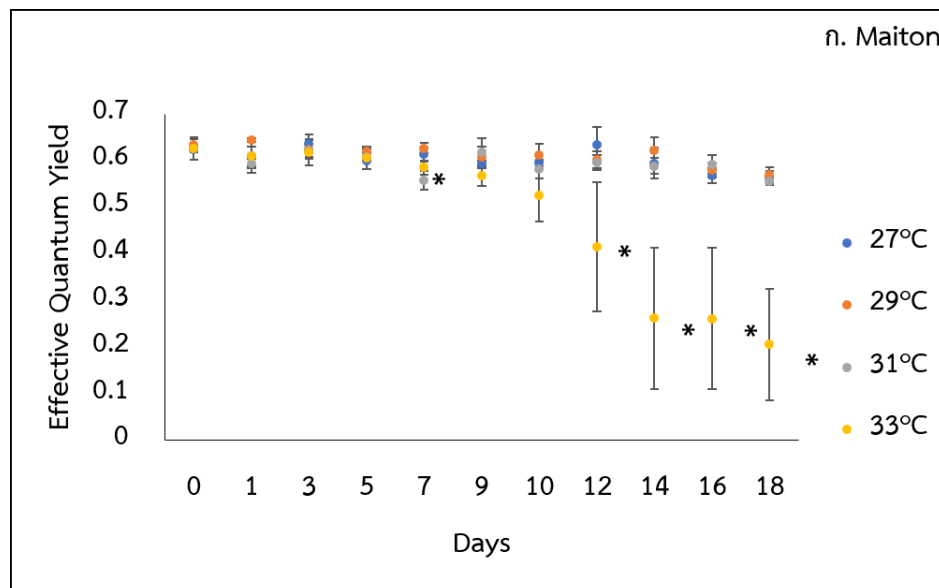
### 3.2.2. Effective Quantum Yield (EQY)

จากการทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (Effective Quantum Yield: EQY) ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษา ได้แก่ เกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา พบว่า ชุดควบคุม (ATAL) มีค่า Effective Quantum Yield (EQY) ค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง ( $0.56 \pm 0.01 - 0.42 \pm 0.02$  และ  $0.57 \pm 0.02 - 0.43 \pm 0.06$  ตามลำดับ) และวันที่ 3 ของการทดลองมีการชักนำความเครียดแก่ปะการัง โดยการเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มแสงที่สูงส่งผลให้ชุดการทดลอง ATHL HTAL และ HTHL ของสองพื้นที่ศึกษามีค่า EQY เริ่มลดลง เฉพาะอย่างยิ่งปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนในชุดการทดลอง ATHL HTAL และ HTHL ที่ค่า EQY ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 19 ก.) จนกระทั่งวันที่ 5 และ 7 ของการทดลอง ค่า EQY ค่อย ๆ ลดลง โดยเฉพาะชุดการทดลอง HTHL ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษาลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 19 ก. และภาพที่ 19 ข.) และวันที่ 9 ของการทดลอง ค่า EQY ของชุดการทดลอง HTAL และ HTHL ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในทางกลับกันค่า EQY ของชุดการทดลอง ATHL ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนลดลงจนถึงวันที่ 11 และยังคงมีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 19 ก.) และในวันที่ 13 ค่า EQY ของชุดการทดลอง ATHL ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่สำหรับชุดการทดลอง HTAL และ HTHL ค่า EQY ลดลงและมีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 19 ก.) ขณะที่ทุกชุดการทดลองของปะการังบริเวณแหลมพันวามีค่า EQY เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะปกติ ( $27^{\circ}\text{C}$ ) (ภาพที่ 19 ข.)

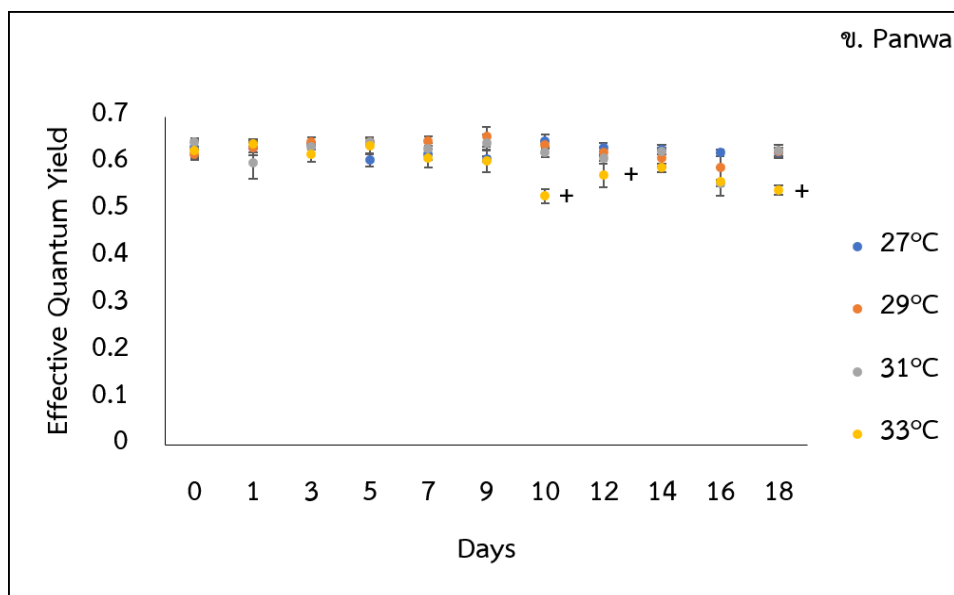


ภาพที่ 19 การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (Effective Quantum Yield: EQY) (Mean  $\pm$  S.D.) ของ ก. ปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน และ ข. ปะการังบริเวณแหลมพันวา โดย \* และ + แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดทดลอง (ATHL HTAL และ HTHL) กับชุดควบคุม (ATAL) ของปะการังจากเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา ตามลำดับ ที่ทดสอบโดยสถิติ one-way ANOVA และ Post Hoc Turkey's Test ( $p < 0.05$ )

การทดลองชี้แจงจำกัดของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษา ได้แก่ เกาะไม้ที่อ่อนและแหลมพบว่า ชุดควบคุม (27°C) ( $0.64 \pm 0.02 - 0.57 \pm 0.02$  และ  $0.65 \pm 0.01 - 0.61 \pm 0.01$  ตามลำดับ) ชุดการทดลอง 29°C ( $0.64 \pm 0.01 - 0.57 \pm 0.02$  และ  $0.65 \pm 0.01 - 0.59 \pm 0.03$  ตามลำดับ) และชุดการทดลอง 31°C ( $0.63 \pm 0.02 - 0.56 \pm 0.01$  และ  $0.65 \pm 0.02 - 0.56 \pm 0.01$  ตามลำดับ) มีค่า Effective Quantum Yield (EQY) ค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง และพบว่าปะการังบริเวณเกาะไม้ที่อ่อนของชุดการทดลอง 33°C มีค่า EQY ลดลงตั้งแต่วันที่ 9 และลดลงอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดลอง โดยแตกต่างกับชุดควบคุม (27°C) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 20 ก.) ในทางตรงกันข้ามปะการังบริเวณแหลมพบว่าในชุดการทดลอง 33°C มีค่า EQY ค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่ 0 - 9 ของการทดลองและไม่มีแตกต่างกับชุดควบคุม (27°C) แม้ว่าได้รับความเครียด แต่ค่า EQY ลดลงในวันที่ 10 - 12 ของการทดลอง และมีความแตกต่างกับชุดควบคุม (27°C) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 20 ข.) หลังจากนั้นค่า EQY ค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่ 14 - 18 โดยไม่มีความแตกต่างกับชุดควบคุม (27°C)





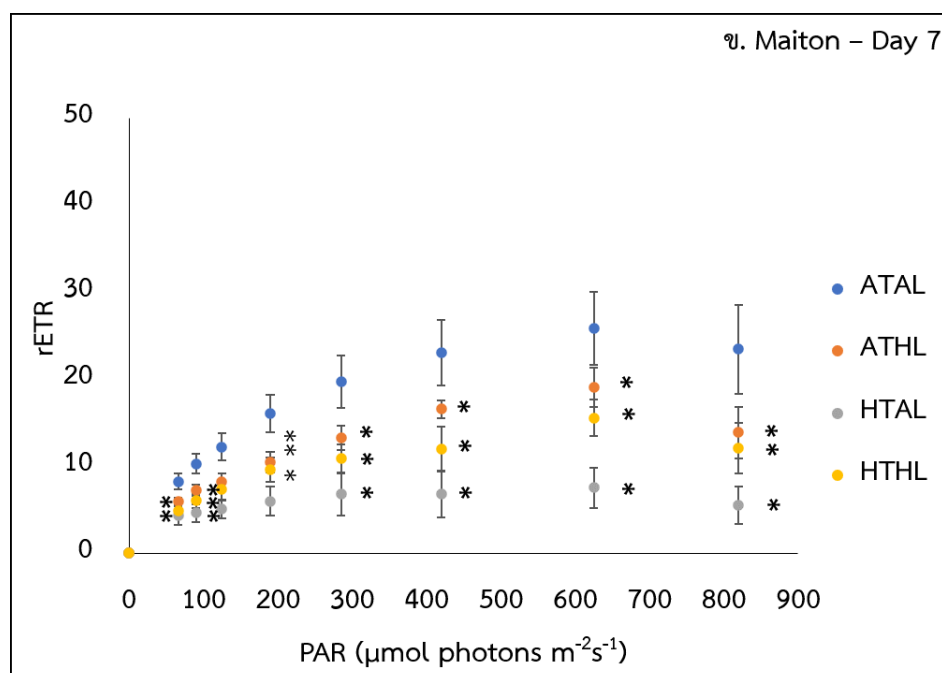
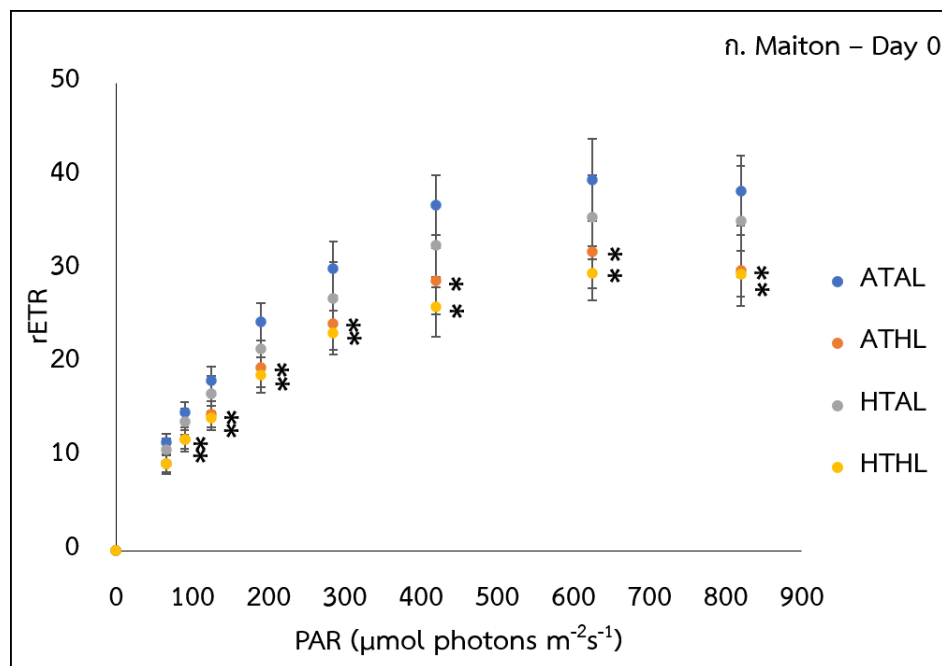


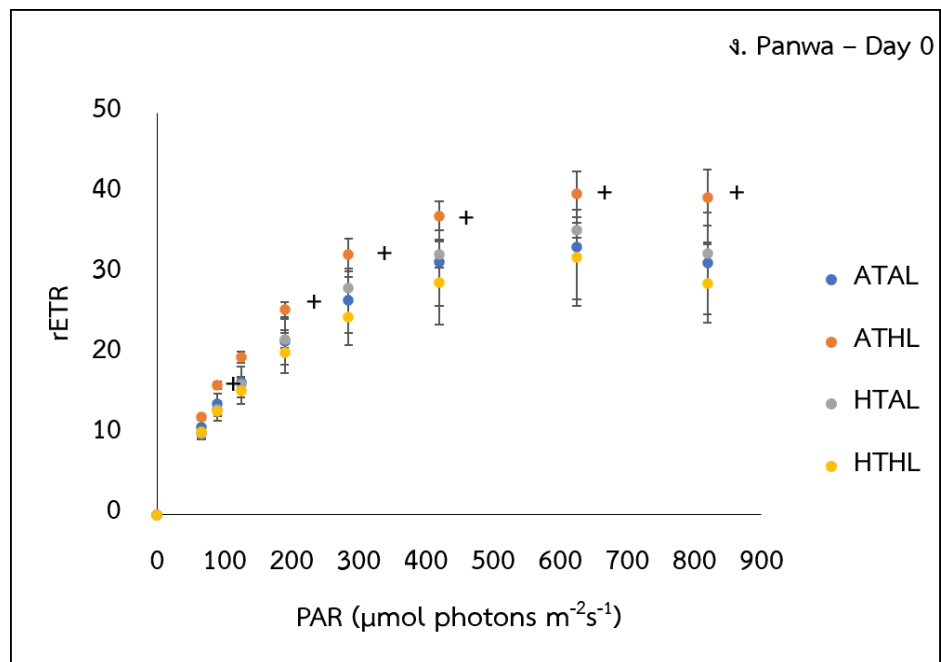
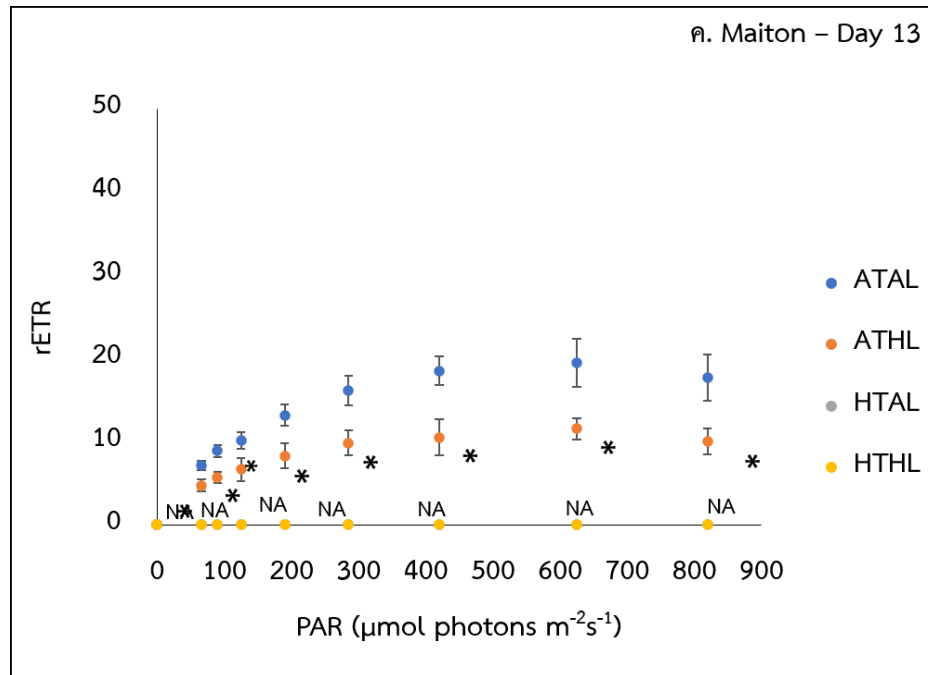
ภาพที่ 20 การทดลองซีดจำกัดของอนุภูมิภาคต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (Effective Quantum Yield: EQY) (Mean  $\pm$  S.D.) ของ ก. ปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน และ ข. ปะการังบริเวณแหลมพันวา โดย \* และ + แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดทดลอง (29°C 31°C และ 33°C) กับชุดควบคุม (27°C) ของปะการังจากเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา ตามลำดับ ที่ทดสอบโดยสถิติ one-way ANOVA และ Post Hoc Turkey's Test ( $p < 0.05$ )

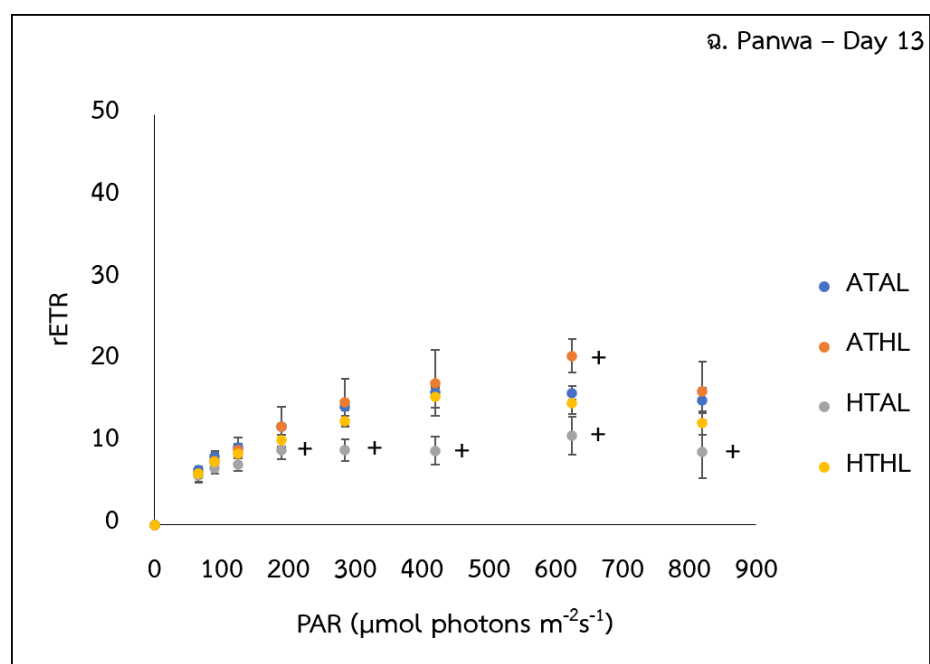
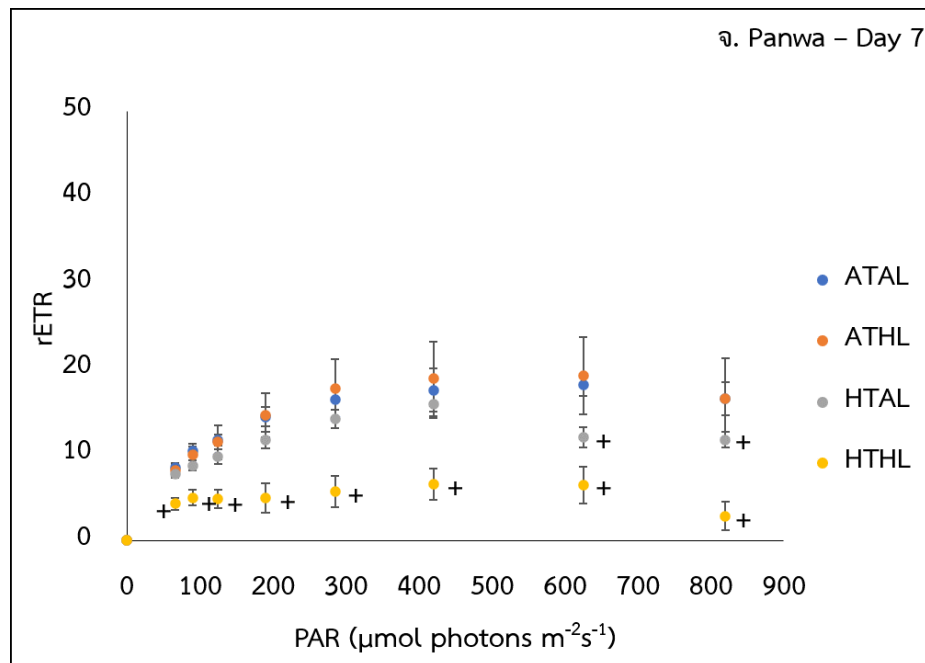
### 3.2.3. relative Electron Transport Rate (rETR)

จากการทดลองการตอบสนองต่ออนุภูมิภาคและแสงต่ออัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอน (relative Electron Transport Rate: rETR) ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษา พบว่าช่วงเวลาเริ่มต้น (วันที่ 0) มีอัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอนสูงสุด ได้แก่ ปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน  $39.65 \pm 4.41$  และปะการังบริเวณแหลมพันวา  $33.40 \pm 6.59$  ที่ความเข้มแสง  $625 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$  และพบว่าในช่วงเวลาที่ปะการังสะสมความเครียดวันที่ 7 ของการทดลอง ส่งผลให้ชุดการทดลอง ATHL HTAL และ HTHL ของทั้งสองพื้นที่ศึกษามีอัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอนลดลง เมื่อเทียบกับช่วงเวลาเริ่มต้น (วันที่ 0) โดยชุดการทดลอง ATHL HTAL และ HTHL ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนมีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 21 ข.) และชุดการทดลอง ATHL และ HTHL ของปะการังบริเวณแหลมพันวามีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 21 จ.) ต่อมาในวันที่ 13 ของการทดลองที่อนุภูมิภาคกลับเข้าสู่สภาวะปกติ (27°C) พบว่าปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนอัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอนยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยชุดการ

ทดลอง ATHL ยังคงมีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 21 ค.) และชุดการทดลอง HTAL และ HTHL ไม่พบอัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอนอิเล็กตรอน (ภาพที่ 21 ค.) ขณะที่ชุดการทดลอง HTHL ของปะการังบริเวณแหลมพันวา มีอัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวันที่ 7 และยังคงแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 21 ฉ.)



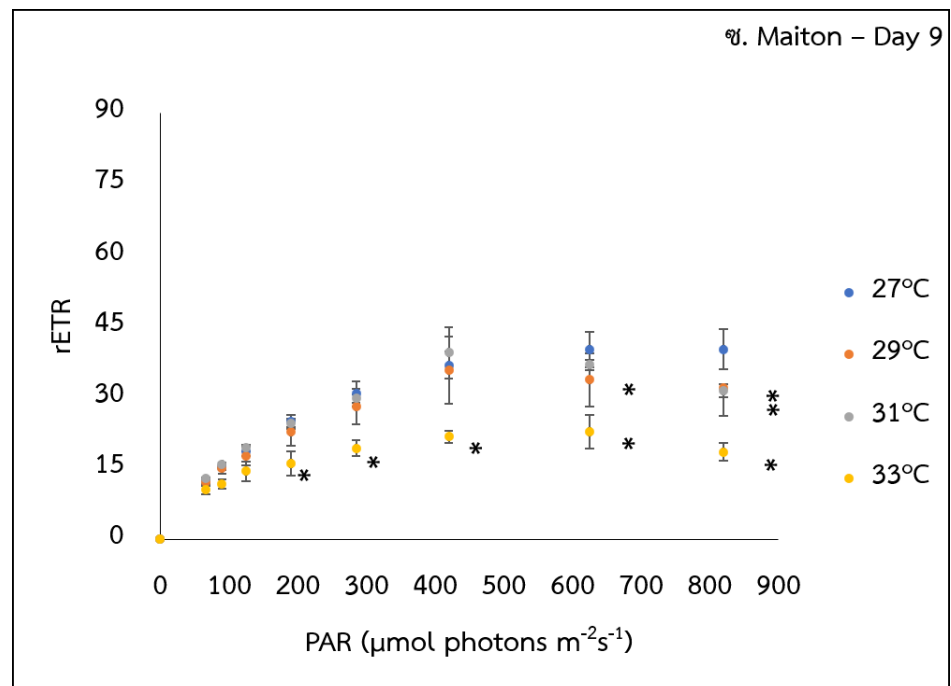
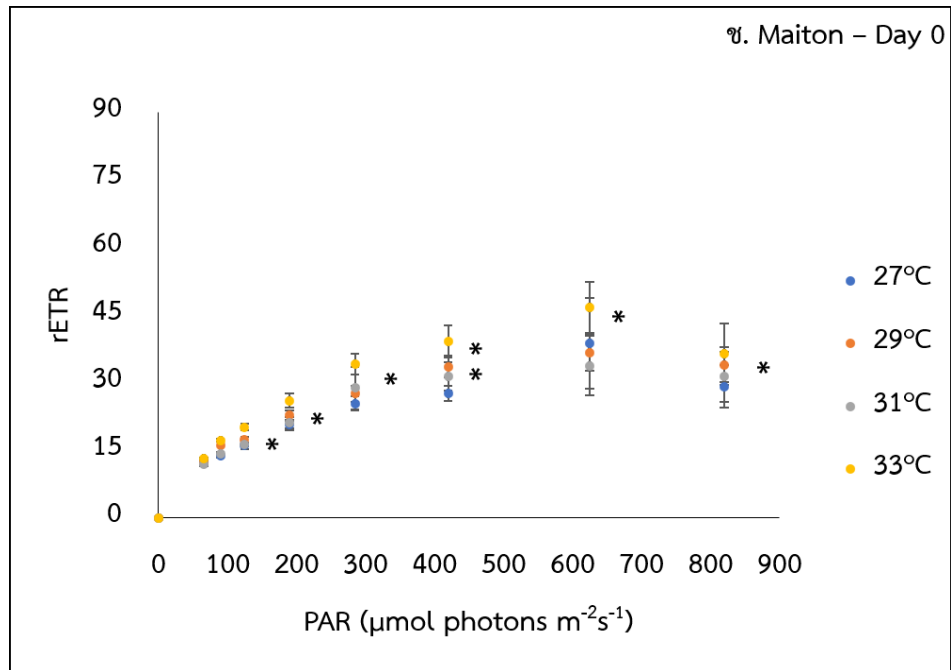


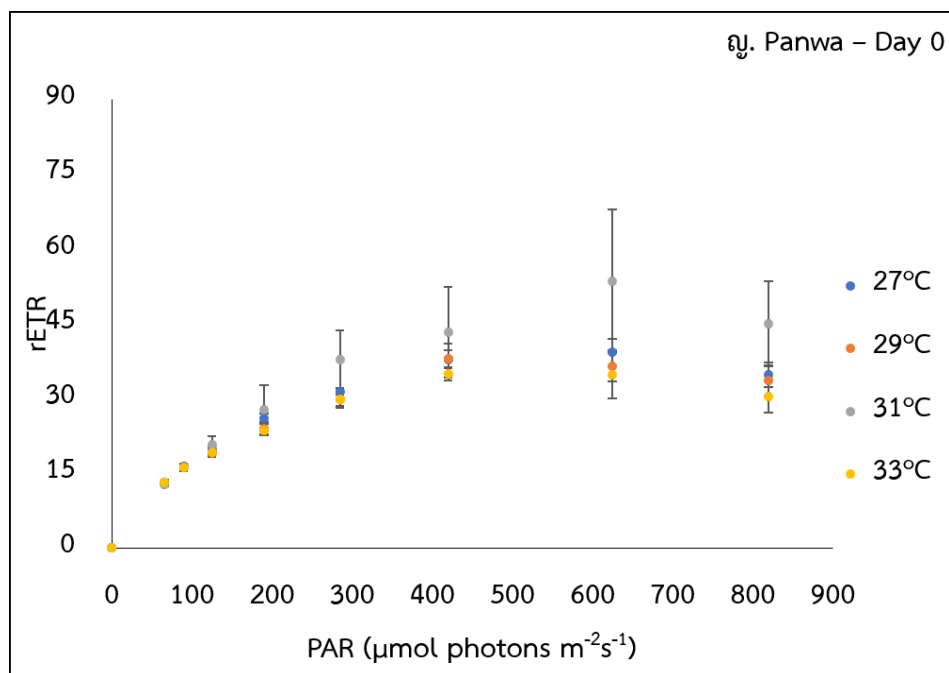
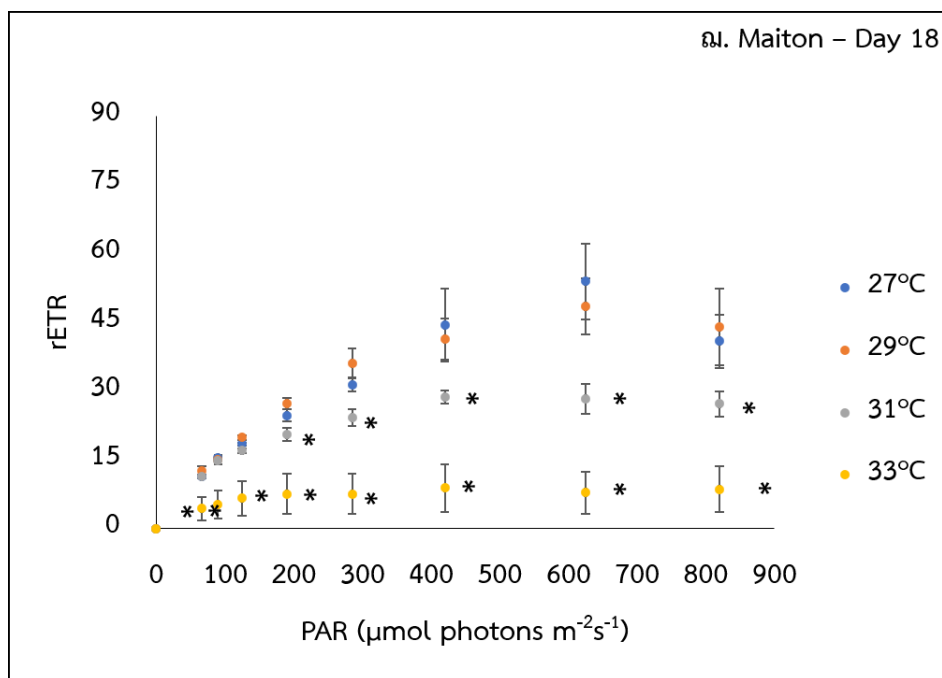


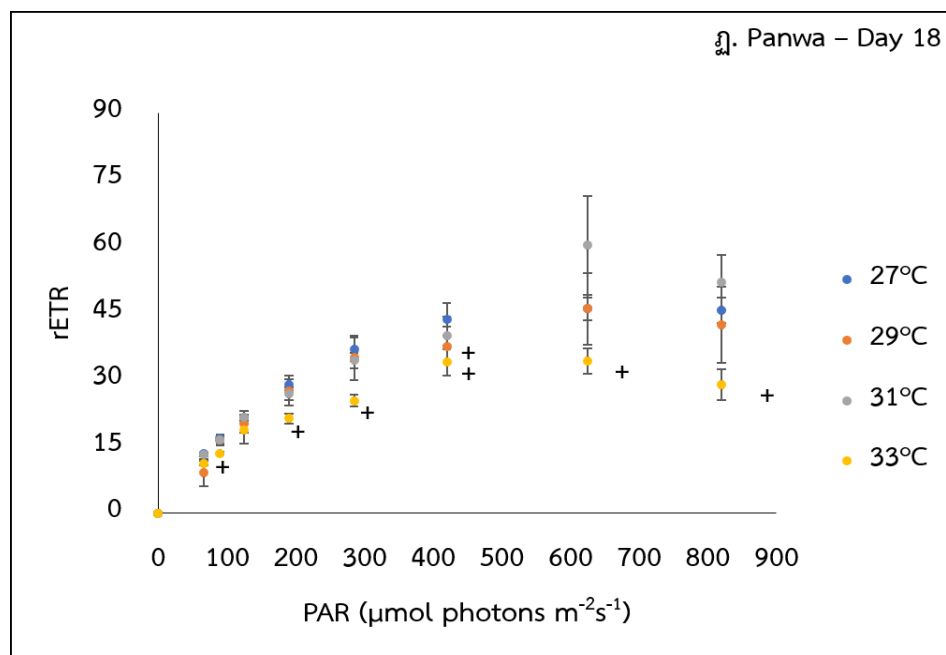
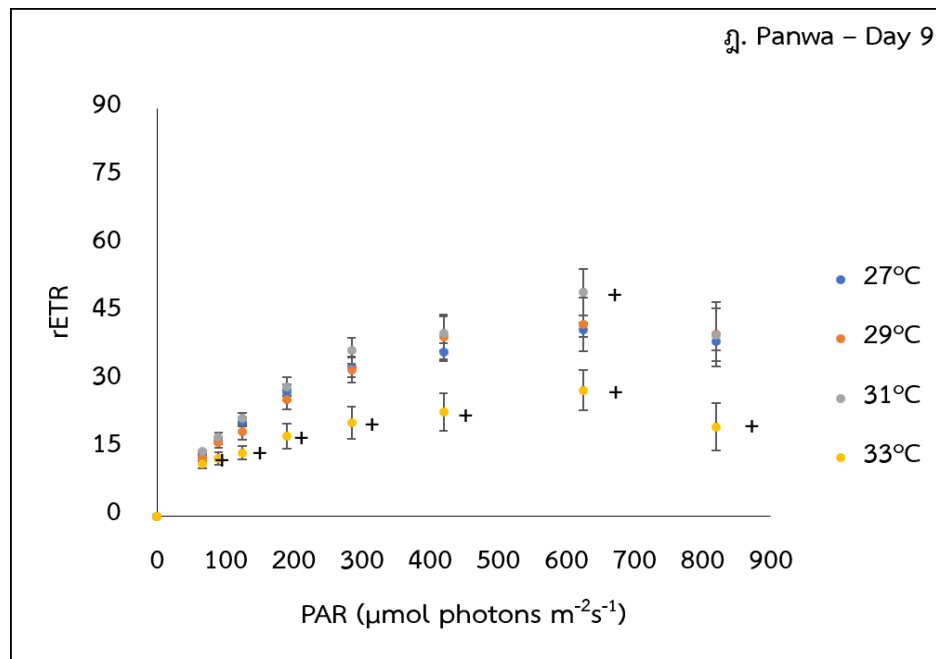
ภาพที่ 21 การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงต่ออัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอน (relative Electron Transport Rate: rETR) (Mean  $\pm$  S.D.) ของปะการังบริเวณ ก. เกาะไม้ท่อน (วันที่ 0) ข. เกาะไม้ท่อน (วันที่ 7) ค. เกาะไม้ท่อน (วันที่ 13) ง. แหลมพันวา (วันที่ 0) จ. แหลมพันวา (วันที่ 7) และ ฉ. แหลมพันวา (วันที่ 13) โดย \* และ + แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุด

ทดลอง (ATHL HTAL และ HTHL) กับชุดควบคุม (ATAL) ของปะการังจากเกาะไม้ท่อนและแหลมพันนา ตามลำดับ ที่ทดสอบโดยสถิติ one-way ANOVA และ Post Hoc Turkey's Test ( $p < 0.05$ )

การทดลองชี้แจงจำกัดของอุณหภูมิต่ออัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอน (relative Electron Transport Rate: rETR) ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษา พบว่าช่วงเวลาเริ่มต้น (วันที่ 0) มีอัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอนสูงที่สุด ได้แก่ ปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน  $38.75 \pm 10.04$  และปะการังบริเวณแหลมพันนา  $39.30 \pm 2.80$  ที่ความเข้มแสง  $625 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$  และพบว่าวันที่ 9 ของการทดลอง ทุกชุดการทดลองของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนและแหลมพันนามีอัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอนลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับวันที่ 0 เฉพาะอย่างยิ่งชุดการทดลอง  $33^{\circ}\text{C}$  และมีความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 22 ซ. และภาพที่ 22 ฎ.) จนกระทั่งวันที่ 18 ของการทดลอง ซึ่งอุณหภูมิกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ( $27^{\circ}\text{C}$ ) พบว่าอัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอนของชุดการทดลอง  $29^{\circ}\text{C}$  และ  $31^{\circ}\text{C}$  ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ยกเว้นชุดการทดลอง  $33^{\circ}\text{C}$  ของเกาะไม้ท่อนที่ยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องและมีความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 22 ฉ.) แต่ชุดการทดลอง  $33^{\circ}\text{C}$  ของปะการังบริเวณแหลมพันนามีอัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวันที่ 9 และยังคงความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 22 ฅ.)





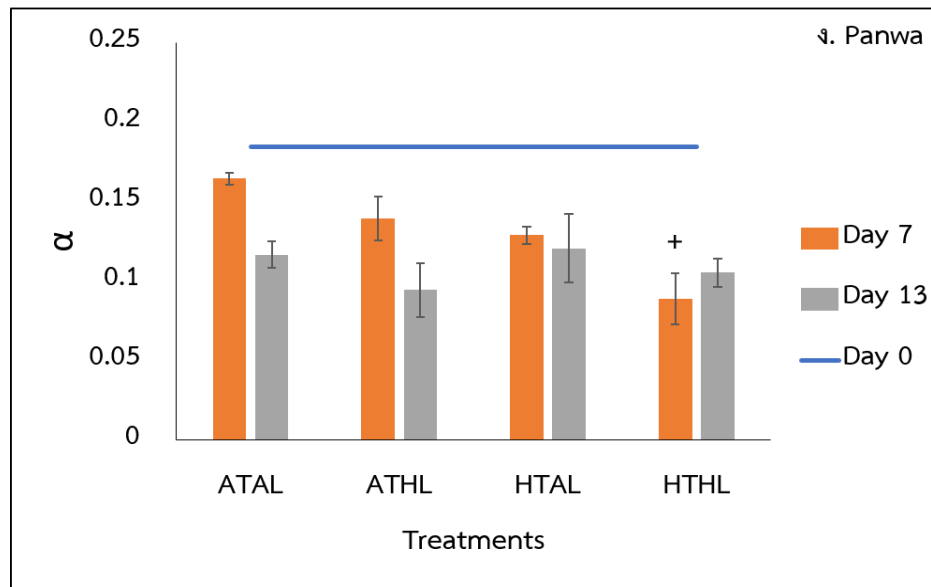
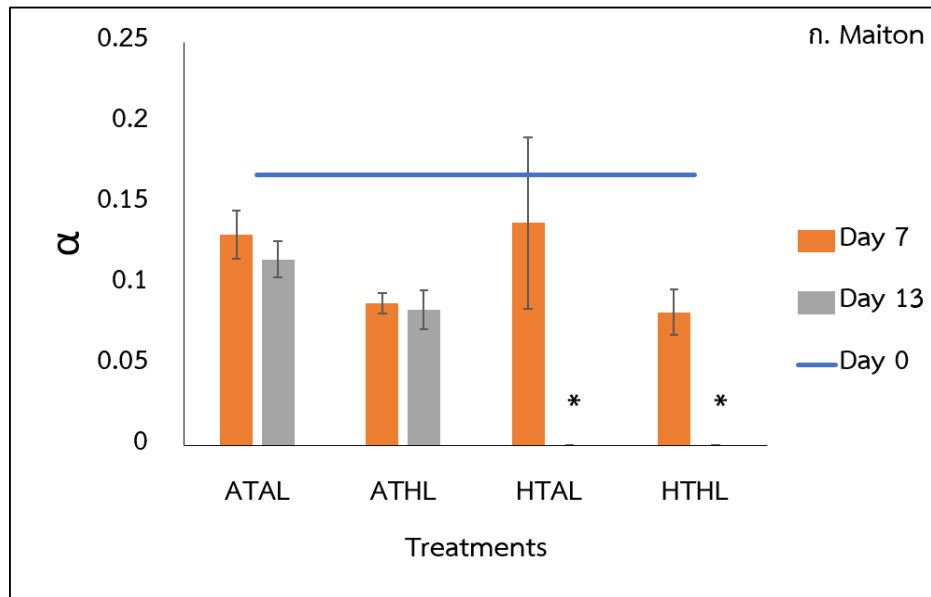


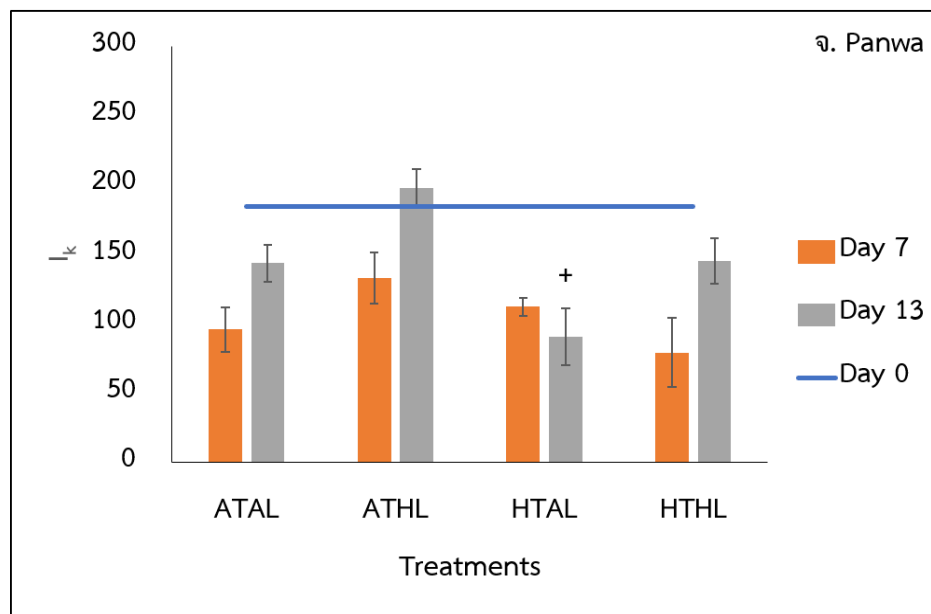
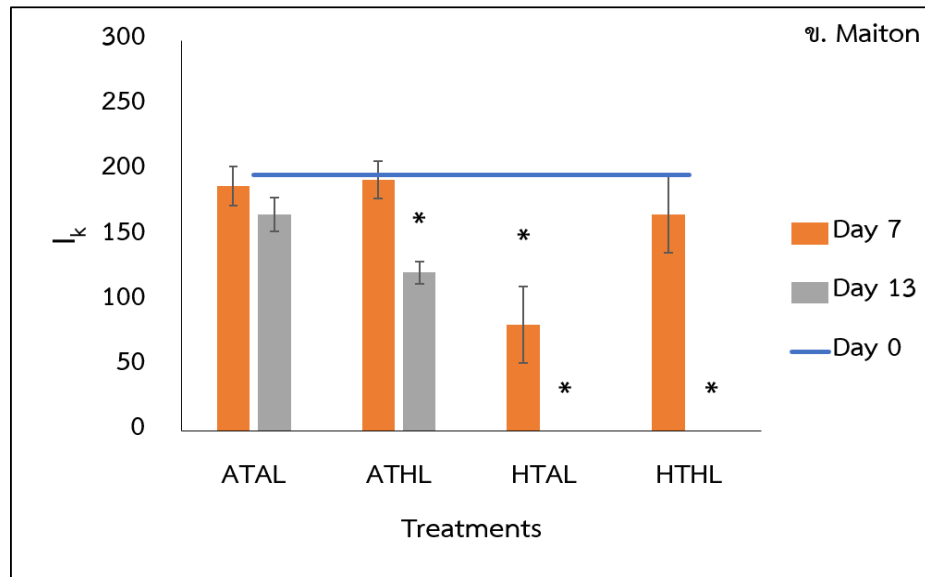
ภาพที่ 22 การทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิต่ออัตราการถ่ายอิเล็กตรอน (relative Electron Transport Rate: rETR) (Mean  $\pm$  S.D.) ของปะการังบริเวณ ช. เกาะไม้ท่อน (วันที่ 0) ช. เกาะไม้ท่อน (วันที่ 9) ณ. เกาะไม้ท่อน (วันที่ 18) ณ. แหลมพันวา (วันที่ 0) ณ. แหลมพันวา (วันที่ 9) และ ณ. แหลมพันวา (วันที่ 18) โดย \* และ + แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดทดลอง (29°C 31°C และ 33°C) กับชุดควบคุม (27°C) ของปะการังจากเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา ตามลำดับ ที่ทดสอบโดยสถิติ one-way ANOVA และ Post Hoc Turkey's Test ( $p < 0.05$ )

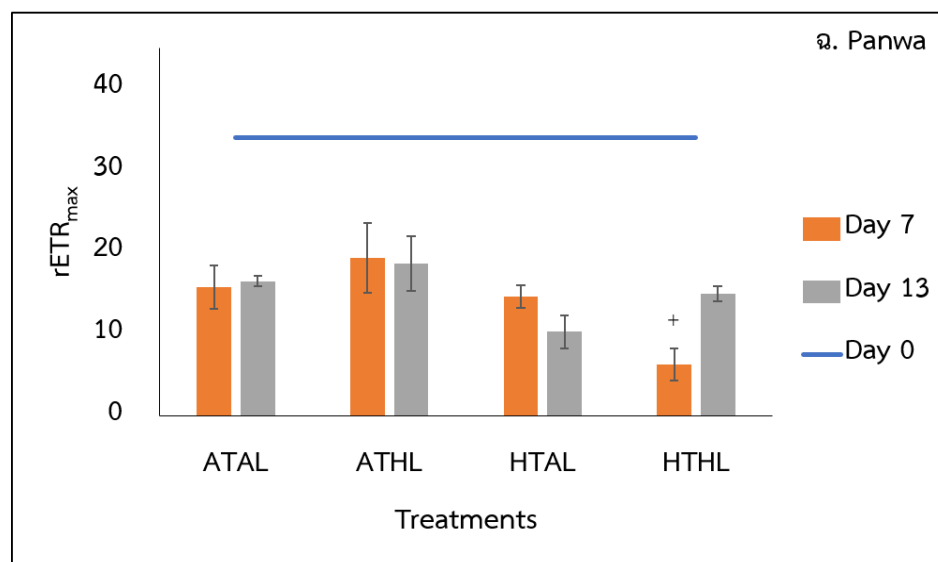
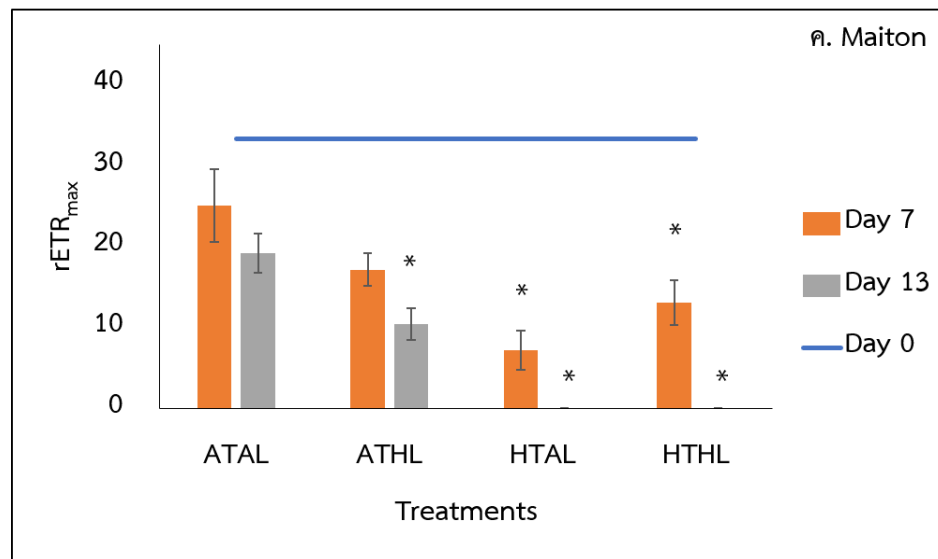


### 3.2.4. $\alpha$ , $I_k$ และ $rETR_{max}$

การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงต่อ  $\alpha$ ,  $I_k$  และ  $rETR_{max}$  ของปะการังจากเกาะไม้ท่อน (วันเริ่มต้นการทดลอง:  $\alpha$   $0.19 \pm 0.01$ ,  $I_k$   $213.30 \pm 4.93$  และ  $rETR_{max}$   $39.94 \pm 3.57$ ) และแหลมพันวา (วันเริ่มต้นการทดลอง:  $\alpha$   $0.18 \pm 0.01$ ,  $I_k$   $179.04 \pm 28.77$  และ  $rETR_{max}$   $33.03 \pm 6.17$ ) พบว่าในช่วงที่ปะการังสะสมความเครียดในวันที่ 7 ของการทดลองส่งผลให้ค่า  $\alpha$  ในชุดการทดลอง HTAL ของปะการังบริเวณแหลมพันวามีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 23 ง.) ขณะที่ทุกชุดการทดลองของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนและชุดการทดลอง ATHL และ HTHL ของปะการังบริเวณแหลมพันวาไม่มีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) ค่า  $I_k$  ในชุดการทดลอง HTAL ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนมีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 23 ข.) และค่า  $rETR_{max}$  ในชุดการทดลอง HTAL และ HTHL ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนและชุดการทดลอง HTHL ของปะการังบริเวณแหลมพันวา มีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 23 ค. และภาพที่ 23 ฉ.) ต่อมาวันที่ 13 ของการทดลองที่อุณหภูมิกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ( $27^{\circ}\text{C}$ ) พบว่าค่า  $\alpha$  ในชุดการทดลอง HTAL และ HTHL ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนมีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 23 ก.) และชุดการทดลอง ATHL ไม่มีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) สำหรับค่า  $I_k$  ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน ในทุกชุดการทดลองลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะชุดการทดลอง HTHL และ HTHL และยังคงมีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 23 ข.) และค่า  $rETR_{max}$  ในวันที่ 13 แสดงแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเทียบกับวันที่ 7 และชุดการทดลอง ATHL HTAL และ HTHL มีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 23 ค.) อย่างไรก็ตามค่า  $\alpha$  ในทุกชุดการทดลองของปะการังบริเวณแหลมพันวามีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับชุดควบคุม (ATAL) และยังคงไม่มีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) สำหรับค่า  $I_k$  ของปะการังบริเวณแหลมพันวาในชุดการทดลอง ATHL และ HTHL ไม่มีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) และค่า  $rETR_{max}$  ในวันที่ 13 ค่อนข้างใกล้เคียงกับวันที่ 7 ยกเว้นชุดการทดลอง HTHL ที่ค่า  $rETR_{max}$  เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวันที่ 7 แต่ยังคงไม่มีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL)

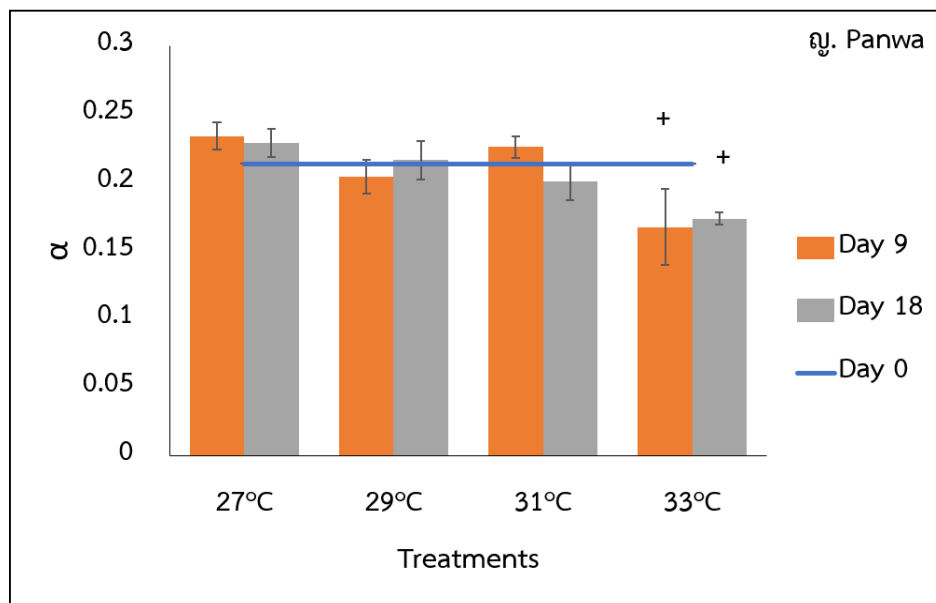
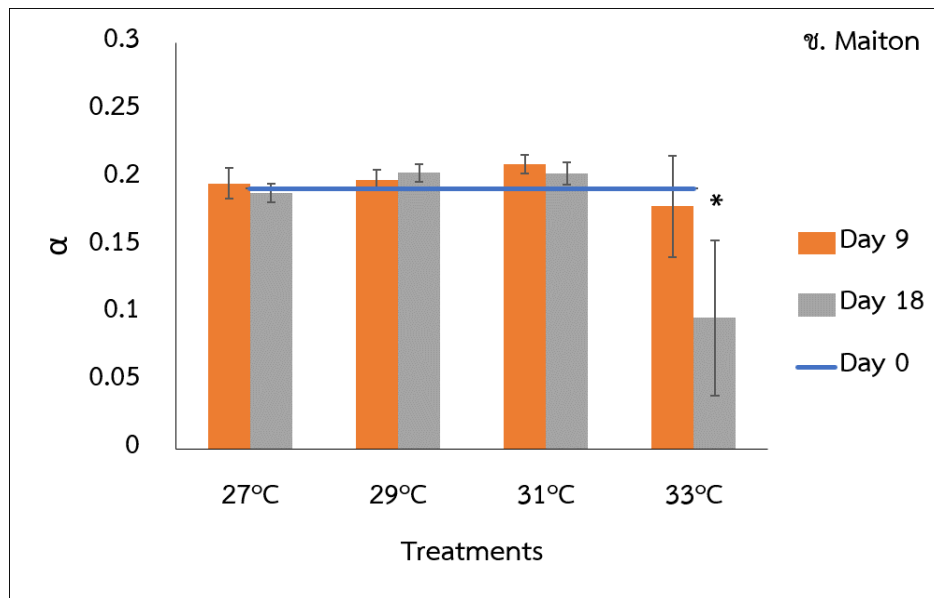


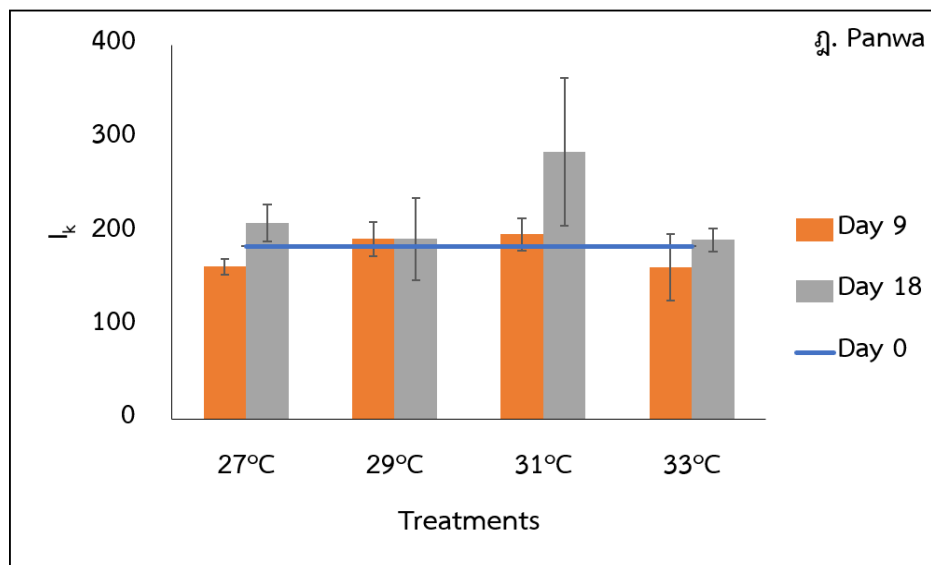
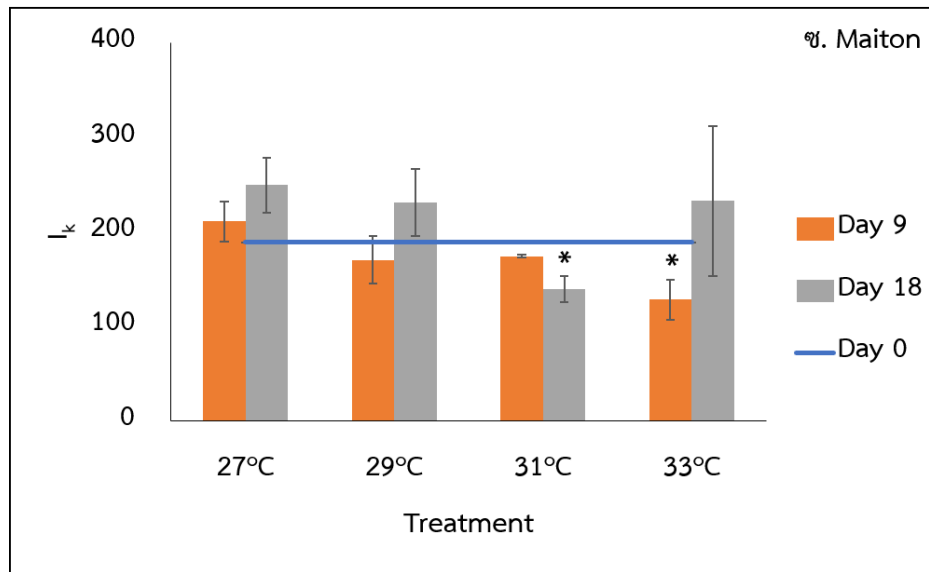


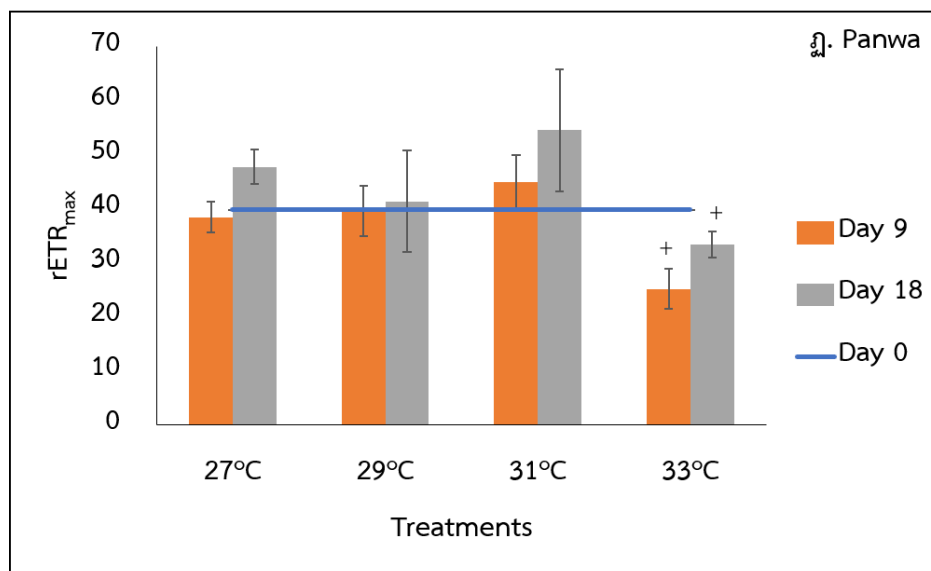
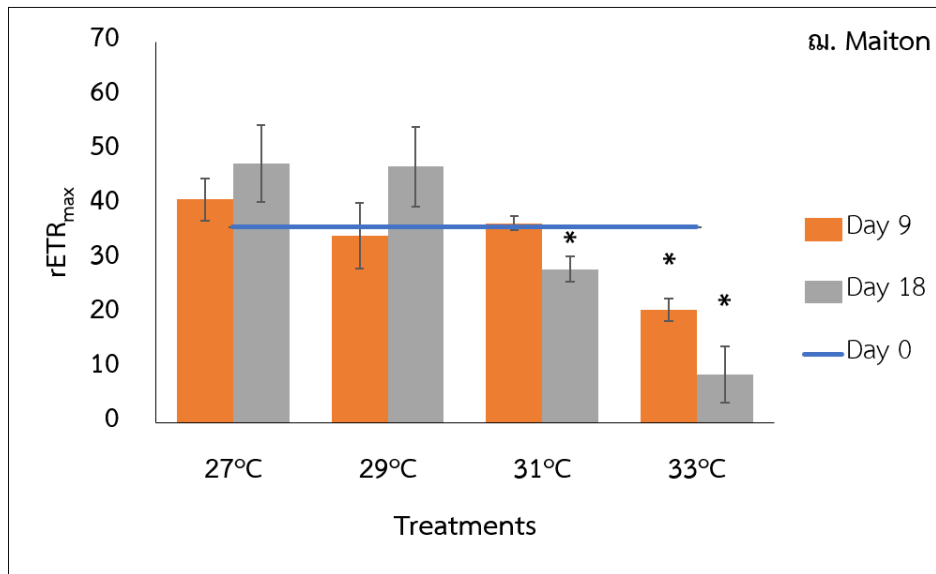


ภาพที่ 23 การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงต่อ  $\alpha$ ,  $I_k$  และ  $rETR_{max}$  (Mean  $\pm$  S.D.) ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน (ก. - ค.) และปะการังบริเวณแหลมพันวา (ง. - จ.) ตามลำดับ โดย \* และ + แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดทดลอง ATHL HTAL และ HTHL กับชุดควบคุม (ATAL) ของปะการังจากเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา ตามลำดับ ที่ทดสอบโดยสถิติ one-way ANOVA และ Post Hoc Turkey's Test ( $p < 0.05$ )

การทดลองชี้ดจำกัดของอุณหภูมิต่อ  $\alpha$ ,  $I_k$  และ  $rETR_{max}$  ของปะการังจากเกาะไม้ท่อน (วันเริ่มต้นการทดลอง:  $\alpha$   $0.17 \pm 0.01$ ,  $rETR_{max}$   $33.86 \pm 6.10$  และ  $I_k$   $201.74 \pm 46.68$ ) และแหลมพันวา (วันเริ่มต้นการทดลอง:  $\alpha$   $0.21 \pm 0.01$ ,  $rETR_{max}$   $38.33 \pm 1.82$  และ  $I_k$   $179.83 \pm 5.19$ ) และพบว่าในวันที่ 9 ของการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงที่ปะการังสะสมความเครียด ส่งผลให้ค่า  $\alpha$  ในชุดการทดลอง  $33^\circ\text{C}$  ของปะการังบริเวณแหลมพันวามีความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^\circ\text{C}$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 24 ญ.) สำหรับค่า  $I_k$  ในชุดการทดลอง  $29^\circ\text{C}$   $31^\circ\text{C}$  และ  $33^\circ\text{C}$  ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนมีค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับช่วงเริ่มต้นการทดลอง (วันที่ 0) และส่งผลให้ชุดการทดลอง  $33^\circ\text{C}$  มีความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^\circ\text{C}$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 24 ซ.) และค่า  $rETR_{max}$  ในชุดการทดลอง  $33^\circ\text{C}$  ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษาลดลงอย่างชัดเจนและมีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 24 ฉ. และภาพที่ 24 ก.) ต่อมาวันที่ 18 ของการทดลอง เมื่ออุณหภูมิกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ( $27^\circ\text{C}$ ) ส่งผลให้ค่า  $\alpha$  ในชุดการทดลอง  $33^\circ\text{C}$  ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวามีความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^\circ\text{C}$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 24 ซ. และภาพที่ 24 ญ.) สำหรับค่า  $I_k$  ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวาในทุกชุดการทดลองมีค่า  $I_k$  เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวันที่ 9 ยกเว้นชุดการทดลอง  $31^\circ\text{C}$  ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนที่แสดงแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แต่ยังคงมีความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^\circ\text{C}$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 24 ซ.) สำหรับปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนในชุดการทดลอง  $29^\circ\text{C}$  ของวันที่ 18 ค่า  $rETR_{max}$  แสดงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวันที่ 9 ขณะที่ชุดการทดลอง  $31^\circ\text{C}$  และ  $33^\circ\text{C}$  แสดงแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนและมีความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^\circ\text{C}$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 24 ฉ.) และทุกชุดการทดลองของปะการังบริเวณแหลมพันวา ยังคงแสดงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวันที่ 9 แม้ว่าชุดการทดลอง  $33^\circ\text{C}$  มีความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^\circ\text{C}$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 24 ก.)







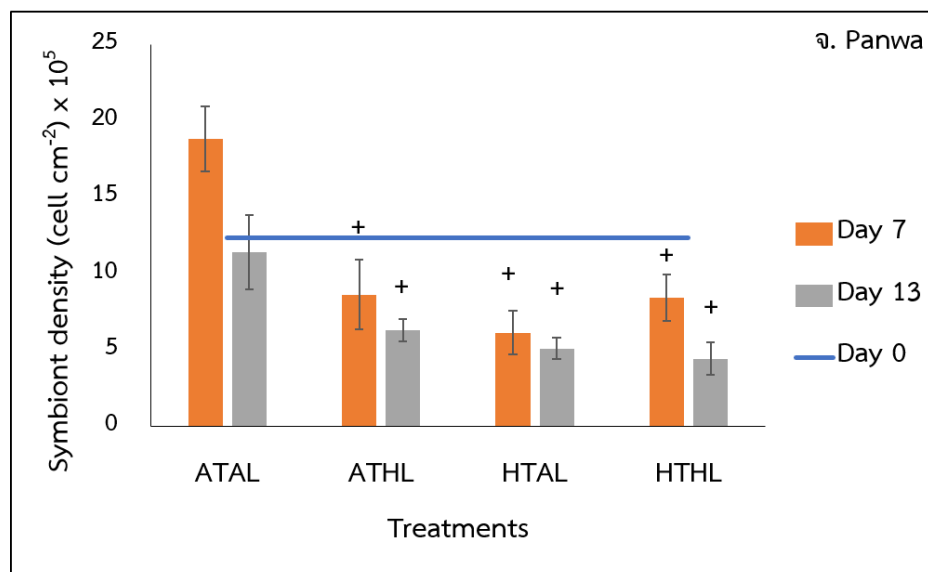
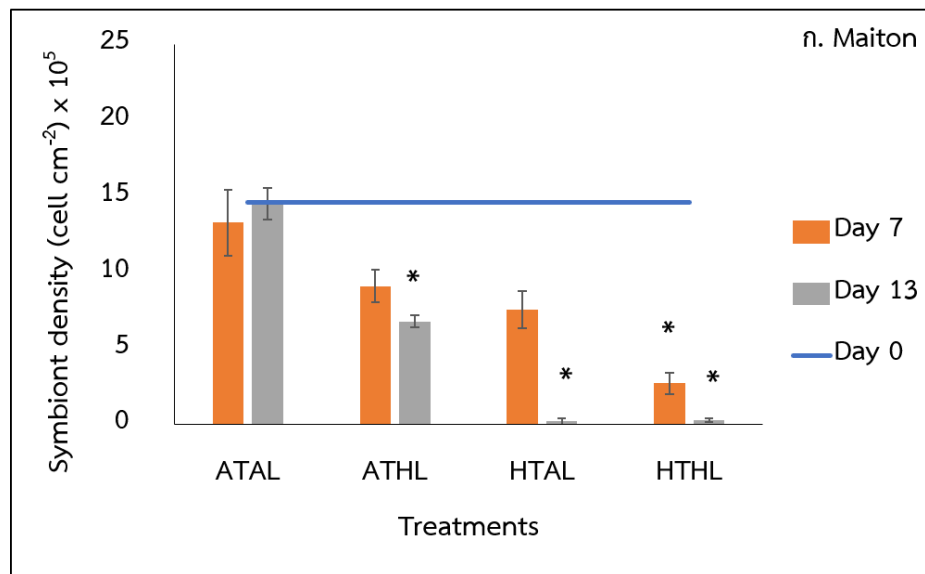
ภาพที่ 24 การทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิต่อ  $\alpha$ ,  $I_k$  และ  $rETR_{max}$  (Mean  $\pm$  S.D.) ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน (ช. - ณ.) และปะการังบริเวณแหลมพันวา (ญ. - ณ.) ตามลำดับ โดย \* และ + แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดทดลอง 29°C 31°C และ 33°C กับชุดควบคุม (27°C) ของปะการังจากเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา ตามลำดับ ที่ทดสอบโดยสถิติ one-way ANOVA และ Post Hoc Turkey's Test ( $p < 0.05$ )

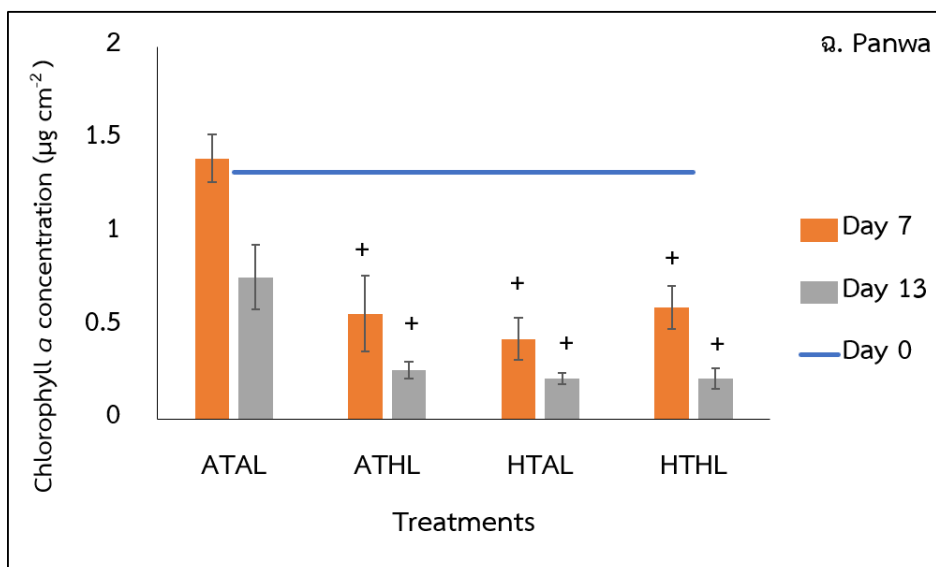
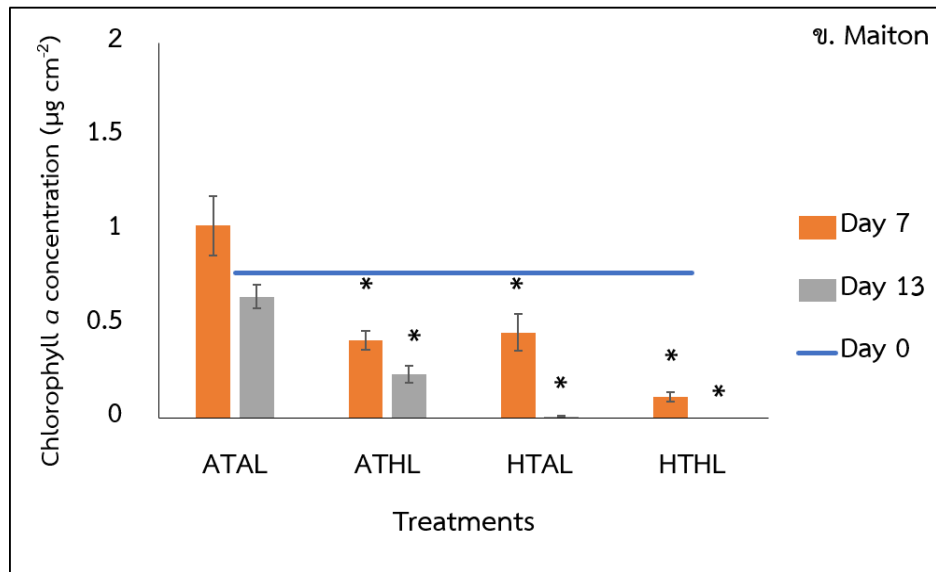


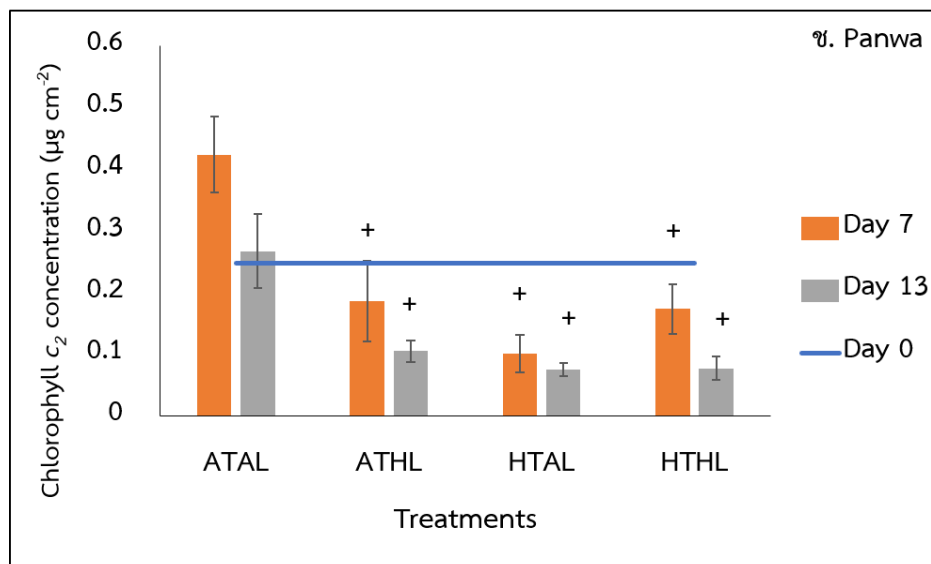
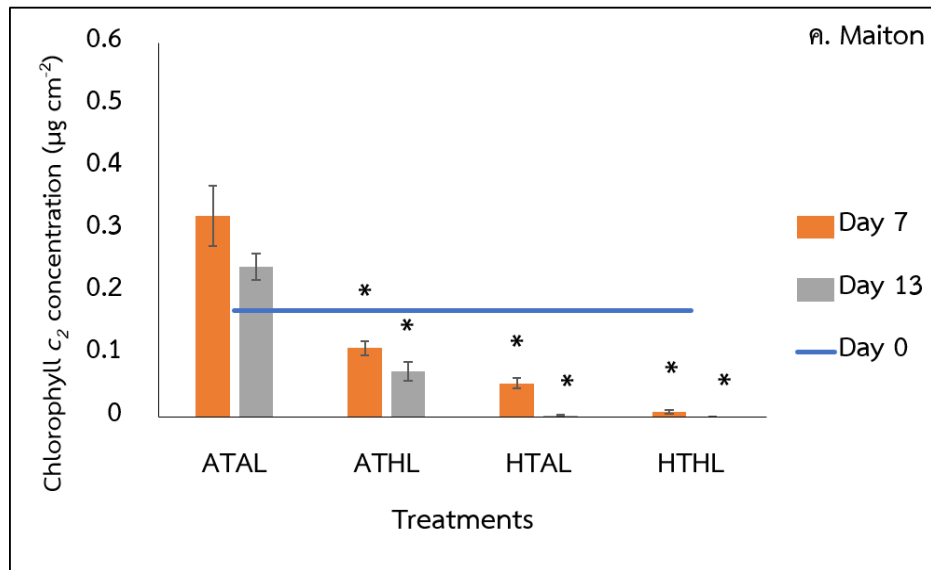
### 3.3. ชูแซนเทลลีและรงควัตถุภายในเซลล์

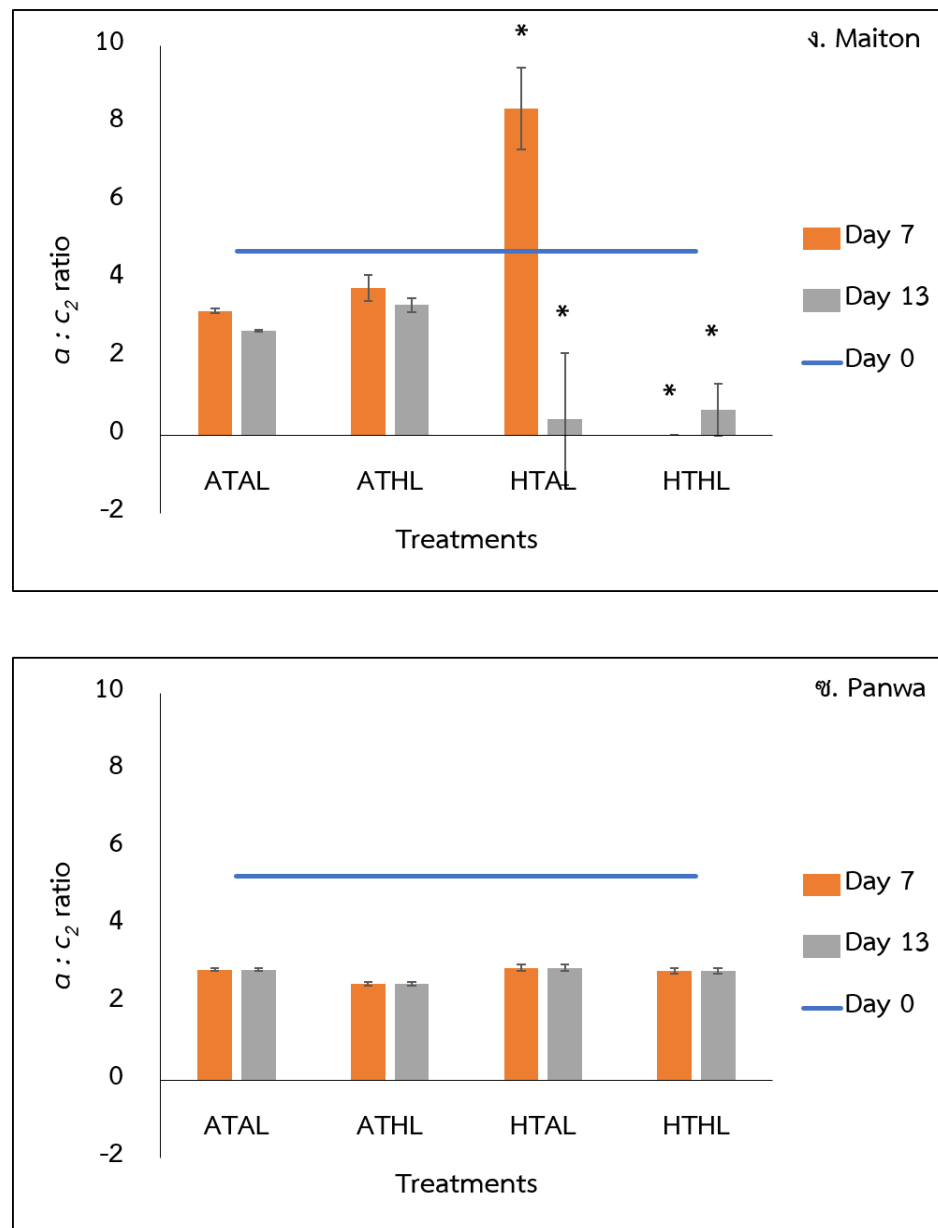
จากการทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงต่อความหนาแน่นของชูแซนเทลลีของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน (วันเริ่มต้นการทดลอง:  $14.61 \pm 4.30 \text{ cell cm}^{-2} \times 10^5$ ) และแหลมพันวา (วันเริ่มต้นการทดลอง:  $12.47 \pm 4.30 \text{ cell cm}^{-2} \times 10^5$ ) พบว่าในช่วงที่ปะการังสะสมความเครียดในวันที่ 7 ของการทดลอง ส่งผลให้ความหนาแน่นของชูแซนเทลลีของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษามีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับวันที่ 0 และส่งผลให้ชุดการทดลอง HTHL ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนและชุดการทดลอง ATHL HTAL และ HTHL มีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 25 ก. และภาพที่ 25 จ.) ต่อมาวันที่ 13 ของการทดลองที่อุณหภูมิกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ( $27^{\circ}\text{C}$ ) พบว่าชุดทุกการทดลองของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษา ยังคงลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งชุดการทดลอง HTAL และ HTHL ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนเมื่อเทียบกับวันที่ 7 และส่งผลให้ทุกชุดการทดลองของทั้งสองพื้นที่ศึกษามีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 25 ก. และภาพที่ 25 จ.) ส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษา ได้แก่ เกาะไม้ท่อน (วันเริ่มต้นของการทดลอง: Chlorophyll  $a$   $0.77 \pm 0.11 \mu\text{g cm}^{-2}$  และ Chlorophyll  $c_2$   $0.17 \pm 0.04 \mu\text{g cm}^{-2}$ ) และแหลมพันวา (วันเริ่มต้นของการทดลอง: Chlorophyll  $a$   $1.33 \pm 0.34 \mu\text{g cm}^{-2}$  และ Chlorophyll  $c_2$   $0.25 \pm 0.06 \mu\text{g cm}^{-2}$ ) พบว่าในช่วงที่ปะการังสะสมความเครียดในวันที่ 7 ของการทดลองส่งผลให้ปริมาณ Chlorophyll  $a$  และ Chlorophyll  $c_2$  ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวามีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับวันที่ 0 และส่งผลให้ชุดการทดลอง ATHL HTAL และ HTHL ของทั้งสองพื้นที่ศึกษามีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 25 ข. ภาพที่ 25 ค. ภาพที่ 25 ฉ. และภาพที่ 25 ช.) ต่อมาวันที่ 13 ของการทดลองที่อุณหภูมิกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ( $27^{\circ}\text{C}$ ) พบว่าชุดทุกการทดลองของทั้งสองพื้นที่ศึกษา ยังคงลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งชุดการทดลอง HTAL และ HTHL ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน และส่งผลให้ทุกชุดการทดลองของทั้งสองพื้นที่ศึกษามีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 25 ข. ภาพที่ 25 ค. ภาพที่ 25 ฉ. และภาพที่ 25 ช.) และอัตราส่วนของปริมาณคลอโรฟิลล์ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษา ได้แก่ เกาะไม้ท่อน (วันเริ่มต้นของการทดลอง:  $4.73 \pm 0.36$ ) และแหลมพันวา (วันเริ่มต้นของการทดลอง:  $5.28 \pm 0.18$ ) พบว่าช่วงที่ปะการังสะสมความเครียดในวันที่ 7 ของการทดลองส่งผลให้ชุดการทดลอง HTHL ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับวันที่ 0 และมีความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 25 ง.) ขณะที่ทุกชุดการทดลองของปะการังบริเวณแหลมพันวามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน และไม่มีความ

แตกต่างกับชุดควบคุม (ภาพที่ 25 ข.) จนกระทั่งวันที่ 13 ของการทดลองอุณหภูมิกลับเข้าสู่สภาวะปกติ (27°C) พบว่าอัตราส่วนของปริมาณคลอโรฟิลล์ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนในชุดการทดลอง ATHL มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับวันที่ 7 และชุดการทดลอง HTAL ลดลงอย่างมาก แต่ในขณะที่ชุดการทดลอง HTHL เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวันที่ 7 และมีความแตกต่างกับชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 25 ง.) อย่างไรก็ตามทุกชุดการทดลองของปะการังบริเวณแหลมพันวา มีแนวโน้มของอัตราส่วนของปริมาณคลอโรฟิลล์ใกล้เคียงกับวันที่ 7 และไม่มี ความแตกต่างกับชุดควบคุม (ATAL)





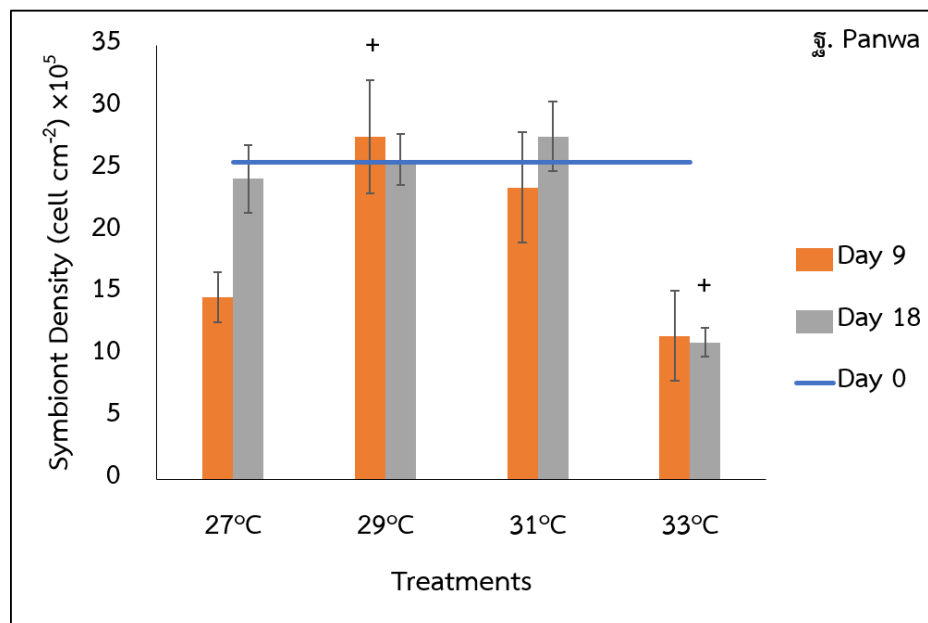
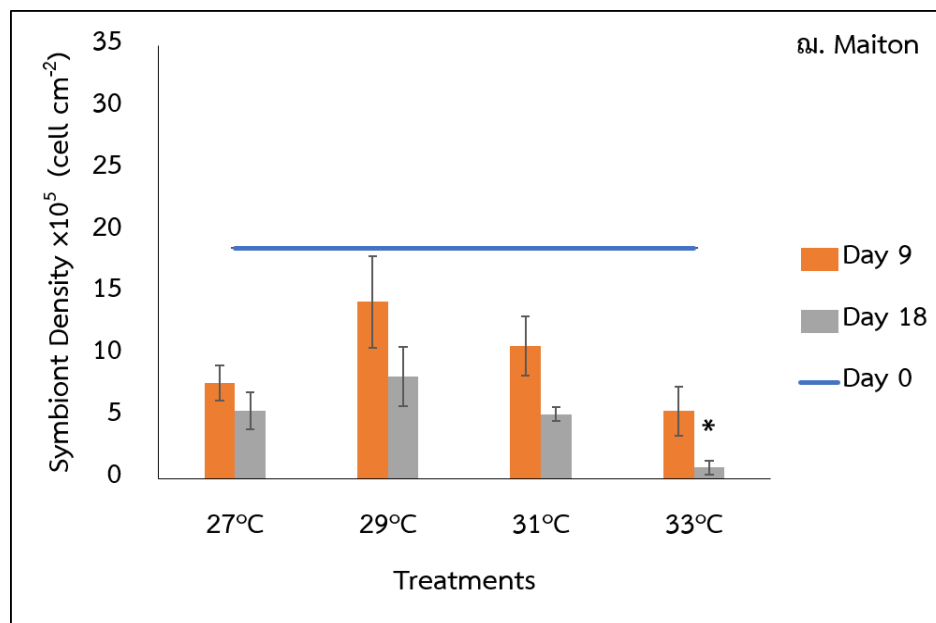


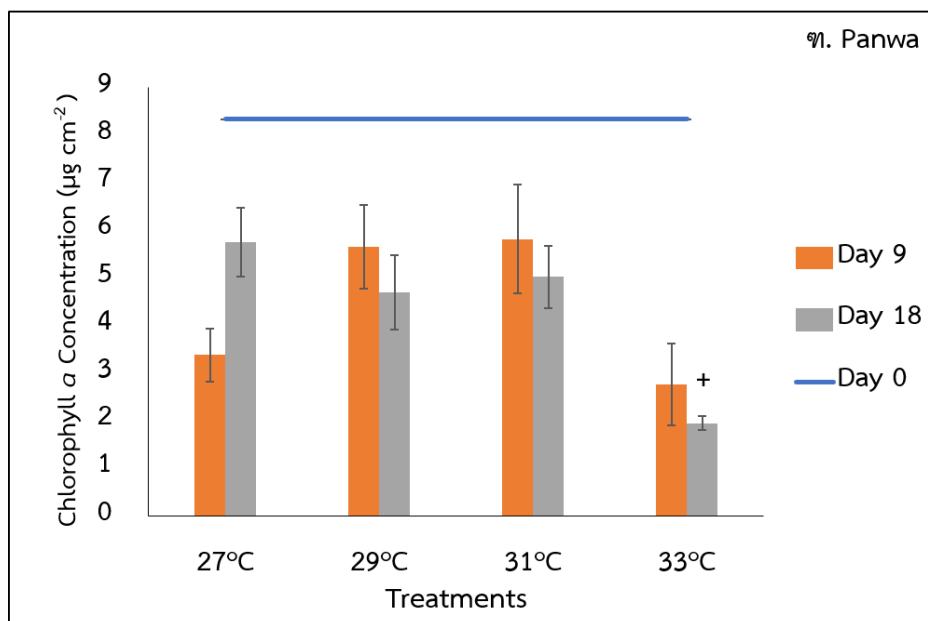
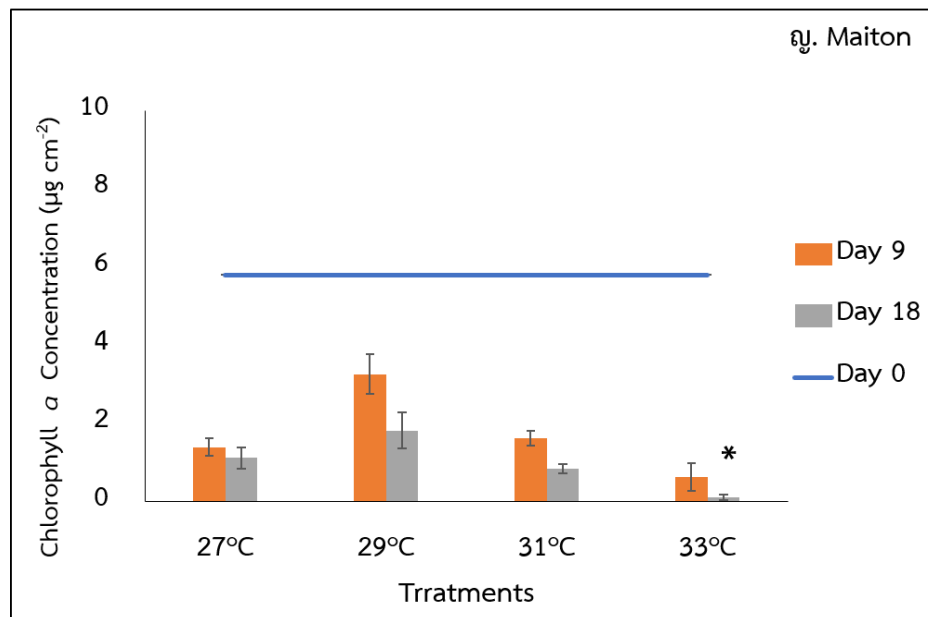


ภาพที่ 25 การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงต่อความหนาแน่นของซูแซนเทลลี ปริมาณ Chlorophyll  $a$  และ Chlorophyll  $c_2$  และอัตราส่วนของปริมาณคลอโรฟิลล์ (Mean  $\pm$  S.D.) ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน (ก. – ง.) และปะการังบริเวณแหลมพันวา (จ. – ช.) ตามลำดับ โดย \* และ + แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดทดลอง ATHL HTAL และ HTHL กับชุดควบคุม (ATAL) ของปะการังจากเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา ตามลำดับ ที่ทดสอบโดยสถิติ one-way ANOVA และ Post Hoc Turkey's Test ( $p < 0.05$ )

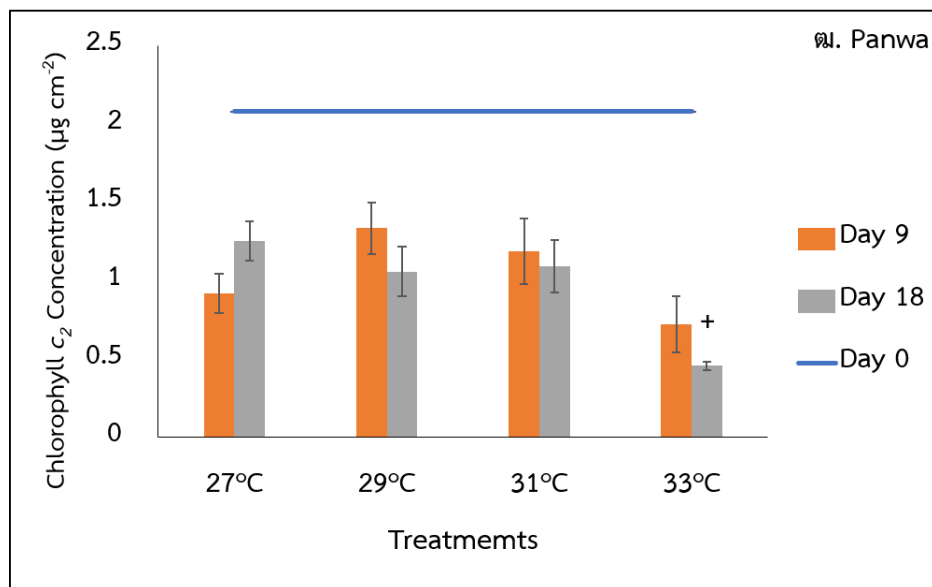
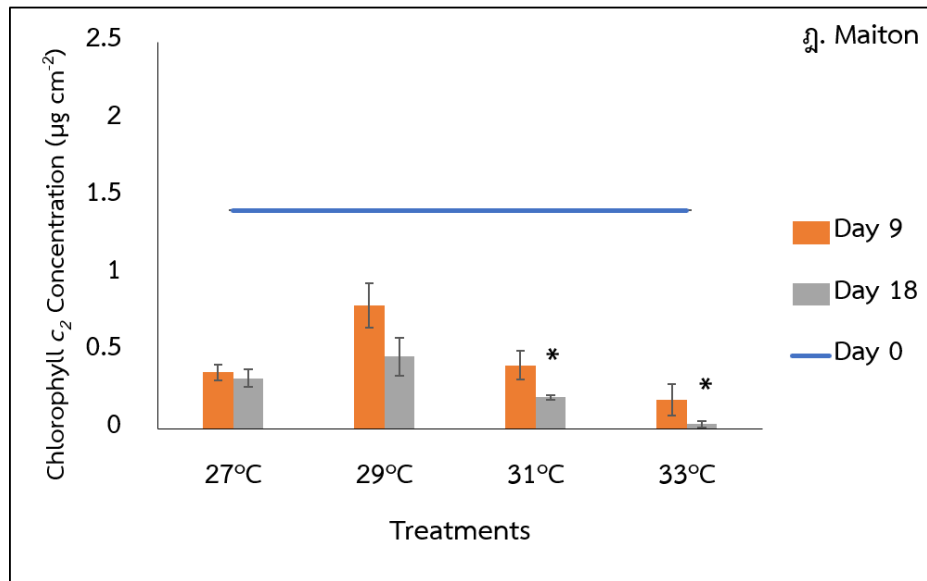
การทดลองชี้ดจำกัดของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของซูแซนเทลลีของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน (วันเริ่มต้นการทดลอง:  $18.60 \pm 2.85 \text{ cell cm}^{-2} \times 10^5$ ) และแหลมพันวา (วันเริ่มต้นการทดลอง:  $25.60 \pm 2.00 \text{ cell cm}^{-2} \times 10^5$ ) พบว่าในวันที่ 9 ของการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงที่ปะการังสะสมความเครียด ส่งผลให้ความหนาแน่นของซูแซนเทลลีของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวาในทุกชุดการทดลองยังไม่มี ความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) โดยเฉพาะอย่างยิ่งชุดการทดลอง  $29^{\circ}\text{C}$  ของทั้งสองพื้นที่ศึกษาแสดงความหนาแน่นของซูแซนเทลลีมากกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ต่อมาวันที่ 18 ของการทดลอง เมื่ออุณหภูมิกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ( $27^{\circ}\text{C}$ ) ส่งผลให้ความหนาแน่นของซูแซนเทลลีของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนในทุกชุดการทดลองลดลงเมื่อเทียบกับวันที่ 9 และส่งผลให้ชุดการทดลอง  $33^{\circ}\text{C}$  มีความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 26 ฉ.) และปะการังบริเวณแหลมพันวาในชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) ของวันที่ 18 มีค่าความหนาแน่นของซูแซนเทลลีเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวันที่ 9 นอกจากนี้ยังส่งผลให้ชุดการทดลอง  $29^{\circ}\text{C}$   $31^{\circ}\text{C}$  และ  $33^{\circ}\text{C}$  มีแนวโน้มที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับวันที่ 9 แม้ว่าชุดการทดลอง  $33^{\circ}\text{C}$  ยังคงแสดงความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 26 ช.) ส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษา ได้แก่ เกาะไม้ท่อน (วันเริ่มต้นการทดลอง: Chlorophyll  $a$   $5.80 \pm 0.73 \mu\text{g cm}^{-2}$  และ Chlorophyll  $c_2$   $1.42 \pm 0.19 \mu\text{g cm}^{-2}$ ) และแหลมพันวา (วันเริ่มต้นการทดลอง: Chlorophyll  $a$   $8.33 \pm 0.94 \mu\text{g cm}^{-2}$  และ Chlorophyll  $c_2$   $2.08 \pm 0.39 \mu\text{g cm}^{-2}$ ) พบว่าในวันที่ 9 ของการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงที่ปะการังสะสมความเครียด ส่งผลให้ปริมาณ Chlorophyll  $a$  และ Chlorophyll  $c_2$  ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษามีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับวันที่ 0 และชุดการทดลอง  $29^{\circ}\text{C}$  ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนมีความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 26 ญ.) จนกระทั่งวันที่ 18 ของการทดลอง เมื่ออุณหภูมิกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ( $27^{\circ}\text{C}$ ) พบว่าปริมาณ Chlorophyll  $a$  และ Chlorophyll  $c_2$  ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษามีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน และทำให้ปริมาณ Chlorophyll  $a$  ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษาในชุดการทดลอง  $33^{\circ}\text{C}$  มีความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 26 ฎ. และภาพที่ 26 ซ.) และปริมาณ Chlorophyll  $c_2$  ของชุดการทดลอง  $31^{\circ}\text{C}$  ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนและชุดการทดลอง  $33^{\circ}\text{C}$  ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษามีความแตกต่างกับชุดควบคุม ( $27^{\circ}\text{C}$ ) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ , ภาพที่ 26 ฏ. และภาพที่ 26 ฅ.) และอัตราส่วนของปริมาณคลอโรฟิลล์ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษา ได้แก่ เกาะไม้ท่อน (วันเริ่มต้นของการทดลอง:  $4.14 \pm 0.16$ ) และแหลมพันวา (วันเริ่มต้นของการทดลอง:  $4.05 \pm 0.19$ ) พบว่าในวันที่ 9 ของการทดลองซึ่งเป็นช่วงที่ปะการังสะสมความเครียด พบว่าทุกชุดการทดลองของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษา ยังแสดงค่าที่

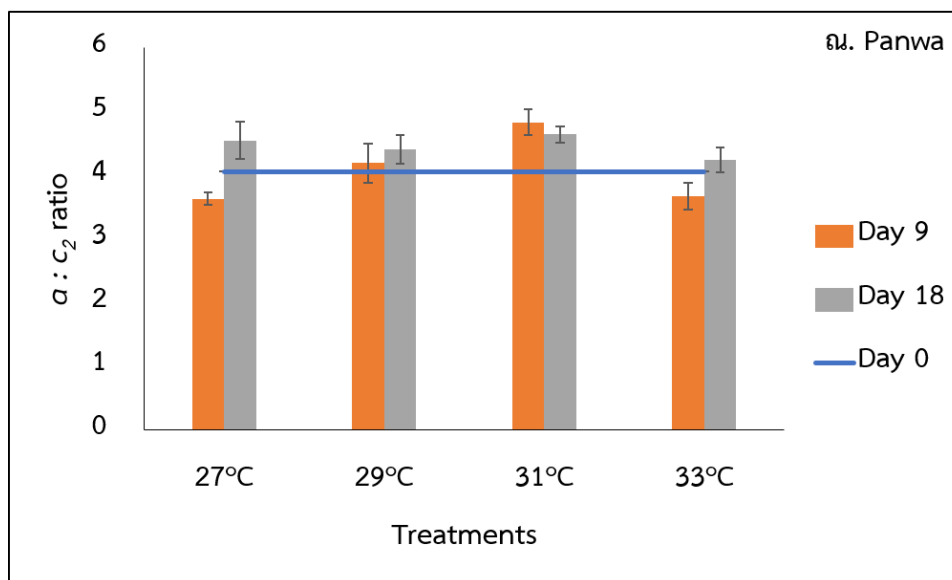
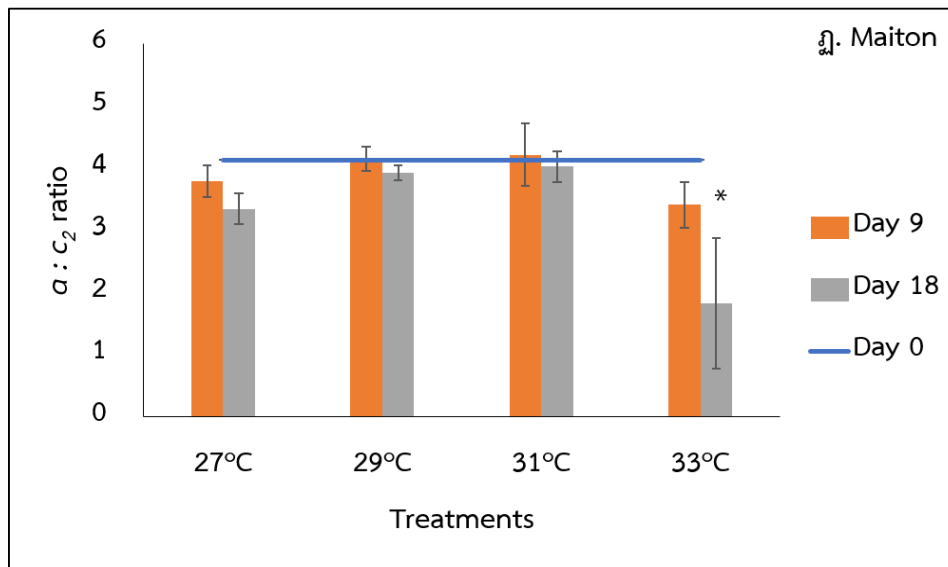
ค่อนข้างใกล้เคียงกับวันที่ 0 และยังมีชุกชุมการทดลองใดที่แตกต่างกับชุดควบคุม (27°C) ต่อมาวันที่ 18 ของการทดลองอัตราส่วนของปริมาณคลอโรฟิลล์ของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษายังคงแสดงแนวโน้มที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับวันที่ 0 และวันที่ 9 ของการทดลอง และพบว่าทุกชุดการทดลองของทั้งสองพื้นที่ศึกษาไม่มีชุกชุมการทดลองใดที่แตกต่างกับชุดควบคุม (27°C) ยกเว้นชุดการทดลอง 33°C มีแนวโน้มลดลงและมีความแตกต่างกับชุดควบคุม (27°C) อย่างมีนัยสำคัญ











ภาพที่ 26 การทดลองชี้ตจกักตของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของซูแซนเทลลีส ปริมาณ Chlorophyll  $\alpha$  และ Chlorophyll  $c_2$  และอัตราส่วนของปริมาณคลอโรฟิลล์ (Mean  $\pm$  S.D.) ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน (ผ. - ภู.) และปะการังบริเวณแหลมพันวา (ฐ. - ผ.) ตามลำดับ โดย \* และ + แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดทดลอง 29°C 31°C และ 33°C กับชุดควบคุม (27°C) ของปะการังจากเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวา ตามลำดับ ที่ทดสอบโดยสถิติ one-way ANOVA และ Post Hoc Turkey's Test ( $p < 0.05$ )

## บทที่ 4

### วิเคราะห์ผลการศึกษา (Discussion)

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลให้เกิดการฟอกขาวของปะการังที่มีการสูญเสียชุมชนเทลลี ในบางกรณีปะการังสามารถฟื้นตัวจากการฟอกขาวได้เมื่อสภาพแวดล้อมกลับเข้าสู่ปกติ แต่หากเกิดความเครียดเป็นเวลานานเกินขีดจำกัด ปะการังไม่สามารถมีชีวิตรอดได้ งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถในการต้านทาน แนวโน้มการฟื้นตัว และการปรับตัวของปะการังและชุมชนเทลลีที่ได้รับภัยคุกคาม และปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ น้ำทะเล และแสงที่ส่งผลต่อสุขภาพของปะการัง ไม่ว่าจะเป็นประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง การเจริญเติบโต กลไกภายในเซลล์และการฟอกขาวผ่านการทดลอง 2 การทดลอง ได้แก่ การตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสง และการทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและความเข้มแสง โดยเฉพาะปัจจัยของอุณหภูมิ ซึ่งเป็นปัจจัยสิ่งแวดล้อมหลัก ๆ ที่สำคัญที่ทำให้เกิดการชักนำความเครียดและนำไปสู่การฟอกขาวของปะการัง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lesser และ Ferrell (2004), Ros et al. (2016) และ Putschim (2017) และปัจจัยรองลงมา ได้แก่ แสงหรือรังสีจากดวงอาทิตย์ โดยส่วนใหญ่พบว่าทั้งสองปัจจัยดังกล่าวมักเกิดควบคู่กันและมีความเชื่อมโยงกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Brown, 1997; Douglas, 2003; Hughes et al., 2017) และจากผลการศึกษาพบว่าผลกระทบที่ปะการังและชุมชนเทลลีได้รับในพื้นที่ศึกษาทั้งเกาะไม้ท่อนและแหลมพันวาไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมดังกล่าวซึ่งแตกต่างกัน รวมถึงชนิดของปะการังและชุมชนเทลลีสามารถแยกประเด็นต่าง ๆ ได้แก่ ผลกระทบจากอุณหภูมิและแสงต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของปะการัง ผลกระทบจากอุณหภูมิและแสงต่อการเจริญเติบโตของปะการัง แนวโน้มในการฟื้นตัวและปรับตัว และการจัดการแนวปะการังต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและกิจกรรมของมนุษย์

#### 4.1 ผลกระทบจากอุณหภูมิและแสงต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของปะการัง

ปะการังเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและได้รับผลกระทบภายใต้ปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิและความเข้มแสงที่สูง จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า เมื่อปัจจัยข้างต้นนี้เพิ่มขึ้นหรือสูงเกินความสามารถที่ปะการังและชุมชนเทลลีรับได้ นำไปสู่การสร้างความเสี่ยงให้กับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งถือว่าเป็นขั้นแรกของการที่ปะการังและชุมชนเทลลีได้รับผลกระทบจนนำไปสู่การสะสมความเครียดเกิดการเปลี่ยนแปลง

กลไกภายในเซลล์ ได้แก่ ประสิทธิภาพหรือความสามารถในการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยพารามิเตอร์นี้เป็นพารามิเตอร์ที่ดีใช้ในการบ่งบอกสุขภาพของปะการัง (Vaughan, 2014) และจากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของปะการัง *P. acuta* ทั้งสองพื้นที่ศึกษาที่ดีที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 29°C ปะการังแสดงการฟอกขาว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 31 – 32°C ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vaughan (2014) และปะการังตายที่อุณหภูมิ 33°C โดยเฉพาะปะการังจากบริเวณเกาะไม้ท่อน

ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง เมื่อการมีช็กนำความเครียดแก่ปะการัง ทั้งการเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มแสง โดยเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่า Maximum Quantum Yield (MQY) และ Effective Quantum Yield (EQY) ซึ่งมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่ออุณหภูมิลดลงเพิ่มขึ้น และส่งผลให้อัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอน (relative Electron Transport Rate: rETR) ทั้งสองพื้นที่ศึกษามีค่าลดลงเช่นกัน และจากผลการศึกษาทำให้ทราบว่าอัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอนมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (Effective Quantum Yield: EQY) กล่าวคือ ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงเป็นผลมาจากการช็กนำความเครียด (Schreiber, 2004) เช่น ปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนในช่วงวันที่ 5 ถึงวันที่ 7 ของการทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสง และชุดการทดลอง ATHL และ HTHL และปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนในชุดการทดลอง 33°C ที่ลดลงตั้งแต่วันที่ 9 ของการทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากมีการสะสมความเครียดอยู่ตลอดเวลา แม้ว่าอุณหภูมิลดลงเข้าสู่สภาวะปกติ (27°C) แล้วก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bhagooli & Hidaka (2006) และ Ralph & Larkum (2001) ที่พบว่าปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าปะการังบริเวณแหลมพันวาสามารถฟื้นตัวได้ เมื่ออุณหภูมิลดลงจนเข้าสู่อุณหภูมิปกติ (27°C) เห็นได้จากค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงที่เพิ่มขึ้นตามลำดับและสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Lesser & Farrell (2004) และ Bhagooli & Hidaka (2006) เกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของรังสีและอุณหภูมิของปะการังและวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงตั้งแต่เพิ่มและลดอุณหภูมิจนกระทั่งปะการังเข้าสู่ช่วงการฟื้นตัว โดยพบว่าปะการังมีค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงฟื้นตัว

อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงยังมีความเชื่อมโยงกับความหนาแน่นของสาหร่ายซูแซนเทลลี ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของการทำหน้าที่สังเคราะห์ด้วยแสง โดยประชากรซูแซนเทลลีมีความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกันกับปะการัง โดยมีหน้าที่ในการสังเคราะห์ด้วยแสงด้วยการตรึงคาร์บอนจากปะการัง (โฮสต์) เพื่อแลกเปลี่ยนแร่ธาตุและสารอาหาร โดยทั่วไปแล้ว ความหนาแน่น

ของประชากรของซูแซนเทลลีที่เป็นตัวแทนในแนวปะการังอยู่ในช่วงระหว่าง  $5 \times 10^5$  ถึง  $50 \times 10^5$  cell cm<sup>-2</sup> ซึ่งบ่งบอกได้ว่าแนวปะการังมีสุขภาพดี เนื่องจากมีปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต ทั้งแสง อุณหภูมิ สารอาหาร และตะกอน เป็นต้น (Hoegh-Guldberg, 1999; Weis, 2008) เมื่อการมีชีวนำความเครียดแก่ปะการังประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง จากการผลิตสีของเนื้อเยื่อปะการังพบว่าเนื้อเยื่อมีสีซีดลงหรืออ่อนลง เนื่องจากปริมาณคลอโรฟิลล์ที่อยู่ในเนื้อเยื่อต่อพื้นที่ผิวของปะการังลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Falkowski et al. (1984) อีกทั้งยังพบว่าปะการังของแต่ละชุดการทดลองแสดงสีของการซีดที่แตกต่างกันไป เนื่องจากปัจจัยของความหนาแน่นของซูแซนเทลลีในแต่ละชั้นของปะการังไม่เท่ากัน รวมถึงชนิดพันธุ์ของซูแซนเทลลีที่อาจมีความแตกต่างกัน (Kühl et al. 1995, de Beer et al. 2000) และท้ายที่สุดเกิดการฟอกขาวเนื้อเยื่อปะการังหลุดลอกออกไปจากโครงสร้างของปะการัง สาหร่ายเริ่มลงเกาะจนทำให้ปะการังอ่อนแอและตายในที่สุด โดยเฉพาะปะการังจากบริเวณเกาะไม้ท่อนที่เห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน และส่งผลกระทบต่อเป็นลูกโซ่กับความหนาแน่นของซูแซนเทลลี คลอโรพลาสต์เกิดความเสียหายและปริมาณรงควัตถุภายในเซลล์ลดลง เช่น วันที่ 7 ของการทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงในชุดการทดลอง HTHL ของปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน ซึ่งชุดการทดลองนี้ได้รับความเครียดจากการสะสมความเครียดจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในแต่ละวันจนถึงอุณหภูมิสูงสุด (33 °C) และความเข้มแสงที่สูงตลอดการทดลอง (300  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) และปะการังบริเวณแหลมพันวาในชุดการทดลอง ATHL ที่ได้รับความเครียดเพียงจากปัจจัยความเข้มแสงที่สูงตลอดการทดลอง (300  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) และชุดการทดลอง HTAL ที่ได้รับเพียงความเครียดจากการสะสมความเครียดจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในแต่ละวันจนถึงอุณหภูมิสูงสุด (33 °C) แม้ว่าจะได้รับความเครียดจากปัจจัยใดปัจจัยหรือปัจจัยของความเครียดที่เกิดควบคู่กันไปก็ต่างส่งผลให้ความหนาแน่นของซูแซนเทลลีลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao และ Yu (2014) ที่พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำทะเลส่งผลให้เกิดการสูญเสียซูแซนเทลลีและ/หรือปริมาณรงควัตถุที่อยู่ภายในเซลล์ซูแซนเทลลีลดลง และงานวิจัยของ Tchernov และคณะ (2004) และ Hawkins (2014) พบว่าปัจจัยสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและแสงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ปะการังเกิดความเครียดและสร้างความเสียหายและทำลายคลอโรพลาสต์ซึ่งนำไปสู่การผลิต Reactive Oxygen Species (ROS) และสารอนุมูลอิสระที่มากเกินไปส่งผลให้เซลล์ของปะการังถูกทำลาย จนนำไปสู่การฟอกขาวและเกิดการตายของปะการัง เมื่ออุณหภูมิเริ่มกลับเข้าสู่สภาวะปกติ (27°C) ประชากรซูแซนเทลลีค่อย ๆ เริ่มฟื้นตัว เกิดการยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ทำให้ซูแซนเทลลีและปะการังสามารถปรับตัวต่อความเครียด และเมื่อสภาพแวดล้อมกลับเข้าสู่สภาวะปกติ

และสามารถทนทานและ/หรือต้านทานความเครียดได้ก็จะสามารถฟื้นตัวและดำรงชีวิตได้ (Jokiel & Coles, 1990; Douglas, 2003; Baird et al., 2008; Caroselli et al., 2015)

#### 4.2 ผลกระทบจากอุณหภูมิและแสงต่อการเจริญเติบโตของปะการัง

ปะการังสามารถเจริญเติบโตได้โดยการเพิ่มขนาดของโครงสร้างที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากการสะสมของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) โดยอาศัยโพลิปเป็นผู้สร้างแคลเซียมคาร์บอเนตผ่านปฏิกิริยาเคมี ( $2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเยื่อโพลิปปะการัง ปะการังต้องการพลังงานจำนวนมากในการสร้างหินปูนและพลังงานเหล่านี้มาจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของซูแซนเทลลี (Khaled bin Sultan Living Oceans Foundation, 2014) ซึ่งปะการังแต่ละชนิดมีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่างกัน ทั้งปัจจัยของชนิดพันธุ์ปะการังและสภาพแวดล้อมเป็นตัวกำหนด ได้แก่ อุณหภูมิ ปะการังเติบโตได้ดีเมื่ออุณหภูมิที่คงที่และอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ความชื้นและตะกอนเป็นอุปสรรคในการบดบังแสงแดดที่เป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของปะการัง เนื่องจากประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงย่อมส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตลดลงไปด้วย และกระแสน้ำที่มีส่วนช่วยในการเพิ่มการแลกเปลี่ยนก๊าซ ( $\text{CO}_2$  และ  $\text{O}_2$ ) และสารอาหาร เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและจับอาหารได้มากขึ้น ทำให้ปะการังมีความสามารถในการสร้างโครงสร้างหินปูน รวมถึงเติบโตได้มากขึ้น และเป็นที่น่าทึ่งกันว่าปะการังเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยสิ่งแวดล้อมซึ่งปัจจัยที่เป็นอุปสรรคและขัดขวางการเจริญเติบโตของปะการัง ได้แก่ ความเครียดจากอุณหภูมิและแสง

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการเจริญเติบโตของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษามีความแตกต่างกันในแต่ละชุดการทดลอง และดูเหมือนว่าปะการังบริเวณแหลมพันวา มีอัตราการเจริญเติบโตและปรับตัวได้ดีกว่าปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน และพบว่าทั้งสองพื้นที่ศึกษามีอัตราการเจริญเติบโตที่ลดลงและลดหลั่นต่างกันไป เมื่อได้รับความเครียดจากอุณหภูมิและความเข้มแสง เช่น ปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษาในชุดการทดลอง ATHL ปะการังบริเวณแหลมพันวาในชุดการทดลอง HTHL ของการทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสง ได้รับความเครียดจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความเข้มแสงที่สูง แต่ในขณะเดียวกันปะการังบางชิ้นบริเวณเกาะไม้ท่อนในชุดการทดลอง HTAL และชุดการทดลอง HTHL ไม่มีอัตราการเจริญเติบโต เมื่อเทียบกับวันเริ่มต้นของการทดลอง นั่นหมายความว่าปะการังไม่สามารถปรับตัวและตายในที่สุด เมื่อได้รับความเครียด สำหรับปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษาในชุดการทดลอง 29°C และชุดการทดลอง 31°C ของการทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิมีอัตราการเจริญเติบโตได้ดี เมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิปกติ (27°C) แต่ในทางกลับกันชุดการทดลอง 31°C ปะการังบริเวณแหลมพันวา มีอัตราการเจริญเติบโตที่ลดลงอย่างมาก และขณะเดียวกันปะการัง

บริเวณเกาะไม้ท่อนกลับไม่มีอัตราการเจริญเติบโตเมื่อเทียบกับวันเริ่มต้นของการทดลอง และจากการศึกษาพบว่าความเข้มแสงที่สูง ( $300 \mu\text{mol photons m}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) อัตราการเจริญเติบโตของปะการังต่ำกว่าถ้าเทียบกับความเข้มแสงที่น้อย ( $150 \mu\text{mol photons m}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Schutter et al. (2011) เนื่องจากความเข้มแสงที่สูงเกินกว่าปะการังจะรับได้และ/หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงกะทันหัน ทำให้เกิดการรบกวนกลไกการทำงานภายในเซลล์ซูแซนเทลลี และ/หรือเซลล์ของปะการัง (Hoegh-Guldberg, 1994) ซึ่งส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตลดลง หรือสามารถปรับตัวและเจริญเติบโตกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนไปได้ เช่น ซูแซนเทลลีมีการสร้างกลไกการป้องกันจากแสง ถ้าความเข้มแสงสูงเกินกว่าจะรับได้ เพื่อป้องกันไม่ให้เนื้อเยื่อและเซลล์ถูกทำลายจนเสียหาย พร้อม ๆ กับสร้างกลไกยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสง เพื่อเพิ่มช่วยประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยทั้งสองกลไกมักเกิดพร้อมกันและสมดุลกัน (Franklin et al., 1996) นอกจากนี้ยังมีระบบการซ่อมแซมความเสียหายภายในเซลล์ ทั้งนี้เพื่อช่วยให้ซูแซนเทลลีสามารถต้านทานต่อความเข้มแสงที่สูงได้มากขึ้นและเกิดการถ่ายโอนออกซิเจนจากซูแซนเทลลีไปสู่เนื้อเยื่อปะการัง และถ่ายโอนคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนียมาจากปะการังให้แก่ซูแซนเทลลี เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและการเจริญเติบโต (Allemand & Furla, 2018) ซึ่งกลไกเหล่านี้ช่วยให้ปะการังสามารถเจริญเติบโต ปรับตัวและอยู่รอดได้

#### 4.3 ความสามารถในการปรับตัว

ปะการังและซูแซนเทลลีมีความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกันที่เป็นสิ่งสำคัญต่อวิวัฒนาการ การดำรงชีวิต การสร้างความหลากหลายทางชีวภาพ รวมถึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมและทนทานต่อสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงได้ซึ่งส่งผลต่อการอยู่รอดของปะการัง นอกจากนี้ความหลากหลายทางพันธุกรรมของซูแซนเทลลีและโครงสร้างซูแซนเทลลีภายในเนื้อเยื่อปะการัง ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการปรับตัวต่อการอยู่รอดและสามารถรับมือกับสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป (Stat et al., 2006) สมมติฐานการปรับตัวต่อการฟอกขาว (Adaptive Bleaching Hypothesis: ABH) เป็นสมมติฐานที่พิจารณาเกี่ยวกับการสูญเสียซูแซนเทลลีที่เกิดขึ้น เมื่อเกิดการฟอกขาวในปะการังหรือโฮสต์ที่มีความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกัน มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากรของซูแซนเทลลี เช่น การสับเปลี่ยนไปมา (reshuffling) ของชนิดซูแซนเทลลี การกลับมาของประชากร (repopulation) การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เป็นกลไกที่ช่วยให้ปะการังเกิดการอยู่รอด มีความสามารถในการต้านทานหรือทนทานต่อภาวะเครียดของสิ่งแวดล้อมได้ (Fautin & Buddemeier, 2004) รวมถึงกลไกการยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสง (photoinhibition) ซึ่งเป็นกลไกทางสรีรวิทยาที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของปะการังประกอบกับกลไกการป้องกันจากแสง (photoprotection mechanism) ซึ่งเกิดภายในรงควัตถุซูแซนเทลลีที่สามารถ

ปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบความร้อนที่เป็น non-photochemical quenching ดังนั้นจึงสามารถช่วยป้องกันหรือต่อต้านการถูกทำลายของเนื้อเยื่อและทั้งสองกลไกนี้มักเกิดพร้อมกันและสมดุลกัน (Franklin et al., 1996)

ผลการศึกษาการทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงและการทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษา ได้แก่ เกาะไม้ท่อนและแหลมพันวามีการตอบสนองต่อปัจจัยของสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยเกาะไม้ท่อนเป็นพื้นที่ที่อยู่ห่างจากแผ่นดินใหญ่ของภูเก็ตประมาณ 8 กิโลเมตร น้ำทะเลค่อนข้างใส ปริมาณตะกอนน้อย หากเปรียบเทียบกับแหลมพันวาเป็นพื้นที่ที่อยู่ใกล้ชายฝั่งที่มีการพัฒนาสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ทำให้บริเวณนี้ปริมาณตะกอนสูงและน้ำขุ่น ซึ่งเห็นได้ว่าทั้งสองพื้นที่ศึกษามีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้การตอบสนองของปะการังที่อยู่ในแต่ละพื้นที่ที่มีความแตกต่างกัน ได้แก่ ประสบการณ์ในการตอบสนองความเครียดต่ออุณหภูมิและแสง เห็นได้ว่าเมื่อปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษาได้รับการชักนำความเครียดของอุณหภูมิ เช่น การทดลองขีดจำกัดของอุณหภูมิในชุดการทดลอง 33°C พบว่าปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนมีการตอบสนองต่อความเครียดจากอุณหภูมิ โดยแสดงค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงลดลงตั้งแต่วันที่ 3 ของการทดลองและลดลงอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดลอง แม้ว่าอุณหภูมิกลับเข้าสู่ปกติ (27°C) แล้วก็ตาม ทั้งนี้ปะการังเกิดการสะสมความเครียด ไม่สามารถต้านทานและฟื้นตัวได้ ในขณะเดียวกันปะการังบริเวณแหลมพันวาแสดงค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงที่ค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่ 0 ถึง วันที่ 8 ของการทดลอง และเมื่ออุณหภูมิกลับเข้าสู่ปกติ (27°C) วันที่ 9 ถึง วันที่ 12 ของการทดลองค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงลดลง หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นในวันที่ 16 ถึงสิ้นสุดการทดลอง ค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงค่อย ๆ เพิ่มขึ้น หรือเมื่อปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษาได้รับการชักนำความเครียดของอุณหภูมิและแสง เช่น การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสง ในชุดการทดลอง HTAL และ HTHL ปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษาแสดงค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงลดลงตั้งแต่วันเริ่มต้นการทดลองถึงวันที่ 7 ของการทดลอง ซึ่งเป็นวันที่ค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิวันละ 1°C ตั้งแต่อุณหภูมิ 27°C จนถึง 33°C และตั้งแต่วันที่ 8 จนถึงสิ้นสุดการทดลองซึ่งเป็นวันที่ค่อย ๆ ลดอุณหภูมิวันละ 1 °C ตั้งแต่อุณหภูมิ 33 °C จนอุณหภูมิกลับเข้าสู่ปกติ (27°C) ค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงค่อย ๆ เพิ่มขึ้น แต่ยังคงเกิดการสะสมความเครียดและสามารถค่อย ๆ ฟื้นตัวได้ แม้ว่าปะการังบางชิ้นจากเกาะไม้ท่อนจะฟอกขาวและตายไป และสิ่งที่สังเกตได้ก็คือค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของปะการังบริเวณแหลมพันวามีค่าที่สูงกว่าปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน ซึ่งเป็นไปได้ว่าปะการังบริเวณแหลมพันวาสามารถต้านทานต่อความเครียด มีแนวโน้มปรับตัวและสามารถฟื้นตัวได้มากกว่าปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน เมื่ออุณหภูมิกลับเข้าสู่ปกติ (27°C)

นอกจากปัจจัยด้านอุณหภูมิและแสงที่ส่งผลต่อความเครียดของปะการังพื้นที่ศึกษาแล้ว ยังมีปัจจัยเสริมด้านอื่น ๆ ได้แก่ ปะการังบริเวณแหลมพันวาเป็นพื้นที่ที่มีการพัฒนาชายฝั่ง เช่น ท่าเรือ



โรงแรมจึงได้รับมลพิษ การเพิ่มขึ้นของตะกอน ระดับความลึก การไหลบ่าของน้ำจืด รวมถึงกิจกรรมของมนุษย์ และแม้ว่าปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อนเป็นพื้นที่ที่อยู่ห่างไกลจากแผ่นดินใหญ่ แต่ก็ได้รับปัจจัยเสริมด้วยเช่นกัน ได้แก่ มลพิษ กิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์และการไหลบ่าของน้ำจืด เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้เป็นเหตุให้ปะการังในแต่ละพื้นที่มีการตอบสนองที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของปัจจัยที่ได้รับ รวมถึงโครงสร้างประชากรซูแซนเทลลีและชนิดซูแซนเทลลีในแง่ของการตอบสนองต่อความเครียด จากการศึกษาของ Lien et al. (2013) พบว่าปะการังที่อยู่บริเวณพื้นที่ที่มีการพัฒนาชายฝั่ง มีแร่ธาตุและตะกอนสูง โครงสร้างประชากรซูแซนเทลลีที่มีความโดดเด่น ได้แก่ ชนิด D หรือ clade D สามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมดังกล่าวได้ และจากการศึกษาของ Bongaerts et al., (2015) พบว่าภายใต้สภาวะความเครียดที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือความเข้มข้นแสงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการสับเปลี่ยนและ/หรือถ่ายโอนประชากรซูแซนเทลลีและ/หรือรับซูแซนเทลลีชนิดใหม่ที่ความความทนทาน ความต้านทานเข้ามา เพื่อให้ปะการังได้ปรับตัวและฟื้นตัวได้อย่างรวดเร็ว

#### 4.4 การจัดการแนวปะการังต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและกิจกรรมของมนุษย์

เป็นที่ทราบกันดีว่าโลกกำลังเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและการเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล การตัดต้นไม้ การทำอุตสาหกรรม การอุปโภคบริโภคและการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ มีการคาดการณ์จากรายงานองค์การสหประชาชาติที่ประเมินโดยคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change หรือ IPCC) อุณหภูมิในชั้นบรรยากาศโลกเพิ่มขึ้นประมาณ 2.5°C ภายในปี 2100 หากไม่มีการลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก (Tollefson, 2021) ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิในมหาสมุทรเพิ่มขึ้น มีความถี่มากขึ้นและรุนแรงขึ้น นำไปสู่ระดับน้ำทะเลที่สูงขึ้นและในที่สุดส่งผลต่อแนวปะการังทั่วโลก การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบต่อแนวปะการัง ทั้งการฟอกขาวและการตายอย่างต่อเนื่อง (Heron et al., 2017) โดยมีสาเหตุมาจากความเครียดจากอุณหภูมิ การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลมีแนวโน้มทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของตะกอนที่อาจนำไปสู่การขัดขวางการสังเคราะห์ด้วยแสง การหาอาหาร รวมถึงกระบวนการที่สำคัญอื่น ๆ ทางสรีรวิทยาของแนวปะการัง เช่น การเจริญเติบโต ระดับความรุนแรงของพายุที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้แนวปะการังเสียหายและยากต่อการฟื้นตัว ปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดน้ำจืดปริมาณมากและน้ำพาตะกอนไหลลงสู่แนวปะการัง (The Nature Conservancy, 2021) เป็นต้น นอกจากนี้มีปัจจัยมาจากกิจกรรมของมนุษย์ ผู้คนทั่วโลกอย่างน้อย 500 ล้านคนต่างพึ่งพาแนวปะการัง ทั้งความมั่นคงทางอาหาร การป้องกันชายฝั่งจากภัยธรรมชาติ และเศรษฐกิจ (Wilkinson & Clive, 2004) นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของประชากรเกิดการ

ขยายตัวของเมืองเกิดการสิ่งก่อสร้างและการพัฒนาชายฝั่งทำให้การสะสมปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้น มลพิษ รวมถึงการใช้เครื่องมือประมงผิดประเภทและทำประมงเกินความจำเป็น (Baird et al., 2008; Riegl et al., 2009; Hawkins, 2014; Hughes et al., 2017; Wear, 2016) สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้เกิดเหตุการณ์การฟอกขาวบ่อยครั้งและรุนแรงขึ้น และกำลังส่งผลกระทบต่อแนวปะการังทั่วโลก มีการรายงานในช่วงปี 2009 – 2018 ปะการังทั่วโลกได้เสียหายประมาณ 14% คิดเป็นพื้นที่ประมาณ 11,700 ตารางกิโลเมตร ได้แก่ แนวปะการังบริเวณญี่ปุ่น หมู่เกาะแคริบเบียน และมหาสมุทรอินเดียที่เกิดการฟอกขาวอย่างรุนแรง นอกจากนี้เหตุการณ์ดังกล่าวยังส่งผลกระทบต่อเป็นลูกโซ่ต่อระบบนิเวศอื่น ๆ เช่น ระบบนิเวศหญ้าทะเล ระบบนิเวศป่าชายเลน และระบบนิเวศบนบก เป็นต้น เนื่องจากทุกระบบนิเวศมีความเชื่อมโยงและความสัมพันธ์กัน เป็นต้น

ปัจจุบันทั่วโลกให้ความสำคัญและสร้างความร่วมมือร่วมกันทุกภาคส่วน โดยมีการดำเนินการตามเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ที่มีการบูรณาการเกี่ยวกับการดูแล อนุรักษ์และใช้ประโยชน์ด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สังคม และเศรษฐกิจเข้าด้วยกัน ทั้งการใช้ประโยชน์แนวปะการังอย่างยั่งยืน การติดตาม เฝ้าระวังการเกิดปรากฏการณ์ปะการังฟอกขาว พัฒนางานวิจัยตั้งแต่การสำรวจจนถึงกลไกการตอบสนอง กลไกการปรับตัวการฟื้นตัว ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม รวมถึงการออกกฎหมาย ภาวะเบียดต่าง ๆ ทั้งการใช้ประโยชน์จากนิเวศบริการของแนวปะการัง และการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ (Heron et al., 2017; World Health Organization 2018) โดยอาศัยความร่วมมือทั้งในระดับท้องถิ่นจนถึงระดับโลกนำไปสู่การเชื่อมโยงและการบูรณาการกับแนวทางบริหารจัดการแนวปะการังในเชิงการป้องกัน บรรเทา และรับมือกับสถานการณ์ปะการังฟอกขาวในอนาคต ซึ่งประเด็นดังกล่าวเกี่ยวข้องกับ SDGs 14 นิเวศทางทะเลและมหาสมุทร โดยประเด็นนี้มุ่งเน้นการป้องกันและลดมลพิษทางทะเลทุกประเภท โดยเฉพาะจากกิจกรรมบนแผ่นดิน รวมถึงขยะและมลพิษจากธาตุอาหาร ภายในปี 2568 การลดและแก้ปัญหาผลกระทบของการเป็นกรดในมหาสมุทร การบริหารจัดการและปกป้องระบบนิเวศทางทะเลและชายฝั่งอย่างยั่งยืนเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบทางลบที่จะส่งผลทั้งทางตรงและทางอ้อม รวมถึงการออกกฎหมายและกำกับการทำประมงให้มีประสิทธิภาพ ลดและยุติการทำประมงเกินขีดจำกัด การประมงที่ผิดกฎหมาย และไม่มีการควบคุม นอกจากนี้ต้องมีการอนุรักษ์พื้นที่ทางทะเลและชายฝั่งโดยให้เป็นไปตามกฎหมายระหว่างประเทศและภายในประเทศ และอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่ดีที่สุดที่มีอยู่ (GCRMN, 2021; UNEP, 2021) สำหรับประเทศไทยนั้นได้มีการอนุรักษ์และการฟื้นฟูแนวปะการังซึ่งเป็นไปตามมาตรการทางด้านกฎหมายเพื่อที่จะทำให้นแนวปะการังและทรัพยากรทางทะเลของประเทศอยู่ใน

สภาพที่อุดมสมบูรณ์และสามารถใช้ประชาชนได้อย่างยั่งยืน (กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2564) ได้แก่

1. การแบ่งพื้นที่การใช้ประโยชน์ตามสภาพของแนวปะการังและความสามารถในการใช้ประโยชน์ของชุมชน ทั้งการท่องเที่ยว ประมง รวมถึงการกำหนดมาตรการเพื่อควบคุม จำกัด จำนวนผู้ที่ใช้ประโยชน์หรือห้ามทำกิจกรรมที่ส่งผลกระทบต่อด้านลบแก่แนวปะการัง เนื่องจากเพื่อให้แนวปะการังอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์และยังคงทำหน้าที่ได้ในระบบนิเวศ

2. เปิดโอกาสให้ประชาชนต้องมีบทบาทในการอนุรักษ์ร่วมกับภาครัฐอย่างจริงจัง เช่น ไม่ทิ้งสมอลงในแนวปะการัง ใช้ทุ่นผูกเรือในแนวปะการัง ไม่เดินเหยียบย่ำบนแนวปะการัง ไม่ปล่อยน้ำเสียลงในแนวปะการัง

3. ให้ความรู้อย่างต่อเนื่องในเรื่องการอนุรักษ์ปะการังแก่ผู้ที่เกี่ยวข้องทุกภาคส่วน

4. ส่งเสริมงานวิจัยขั้นพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ด้านชีววิทยาและนิเวศวิทยาทางทะเล รวมถึงองค์ความรู้เชิงลึกเกี่ยวกับพันธุกรรม สรีรวิทยา และการปรับตัวของปะการังเพื่อเสริมสร้างความสามารถในการฟื้นฟูตนเอง ความทนทานให้กับแนวปะการัง เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เมื่อปะการังและซูแซนเทลลีได้รับผลกระทบภายใต้ปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เฉพาะอย่างยิ่ง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความเข้มแสงที่สูง ทำให้เกิดความเสียหายแก่กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงส่งผลกระทบต่อกระบวนการสะสมความเครียด เกิดการเปลี่ยนแปลงกลไกภายในเซลล์ และแสดงออกมาภายนอกเซลล์ เช่น ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง สีของเนื้อเยื่อปะการังพบว่าเนื้อเยื่อมีสีซีดลงหรืออ่อนแอลง เนื้อเยื่อปะการังหลุดลอกออกไป และฟอกขาว ถ้าอุณหภูมิและความเข้มแสงสูงเกินกว่าจะรับได้หรือกระทบกัน ทำให้เกิดการรบกวนกลไกการทำงานภายในเซลล์ ซึ่งส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตลดลง

เนื่องจากปะการังมาจากพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันทางสภาพแวดล้อม ทำให้การเจริญเติบโตของปะการังทั้งสองพื้นที่ศึกษามีความแตกต่างกัน และจากการศึกษาทำให้ทราบว่าปะการังบริเวณแหลมพันวามีการเจริญเติบโตได้ดีกว่าปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน และค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของปะการัง *P. acuta* จากทั้งสองพื้นที่ศึกษาที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 27°C – 29°C โดยปะการังเริ่มเกิดความเครียดเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 31°C หลังจากนั้นแสดงอาการฟอกขาว และตายที่อุณหภูมิ 33°C จากการทดลองที่ 1 พบว่าทั้งอุณหภูมิและแสงส่งผลกระทบต่อปะการัง แต่หากแยกปัจจัยทั้งสองออกจากกัน ปัจจัยอุณหภูมิส่งผลกระทบมากกว่าอย่างชัดเจน เช่น ชุดการทดลองอุณหภูมิปกติความเข้มแสงสูง (ATHL) ปะการังไม่ได้รับผลกระทบมากนัก ในขณะที่ชุดการทดลองอุณหภูมิสูงความเข้มแสงปกติ (HTAL) ปะการังแสดงการฟอกขาว โดยเฉพาะปะการังจากบริเวณเกาะไม้ท่อนพบเนื้อเยื่อหลุดลอกและไม่พบประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการอยู่รอดเป็นอย่างมาก ในขณะที่ปะการังบริเวณแหลมพันวาที่มีการเจริญเติบโตและแนวโน้มการปรับตัวได้ดีกว่า ซึ่งสาเหตุที่ปะการังบริเวณแหลมพันวามีแนวโน้มการปรับตัวได้ดีกว่า เนื่องจากปะการังอยู่ในพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เช่น มีตะกอนและน้ำขุ่นมากกว่า รวมถึงอยู่ใกล้พื้นที่ที่มีการทำกิจกรรมของมนุษย์ จึงมีความสามารถในการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงได้และสามารถฟื้นตัวได้เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่ปกติ (27°C) อยู่รอด และมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีกว่าปะการังบริเวณเกาะไม้ท่อน นอกจากนี้ความสามารถในการต้านทานแนวโน้มการฟื้นตัว และการปรับตัวของปะการังในแต่ละพื้นที่ศึกษาไม่เท่ากัน ซึ่งอาจเป็นในเรื่องของพันธุกรรมที่ถ่ายทอดมายังรุ่นต่อรุ่น ชนิดของ clade ของซูแซนเทลลีและปะการัง รวมถึง

ประสบการณ์หรือการพบเจอกับสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อการปรับตัวของปะการังด้วยเช่นกัน (Putchim, 2017)

ข้อเสนอแนะสำหรับการต่อยอดงานวิจัยและประยุกต์ใช้ในอนาคตในประเด็นของชีวโมเลกุล และการแสดงออกของลักษณะทางพันธุกรรมของปะการังและซูแซนเทลลีของพื้นที่ศึกษานี้ ได้แก่ ชนิดพันธุ์ของซูแซนเทลลี การปรับตัว การทนทาน การต้านทาน และการฟื้นตัว เมื่อได้รับผลกระทบจากความเครียดของอุณหภูมิและแสงที่เพิ่มขึ้นและในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน และข้อเสนอแนะ และข้อควรตระหนักสำหรับการครั้งต่อไปที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับงานวิจัยชิ้นนี้ มีประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

- การเตรียมน้ำทะเลในแต่ละครั้งควรคำนวณปริมาณการใช้และน้ำทะเลสำรองให้รอบคอบ และควรฆ่าเชื้อน้ำทะเลทุกครั้งด้วยคลอรีน เพื่อป้องกันการปนเปื้อน
- การเตรียมตู้ปะการังหลังจากการเก็บปะการังจากธรรมชาติและก่อนการเริ่มการทดลองการชักนำความเครียด ควรเตรียมความพร้อมทั้งในเรื่องน้ำทะเล ระบบหมุนเวียนน้ำ ระบบควบคุมอุณหภูมิ และระบบการกรอง ก่อนเริ่มการทดลองก่อนอย่างน้อยสองสัปดาห์ เพื่อให้ระบบในตู้ปะการังได้หมุนเวียนน้ำทะเลและปรับสมดุลของน้ำทะเลให้สมดุลมากที่สุด ทั้งจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ คุณภาพของน้ำทะเลให้อยู่ในค่าที่เหมาะสม
- สำหรับตู้ทดลองขนาด 70 ลิตร ขนาดขึ้นปะการังที่เหมาะสม ได้แก่ 3 – 5 ซม. และ 1 ตู้ทดลองควรวางขึ้นส่วนปะการังประมาณ 32 – 40 ชิ้น เพื่อไม่ให้ภายในตู้ทดลองมีชิ้นส่วนปะการังที่หนาแน่นเกินไป และทำให้การไหลเวียนของน้ำภายในตู้ทดลองไหลเวียนได้ดี รวมถึงสะดวกและง่ายต่อการทำความสะอาด เช่น การขัดสาหร่าย การเปลี่ยนอุปกรณ์การกรองต่าง ๆ เป็นต้น
- ในระหว่างการทดลองการชักนำความเครียด ควรหมั่นดูแลตู้ทดลองและตรวจสอบคุณภาพน้ำทะเลอย่างสม่ำเสมอ รวมถึงการขัดและทำความสะอาดตู้ทดลองเพื่อลดการเจริญเติบโตของสาหร่าย และทุกครั้งที่สัมผัสน้ำทะเลในตู้ปะการังควรล้างมือและแขนให้สะอาดก่อนสัมผัสน้ำทะเล เนื่องจากป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนของสารเคมี เช่น ครีมนันแดด ครีมทาผิว

## เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. 2556. ชนิดปะการังในประเทศไทย, 21 ตุลาคม 2561.  
[https://km.dmcr.go.th/th/c\\_3/d\\_807](https://km.dmcr.go.th/th/c_3/d_807)
- กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. 2556. ปะการัง, 20 ตุลาคม 2561.  
[https://km.dmcr.go.th/th/c\\_3](https://km.dmcr.go.th/th/c_3)
- จิรัสัย เจนพาณิชย์. (2552). *Biology for high school students* ชีววิทยา สำหรับนักเรียนมัธยมศึกษา. กรุงเทพฯ: บুমคัลเลอร์ไลน์.
- จินดารัตน์ วัดจินดา. (2549). ผลการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายธาตุอาหารพืชอย่างรวดเร็วต่อ กระบวนการสังเคราะห์แสง และเอนไซม์เพอริคลอโรฟิลล์ในใบของยูคาลิปตัส (*Eucalyptus camaldulensis*). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สหภาพ ดอกแก้ว และพงศ์เชษฐา พิษิตกุล. (ม.ป.ป.). *การเลี้ยงปลสวยงามอย่างถูกวิธี*. คณะประมง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. 2556. คู่มือการทำกิจกรรมเรียนรู้ระบบนิเวศทางทะเล และชายฝั่ง: ระบบนิเวศแนว ปะการังเกาะเต่า จังหวัดสุราษฎร์ธานี. เอกสารเผยแพร่ สำนักอนุรักษ์ ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง ฉบับที่ 63. กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร. 130 หน้า
- Al-hammady, M. A. M. (2013). The effect of zooxanthellae availability on the rates of skeletal growth in the Red Sea coral *Acropora hemprichii*. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 39(3), 177 – 183.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejar.2013.10.005>
- Allemand, D., & Furla, P. (2018). How does an animal behave like a plant? Physiological and molecular adaptations of zooxanthellae and their hosts to symbiosis. *Comptes Rendus - Biologies*, 341(5), 276 – 280.  
<https://doi.org/10.1016/j.crvi.2018.03.007>
- Baird, A., Baird, A. H., Bhagooli, R., Ralph, P. J., & Takahashi, S. (2008). Coral bleaching : The role of the host Coral bleaching. *Trends in Ecology and Evolution*, 24(1), 16020. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.09.005>
- Baker, A. C. (2001). Reef corals bleach to survive change. *Nature*, 411(June), 765 – 766. <https://doi.org/10.1038/35081151>

- Baker, A. C. (2003). Flexibility and Specificity in Coral-Algal Symbiosis: Diversity, Ecology, and Biogeography of *Symbiodinium*. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34(1), 661 – 689.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132417>
- Beer, S., Ilan, M., Eshel, A., Weil, A., & Brickner, I. (1998). Use of pulse amplitude modulated (PAM) fluorometry for in situ measurements of photosynthesis in two Red Sea faviid corals. *Marine Biology*, 131(4), 607 – 612.  
<https://doi.org/10.1007/s002270050352>
- Belshe, E. F., Durako, M. J., & Blum, J. E. (2007). Photosynthetic rapid light curves (RLC) of *Thalassia testudinum* exhibit diurnal variation. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 342(2), 253 – 268.  
<https://doi.org/10.1016/j.jembe.2006.10.056>
- Berkelmans, R., & Oppen, M. J. H. Van. (2006). The role of zooxanthellae in the thermal tolerance of corals : a ‘ nugget of hope ’ for coral reefs in an era of climate change, (June), 2305 – 2312.  
<https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3567>
- Bongaerts, P., Carmichael, M., Hay, K. B., Tonk, L., Frade, P. R., & Hoegh-Guldberg, O. (2015). Prevalent endosymbiont zonation shapes the depth distributions of scleractinian coral species. *Royal Society Open Science*, 2(2).  
<https://doi.org/10.1098/rsos.140297>
- Brown, B. E. (1997). Coral bleaching : causes and consequences. *Coral Reefs*, 16, 129 – 138.
- Buddemeier, R. W., Fautin, D. G., Buddemeier, R. W., & Fautin, D. G. (1993). Coral Bleaching as an Adaptive Mechanism A testable hypothesis, 43(5), 320 – 326.
- Caroselli, E., Falini, G., Goffredo, S., Dubinsky, Z., & Levy, O. (2015). Negative response of photosynthesis to natural and projected high seawater temperatures estimated by pulse amplitude modulation fluorometry in a temperate coral. *Frontiers in Physiology*, 6, 1 – 11.  
<https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00317>

- Cote, I. M., Darling, E. S., & Brown, C. J. (2016). Interactions among ecosystem stressors and their importance in conservation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1824), 1 – 9.  
<https://doi.org/10.1098/rspb.2015.2592>
- Douglas, A. E. (2003). Coral bleaching – how and why ? *Marine Pollution Bulletin*, 46, 385 – 392. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00037-7](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00037-7)
- Edwards, A. J., & Gomez, E. D. (2007). *Restoration and Remediation Guidelines*. (C. R. T. R. & C. B. for M. Program, Ed.), *Management*. Queensland. Retrieved from [http://www.gefcoral.org/Portals/25/workgroups/rr\\_guidelines/rrg\\_fullguide.pdf](http://www.gefcoral.org/Portals/25/workgroups/rr_guidelines/rrg_fullguide.pdf)
- Fautin, D. G., & Buddemeier, R. W. (2004). Adaptive bleaching: A general phenomenon. *Hydrobiologia*, 530–531(4), 459 – 467.  
<https://doi.org/10.1007/s10750-004-2642-z>
- Fournier, A. (2013). The story of symbiosis with zooxanthellae , or how they enable their host to thrive in a nutrient poor environment . *BioSciences Master Reviews*, 1 – 8.
- Franklin, L. A., Seaton, G. G. R., Lovelock, C. E., & Larkum, A. W. D. (1996). Photoinhibition of photosynthesis on a tropical reef. *Plant Cell And Environment*, 19(1996), 825 – 836.
- GCRMN. (2021). The Sixth Status of Corals of the World: 2020 Report. 1 February 2022.  
<https://gcrmn.net/2020-report/>
- Gorbunov, M. Y., Kolber, Z. S., Lesser, M. P., Falkowski, P. G., Gorbunov, M. Y., Lesser, M. P., & Falkowski, P. G. (2001). Photosynthesis and photoprotection corals, 46(1), 75 – 85.
- Glynn, P.W. (1991). Coral reef bleaching in the 1980s and possible connections with global warming. *Trends Ecol Evol*, (6), 175 – 179
- Hawkins, C. (2014). Coral Bleaching - A review of the causes and consequences. *A Reef Manager's Guide to Coral Bleaching, Chapter 4*, 22.
- Heron, S. F., Eakin, C. M., Douvère, F., Anderson, K., Day, J. C., Geiger, E., ... Obura, D. (2017). *Impacts of Climate Change on World Heritage Coral Reefs*.



- Hoegh-Guldberg O. (1994). The population dynamics of symbiotic zooxanthellae in the coral *Pocillopora damicornis* exposed to elevated ammonium (NH<sub>4</sub>Cl) concentrations. *Pacific Science*, 48, 263–272.
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., ... Hatziolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science (New York, N.Y.)*, 318(5857), 1737 – 1742.  
<https://doi.org/10.1126/science.1152509>
- Hoegh-Guldberg, Ove. (1999). Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research*, 50(8), 839–866.  
<https://doi.org/10.1071/MF99078>
- Hughes, T. P., Baird, A. H., Bellwood, D. R., Card, M., Connolly, S. R., Folke, C., ... Roughgarden, J. (2003). Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science*, 301(5635), 929 – 933.  
<https://doi.org/10.1126/science.1085046>
- Hughes, Terry P., Kerry, J. T., Álvarez-Noriega, M., Álvarez-Romero, J. G., Anderson, K. D., Baird, A. H., ... Wilson, S. K. (2017). Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, 543(7645), 373 – 377.  
<https://doi.org/10.1038/nature21707>
- IUCN. (2008). Status of the World's Marine Species. Specialist, 2.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01644.x>
- Jokiel, P. L., & Coles, S. L. (1990). Response of Hawaiian and other Indo-Pacific reef corals to elevated temperature. *Coral Reefs*, 8(4), 155 – 162.  
<https://doi.org/10.1007/BF00265006>
- Jones, R. J., Ward, S., Amri, A. Y., & Hoegh-Guldberg, O. (2000). Changes in quantum efficiency of Photosystem II of symbiotic dinoflagellates of corals after heat stress, and of bleached corals sampled after the 1998 Great Barrier Reef mass bleaching event. *Marine and Freshwater Research*, 51(1), 63 – 71. <https://doi.org/10.1071/MF99100>
- Khaled bin Sultan Living Oceans Foundation. (2014). Coral Growth. 11 October 2021.  
<https://www.livingoceansfoundation.org/education/portal/course/growth/>

- Khaled Bin Sultan Living Oceans Foundation. (2014). Reef zones. 21 October 2020.  
<https://www.livingoceansfoundation.org/education/portal/course/reef-zonation/>
- Knowlton, N. Jackson, & J.B.C. (2001). The Ecology of Coral Reefs. Chapter 15, 395 – 422. In Bertness, M. D., Gaines, S. & Hay, M. E. (eds.). *Marine Community Ecology*. Sinauer, Sunderland, MA.
- LaJeunesse, T. C., Loh, W. K. W., van Woesik, R., Hoegh-Guldberg, O., Schmidt, G. W., & Fitt, W. K. (2003). Low symbiont diversity in southern Great Barrier Reef corals, relative to those of the Caribbean. *Limnology and Oceanography*, *48*(5), 2046 – 2054. <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.5.2046>
- LaJeunesse, T. C., Parkinson, J. E., Gabrielson, P. W., Jeong, H. J., Reimer, J. D., Voolstra, C. R., & Santos, S. R. (2018). Systematic Revision of Symbiodiniaceae Highlights the Antiquity and Diversity of Coral Endosymbionts. *Current Biology*, *28*(16), 2570 – 2580.e6.  
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.07.008>
- Lesser, M. P., & Farrell, A. J. H. (2004). Exposure to solar radiation increases damage to both host tissues and algal symbionts of corals during thermal stress. *Coral Reefs*, *23*, 367 – 377. <https://doi.org/10.1007/s00338-004-0392-z>
- Lien, Y. T., Keshavmurthy, S., Nakano, Y., Plathong, S., Huang, H., Hsu, C. M., ... Chen, C. A. (2013). Host genetics and symbiodinium D diversity in a stress-tolerant scleractinian coral, *Oulastrea crispata*, in the west Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, *473*, 163 – 177.  
<https://doi.org/10.3354/meps10041>
- Magnone, V., Allemand, D., & Furla, P. (2011). Adaptations to Endosymbiosis in a Cnidarian- Dinoflagellate Association : Differential Gene Expression and Specific Gene Duplications. *Plos Genetics*, *7*(7), 1 – 17.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1002187>
- Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence-a practical guide, *51*(345), 659–668. <https://doi.org/10.1093/jxb/51.345.659>
- Miththapala, S. (2008). *Coral Reefs: Coastal Ecosystems Series (Volume 1)* (Vol. 1).  
<https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00090-4>

- Nakajima, Y., Wepfer, P. H., Suzuki, S., Zayas, Y., Shinzato, C., Satoh, N., & Mitarai, S. (2017). Microsatellite markers for multiple Pocillopora genetic lineages offer new insights about coral populations. *Scientific Reports*, *7*(1), 1 – 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06776-x>
- Oliver, J. K., Berkelmans, R., & Eakin, C. M. (2008). Coral Bleaching, *205*(October). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69775-6>
- Osinga, R., Janssen, M., & Janse, M. (2008). The role of light in coral physiology and its implications of coral husbandry. *Advances in Coral Husbandry in Public Aquariums*, *2*(November 2014), 173 – 183.
- Pacific, W., Lien, Y., Keshavmurthy, S., & Nakano, Y. (2013). Host genetics and Symbiodinium D diversity in a stress-tolerant scleractinian coral, *Oulastrea crispata*, in the West Pacific, (January 2014). <https://doi.org/10.3354/meps10041>
- Palumbi, S. R., Barshis, D. J., Traylor-Knowles, N., & Bay, R. A. (2014). Mechanisms of reef coral resistance to future climate change. *Science*, *344*(6186), 895 – 898. <https://doi.org/10.1126/science.1251336>
- Buapet, P., Sinutok, S. (2021). Calcification in Three Common Calcified Algae from Phuket, Thailand. *Plants*, *10* (2537). <https://doi.org/10.3390/plants10112537>
- Putchim, L. (2017). Coral Bleaching and Recovery in the Thai Andaman Sea, 151.
- Ralph, P. J., & Gademann, R. (2005). Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity. *Aquatic Botany*, *82*(3), 222 – 237. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2005.02.006>
- Ralph, P. J., Schreiber, U., Gademann, R., Kühl, M., & Larkum, A. W. D. (2005). Coral photobiology studied with a new imaging pulse amplitude modulated fluorometer. *Journal of Phycology*, *41*(2), 335 – 342. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2005.04034.x>
- Riegl, B., Bruckner, A., Coles, S. L., Renaud, P., & Dodge, R. E. (2009). Coral reefs: Threats and conservation in an era of global change. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1162*(May), 136 – 186. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04493.x>

- Ritchie, R. J. (2006). Consistent sets of spectrophotometric chlorophyll equations for acetone, methanol and ethanol solvents. *Photosynthesis Research*, 89(1), 27 – 41. <https://doi.org/10.1007/s11120-006-9065-9>
- Ros, M., Pernice, M., Guillou, S. Le, Doblin, M. A., Schrameyer, V., & Laczka, O. (2016). Colorimetric Detection of Caspase 3 Activity and Reactive Oxygen Derivatives : Potential Early Indicators of Thermal Stress in Corals Colorimetric Detection of Caspase 3 Activity and Reactive Oxygen Derivatives : Potential Early Indicators of Thermal Stre. *Marine Biology*, 1 – 13. <https://doi.org/10.1155/2016/6825949>
- Rouzé, H., Lecellier, G. J., Saulnier, D., Planes, S., Gueguen, Y., Wirshing, H. H., & Berteaux-Lecellier, V. (2017). An updated assessment of *Symbiodinium* spp. that associate with common scleractinian corals from Moorea (French Polynesia) reveals high diversity among background symbionts and a novel finding of clade B. *PeerJ*, 5, e2856. <https://doi.org/10.7717/peerj.2856>
- Schutter, M., Van Der Ven, R.M., Janse, M., Verreth, J.A.J. & Osinga, R. (2011). Light intensity, photoperiod duration, daily light flux and coral growth of *Galaxea fascicularis* in an aquarium setting: a matter of photons?. *Journal of the Marine Biological*, 1 – 10. doi:10.1017/S0025315411000920
- Sinutok, S., Hill, R., Doblin, M. A., Wuhrer, R., & Ralph, P. J. (2011). Warmer more acidic conditions cause decreased productivity and calcification in subtropical coral reef sediment-dwelling calcifiers. *Ocean acidification and coral reef*, 56(4). 1200 – 1212. doi:10.4319/lo.2011.56.4.1200
- Stat, M., Carter, D., & Hoegh-guldberg, O. (2006). The evolutionary history of *Symbiodinium* and scleractinian hosts — Symbiosis , diversity , and the effect of climate change. *PRESS Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 8(23 – 43). <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2006.04.001>
- Stat, M., Baker, A. C., Bourne, D. G., Correa, A. M. S., Forsman, Z., Huggett, M. J., ... Gates, R. D. (2012). Molecular Delineation of Species in the Coral Holobiont. *Advances in Marine Biology* (1st ed., Vol. 63). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394282-1.00001-6>

- Tchernov, D., Gorbunov, M. Y., Vargas, C. De, Yadav, S. N., Milligan, A. J., Ha, M., & Falkowski, P. G. (2004). Membrane lipids of symbiotic algae are diagnostic. *Ecology*, *101*(37), 13531 – 13535.
- Tollefson J. (2021). IPCC climate report: Earth is warmer than it's been in 125,000 years. 1 February 2022. <https://www.nature.com/articles/d41586-021-02179-1>.
- Tun, K., Chou, L. M., Low, J., Yeemin, T., Phongsuwan, N., Setiasih, N., ... Gomez, E. (2010). A regional overview on the 2010 coral bleaching event in southeast Asia. *Status of Coral Reefs in East Asian Seas Region: 2010*, 9 – 27. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- UNEP. (2021). Rising sea surface temperatures driving the loss of 14 percent of corals since 2009. 1 February 2022. <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/rising-sea-surface-temperatures-driving-loss-14-percent-corals-2009>
- Venn, A. A., Loram, J. E., & Douglas, A. E. (2008). Photosynthetic symbioses in animals. *Journal of Experimental Botany*, *59*(5), 1069 – 1080. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm328>
- Walsh, S., Brading, P., Suggett, D. J., & Smith, D. J. (2012). Working with Nature to Identify Coral Reefs with Increased Environmental Tolerance. In *Proceeding of the 12th International Coral Reef Symposium, Cairns, Australia* (pp. 9 – 13).
- Wear, S. L. (2016). Missing the boat: Critical threats to coral reefs are neglected at global scale. *Marine Policy*, *74*, 153 – 157.
- Weis, V. M. (2008). Cellular mechanisms of Cnidarian bleaching : stress causes the collapse of symbiosis. *Experimental Biology*, *211*, 3059 – 3066. <https://doi.org/10.1242/jeb.009597>
- Wild, C. (2011). Climate change impedes scleractinian corals as primary reef ecosystem engineers. *Marine and Freshwater Research*, *62*, 205 – 215.
- Wilkinson & Clive. (2004). Status of coral reefs of the world : 2004. Vol. 1. 1 February 2022. <https://portals.iucn.org/library/node/8583>.

- Wilkinson, C. & Hodgson, G. (1999). Coral reefs and the 1997-1998 mass bleaching and mortality. *Nature & Resources*, 35(2), 16 – 25.
- Woods Hole Oceanographic Institution. (2018). Scientists Pinpoint How Ocean Acidification Weakens Coral Skeletons. 1 February 2022.  
<https://www.whoi.edu/press-room/news-release/scientists-identify-how-ocean-acidification-weakens-coral-skeletons/>
- Xianzhe Gong. (2012). *A Survey into Taxonomic and Physiological Differences of Symbiodinium sp., the Photosynthetic Symbiont of Reef-building Corals*. King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia.
- Yamashita, H., Suzuki, G., & Hayashibara, T. (2011). Do corals select zooxanthellae by alternative discharge ?, 87 – 100. <https://doi.org/10.1007/s00227-010-1544-z>
- Yeemin, T., Saenghaisuk, C., Sutthacheep, M., Pongsakun, S., Klinthong, W., & Saengmanee, K. (2009). Conditions of coral communities in the Gulf of Thailand: a decade after the 1998 severe bleaching event. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies*, 11, 207 – 217.  
<https://doi.org/10.3755/galaxea.11.207>

## ภาคผนวก

### RESPONSES OF CORAL HOLOBIONT TO ELEVATED TEMPERATURE AND LIGHT

Pimrak Moungeaw<sup>1,2</sup>, Sutinee Sinutok<sup>2,3</sup>, Phatcharee Roekngandee<sup>2</sup>,  
Pathompong Pramneechote<sup>1,2</sup>, and Mathinee Yucharoen<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Marine and Coastal Resources Institute, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

<sup>2</sup> Coastal Oceanography and Climate Change Research Center,  
Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

<sup>3</sup> Faculty of Environmental Management, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

\*Corresponding author: mathinee\_yucharoen@hotmail.com

#### ABSTRACT

Coral reefs in Thai Waters have seriously affected from coral bleaching events; however, effects on mortality and their recovered ability vary based on their thermal history. Some corals were able to adapt and resist to higher seawater temperature afterwards. The aim of this study was to investigate response and resistant ability of corals, *Pocillopora damicornis* to elevated temperature and light. Coral nubbins from Panwa Cape and Maiton Island, Phuket, Thailand were exposed to four treatments: 1) ambient temperature, ambient light 2) ambient temperature, high light intensity, 3) high temperature, ambient light, and 4) high temperature, high light intensity. The results of photosynthesis performance measuring by PAM showed that  $F_v/F_m$  of corals from high temperature and light slightly reduced. Remarkably, corals from extreme reef as Panwa Cape seemed to be more resistant comparing with corals from Maiton Island. During the recovery phase, the  $F_v/F_m$  of corals from Panwa Cape partially recovered while  $F_v/F_m$  from Maiton Island had lower ability to recover. This study suggested that *P. damicornis* from Panwa Cape might be more resistant to heat stress, which enhance their capacity to survive after coral bleaching event.

**Keywords** coral bleaching, light stress, heat stress, PAM fluorometry, Thailand

## 1. INTRODUCTION

Temperature is an important factor influencing coral growth and photosynthesis (Osinga et al., 2012) and effects of the high temperature of seawater causes corals response to temperature stress. Normally, the coral can live in a narrow temperature range and when temperature changes, corals become stressful. This has led to bleaching and imbalance of mutualistic relationship which is a loss of zooxanthellae in their tissue (Miththapala, 2008). Reduction in photosynthetic performance might occur and may lead to coral mortality. The effect of temperature on corals might be influenced by irradiance as well (Lesser & Farrell, 2004). It has been found that corals in higher irradiance are more susceptible to elevated temperature comparing to lower irradiance. However, some corals might be able to adapt and resist to elevated temperature (Fautin & Buddemeier, 2000). The ability of coral recovery from temperature stress might depend on their thermal history (Putchim, 2017).

Response of coral holobiont to elevated temperature and light were observed e.g., reduction in zooxanthellae density (Caroselli & Levy, 2015), change in photosynthetic performance (Lesser & Farrell, 2004; Middlebrook & Dove, 2012), and changing in reactive oxygen species (ROS) (Baird & Takahashi, 2008; Ros et al., 2016). The photosynthetic performance of photosystem II can be measured by chlorophyll *a* fluorescence using pulse amplitude modulated (PAM) fluorometer (Maxwell & Johnson, 2000; Ralph & Gademann, 2005). PAM fluorometry can measure the fluorescence parameters such as: 1) effective quantum yield of PSII ( $\Delta F/F_m'$ ) which indicates the efficiency of photochemical process in PSII when under the experimental light conditions, and 2) maximum quantum yield of PSII ( $F_v/F_m$ ) which represents the maximum efficiency that light absorbed by photosystem II and indicates stress or damage in PSII (Maxwell & Johnson 2000; Ralph & Gademann, 2005). It is a non-destructive, non-invasive and rapid method. Light energy which is absorbed by light harvesting complexes (LHCs) of PSII is separated into three parts: 1) transfer to PSII reaction center and drive photosynthesis, 2) dissipate in the form of non-photochemical quenching (NPQ) as heat, and 3) re-emitted at a longer wavelength as chlorophyll fluorescence (Maxwell & Johnson, 2000). The aim of this study was to investigate the effect of temperature and light on photosynthetic performance of corals, *Pocillopora damicornis* from Maiton Island and Panwa Cape. Responses of corals during stress and recovery phases were elucidated.



## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Experimental design

Colonies of *P. damicornis* from Maiton Island (7°45'43.94"N; 98°28'35.37"E) and Panwa Cape (7°48'6.26"N; 98°24'23.75"E), Phuket, Thailand were collected and maintained in an indoor aquarium system (artificial seawater, temperature 27°C, light intensity 150  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) for acclimation. Light was set at 12:12 h light:dark cycle on and off at 6 a.m. and 6 p.m., respectively. After that, coral colonies were cut into nubbins of 3 - 5 cm. using bone cutter and allocated ( $n = 4$ ) to 4 treatments: 1) ambient temperature, ambient light intensity (ATAL; 27°C, 150  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), 2) ambient temperature, high light intensity (ATHL; 27°C, 300  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), 3) high temperature, ambient light intensity (HTAL; 33°C, 150  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), and 4) high temperature, high light intensity (HTHL; 33°C, 300  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) for 13 days. In high temperature treatments (HTAL and HTHL), temperature was increased 1°C each day from 27°C to 33°C (stress phase) and then temperature was decreased 1°C per day from 33°C to 27°C (recovery phase) as shown in **Table 1**.

**Table 1.** Experimental design shows temperature in each treatment at each day of experiment in stress phase and recovery phase.

Treatments	Day / Temperature (°C)													
	Stress phase								Recovery phase					
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ATAL (T27, L150)	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
ATHL (T27, L300)	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
HTAL (T33, L150)	27	28	29	30	31	32	33	33	32	31	30	29	28	27
HTHL (T33, L300)	27	28	29	30	31	32	33	33	32	31	30	29	28	27

Note: T = temperature in unit of °C, L = light in unit of  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$

### 2.3 Detection of photosynthesis performance

Photosynthetic performance was determined through a measurement of maximum quantum yield of PSII ( $F_v/F_m$ ) and effective quantum yield of PSII ( $\Delta F/F_m'$ ) at day 0, 3, 5, 7, 9, 11 and 13. Days 3 - 7 were stress period and days 9 - 13 were recovery period. Maximum quantum yield of PSII ( $F_v/F_m$ ) and effective quantum yield of PSII ( $\Delta F/F_m'$ ) were measured at 5 a.m. and 10.30 a.m., respectively using Pulse Amplitude Modulated (PAM) Fluorometer and WinControl software version 3.26 (Junior PAM, Walz, Germany) (PAM settings: measuring intensity  $<0.15 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , saturating intensity  $>4500 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , saturating width = 0.8 s, gain = 2, damping = 2).

### 2.4 Statistics analysis

Data of maximum quantum yield were calculated in term of changing percentage in order to compare change of initial value and each day using a formula as:

$$\text{Change of maximum quantum yield} = \frac{\text{Day}_i - \text{Day}_0}{\text{Day}_0} \times 100$$

where  $\text{Day}_i$  = value of maximum quantum yield of each day,

$\text{Day}_0$  = average initial data of all treatments

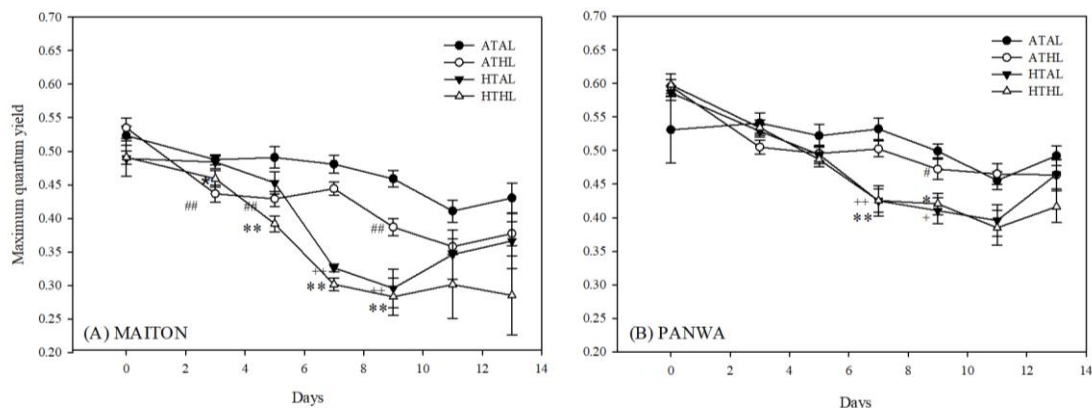
All data were met with assumptions of normality (Kolmogorov-Smirnov test) and equal variance (Levene's test), except maximum quantum yield, which was transformed using  $X^{1/4}$ . To determine any significant differences among treatments, one-way ANOVA tests were performed with a significant level of 95% for maximum quantum yield and effective quantum yield. The change of maximum quantum yield was tested two-way ANOVA for influences of treatments and study sites. The Tukey's HSD post hoc tests was used to determine the statistically distinct groups.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

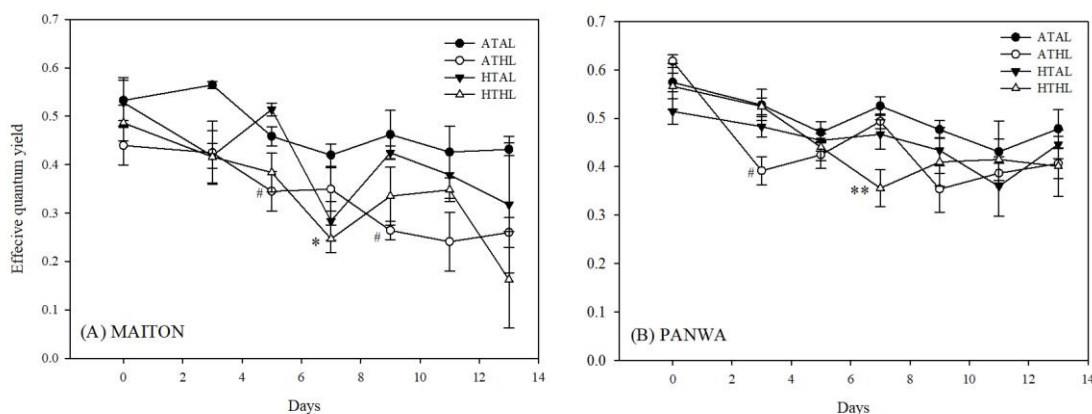
Maximum quantum yield ( $F_v:F_m$ ) and effective quantum yield ( $\Delta F/F_m'$ ) of corals both Maiton Island and Panwa Cape in the control treatment were constant throughout the experiment. During stress period, a significant decrease in  $F_v:F_m$  and  $\Delta F/F_m'$  were found in corals from both study sites when exposed to elevated temperature, ambient light (HTAL) and elevated temperature and high light (HTHL) on day 7 ( $p < 0.05, 0.01$ ; **Figure 1** and

**Figure 2).**  $F_v:F_m$  and  $\Delta F/F_m'$  of corals in HTAL and HTHL treatments were still low on day 9, although temperature was reduced from 33 to 31°C. Besides,  $F_v:F_m$  of corals from ambient temperature and high light (ATHL) continually decrease on day 9 even though the temperature was reduced from 33 to 31°C. These results suggested there was cumulative stress on corals, which required longer recovery time. Similar results during recovery phase were also presented in other corals, e.g., *Montipora* and *Acropora* (Higuchi & Yuyama, 2015; Saxby & Hoegh-Guldberg, 2003). At the end of the experiment (day 13), there were no significant difference in  $F_v:F_m$  and  $\Delta F/F_m'$  among treatments suggesting  $F_v:F_m$  and  $\Delta F/F_m'$  can recover after the temperature is reduced to ambient. However, some Maiton Island's corals visually bleached suggesting that this was a critical period that lead to coral mortality or survival.

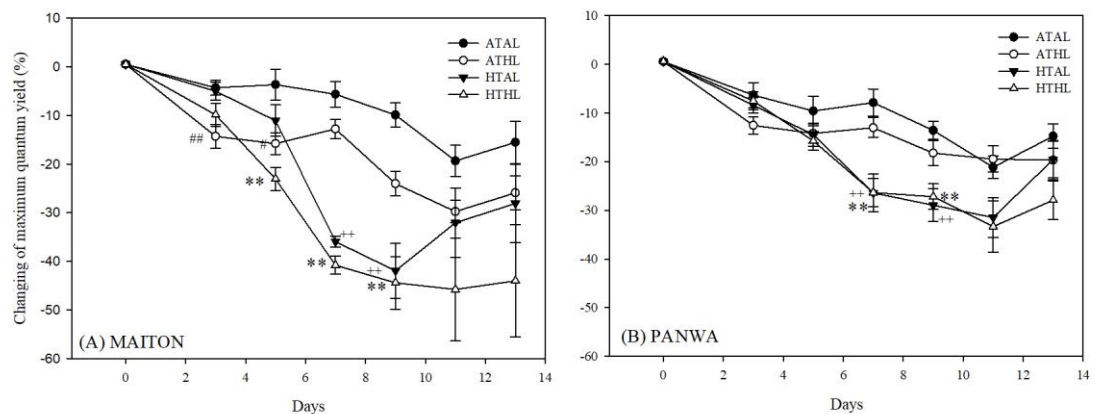
Significantly decreased in maximum quantum yield in ATHL, HTAL and HTHL treatments since day 3 as shown in **Figure 3** suggested that corals from Maiton Island more Maiton Island was more sensitive to high temperature and high light. On the other hand, maximum quantum yield in ATHL, HTAL and HTHL from Panwa Cape corals was significantly lower on day 7 ( $p < 0.01$ ) indicating that corals from Panwa Cape seemed to be more resistant to elevated temperature and light than corals from Maiton Island. The differences in response, resistance and recovery ability of corals from two locations might be from their thermal history (Putchim, 2017) or their experiences with extreme environmental conditions such as run-off and sedimentation as Panwa Cape is closer to the shoreline and has higher rate of run-off and sedimentation. This study also confirms the ability of PAM fluorometry in timely detection of physiological stress in corals.



**Figure 1.** Maximum quantum yield (mean  $\pm$  SE) of each treatment among study sites: (A) Maiton Island and (B) Panwa Cape. Difference among treatments were determined by one-way ANOVA and post hoc Tukey's HSD test. \*, # and + indicate significant differences with the control (ATAL) and others: ATAL VS ATHL (# $p < 0.05$ , ## $p < 0.01$ ) ATAL VS HTHL (\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ ) and ATAL VS HTAL (+ $p < 0.05$ , ++ $p < 0.01$ ), respectively.



**Figure 2.** Effective quantum yield (mean  $\pm$  SE) of each treatment among study sites: (A) Maiton Island and (B) Panwa Cape. Difference among treatments were determined by one-way ANOVA and post hoc Tukey's HSD test. \*, # and + indicate significant differences with the control (ATAL) and others: ATAL VS ATHL (# $p < 0.05$ , ## $p < 0.01$ ) ATAL VS HTHL (\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ ) and ATAL VS HTAL (+ $p < 0.05$ , ++ $p < 0.01$ ), respectively.



**Figure 3.** Change of maximum quantum yield (mean  $\pm$  SE) of each treatment among study sites: (A) Maiton Island and (B) Panwa Cape. Difference among treatments were determined by two-way ANOVA and post hoc Tukey's HSD test. \*, # and + indicate significant differences with the control (ATAL) and others: ATAL VS ATHL (# $p < 0.05$ , ## $p < 0.01$ ) ATAL VS HTHL (\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ ) and ATAL VS HTAL (+ $p < 0.05$ , ++ $p < 0.01$ ), respectively.

#### 4. CONCLUSION

Our finding demonstrates the combination of elevated temperature and light led to a reduction in photosynthetic performance of *P. damicornis* from Phuket and these corals had an ability to recover when temperature was returned to ambient. However, the degree of stress response and recovery ability were different between corals from Maiton Island and Panwa Cape.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by National Science and Technology Development Agency (NSTDA) under a project of "stress indicator for coral and zooxanthellae at the Southern Reef of Phuket of resistance to coral bleaching" no. FDA-C0-2561-5777-TH. We are most grateful to the staffs and students belonging to Coastal Oceanography and Climate Change Research Center (COCC), Prince of Songkla University for their assistances of field and lab works. We would like to thank Dr. Lalita Putchim and the Phuket Marine Biological Center for providing all facilities.

## REFERENCES

- Baird, A., Baird, A. H., Bhagooli, R., Ralph, P. J., & Takahashi, S. (2008). Coral bleaching : The role of the host Coral bleaching : the role of the host, ( December) . <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.09.005>
- Caroselli, E., Falini, G., Goffredo, S., Dubinsky, Z., & Levy, O. (2015). Negative response of photosynthesis to natural and projected high seawater temperatures estimated by pulse amplitude modulation fluorometry in a temperate coral. *Frontiers in Physiology*, 6(NOV), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00317>
- Fautin, D. G., & Buddemeier, R. W. (2004). Adaptive bleaching: A general phenomenon. *Hydrobiologia*, 530–531(4), 459–467. <https://doi.org/10.1007/s10750-004-2642-z>
- Higuchi, T., Agostini, S., Casareto, B. E., Suzuki, Y., & Yuyama, I. (2015). The northern limit of corals of the genus *Acropora* in temperate zones is determined by their resilience to cold bleaching. *Scientific Reports*, 5(March), 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep18467>
- Lesser, M. P., & Farrell, Æ. J. H. (2004). Exposure to solar radiation increases damage to both host tissues and algal symbionts of corals during thermal stress, 367–377. <https://doi.org/10.1007/s00338-004-0392-z>
- Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence-a practical guide, 51(345), 659–668. <https://doi.org/10.1093/jxb/51.345.659>
- Middlebrook, R., Anthony, K. R. N., Hoegh-Guldberg, O., & Dove, S. (2012). Thermal priming affects symbiont photosynthesis but does not alter bleaching susceptibility in *Acropora millepora*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 432–433, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2012.07.005>
- Miththapala, S. (2008). *Coral Reefs: Coastal Ecosystems Series (Volume 1)* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00090-4>
- Osinga, R., Iglesias-Prieto, R., & Enriquez, S. (2012). Measuring Photosynthesis in Symbiotic Invertebrates: A Review of Methodologies, Rates and Processes. *Applied Photosynthesis*. <https://doi.org/10.5772/29339>
- Putchim, L. (2017). Long-term changes in the susceptibility of corals to thermal stress around Phuket, Thailand. *PeerJ PrePrints*, (May). [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(02\)00099-5](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(02)00099-5)
- Ralph, P. J., & Gademann, R. (2005). Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity. *Aquatic Botany*, 82( 3) , 222–237. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2005.02.006>

- Ros, M., Pernice, M., Guillou, S. Le, Doblin, M. A., Schrameyer, V., & Laczka, O. (2016). Colorimetric Detection of Caspase 3 Activity and Reactive Oxygen Derivatives : Potential Early Indicators of Thermal Stress in Corals Colorimetric Detection of Caspase 3 Activity and Reactive Oxygen Derivatives : Potential Early Indicators of Thermal Stre, (April). <https://doi.org/10.1155/2016/6825949>
- Saxby, T., Dennison, W. C., & Hoegh-Guldberg, O. (2003). Photosynthetic responses of the coral *Montipora digitata* to cold temperature stress. *Marine Ecology Progress Series*, 248, 85–97. <https://doi.org/10.3354/meps248085>

Citation: Proceeding of the 11th IMT-GT UNINET Conference 2018, Penang, Malaysia: School of Biological Sciences, Universiti Sains Malaysia, 11-12 December 2018.

eISBN 978-967-461-376-1

Editing & Book Design by Siti Nasuha Hamzah & Amira Suriaty Yaakop  
Book Cover Design by Zulfigar Yasin & Norhanis Razalli

Published by:  
School of Biological Sciences,  
Universiti Sains Malaysia,  
11800 Minden, Penang, Malaysia.

This ebook can be accessed at <https://imtgtoninet.wixsite.com/2018>





## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล                      นางสาวพิมพ์รัก ม่วงแก้ว  
 รหัสประจำตัวนักศึกษา    6010023004  
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต	มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขต กาญจนบุรี	2560

### ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2562

### ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

นักสิ่งแวดล้อมศึกษา (Environmental Educator) บริษัท อีอีซี เอ็ชคิว จำกัด 52/1 หมู่ที่ 2  
 ตำบลบางแก้ว อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540

### การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. การแพร่กระจายของสัตว์พื้นทะเลขนาดใหญ่บริเวณพื้นที่ปกคลุมที่แตกต่างกันของหญ้า  
 ชะเงาใบมน ณ อ่าวตังเซ็น จังหวัดภูเก็ต: รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ  
 วิทยาศาสตร์ทางทะเล ครั้งที่ 6, 18 - 20 มิถุนายน 2561, มหาวิทยาลัยบูรพา. ISBN  
 (E-book) 978-974-384-559-8
2. “Responses of coral holobiont to elevated temperature and light”: Bioscience  
 for a Sustainable Future” 11th IMT-GT UNINET CONFERENCE 2018, 11-12 Dec.  
 2018, Penang, Malaysia. eISBN 978-967-461-376-1