



การพัฒนาแผงโซลาร์เซลล์ Agri-PV ต่อคุณภาพผลผลิตของฟ้าทะลายโจร
(*Andrographis paniculata* (Burm.f.) Wall.ex Nees)
ภายใต้ระบบอกริรอลเทอิกส์

โดย

ชรินทร์ตน คงเอียด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการเกษตร)
สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2568

DEVELOPMENT OF AGRI-PV SOLAR CELL ON YIELD QUALITY OF
KALMEGH (*Andrographis paniculata* (Burm.f.) Wall.ex Nees)
UNDER AGRIVOLTAIC SYSTEM

BY

CHARINRAT KONG-AIAD

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (AGRICULTURAL TECHNOLOGY)
DEPARTMENT OF AGRICULTURAL TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2025

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วิทยานิพนธ์

ของ

ชรินทร์ตน คงเอียด

เรื่อง

การพัฒนาแผงโซลาร์เซลล์ Agri-PV ต่อคุณภาพผลผลิตของฟ้าทะลายโจร
(*Andrographis paniculata* (Burm.f.) Wall.ex Nees)
ภายใต้ระบบอกริวอลเทอิกส์

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการเกษตร)

เมื่อ วันที่ 25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2568

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

จุฑามาศ ๑

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑามาศ ร่มแก้ว)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อลิษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.อรประภา เทพศิลป์วิสุทธิ์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

พณ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พฤกษ์ ชูติมานุกุล)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

จิราภา

(รองศาสตราจารย์ ดร.จิราภา วังศิริ)

คณบดี

สุเพชร

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเพชร จิรขจรกุล)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแผงโซลาร์เซลล์ Agri-PV ต่อคุณภาพผลผลิตของฟ้าทะลายโจร (<i>Andrographis paniculata</i> (Burm.f.) Wall.ex Nees) ภายใต้ระบบอกริวอลเทอิกส์
ชื่อผู้เขียน	ชรินรัตน์ คงเอียด
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการเกษตร)
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อรประภา เทพศิลป์วิสุทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.พฤกษ์ ชูติมานุกุล
ปีการศึกษา	2568

บทคัดย่อ

ฟ้าทะลายโจรเป็นพืชสมุนไพรเศรษฐกิจที่มีสารสำคัญในกลุ่มแลคโตนและมีความต้องการเพิ่มขึ้นตามการเติบโตของอุตสาหกรรมสมุนไพร อย่างไรก็ตาม ผลผลิตและคุณภาพมีความแปรปรวน เนื่องจากฟ้าทะลายโจรเป็นพืชที่ไวต่อสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะอุณหภูมิและความเข้มแสง การใช้ระบบอกริวอลเทอิกส์จึงเป็นแนวทางในการควบคุมสภาพแวดล้อม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพืชพร้อมกับการผลิตพลังงานบนพื้นที่เดียวกัน ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณและคุณภาพผลผลิตของฟ้าทะลายโจรและศึกษาความเป็นไปได้ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพื่อประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจจากการปลูกฟ้าทะลายโจรของระบบอกริวอลเทอิกส์ โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) ประกอบด้วย 5 สิ่งทดลอง สิ่งทดลองละ 12 ซ้ำ (ต้น) ได้แก่ 1) พื้นที่โล่งแจ้ง (ควบคุม) 2) หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra 3) หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง 4) หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง และ 5) หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra จากผลการศึกษาด้านปริมาณและคุณภาพผลผลิต พบว่า ฟ้าทะลายโจรที่ปลูกภายใต้แผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra มีการเจริญเติบโตทางด้านความสูงต้น ความกว้างทรงพุ่ม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง น้ำหนักสดทั้งหมด น้ำแห้งทั้งหมด และโดยเฉพาะทำให้ได้ปริมาณแลคโตนรวมที่สูงที่สุด คือ 10.12 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ฟ้าทะลายโจรที่ปลูกภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และคลอโรฟิลล์รวมเฉลี่ยสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม การปลูกในพื้นที่โล่งแจ้งทำให้ฟ้าทะลายโจรมี

ปริมาณแคโรทีนอยด์ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และฟลาโวนอยด์ทั้งหมดเฉลี่ยสูงสุด ขณะที่การปลูกภายใต้แผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสงทำให้ฟ้ายะลวยโอรมีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเฉลี่ยสูงสุด ทั้งนี้หากพิจารณาที่ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจต่อพื้นที่ทั้งการขายผลผลิตพืชและผลผลิตที่เป็นกระแสไฟฟ้า พบว่า การปลูกฟ้ายะลวยโอรภายใต้แผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra ให้รายได้จากการขายผลผลิตพืช (น้ำหนักแห้ง) และพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดคือ 139.27 บาทต่อตารางเมตรต่อเดือน รองลงมาได้แก่ การปลูกภายใต้แผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง ที่ให้รายได้จากการขายผลผลิตพืชและพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 135.41 บาทต่อตารางเมตรต่อเดือน ในขณะที่การปลูกฟ้ายะลวยโอรในพื้นที่โล่งแจ้ง และหลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra ซึ่งไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ และได้รายได้จากผลผลิตพืชเพียงอย่างเดียวอยู่ที่ 72.96 และ 77.16 บาทต่อตารางเมตรต่อเดือน ตามลำดับ

ดังนั้นผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า การใช้แผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ปริมาณ คุณภาพผลผลิต และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจต่อพื้นที่ทั้งการขายผลผลิตพืชและผลผลิตที่เป็นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด ซึ่งสามารถนำไปเป็นแนวทางในเพาะปลูกพืชภายใต้หลังคดังกล่าวที่นำไปประยุกต์ใช้ได้กับสภาพโรงเรือนได้ต่อไป

คำสำคัญ: ฟ้ายะลวยโอร, แผงโซลาร์เซลล์โปร่งแสง, ระบบอกริโวลเทอิกส์, Agri-PV

Thesis Title	DEVELOPMENT OF AGRI-PV SOLAR CELL ON YIELD QUALITY OF KALMEGH (<i>Andrographis paniculata</i> (Burm.f.) Wall.ex Nees) UNDER AGRIVOLTAIC SYSTEM
Author	Charinrat Kong-aiad
Degree	Master of Science (Agricultural Technology)
Department/Faculty/University	Agricultural Technology Faculty of Science and Technology Thammasat University
Thesis Advisor	Associate Professor Ornprapa Thepsilvisut, Ph.D.
Thesis Co-Advisor	Associate Professor Preuk Chutimanukul, Ph.D.
Academic Year	2025

ABSTRACT

Kalmegh is an economically important medicinal plant containing bioactive lactone compounds, and its demand has increased in response to the growth of the herbal medicine industry. However, its yield and quality are highly variable because kalmegh is sensitive to environmental conditions, particularly temperature and light intensity. The application of an agrivoltaic system represents an approach to environmental control that enhances crop production efficiency while simultaneously generating energy on the same land area. Therefore, this study aims to investigate the yield and quality of kalmegh and to evaluate the electricity generation potential in order to assess the economic feasibility of cultivating kalmegh under an agrivoltaic system. The experiment was designed as a completely randomized design (CRD) consisting of 5 treatments, with 12 replicates (plants) per treatment: T1) open field (control) T2) MultiTech-Ultra plastic film (MU) T3) Standard solar panel T4) semi-transparent solar panel (Agri-PV) and T5) semi-transparent solar panel combined with MultiTech-Ultra plastic film (Agri-PV + MultiTech-Ultra). The results for yield and quality show that kalmegh grown under T5 exhibited the highest growth in terms of plant

height, canopy width, diameter of stem, total fresh weight, total dry weight and the highest total lactone content at 10.12%. In contrast, kalmegh cultivated under T2 exhibited the highest average contents of chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll. However, cultivation under T1 exhibited the highest average contents of carotenoids, total phenolic compounds, and total flavonoids. While cultivation under T3 exhibited the highest average contents of nitrogen and phosphorus.

Considering the economic returns to the area, both from the sale of crops and from the generation of electricity, cultivation of kalmegh under T5 provided the highest income from the sale of plant yield (dry weight) and electrical energy, amounting to 139.27 baht/m²/month. This was followed by cultivation under T3, which generated income from plant yield and electricity of 135.41 baht/m²/month. In contrast, cultivation in T1 and T2, which are unable to generate electricity and provide income solely from plant yield, resulted in returns of 72.96 and 77.16 baht/m²/month, respectively.

Therefore, the results of this study indicate that the use of semi-transparent solar panels in combination with MultiTech-Ultra plastic film (T5) resulted in the highest yield and yield quality, as well as the highest of economic benefits per unit area from both crop production and electricity generation. This system can serve as a practical guideline for crop cultivation under such roofing structures and can be further applied in greenhouse conditions.

Keywords: Kalmegh, semi-transparent solar panel, Agrivoltaic system, Agri-PV

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากการได้รับคำแนะนำ การสนับสนุน และความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย อันดับแรกข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรประภา เทพศิลป์วิสุทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้เปี่ยมด้วยเมตตาและความเอาใจใส่ ท่านได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง คอยชี้แนะแนวทาง แก้ไขข้อบกพร่อง และให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาการทําวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑามาศ ร่มแก้ว ประธานกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พฤกษ์ ชุตินานุกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และ รองศาสตราจารย์ ดร.จุริมาศ วังศิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา และ ดร.ทวีวัฒน์ กระจำงสังข์ และคณะ จากศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ (NECTEC) โรงงานต้นแบบผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ อุปกรณ์ ตลอดจนความอนุเคราะห์ในการทดลองและเก็บข้อมูล ซึ่งมีส่วนสำคัญยิ่งต่อความสำเร็จของงานวิจัย ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณทุนบัณฑิตเรียนดีเพื่อศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 (ตามเลขที่ ทบ.19/2566)

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัว พี่ๆ และเพื่อน ๆ ที่อยู่เคียงข้างคอยให้ความช่วยเหลือและเป็นแรงสนับสนุนที่สำคัญ กำลังใจในการวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ชรินทร์ตัน คงเอียด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(12)
สารบัญภาพ	(14)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ฟ้ายะลวยโจร	4
2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์	4
2.1.2 ถิ่นกำเนิดและแหล่งกระจายพันธุ์	5
2.1.3 สารสำคัญในฟ้ายะลวยโจร	6
2.1.3.1 ปริมาณสารสำคัญกับส่วนต่าง ๆ ของฟ้ายะลวยโจร	7
2.1.3.2 ปริมาณสารสำคัญกับระยะเวลาการเจริญเติบโต	8
2.1.4 การปลูกและการจัดการ	8
2.1.4.1 สภาพพื้นที่ปลูก	8
(1) ลักษณะดิน	8
(2) สภาพภูมิอากาศ	8

	(7)
(3) แหล่งน้ำ	8
(4) ฤดูกาลปลูก	8
2.1.4.2 พันธุ์	8
2.1.4.3 การปลูกและการดูแลรักษา	9
(1) การเตรียมดิน	9
(2) การเตรียมพันธุ์	9
(3) การปลูก	9
(4) การดูแลรักษา	10
(5) การใส่ปุ๋ย	10
(6) การให้น้ำ	10
2.1.4.4 การเก็บเกี่ยว	10
(1) การเก็บเกี่ยว	10
(2) การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว	11
2.1.4.5 การจัดการศัตรูพืช	12
(1) โรคพืช	12
(2) แมลงศัตรูพืช	12
(3) วัชพืช	13
2.1.4.6 ธาตุอาหารในพืชและการจัดการธาตุอาหารพืช	13
(1) มหาธาตุ	13
(2) จุลธาตุ	13
2.2 องค์ประกอบทางพฤกษเคมี	13
2.2.1 องค์ประกอบทางพฤกษเคมี	13
2.2.1.1 สารปฐมภูมิ (primary metabolites)	13
2.2.1.2 สารทุติยภูมิ (secondary metabolites)	14
2.3 อนุมูลอิสระ	14
2.3.1 สารต้านอนุมูลอิสระ	14
2.3.1.1 กลไกการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระ	15
2.3.1.2 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ	15
(1) การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเชิงคุณภาพ	15
(2) การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเชิงปริมาณ	15

2.3.1.3 ตัวอย่างสารต้านอนุมูลอิสระ	16
(1) สารประกอบฟีนอลิก	16
(2) สารประกอบฟลาโวนอยด์	16
2.4 รงควัตถุของพืช	17
2.4.1 คลอโรฟิลล์ (chlorophyll)	17
2.4.2 แคโรทีนอยด์ (carotenoids)	18
2.5 บทบาทของแสงที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช	19
2.5.1 องค์ประกอบของแสง	20
2.5.1.1 ความเข้มแสง (light intensity)	20
2.5.1.2 คุณภาพของแสง (light quality)	21
(1) คลื่นแสงที่มองเห็น (visible light)	21
(2) คลื่นแสงที่มองไม่เห็น (invisible light)	21
2.5.1.3 ช่วงแสง (photoperiodism)	21
2.6 ระบบอกริวอลเทอิกส์	22
2.6.1 ลักษณะของระบบอกริวอลเทอิกส์	24
2.6.1.1 ระบบประยุกต์ใช้พื้นที่ทำการเกษตรร่วมกับพื้นที่ของพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่แล้ว	24
(1) การปลูกพืชภายใต้แผงโซลาร์เซลล์	24
(2) การปลูกพืชในพื้นที่ระหว่างแถวของแผงโซลาร์เซลล์	24
(3) การใช้พื้นที่โซลาร์เซลล์สำหรับการเลี้ยงสัตว์ร่วมด้วย	25
2.6.1.2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ออกแบบให้เหมาะสมต่อการทำเกษตร	25
2.6.2 ประเภทของแผงโซลาร์เซลล์	25
2.6.2.1 แผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง (Opaque PV panels)	26
2.6.2.2 แผงโซลาร์เซลล์แบบโปร่งแสง (Semi-transparent PV panels)	26
2.6.2.3 แผงโซลาร์เซลล์แบบปรับมุมได้ (Adjustable PV panels)	26
2.6.2.4 แผงโซลาร์เซลล์แบบติดตั้งยกสูง (Elevated PV structures)	26
2.6.2.5 แผงโซลาร์เซลล์แบบเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ (Tracking PV panels)	26

2.6.2.6 แผงโซลาร์เซลล์ชนิดรับแสงได้ 2 ด้าน (Bifacial solar panel)	26
2.6.2.7 แผงโซลาร์เซลล์ชนิดออร์แกนิก (Organic photovoltaics)	26
2.6.2.8 แผงโซลาร์เซลล์ชนิดรวมแสง (Concentrator photovoltaics)	27
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
2.7.1 ผลของการพร่างแสงที่มีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต	27
2.7.2 ผลของระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่มีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต	28
2.7.3 ผลของการปลูกพืชภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต	29
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	31
3.1 แผนการทดลอง	31
3.2 วัสดุที่ใช้ทำการทดลอง	32
3.2.1 เมล็ดพันธุ์ฟักทะลายโจร	32
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	32
3.3.1 การเพาะต้นกล้า	32
3.3.2 การปลูก	32
3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุปลูก	33
3.3.3.1 ความหนาแน่นรวมของวัสดุปลูก	33
3.3.3.2 ความพรุนของวัสดุปลูก	33
3.3.3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (EC)	34
3.3.3.4 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	34
3.4 การบันทึกข้อมูล	35
3.4.1 ข้อมูลสภาพแวดล้อม	35
3.4.1.1 อุณหภูมิบริเวณใต้ปลูก (องศาเซลเซียส)	35
3.4.1.2 ความเข้มแสง (ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)	35
3.4.1.3 ปริมาณแสงที่พืชได้รับ (โมลต่อตารางเมตรต่อวัน)	35
3.4.2 การเจริญเติบโต	36
3.4.2.1 ความสูง (เซนติเมตร)	36

3.4.2.2 ความกว้างทรงพุ่ม (เซนติเมตร)	36
3.4.2.3 เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น (มิลลิเมตร)	36
3.4.2.4 จำนวนข้อ (ข้อต่อต้น)	36
3.4.3 น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ)	36
3.4.4 คุณภาพผลผลิต	36
3.4.4.1 ค่าความเขียวของใบ	36
3.4.4.2 ปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์	36
3.4.4.2 ปริมาณแลคโตนรวม	37
3.4.4.4 สารต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ	37
(1) สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด	37
(2) สารประกอบฟลาโวนอยด์ทั้งหมด	38
(3) ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ	39
3.4.4.5 ปริมาณธาตุอาหารหลักของส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ)	40
(1) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen)	40
(2) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorus)	40
(3) ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (total potassium)	41
3.4.5 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้	42
3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	42
3.6 สถานที่ทำการทดลอง	42
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	43
4.1 ข้อมูลสภาพแวดล้อม	43
4.2 การเจริญเติบโต	46
4.2.1 ความสูง	46
4.2.2 ความกว้างทรงพุ่ม	46
4.2.3 เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น	48
4.2.4 จำนวนข้อ	48
4.3 น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ)	50
4.4 คุณภาพผลผลิต	54

	(11)
4.4.1 ค่าความเขียวใบ	54
4.4.2 ปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์	55
4.4.3 ปริมาณสารแลคโตนรวม	59
4.4.4 ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ	61
4.4.5 ปริมาณธาตุอาหารหลักของส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ)	64
4.5 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	69
5.1 สรุปผลการวิจัย	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
รายการอ้างอิง	71
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ลักษณะของหลังคาโตะปลูกฟ้าทะลายโจร	83
ภาคผนวก ข ลักษณะทางกายภาพของฟ้าทะลายโจร	84
ประวัติผู้เขียน	85

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างสีของแสง ความยาวคลื่น และประโยชน์ต่อพืช	22
3.1	สมบัติของวัสดุปลูกที่ใช้ในการทดลอง	35
4.1	สภาพแวดล้อมภายในโตะปลูกฟ้าทะลายโจรที่แตกต่างกัน จำนวน 4 รอบการเก็บเกี่ยว	45
4.2	ความสูงของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 0, 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน	47
4.3	ความกว้างทรงพุ่มของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 0, 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน	47
4.4	เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 0, 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน	49
4.5	จำนวนข้อของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 0, 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน	49
4.6	น้ำหนักสดส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) ของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน	52
4.7	น้ำหนักแห้งส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) ของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน	53
4.8	ค่าความเขียวใบของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 0, 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน	54
4.9	ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และคลอโรฟิลล์รวมของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน	57
4.10	ปริมาณแคโรทีนอยด์ของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน	58
4.11	ปริมาณแลคโตนรวมในส่วนเหนือดินของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน	60

- 4.12 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณสารฟวาโนอยด์ทั้งหมด และ
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในส่วนเนื้อดินของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100,
140 และ 180 วันหลังย้ายปลูกภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน 63
- 4.13 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และปริมาณ
โพแทสเซียมทั้งหมดในส่วนเนื้อดินของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100,
140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน 66
- 4.14 พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ผลิตได้และรายได้ที่เกิดขึ้นจากผลผลิตพลังงานไฟฟ้า
ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน 68



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟ้าทะลายโจร	5
2.2	ส่วนประกอบทางเคมีของสารสำคัญบางชนิดของฟ้าทะลายโจร	7
2.3	โครงสร้างทางเคมีของกลุ่มฟีนอลิก	16
2.4	โครงสร้างทางเคมีของกลุ่มฟลาโวนอยด์	17
2.5	โครงสร้างทางเคมีของคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี	18
2.6	โครงสร้างทางเคมีของแคโรทีนอยด์	19
2.7	Photosynthetic activity in different wavelengths of light radiation	20
2.8	ส่วนประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์	23
3.1	ขนาดของโครงสร้างโຕะปลูกฟ้าทะลายโจร	32
3.2	กราฟมาตรฐานของ Gallic acid	38
3.3	กราฟมาตรฐานของ Quercetin	39
ภาพผนวกที่		
ก.1	ลักษณะของหลังคาโຕะปลูกฟ้าทะลายโจร	83
ข.1	ลักษณะทางภาพของฟ้าทะลายโจรที่ปลูกภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน ที่อายุ 30 วันหลังย้ายปลูก	84
ข.2	ลักษณะทางภาพของฟ้าทะลายโจรที่ปลูกภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน ที่อายุ 60 วันหลังย้ายปลูก	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata* (Burm. f.) Wall.ex Nees) เป็นพืชล้มลุก ฤดูเดียวในตระกูล Acanthaceae มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดียและศรีลังกา และได้แพร่กระจายเข้ามาในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมถึงประเทศไทย เนื่องจากฟ้าทะลายโจรเป็นพืชสมุนไพรที่มีสารสำคัญออกฤทธิ์ทางยา 3 ประเภท และมีสารสำคัญออกฤทธิ์ในกลุ่มแลคโตน (lactone) ได้แก่ สารแอนโดรกราโฟไลด์ (andrographolide) สารนีโอแอนโดรกราโฟไลด์ (neo-Andrographolide) และสาร 14-ดีออกซี แอนโดรกราโฟไลด์ (14-deoxy-andrographolide) (กรมวิชาการเกษตร, 2564) ฟ้าทะลายโจรมีสรรพคุณหลายประการ เช่น แก้ไข้หวัด ไข้หวัดใหญ่ ระวังอาการอักเสบ แก้ไอ เจ็บคอ ต่อมทอนซิลอักเสบ หลอดลมอักเสบ ขับเสมหะ รักษาโรคผิวหนังและอาการติดเชื้อในระบบทางเดินอาหาร รวมทั้งเป็นยาช่วยเจริญอาหาร มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียและไวรัสได้ (ทวิผล และคณะ, 2542) ทั้งนี้จากคุณสมบัติทางเภสัชวิทยาที่โดดเด่น ฟ้าทะลายโจรจึงได้รับความสนใจอย่างมาก ในฐานะวัตถุดิบสำคัญของอุตสาหกรรมสมุนไพรทั้งในประเทศและต่างประเทศ (Akbar, 2011; Niranjana et al., 2010; Shah et al., 2007) โดยในปี พ.ศ. 2572 คาดการณ์ว่าอุตสาหกรรมสมุนไพร มีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่อง และอาจมีมูลค่าสูงถึง 78,395.6 ล้านบาทสหรัฐ (สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า, 2568) ซึ่งน่าจะส่งผลรวมถึงความต้องการวัตถุดิบจากฟ้าทะลายโจร ที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกษตรกรไทยเริ่มหันมาปลูกฟ้าทะลายโจรในเชิงพาณิชย์ มากขึ้นเพื่อเพิ่มรายได้และตอบสนองตลาดสมุนไพรที่เติบโตอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ปริมาณผลผลิตที่เกษตรกรเก็บเกี่ยวได้ยังคงมีความไม่แน่นอน และคุณภาพของผลผลิตมีความแปรปรวน (Edi et al., 2011) เนื่องจากฟ้าทะลายโจรเป็นพืชที่ไวต่อสภาพแวดล้อม และเป็นพืชที่ต้องการแสงในระดับปานกลางถึงค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอุณหภูมิและแสง ซึ่งค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตอยู่ที่ อุณหภูมิ 25–30 องศาเซลเซียส และควรได้รับแสงวันละ 6–8 ชั่วโมง (Picture This, 2024) อีกทั้งมีรายงานว่า ปริมาณแสงรวมต่อวัน (Daily Light Integral, DLI) ที่เหมาะสมต่อการปลูกฟ้าทะลายโจร ควรไม่น้อยกว่า 15 โมลต่อตารางเมตรต่อวัน และอาจเพิ่มขึ้นได้ถึง 20 – 25 โมลต่อตารางเมตรต่อวัน (Pennisi et al., 2020) ดังนั้นหากจัดการได้อย่างเหมาะสมโดยเฉพาะปริมาณแสงและช่วงเวลาที่พืชได้รับแสง ย่อมส่งผลให้ได้ผลผลิตฟ้าทะลายโจรเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามจากสถานการณ์ในปัจจุบันที่ประเทศไทยเผชิญกับข้อจำกัดด้านพื้นที่ การพัฒนาเกษตรกรรมสมัยใหม่จึงมุ่งเน้นการใช้พื้นที่และทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุดควบคู่กับการผลิตพลังงานหมุนเวียน หนึ่งในแนวคิดที่ได้รับความสนใจคือ ระบบอกริวอลเทอิกส์ หรือ Agrivoltaic system ซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่างการผลิตพืชกับการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนพื้นที่เดียวกัน โดยช่วยลดผลกระทบจากสภาพอากาศที่แปรปรวน เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พื้นที่ และลดต้นทุนพลังงานในภาคเกษตร (CSTEP, 2024) ทั้งนี้งานวิจัยหลายชิ้นยืนยันว่า การปลูกพืชภายใต้ระบบโซลาร์เซลล์สามารถเพิ่มผลผลิตได้ ยกตัวอย่างเช่น Edouard et al. (2023) ที่ศึกษาการปลูกอัลฟัลฟาภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ชนิด Bifacial photovoltaic พบว่า ผลผลิตชีวมวลเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 10% ขณะที่ประสิทธิภาพการใช้ที่ดินรวมเพิ่มขึ้นถึง 51% เมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกในพื้นที่โล่งแจ้ง ส่วน Scarano et al. (2024) ที่ศึกษามะเขือเทศภายใต้ระบบโซลาร์เซลล์ และพบว่า ผลผลิตมะเขือเทศทั้งขนาดผลและปริมาณน้ำคั้นที่ได้มีค่าสูงกว่าการปลูกในพื้นที่โล่งอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งจากการศึกษาของ Dal Prà et al. (2024) ที่ศึกษาการปลูกผักสลัดเอสคาโรล (escarole) ภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ ยังพบว่า ผักสลัดเอสคาโรลมีน้ำหนักสดและขนาดของหัวผักกาดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกพื้นที่โล่งแจ้ง ซึ่งอาจเป็นเพราะผักสลัดเอสคาโรลสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะร่มเงา หรืออาจเนื่องมาจากผลดีของการปลูกภายใต้แผงโซลาร์เซลล์จากการรักษาความชื้นของบริเวณที่ปลูก เช่นเดียวกับ Hickey et al. (2024) ที่ศึกษาผลของการปลูกพืชผักใต้แผงโซลาร์เซลล์ โดยการปลูกพริก ผักกาดหอม พักทอง และมะเขือเทศใต้แผงโซลาร์เซลล์ที่มีการบังแสงในระดับต่างๆ ได้แก่ แผงชนิดแบบทึบแสง (standard solar panels) ที่พรางแสง 100 เปอร์เซ็นต์ แผงโซลาร์เซลล์ 2 หน้า (bifacial solar panels) ที่พรางแสง 95 เปอร์เซ็นต์ และแผงชนิดฟิล์มบางกึ่งโปร่งแสง (thin-film solar panels) ที่พรางแสง 60 เปอร์เซ็นต์ พบว่า การปลูกพืชผักใต้แผงโซลาร์เซลล์ชนิดฟิล์มบางกึ่งโปร่งแสงทำให้สภาพแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิของสภาพอากาศและดินเหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชดังกล่าวมากที่สุด อย่างไรก็ตาม พบว่า ร่มเงาจากแผงโซลาร์เซลล์มีผลต่อผลผลิตของพักทองมากที่สุด เนื่องจากพักทองปลูกอยู่ในแนวแถวกลางใต้แผงพอดี ในขณะที่พริก ผักกาดหอม และมะเขือเทศได้รับผลกระทบน้อยกว่า เนื่องจากการปลูกอยู่ในแนวเหนือและแนวใต้ของแผง ดังนั้นตำแหน่งของการปลูกพืชภายใต้แผงส่งผลต่อผลผลิตพืช อย่างไรก็ตามแม้ว่ายังไม่พบการทดสอบการปลูกพืชสมุนไพรของประเทศไทยภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ แต่พบว่า พืชสมุนไพรของไทยส่วนใหญ่ปลูกในพื้นที่โล่งแจ้งหรือต้องการปริมาณแสงค่อนข้างมาก

ดังนั้นหากนำแผงโซลาร์เซลล์มาใช้กับการปลูกพืชสมุนไพรไทย ยังคงจำเป็นต้องมีพัฒนาให้เหมาะสมกับการปลูกพืชในกลุ่มนี้ ทั้งนี้จากความร่วมมือกับสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ซึ่งได้ออกแบบแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งส่องผ่านแสง (Semi-

transparent solar panels) ที่กรองรังสี UV และสะท้อนรังสีความร้อนออกไป แต่ยังให้แสงในช่วง Photosynthetically Active Radiation (PAR) ผ่านลงมาถึงพืชในระดับที่เหมาะสม ช่วยลดอุณหภูมิช่วงกลางวันและส่งเสริมการสังเคราะห์แสงของพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเกิดเป็นการวิจัยนี้ขึ้น เพื่อศึกษาการใช้แผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งส่องผ่านแสงดังกล่าวกับการผลิตฟ้าทะลายโจรเปรียบเทียบกับการใช้แผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสงและการปลูกในพื้นที่โล่งแจ้ง ซึ่งผลการวิจัยที่ได้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตพืชสมุนไพรที่อาจเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตทั้งด้านปริมาณและคุณภาพ และยังช่วยให้การใช้พื้นที่เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อสนับสนุนการพัฒนาการเกษตรอย่างยั่งยืนในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปริมาณและคุณภาพผลผลิตของฟ้าทะลายโจรที่ปลูกภายใต้ระบบอกริวอลเทอิกส์ที่ใช้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับหลังคาพลาสติกและพื้นที่โล่งแจ้ง
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพื่อประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจจากการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้ระบบกริวอลเทอิกส์

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟาทะลายโจร

ฟาทะลายโจร (kalmegh) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Andrographis paniculata* (Burm.f.) Wall.ex Nees อยู่ในวงศ์ Acanthaceae เป็นสมุนไพรที่มีศักยภาพสูงทั้งในด้านการผลิตและการนำไปใช้ อีกทั้งยังถูกจัดเป็น First-line drug ในบัญชียาหลักแห่งชาติ อยู่ในกลุ่มยาพัฒนาจากสมุนไพร ใช้เป็นยารักษาอาการของระบบทางเดินอาหาร (ยาบรรเทาอาการท้องเสีย) และใช้เป็นยารักษาอาการของระบบทางเดินหายใจ (ไข้หวัดเจ็บคอ) ในรูปของยาแคปซูล ยาเม็ด ยา ลูกกลอน ฟาทะลายโจรมีรสขมและยังใช้เป็นยาสมุนไพรได้ทั้งต้น ใบและราก สามารถใช้รักษา (1) แก้ไข้ทั่วไป ไข้หวัด ไข้หวัดใหญ่ ที่มีอาการไอ เจ็บคอ น้ำมูกไหล (2) ระวังอาการอักเสบ คออักเสบ ต่อมทอนซิลอักเสบ ขับเสมหะ (3) รักษาโรคผิวหนัง ผื่น (4) แก่ติดเชื้อมาทำให้ปวดท้อง ท้องเสีย บิดและแก้กระเพาะลำไส้อักเสบ (5) เป็นยาขมเจริญอาหาร (กรมวิชาการเกษตร, 2564) นอกจากนี้ ฟาทะลายโจรยังเป็นสมุนไพรที่ถูกกล่าวถึงและมีการใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้นในช่วงที่มีการระบาดของโรคทางเดินหายใจเฉียบพลันรุนแรงหรือซาร์ส (SARS) ทั้งนี้ฟาทะลายโจรมีสารสำคัญ Andrographolide ที่มีศักยภาพป้องกันและรักษาโรค SARS 2 หรือ SARS-CoV (Cure and prevent the diseases caused by the SARS virus) ซึ่งไวรัส SARS มีความใกล้เคียงกับไวรัส COVID-19 (SARS-CoV-2) จึงทำให้ฟาทะลายโจรได้รับความสนใจจากนักวิจัย และมีการนำฟาทะลายโจรมาใช้ในการบรรเทาอาการของโรคหวัดและใช้เพื่อรักษา COVID-19 กันอย่างแพร่หลาย (กรมวิชาการเกษตร, 2564)

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ (กรมวิชาการเกษตร, 2564)

ฟาทะลายโจร เป็นไม้ล้มลุก มีลำต้นตั้งตรง สูงประมาณ 30-60 เซนติเมตร ส่วนตรงปลายกิ่งเป็น เหลี่ยม แตกกิ่งเล็กด้านข้างจำนวนมากลักษณะเป็นพุ่ม กิ่งก้านมีสีเขียว (ภาพที่ 2.1) ส่วนที่ใช้ คือ ใช้ทั้งต้น ใบสด ใบแห้ง จะเก็บมาใช้เมื่อต้นมีอายุได้ 3-5 เดือน



ภาพที่ 2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟ้าทะลายโจร a) ลำต้น b) ใบ c) ดอก และ d) ฝัก
ที่มา: Intharuksa et al. (2022)

2.1.2 ถิ่นกำเนิดและแหล่งกระจายพันธุ์ (กรมวิชาการเกษตร, 2564)

พืชในสกุล *Andrographis* มีถึง 40 species และหลายชนิดถูกนำมาใช้เป็นยาพื้น (traditional medicine) มีถิ่นกำเนิดอยู่ทางตอนใต้ของอินเดียและศรีลังกา และการแพร่กระจายอย่างกว้างขวางในแถบเขตร้อนและกึ่งเขตร้อนของทวีปเอเชีย เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ อินเดีย ศรีลังกา ปากีสถาน ฮองกง และพื้นที่เขตร้อนของทวีปอเมริกา จนถึงปัจจุบันมีการปลูกฟ้าทะลายโจรในตะวันตกเฉียงใต้ของไนจีเรียด้วย

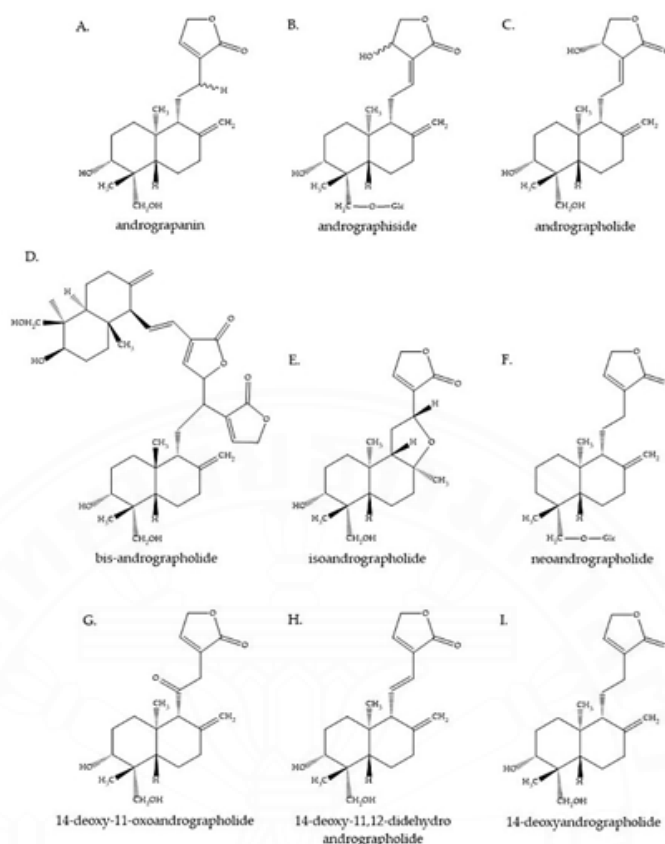
ฟ้าทะลายโจรพบได้ในแหล่งที่อยู่ต่าง ๆ ได้แก่ ที่ราบ เนินเขา ทางลาดชัน ที่รกร้าง พาร์ม พื้นที่แห้งหรือเปียกชื้น ฟ้าทะลายโจรเจริญเติบโตได้ดีในดินทุกประเภท แม้แต่ดินชนิดที่เกิดจากการผุกร่อนของหิน (serpentine soil) ที่พืชชนิดอื่นๆ แทะไม่สามารถขึ้นอยู่ได้ ซึ่งดินเหล่านี้มักจะมีสารโลหะหนักค่อนข้างสูง เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง และสังกะสี อย่างไรก็ตามพบว่า ฟ้าทะลายโจรจะเจริญเติบโตได้ดีในดินร่วนซุยที่มีการระบายน้ำดีและมีการให้น้ำอย่างพอเพียง แต่ก็พบว่า ฟ้าทะลายโจรทนต่อความแห้งแล้งได้ดีเนื่องจากมีระบบรากที่ยาว อีกทั้งเมื่ออยู่ในสภาพแห้งแล้งรากของฟ้าทะลายโจรจะเจริญเติบโตแผ่กว้างออก แม้ว่าการเจริญเติบโตของส่วนยอดจะลดลง พืชชนิดนี้สามารถเจริญเติบโตได้ทุกฤดูกาล ทั้งในที่โล่งแจ้งหรือมีแสงรำไร ในสภาพที่มีความชื้นบ้างเล็กน้อยไปจนถึงบริเวณที่มีฝนตกชุก

2.1.3 สารสำคัญในฟ้าทะลายโจร (กรมวิชาการเกษตร, 2564)

ในฟ้าทะลายโจรมีสารประกอบกลุ่ม Diterpenic compounds คือ Andrographolide, Neoandrographolide และ 14-deoxy-11, 12-didehydroandrographolide เป็นองค์ประกอบหลักที่ให้ผลทางเภสัชซึ่งสารสำคัญเหล่านี้เป็นตัวชี้วัดในการควบคุมสารสกัดฟ้าทะลายโจร ในตำรามาตรฐานยาสมุนไพรไทย (Thai Herbal Pharmacopoeia) ซึ่งกำหนดให้วัตถุดิบสมุนไพร (ส่วนเหนือดินแห้ง) มีสารสำคัญ คือ แลคโตนรวม (total lactone) โดยคำนวณเป็นแอนโดรกราโฟไลด์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก (W/W) (กรมวิชาการเกษตร, 2564) ปริมาณของสาร Andrographolide เป็นสารหลักเพื่อใช้บ่งบอกคุณภาพของสารสกัดฟ้าทะลายโจร ซึ่งได้มีการแบ่งชั้นคุณภาพออกเป็น 3 เกรด คือ

1. เกรดคุณภาพดี ปริมาณสาร Andrographolides สูงหรือ 2.50% ขึ้นไป
2. เกรดคุณภาพปานกลาง ปริมาณสาร Andrographolides มากกว่า 1% แต่ไม่เกิน 2.5%
3. เกรดต่ำ ปริมาณสาร Andrographolides น้อยกว่า 1% ซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับตามตำรามาตรฐานยาสมุนไพรอินเดีย the Indian Pharmacopoeia (IP 2014)

นอกจากนี้ยังพบสารประกอบประเภทแลคโตนอื่นๆ ในปริมาณน้อย ได้แก่ ดิออกซีออกซิแอนโดรกราโฟไลด์ (deoxy-oxo-andrographolide) แอนโดรกราฟีไซด์ (Andrographiside) และดิออกซีแอนโดรกราฟีไซด์ (deoxy-andrographiside) และสารประเภทฟลาโวนอยด์ (flavonoid) เช่น โอโรกซิลิน (oroxylin) วอโกนิน (wogonin) และ แอนโดรกราฟีดินเอ (andrographidine A) เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของสารสำคัญบางชนิดของฟ้าทะลายโจร
ที่มา: Intharuksa et al. (2022)

2.1.3.1 ปริมาณสารสำคัญกับส่วนต่าง ๆ ของฟ้าทะลายโจร

ส่วนต่าง ๆ ของฟ้าทะลายโจรมีปริมาณสารสำคัญแตกต่างกันไป พบว่าในใบมีสาร Andrographolide 4.686 % สูงกว่าส่วนปลายยอด ลำต้นและราก ที่มีสาร Andrographolide ประมาณ 1.955 %, 0.533% และ 0.054% ตามลำดับ อีกทั้งยังมีรายงานว่า ส่วนของลำต้น มีสาร Andrographolide 0.6% และยังประกอบด้วย 14-deoxy-11-oxoandrographolide 0.12%, 14-deoxy-11, 12-didehydroandrographolide (andrographolide-D) 0.06% และ 14-deoxy andrographolide 0.02% และมีสารที่ไม่มีความขม (neoandrographolide) 0.005% ต่อน้ำหนักแห้ง (Gajbhiye and Khristi, 2010)

นอกจากนี้ในส่วนของใบมีสารกลุ่ม Diterpene lactones ได้แก่ Andrographolide, Deoxyandrographolide, Neoandrographolide และ 14-deoxy-11, 12-didehydroandrographolide) กลุ่ม Diterpene glucoside (deoxyandrographolide 19 β -D

glucoside) และกลุ่ม Flavonoids (5,7,2',3'-tetramethoxy flavanone และ 5-hydroxy-7,2',3'-trimethoxyflavone) โดยใบอ่อนจะมีสารประกอบ Andrographolide และ 14-deoxyandrographolide ค่อนข้างสูง ส่วนใบแก่พบสาร Neoandrographolid, Glucose, Sucrose, Choline และ Alanine สูง ส่วนต่าง ๆ ของฟ้าทะลายโจรจะมีปริมาณสารสำคัญแตกต่างกัน ซึ่งปริมาณสาร Andrographolide ในส่วนต่างๆ ของพืชในทุกระยะการเจริญเติบโต ใบจะมีสาร Andrographolide สูงสุดมากกว่าลำต้นทั้งต้นและฝัก สำหรับปริมาณแลคโตนรวมก็ให้ผลในแนวเดียวกัน (Gajbhiye and Khristi, 2010)

2.1.3.2 ปริมาณสารสำคัญกับระยะการเจริญเติบโต

สารสำคัญที่พบในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของฟ้าทะลายโจรมีความแตกต่างกัน โดยที่ระยะ 40-80 วันหลังย้ายปลูก ใบมีการสร้างสาร Andrographolide เพิ่มขึ้น และมีปริมาณสูงที่สุดที่ 100 วันหลังย้ายปลูก อย่างไรก็ตาม ลำต้นมีปริมาณสาร Andrographolide ต่ำกว่าใบในทุกระยะการเจริญเติบโต ลำต้นมีปริมาณสาร Andrographolide เพิ่มขึ้นสูงสุดจนกระทั่งที่ 120 วันหลังย้ายปลูก หลังจากนั้นปริมาณสาร Andrographolide จะลดลง (กรมวิชาการเกษตร, 2564)

2.1.4 การปลูกและการจัดการ (กรมวิชาการเกษตร, 2564)

2.1.4.1 สภาพพื้นที่ปลูก

(1) ลักษณะดิน

ควรเป็นดินร่วนซุย หลีกเลียงดินเหนียว หรือดินทรายจัด มีการระบายน้ำดี ไม่ท่วมขัง มีอินทรีย์วัตถุไม่น้อยกว่า 3.5% ความเป็นกรด-ด่างของดิน อยู่ในช่วง 5.5-8.0

(2) สภาพภูมิอากาศ

ความชื้นสัมพัทธ์ควรอยู่ในช่วง 60-80% ชอบแสงรำไร

(3) แหล่งน้ำ

ฟ้าทะลายโจรต้องการน้ำเพียงพอตลอดการปลูก ถ้าขาดน้ำผลผลิตและปริมาณสารสำคัญจะลดลง

(4) ฤดูกาลปลูก

ในช่วงเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม มกราคม กุมภาพันธ์ และมีนาคม เป็นช่วงเวลาการที่ปลูกที่เหมาะสม เนื่องจากจะให้ผลผลิตและปริมาณสารสำคัญอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

2.1.4.2 พันธุ์

ฟ้าทะลายโจรมีหลายสายพันธุ์ซึ่งปริมาณสารสำคัญและผลผลิตของแต่ละพันธุ์มักขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่ฤดูกาล วิธีการปลูก การดูแลรักษาและการเก็บเกี่ยว ปัจจุบันมีพันธุ์ที่ปลูกกันทั่วไป และพันธุ์ที่กรมวิชาการเกษตรมีการวิจัยพัฒนาสายพันธุ์และกำลังส่งเสริมให้เกษตรกรนำไป

ปลูก ยกตัวอย่างเช่น พันธุ์พิษณุโลก 5 - 4 อายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 77 วัน และพันธุ์พิจิตร 4-4 อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 82 วัน และยังมีพันธุ์อื่น ๆ ที่ปลูกทั่วไป เช่น พันธุ์จาก อ.กำแพงแสน จ. นครปฐม พันธุ์จาก จ. ระยอง พันธุ์จาก จ. ศรีสะเกษ และพันธุ์พื้นเมือง เป็นต้น

2.1.4.3 การปลูกและการดูแลรักษา

(1) การเตรียมดิน

ขุดหรือไถพรวนเพื่อให้ดินร่วนซุย และตากดินไว้ประมาณ 2 สัปดาห์ แล้วทำการไถแปร และปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์ปุ๋ยคอก หรือปุ๋ยหมัก

(2) การเตรียมพันธุ์

ขยายพันธุ์ด้วยเมล็ด ใช้เมล็ดจากฝักแก่จัด เมล็ดต้องมีสีน้ำตาลแดง ลักษณะสมบูรณ์ ปราศจากโรคและแมลง เนื่องจากเมล็ดมีเปลือกแข็ง ก่อนปลูกแช่เมล็ดในน้ำที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 6-12 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำซึมผ่านเมล็ด และเมล็ดสามารถงอกได้

(3) การปลูก

1. การปลูกแบบหว่าน นำเมล็ดมาผสมกับทรายหยาบ อัตรา 1:1-2 โดยปริมาตร ใช้เมล็ด 100-400 เมล็ดต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร

2. การปลูกแบบโรยเมล็ดเป็นแถว ขุดร่องตื้น ๆ เป็นแถวยาว โรยเมล็ดและกลบดินบาง ๆ ระยะปลูกระหว่างแถวประมาณ 40 เซนติเมตร ใช้เมล็ดประมาณ 50-100 เมล็ดต่อความยาว 1 เมตร วิธีนี้ทำให้สามารถกำจัดวัชพืชซึ่งเป็นปัญหาสำคัญได้สะดวก

3. การปลูกโดยใช้กล้า มีขั้นตอนดังนี้

- เพาะกล้า เพาะกล้าในถาดเพาะกล้า หรือเตรียมแปลงโดยยกแปลงกว้าง 2 เมตร สูงประมาณ 15-20 เซนติเมตร ย่อยดินให้ละเอียดใส่ปุ๋ยอินทรีย์รองพื้น $\frac{1}{2}$ -1 กิโลกรัมต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร

- การเตรียมหลุมปลูก ขุดหลุมกว้างประมาณ 15 เซนติเมตร ลึกประมาณ 8-12 เซนติเมตร เป็นแถว ให้มีระยะปลูกระหว่างต้น 20-30 เซนติเมตร และระหว่างแถว 40 เซนติเมตร ใส่ปุ๋ยอินทรีย์รองก้นหลุมประมาณ 125 กรัมต่อหลุม และคลุกเคล้าให้เข้ากับดิน

- ย้ายกล้าปลูก เมื่อกล้ามีอายุประมาณ 30 วัน ก่อนย้ายกล้า รดน้ำแปลงให้ชุ่มแล้วจึง ใช้ช้อนขุดหรือเสียมแซะกล้าไปปลูกในหลุมที่เตรียมไว้ 1 ต้นต่อหลุม หลังปลูกรดน้ำทันที ปลูกฤดูแล้ง ระยะ 30 x 40 เซนติเมตร จะปลูกได้ 8 ต้นต่อตารางเมตร และปลูกฤดูฝน ระยะ 30 x 60 เซนติเมตร จะปลูกได้ 6 ต้นต่อตารางเมตร

(4) การดูแลรักษา

1. การคลุมแปลง โดยเฉพาะพื้นที่ปลูกเป็นทีโล่งแจ้ง ลมพัดแรงจัด แดดจัด ฝนตกชุก ควรคลุมแปลงด้วยฟางหรือใบหญ้าคาบาง ๆ เพื่อลดการชะล้างของน้ำความชื้น ทำให้เมล็ดงอกได้เร็วขึ้น
2. การปลูกซ่อม หลังจากปลูกแล้วประมาณ 7-15 วัน ถ้าพบว่าต้นกล้าที่ปลูกตายหรือไม่งอก ควรปลูกซ่อมทันที

(5) การใส่ปุ๋ย

เมื่อฟัทะลายโจรอายุ 60 วัน ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 300-400 กรัมต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร และที่อายุ 90-110 วัน ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 300-500 กรัมต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร

1. แบบหว่าน หว่านให้กระจาย หลังหว่านต้องรดน้ำทันที อย่ายให้ปุ๋ยค้ำที่ใบ
2. แบบโรยหรือหว่านเป็นแถว ตามแนวนานระหว่างแถวปลูกห่างจากแถวปลูกประมาณ 10-15 เซนติเมตร โดยขุดเป็นร่อง ใส่ปุ๋ยพรวนดินกลบ เหมาะกับการปลูกแบบโรยเป็นแถว
3. แบบหยอดโคน ใส่ปุ๋ยห่างจากโคนต้นประมาณ 10 เซนติเมตร โดยขุดหลุมฝังกลบ ดินหรือโรยรอบ ๆ โคนต้นแล้วพรวนดินกลบก็ได้ เหมาะกับการปลูกแบบมีระยะปลูก

(6) การให้น้ำ

เนื่องจากฟัทะลายโจรเป็นพืชชอบน้ำ แต่ไม่ชอบน้ำขัง ควรให้น้ำอย่างสม่ำเสมอและเพียงพอ ตั้งแต่ปลูกจนถึงเก็บเกี่ยว หลังจากปลูกทุกครั้งต้องให้น้ำทันที ซึ่งจะช่วยให้ต้นกล้าไม่เฉาและตายง่าย ในระยะเดือนแรกหลังจากปลูก ถ้าแดดจัดควรให้น้ำ 2 ครั้ง เช้า เย็น ถ้าแดดไม่จัด ให้น้ำวันละ 1 ครั้ง และหลังจากอายุ 2 เดือน สามารถให้น้ำวันเว้นวัน หรือให้ตามความเหมาะสมตามสภาพพื้นที่และสภาพอากาศ (จรัญ และคณะ 2554)

2.1.4.4 การเก็บเกี่ยว

(1) การเก็บเกี่ยว

1. การเก็บเกี่ยวใบหรือทั้งต้น ควรเก็บเกี่ยวในช่วงที่ฟัทะลายโจรเริ่มออกดอกจนถึงดอกบาน 50% ซึ่งฟัทะลายโจร จะมีอายุประมาณ 110-150 วัน และเป็นช่วงที่มีสารสำคัญมากที่สุดหากเก็บหลังช่วงนี้สารสำคัญจะลดลง ในขณะที่การออกดอกจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม
2. วิธีการเก็บเกี่ยว ใช้กรรไกรตัดหรือเคียว ตัดเหนือดินให้ห่างจากโคนประมาณ 5-10 เซนติเมตร เพื่อเลี้ยงต้นต่อให้เจริญเติบโตให้ผลผลิตในรุ่นต่อไปใช้เวลาประมาณ 2-3

เดือน จึงสามารถเก็บเกี่ยวฟัทะลายโจรได้อีกครั้งจากนั้นนำมาคัดแยกวัชพืชและสิ่งปลอมปนออก ล้างด้วยน้ำสะอาด ตัดเป็นท่อนประมาณ 2-3 เซนติเมตร แล้วผึ่งให้แห้งหรืออบด้วยเครื่องอบแห้งแบบ ลมร้อน ผลผลิตสดเฉลี่ย 2,000-3,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีสัดส่วนผลผลิตสดต่อผลผลิตแห้งอัตรา 4:1 กิโลกรัม ซึ่งสารแอนโดกราโฟไลด์ในส่วนของใบฟัทะลายโจรจะเริ่มมีปริมาณมากขึ้นตั้งแต่อายุ 80 วันขึ้นไป (Gajbhiye and Khristi, 2010) การเก็บเกี่ยวฟัทะลายโจรที่อายุ 135 วันหลังย้ายปลูก จะ ให้ปริมาณสารแอนโดกราโฟไลด์สูง (Kumar and Kumar, 2013; Detpiratmongkol and Liphan, 2018) นอกจากนี้ การเก็บเกี่ยวฟัทะลายโจรที่อายุ 18 สัปดาห์หลังปลูก หรือระยะก่อนออกดอกจะมี ปริมาณสารสำคัญมากที่สุด และจะพบในระยะเวลาใบอ่อนมากกว่าใบแก่ (Tajidin et al., 2019)

3. การเก็บเกี่ยวเมล็ด เก็บเกี่ยวเมล็ดพันธุ์ที่เหมาะสม เมื่อฟัทะลายโจรมี อายุประมาณ 6 เดือน เป็นระยะฝักแก่ เมล็ดมีสีน้ำตาลหรือมีน้ำหนักเมล็ดรวมประมาณ 0.166 กรัม ต่อ 100 เมล็ด มีความงอก (98.5%) และสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานถึง 1 ปี แต่ความงอกสูงสุดจะ พบในเมล็ดฟัทะลายโจรที่เก็บรักษาไว้ไม่เกิน 6 เดือน (Kumar and Kumar, 2013)

(2) การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว

หลังจากเก็บเกี่ยวฟัทะลายโจรเรียบร้อยแล้วควรทำความสะอาดก่อนทำ ให้แห้ง นำฟัทะลายโจรที่เก็บมาล้างน้ำให้สะอาด คัดแยกสิ่งปลอมปนเช่น วัชพืชที่ปะปนมา จากนั้น ตัดหรือหั่นให้มีความยาว 3-5 เซนติเมตร ผึ่งให้สะเด็ดน้ำแล้วนำมาเกลี่ยบนภาชนะที่สะอาดเช่น กระด้งหรือถาด การตากควรคลุมภาชนะด้วยผ้าขาวบางเพื่อป้องกันฝุ่นละอองและกันการปลิวของ สมุนไพร ตากจนแห้งสนิทหรือใช้เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใน 8 ชั่วโมง แรกและลดอุณหภูมิเหลือ 40-45 องศาเซลเซียส อบต่อจนแห้งสนิทหลังจากที่ฟัทะลายโจรแห้งดี แล้วควรนำฟัทะลายโจรเก็บใส่ถุงพลาสติกปิดปากถุงหรือมัดให้แน่นและเก็บฟัทะลายโจรในที่ สะอาด ไม่ควรเก็บฟัทะลายโจรไว้นานเพราะจะทำให้ปริมาณสารสำคัญลดลงประมาณ 25% อย่างไรก็ตาม วิธีการเก็บรักษาฟัทะลายโจรหลังการเก็บเกี่ยวสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การผึ่งลม การอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส การอบด้วยโรงอบพลังงานแสงอาทิตย์ การทำแห้งแบบเยือกแข็ง (freeze dry) และการตากแดด เป็นต้น (แสงมณี และคณะ, 2553)

การบรรจุและการเก็บรักษา เก็บใส่ถุงพลาสติกปิดปากถุงหรือมัดให้แน่น ถ้ามีปริมาณน้อยเก็บในขวดแห้งที่สะอาด ปิดฝาให้สนิทและเก็บในที่สะอาดไม่ควรเก็บวัตถุดิบไว้นาน

2.1.4.5 การจัดการศัตรูพืช (กรมวิชาการเกษตร, 2564)

(1) โรคพืช

ต้นฟ้ายะลายนี้อายุ 2-3 เดือน ไม่ค่อยพบการระบาดของโรคแต่จะพบมากในช่วงออกดอกจนถึงติดฝัก ซึ่งโรคที่พบบ่อยมีดังนี้

1. โรครากเน่าและโคนเน่า เกิดจากเชื้อรา *Phytophthora* sp. จะมีอาการคือต้นเริ่มเหี่ยว เหลือง ใบร่วง โคนต้นมีอาการเน่าและต้นตาย ระบาดมากในช่วงฤดูฝน ตั้งแต่เดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม โดยการป้องกันและกำจัดจะใช้เชื้อราปฏิปักษ์ *Trichoderma harzianum* อัตราตามคำแนะนำหรือหากรุนแรงมากให้ใช้สารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อราเมทาแลกซิลตามคำแนะนำในฉลาก

2. โรคแอนแทรคโนส เกิดจากเชื้อรา *Colletotrichum* sp. ใบของฟ้ายะลายจะมีจุดแผลแห้งเล็ก ๆ สีน้ำตาลและขยายเป็นวงซ้อนกันเป็นชั้น หากพบให้ถอนทิ้งและโรยปูนขาวป้องกันการแพร่ระบาดและใช้เชื้อราบาซิลลัส ซับทิลิส พ่นในอัตรา 30-50 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร หรือหากรุนแรงมากให้ใช้สารกำจัดเชื้อแบคทีเรียหรือโรอะเบนดาโซลพ่นตามคำแนะนำในฉลาก

3. โรคที่เกิดจากเชื้อไวรัส ต้นฟ้ายะลายจะมีใบสีเหลืองซีดเป็นกลุ่มๆ ต้นจะไม่เจริญเติบโต แครกแตก เป็นต้น สามารถป้องกันกำจัดได้โดยหมั่นตรวจแปลง ถ้าพบต้นที่แสดงอาการเป็นโรคใหม่ให้ถอนทำลายหรือเผาทั้งต้นเพื่อกำจัดแหล่งสะสมของไวรัส

(2) แมลงศัตรูพืช

1. หนอนเจาะสมอฝ้าย ตัวเต็มวัยจะวางไข่เป็นฟองเดี่ยวตามส่วนต่างๆ ของพืชได้แก่ ใบ ก้านใบและยอดอ่อน หนอนวัยแรกจะกัดกินทำลายต้นอ่อน สามารถป้องกันและกำจัดได้โดยเมื่อพบการระบาดของหนอนเจาะสมอฝ้ายที่ความเสียหายระดับเศรษฐกิจคือ พบหนอนมากกว่า 1 ตัวต่อ 2 ต้น หรือไข่มากกว่า 1 ฟองต่อต้น ให้พ่นด้วยเชื้อไวรัสนิวเคลียโพลีอีโดโรซิส อัตรา 30 มิลลิลิตรต่อน้ำ 20 ลิตร หยุดพ่น 1 วันก่อนเก็บเกี่ยวหรือใช้สารคลอร์ฟลูอาซูรอน 5 % อีซี อัตรา 20 มิลลิลิตรต่อน้ำ 20 ลิตร หยุดพ่นสาร 7 วันก่อนเก็บเกี่ยว

2. หนอนกระทู้หอม ตัวเต็มวัยเป็นผีเสื้อกลางคืน วางไข่เป็นกลุ่มสีน้ำตาล คล้ายฟางข้าว กัดกินที่ทุกส่วนของพืช ทำลายได้รวดเร็ว หนอนจะเข้าดักแด้ในดิน การป้องกันกำจัดหากเป็นระยะที่ไม่รุนแรงให้ใช้เชื้อบีที *Bacillus thuringiensis* subsp. *aizawai* หรือเชื้อ *Bacillus thuringiensis* subsp. *Kurstaki* อัตรา 60-80 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร หรือใช้สารธรรมชาติ ได้แก่ เมล็ดสะเดาพ่นในอัตรา 1 กิโลกรัมต่อน้ำ 20 ลิตร

3. เพลี้ยหอยและเพลี้ยอ่อน สามารถป้องกันกำจัดโดยพ่นสารสกัดสะเดาหรือ ไวท์ออยล์

(3) วัชพืช

1. วัชพืชประเภทใบแคบ ได้แก่ หญ้าตีนนก หญ้าตีนกา หญ้าปากควาย หญ้าแพรก หญ้าไผ่ เป็นต้น
2. วัชพืชประเภทใบกว้าง ได้แก่ หญ้ายาง ผักปราบ หญ้าเขมร สาบแร้งสาบกา ผักกะสัง ผักโขมหนาม ผักเสี้ยนผี ผักโขม ลูกใต้ใบ ตำแย บานไม่รู้โรย ปอวัชพืช เป็นต้น
3. วัชพืชประเภทกก ได้แก่ แห้วหนู กกดอกเขียว ตะกรับ เป็นต้น

2.1.4.6 ธาตุอาหารในพืชและการจัดการธาตุอาหารพืช (สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดอ่างทอง, 2563)

ธาตุอาหารในพืชเป็นสิ่งที่พืชต้องการใช้เพื่อการเจริญเติบโต ซึ่งธาตุอาหารจะประกอบด้วย 16 ธาตุ ได้จากอากาศและน้ำ 3 ธาตุ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) และได้จากดิน 13 ธาตุ แบ่งได้ดังนี้

(1) มหธาตุ

ประกอบด้วย ธาตุอาหารหลัก เป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชและพืชต้องการมาก แต่ส่วนใหญ่ดินมักจะขาด ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) และธาตุอาหารรอง เป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชและพืชต้องการมากแต่ไม่ต้องการเท่ากับธาตุอาหารหลัก ได้แก่ แคลเซียม (Ca) กำมะถัน (S) และแมกนีเซียม (Mg)

(2) จุลธาตุ

เป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการน้อยแต่ไม่สามารถขาดได้ ได้แก่ ทองแดง (Cu) โบรอน (B) สังกะสี (Zn) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) โมลิบดีนัม (Mo) และคลอรีน

2.2 องค์ประกอบทางพฤกษเคมี

2.2.1 องค์ประกอบทางพฤกษเคมี

เป็นสารสำคัญที่พบได้ในพืชหลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มสารเคมีในพืชตามสารตั้งต้นของสารเหล่านี้ ได้ 2 กลุ่มใหญ่ คือ สารปฐมภูมิ (primary metabolites) และสารทุติยภูมิ (secondary metabolites)

2.2.1.1 สารปฐมภูมิ (primary metabolites)

เป็นสารเคมีพื้นฐานที่พบในพืชชั้นสูง ซึ่งพบในพืชเกือบทุกชนิด และเป็นสารที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช และกรดอะมิโนบางชนิดจะมีการเกิด

กระบวนการชีวสังเคราะห์ ตัวอย่างสารปฐมภูมิ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต (carbohydrates) โปรตีน (protein) กรดอะมิโน (amino acid) เอนไซม์ (enzymes) และไขมัน (lipids) (วันดี, 2544; จิราพร, 2564)

2.2.1.2 สารทุติยภูมิ (secondary metabolites)

เป็นสารประกอบทางเคมีที่เกิดจากกระบวนการชีวสังเคราะห์ (biosynthesis) ภายในพืช เป็นสารประกอบที่สร้างขึ้นจากสารตั้งต้นที่ได้จากสารปฐมภูมิในกระบวนการชีวสังเคราะห์ที่จำเป็นในการดำรงชีวิต เป็นสารที่ไม่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโต แต่มีความจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตของพืช (ศุภวรรณ, 2549) โดยสารทุติยภูมิที่พบมากในพืชส่วนใหญ่ เช่น ฟีนอลิก (phenolic) สเตียรอยด์ (steroid) ฟลาโวนอยด์ อัลคาลอยด์ และเทอร์ปีนอยด์ เป็นต้น (นงลักษณ์, 2559; จิราพร, 2564)

2.3 อนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระ (free radical) คือ อะตอม โมเลกุล หรือสารประกอบที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยว อยู่ในออร์บิทัล (orbitals) วงนอกสุดที่มีระดับพลังงานสูงคืออะตอมของไฮโดรเจนและไอออนของโลหะทรานซิชัน (transition) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังรวมถึงโมเลกุลของออกซิเจนซึ่งนับว่าเป็นอนุมูลเพราะมีอิเล็กตรอนจำนวน 2 อิเล็กตรอน แต่ละอิเล็กตรอนจะแยกกันอยู่เป็นอิเล็กตรอนเดี่ยวในแต่ละออร์บิทัล ทั้งนี้การสปินหรือการหมุนรอบตัวของอิเล็กตรอนทั้งสองจะสปินแบบคู่ขนาน ในทิศทางเดียวกัน อนุมูลอิสระมีทั้งที่อยู่ในสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า และอนุมูลอิสระในสถานะที่มีประจุไฟฟ้า โดยมีทั้งประจุบวกและประจุลบ สัญลักษณ์ทางเคมีของอนุมูลหรืออนุมูลอิสระ คือ อิเล็กตรอนเดี่ยวของอนุมูลซึ่งจะแสดงด้วยจุดตำแหน่งข้างบนของสัญลักษณ์ทางเคมี เช่น อนุมูล $A^{\cdot}$, อนุมูล A^+ และอนุมูล A^{++} โดยเฉพาะอนุมูลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะไวต่อการเกิดปฏิกิริยา มากกว่าอนุมูลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เนื่องจากอิเล็กตรอนเดี่ยวจะไม่เสถียรและพยายามจับคู่กับอิเล็กตรอนเดี่ยวอื่น ดังนั้นอนุมูลอิสระจึงมีคุณสมบัติเฉพาะ คือ มีความไวสูงในการเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น ๆ อย่างไรก็ตามยังคงมีอนุมูลอิสระบางชนิดที่มีความเสถียร ไม่ไวในการเกิดปฏิกิริยา สามารถคงอยู่ในสภาพอนุมูลได้นาน แต่พบว่ามีจำนวนน้อยชนิดมาก (ปริยารัตน์, 2562; Cunha et al., 2018)

2.3.1 สารต้านอนุมูลอิสระ

สารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) คือ สารที่สามารถป้องกันหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) กระบวนการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปยัง

อีกสารหนึ่ง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ และอนุมูลอิสระยังสามารถทำลายเซลล์ของร่างกาย ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระนี้จะเข้าไปยับยั้งปฏิกิริยานี้โดยการจับกับอนุมูลอิสระ และยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ สำหรับในร่างกายมนุษย์มีสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เซลล์ในร่างกายเสียหายจากอนุมูลอิสระที่ทำให้เกิดการออกซิเดชันในร่างกายที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคต่าง ๆ และความแก่ชรา (พัชรี, 2566; Mason, 2011; Kumar, 2014)

2.3.1.1 กลไกการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระ

กลไกการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระจากรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระ พบว่า มีหลายกลไกและเป็นที่ทราบดีว่าสารต้านอนุมูลอิสระสามารถยับยั้งอนุมูลอิสระได้โดยการทำให้อิเล็กตรอนของอนุมูลอิสระมีความเสถียรขึ้น ซึ่งกลไกของปฏิกิริยาเกิดโดยการให้ไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ (ระวีวรรณ และทรงพร, 2549)

2.3.1.2 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

วิธีการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเชิงคุณภาพและการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเชิงปริมาณ ใน แต่ละประเภทจะมีหลายวิธีด้วยกันซึ่งแต่ละวิธีมีความจำเพาะแตกต่างกัน (ศิริพงษ์, 2565)

(1) การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเชิงคุณภาพ

การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเชิงคุณภาพเป็นการทดสอบเพื่อหาชนิดของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีอยู่ในตัวอย่างโดยอาศัยหลักการต่าง ๆ เช่น การทำให้เกิดสี การทำให้เกิดตะกอน ความสามารถในการละลายในตัวทำละลายและการถูกดูดซับโดยตัวดูดซับ วิธีการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่นิยม ได้แก่ การตรวจวัดสารโพลีฟีนอล เช่น Shinoda test และ Pew test โครมาโตกราฟีแบบชั้นบาง (thin layer chromatography) และการตรวจหาสารต้านอนุมูลอิสระชนิดต่าง ๆ โดยเครื่อง HPLC (ศิริพงษ์, 2565)

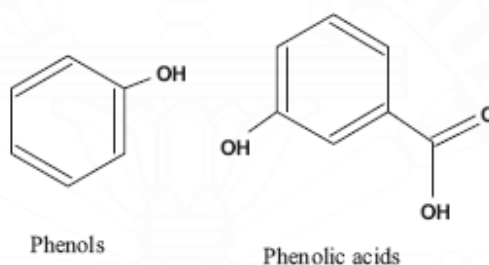
(2) การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเชิงปริมาณ

เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระในตัวอย่างประเภทต่าง ๆ วิธีที่นิยม ได้แก่ การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีการทำลายอนุมูลอิสระดีพีพีเอช (DPPH[•]) วิธีการฟอกสีอนุมูลอิสระเอบีทีเอส (ABTS^{•+}) และการวิเคราะห์ความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริกของสารต้านอนุมูลอิสระ (FRAP assay) ซึ่งวิธีการดังกล่าวข้างต้นจะมีการสร้างอนุมูลอิสระที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนและวิเคราะห์ความสามารถในการยับยั้งหรือกำจัดอนุมูลอิสระของสารตัวอย่างที่สนใจ โดยวัดปริมาณอนุมูลอิสระที่ลดลงหรือที่เหลือจากการดูดกลืนแสงสารอนุมูลอิสระที่นิยมใช้ เช่น ABTS^{•+} และ DPPH[•] (บุหริน, 2556)

2.3.1.3 ตัวอย่างสารต้านอนุมูลอิสระ

(1) สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds)

เป็นสารประกอบที่สามารถพบได้ในพืชหลายชนิด เช่น ผัก ผลไม้ ธัญพืช เครื่องเทศ และสมุนไพร นอกจากนี้ยังพบในเบียร์ ไวน์ ชา และโกโก้ โดยโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วย หมู่ไฮดรอกซีเกาะอยู่กับวงแหวนเบนซีน (ภาพที่ 2.3) (ลือชัย, 2554) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดี ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในกระบวนการหมัก และการเก็บรักษา ส่งผลต่อสีที่จำเพาะ และรสชาติ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดโรคหัวใจ เบาหวาน และโรคอ้วน รวมถึงต้านเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดได้ (รำพึง, 2560; ศรีณภิรมย์, 2563)



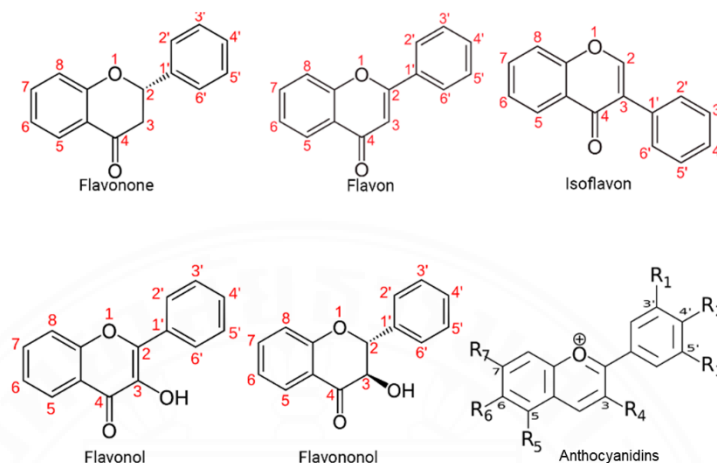
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของกลุ่มฟีนอลิก

ที่มา : [https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2585/phenolic compound](https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2585/phenolic%20compound)

(2) สารประกอบฟลาโวนอยด์ (flavonoid compounds)

เป็นสารที่อยู่ในกลุ่มสารประกอบโพลีฟีนอลิก (polyphenolic compounds) ที่สามารถพบได้ในผัก ผลไม้ ธัญพืช โดยจะพบเม็ดสีในส่วนต่างๆ ของพืช มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) 2 วงเชื่อมกันด้วยคาร์บอน 3 อะตอม ได้แก่ ฟลาโวนอน (flavone) ฟลาโวน (flavone) ไอโซฟลาโวน (isoflavone) ฟลาโวนอล (flavonol) ฟลาโวนอนอล (flavononol) และแอนโทไซยานิดิน (anthocyanidins) (ภาพที่ 2.4) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยทำหน้าที่ยับยั้งสารอนุมูลอิสระ รวมถึงมีฤทธิ์ต้านมะเร็ง โรคหัวใจ และโรคสมองเสื่อม ทั้งความจำและการเคลื่อนไหว นอกจากนี้เป็นสารให้สีที่สำคัญในพืชช่วยกรองรังสีอัลตราไวโอเล็ตและตรึงไนโตรเจน นอกจากนี้ยังมีความสำคัญทางเภสัชกรรม คือ มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ต้านมะเร็ง ต้าน

การอักเสบ ด้านโรคเบาหวาน ด้านจุลชีพ และช่วยปรับการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน (รำพึง, 2560; ศรีณภิมย์, 2563; Carrillo-Martinez et al. 2023)



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของกลุ่มฟลาโวนอยด์

ที่มา: Carrillo-Martinez et al. (2023)

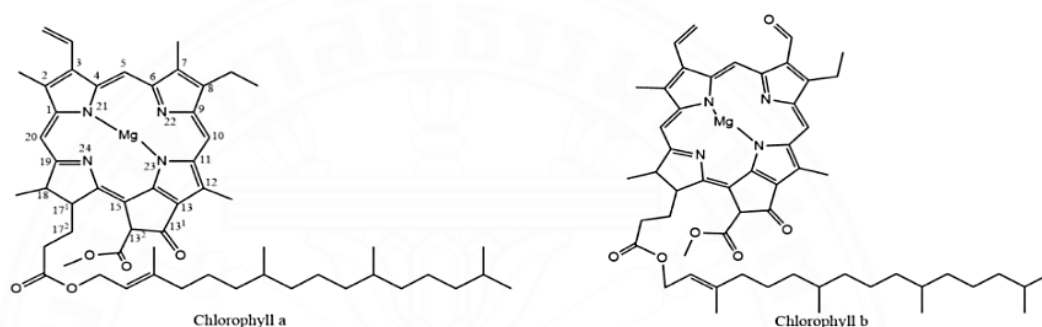
2.4 รงควัตถุของพืช

รงควัตถุ (pigment) คือ สารสีที่พืชสามารถดูดกลืนแสงได้ ซึ่งรงควัตถุแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ทำให้พืชแต่ละชนิดมีรงควัตถุที่แตกต่างกันออกไป รงควัตถุที่พบในพืช ดังนี้

2.4.1 คลอโรฟิลล์ (chlorophyll)

คลอโรฟิลล์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบได้ทั่วไปในทุกส่วนที่เป็นสีเขียวของพืช พบมากในใบ และในส่วนอื่น ๆ ได้แก่ ลำต้น กิ่ง ดอก ผล และรากที่มีสีเขียว นอกจากนี้ยังพบได้ในสาหร่ายทุกชนิด และแบคทีเรียบางชนิดคลอโรฟิลล์เป็นสารสำคัญในพืชที่ทำหน้าที่รับพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์เพื่อไปใช้ในการสร้างพลังงานในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างสารอินทรีย์ (Hörtensteiner and Kräutler, 2011) เช่น น้ำตาล คลอโรฟิลล์เป็นสารที่ดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีฟ้าและสีแดง และดูดกลืนแสงสีเหลือง และสีเขียวได้น้อย ดังนั้นจึงมองเห็นใบพืชมีสีเขียวได้ เนื่องจากคลอโรฟิลล์ดูดกลืนแสงสีฟ้าและสีแดงไว้ ส่วนแสงสีเขียวจะสะท้อนออกมาทำให้ตามองเห็น (Sun et al., 2024) โครงสร้างของคลอโรฟิลล์ประกอบด้วย Porphyrin-like structure ซึ่งมีอะตอมของ

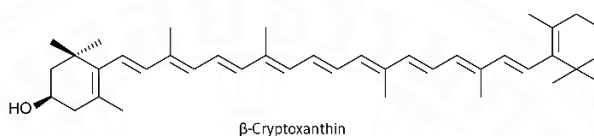
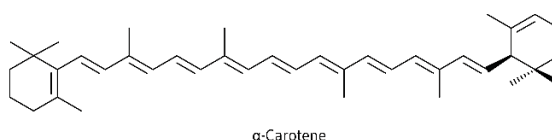
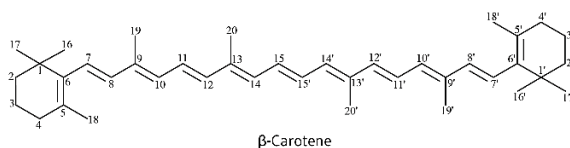
แมกนีเซียม (Mg) อยู่ส่วนกลางของโครงสร้าง และส่วนที่เป็นสายยาวของไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเป็นส่วนที่เป็น Hydrophobic region (ภาพที่ 2.5) ฝังตัวอยู่บน Photosynthetic membrane ในคลอโรพลาสต์ ทั้งนี้พบว่า คลอโรฟิลล์เอสามารถดูดกลืนแสงได้ดีที่สุดในช่วงความยาวคลื่น ประมาณ 680 และ 700 นาโนเมตร และคลอโรฟิลล์บีสามารถดูดกลืนแสงได้ดีในหลายความยาวคลื่นได้แก่ 480, 640 และ 650 นาโนเมตร ซึ่งพืชจะมีคลอโรฟิลล์เป็นตัวบ่งชี้ที่ดีถึงสภาวะการขาดไนโตรเจน และธาตุอาหารที่เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ (Sun et al., 2024)



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี
ที่มา: Sun et al. (2024)

2.4.2 แคโรทีนอยด์ (carotenoids)

แคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุ (pigment) ที่มีตั้งแต่สีเหลือง ส้ม ไปจนถึงสีแดง สามารถพบได้ทั่วไปในสิ่งมีชีวิตทั้ง พืช สัตว์ สาหร่ายทะเลที่สามารถสังเคราะห์แสงได้ เชื้อรา และยีสต์ ซึ่งในพืชสามารถพบได้ในส่วนต่าง ๆ เช่น ดอก ผล และราก โดยพบมากในผักและผลไม้ที่มีสีเหลือง สีส้ม และสีแดง แคโรทีนอยด์เป็นสารประกอบประเภทไขมัน จึงสามารถละลายได้ในไขมันและตัวทำละลายไขมัน เช่น แอลกอฮอล์ อะซิโตน คลอโรฟอร์ม และไดเอทิลอีเทอร์ เป็นต้น (ภาพที่ 2.6) อีกทั้งยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว (nonpolar solvent) เช่น เฮกเซน และปิโตรเลียม เป็นต้น แคโรทีนอยด์มีโครงสร้างเป็นเตตราเทอร์พีนอยด์ (tetraterpenoid) มีโมเลกุลเป็นพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว (conjugate double bond) ส่งผลให้เกิดสารสีต่าง ๆ เช่น สีเหลือง สีส้ม สีแดง ไปจนถึงสีม่วงเข้ม โดยสีของแคโรทีนอยด์จะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลสีแดงที่เข้มข้นจะเกิดจากการมีพันธะคู่ในโมเลกุลที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจำนวนพันธะคู่ที่น้อยที่สุดของแคโรทีนอยด์ คือ 7 พันธะจะให้สีเหลือง (อรัญญา, 2556)



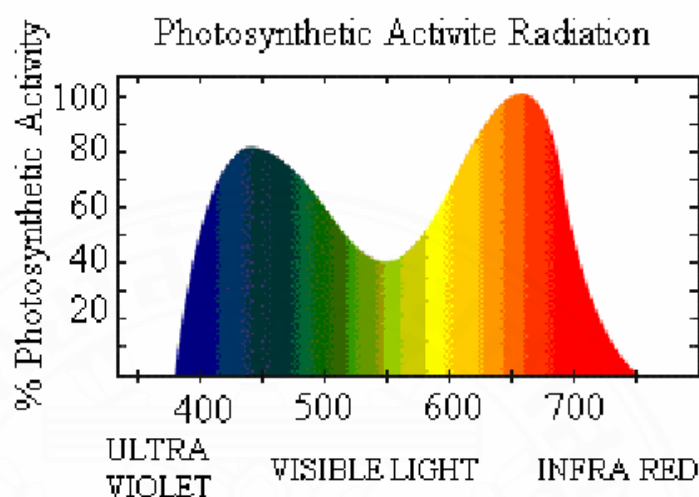
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของแคโรทีนอยด์

ที่มา: <https://lpi.oregonstate.edu/mic/dietary-factors/carotenoids>

2.5 บทบาทของแสงที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

แสงเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช การเลือกแสงและการให้แสงกับพืชจึงส่งผลต่อคุณภาพผลผลิต เนื่องจากพืชต้องนำแสงไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อให้พืชได้พลังงานที่เป็นแหล่งของสารประกอบขั้นต้น และเกิดการสังเคราะห์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้ในการควบคุมการเจริญเติบโต การพัฒนาส่วนต่าง ๆ ในแต่ละระยะ รวมถึงการกระตุ้นให้ผลิตสารทุติยภูมิ และกระบวนการต่าง ๆ ของพืช เช่น การงอกของเมล็ด การออกดอก การพักตัว และปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระ (พรอนันต์ และหฤทัย, 2561) ซึ่งต้องมีการจัดการแสงให้เหมาะสมกับพืช โดยจะขึ้นกับความเข้มแสง คุณภาพแสง และช่วงแสง (นภัทร และไชยยันต์, 2560) ซึ่งแสงที่พืชนำมาใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์ด้วยแสง คือ แสงในช่วงที่มนุษย์มองเห็น (visible light) ที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 400–700 นาโนเมตร ประกอบด้วยแสงสีต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ได้แก่ แสงสีม่วง (380–436 นาโนเมตร) สีนํ้าเงิน (436–495 นาโนเมตร) สีเขียว (495–566 นาโนเมตร) สีเหลือง (566–589 นาโนเมตร) สีส้ม (589–627 นาโนเมตร) และสีแดง (627–770 นาโนเมตร) แต่จะมีช่วงแสงเฉพาะที่พืชใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง คือ photosynthetically active

radiation (PAR) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร ซึ่งมีความสำคัญมากต่อพืชในการสังเคราะห์ด้วยแสง (นภัทร และไชยยันต์, 2560)



ภาพที่ 2.7 Photosynthetic activity in different wavelengths of light radiation

ที่มา : Ahonen et al. (2008)

ชนิดของแสงที่มีสีต่างกันมักมีผลต่อประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช โดยพืชสามารถดูดกลืนแสงได้ 2 ช่วงความยาวคลื่น คือ แสงสีน้ำเงิน (400– 500 นาโนเมตร) และแสงสีแดง (600–700 นาโนเมตร) ซึ่งเป็นแสงในช่วงความยาวคลื่นที่จำเพาะต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และช่วงความยาวคลื่นแสงมีผลกับพืชอย่างเฉพาะ ได้แก่ ความยาวคลื่นของแสงสีแดงและสีน้ำเงิน จะถูกดูดซับโดยคลอโรฟิลล์ และแคโรทีนอยด์จะถูกดูดซับอย่างมากในบริเวณสีน้ำเงิน ที่ 454 และ 448 นาโนเมตร (Ramalho et al., 2001) และแสงสีแดงมีบทบาทสำคัญในการควบคุมการทำงานของคลอโรพลาสต์ ก้านใบ ลำต้น (Li et al., 2012) (ตารางที่ 2.1)

2.5.1 องค์ประกอบของแสง (นภัทร และไชยยันต์, 2560)

2.5.1.1 ความเข้มแสง (light intensity)

ปริมาณแสงทั้งหมดที่พืชได้รับความเข้มของแสงมีความแตกต่างกัน ตามพื้นที่ เวลา และฤดูกาล อิทธิพลของความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตของพืชแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ได้แก่ (1) ในร่ม เป็นพืชที่ต้องการความเข้มแสงน้อยจึงเจริญเติบโตได้ดี (2) กึ่งร่มกึ่งแจ้ง เป็นพืชที่

ต้องการแสงที่มีการพราง/ลดความเข้มแสง และ (3) กลางแจ้ง เป็นพืชที่ต้องการความเข้มแสงสูง โดยกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืชที่ได้รับผลกระทบจากความเข้มแสงมีหลายกระบวนการ เช่น การสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณแสงเพิ่มมากขึ้น และพืชที่เติบโตอยู่ในสภาพที่มีแสงน้อย มักมีอัตราการหายใจ

2.5.1.2 คุณภาพของแสง (light quality)

แสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีความยาวคลื่นหลายระดับโดยที่แสงอาทิตย์ประกอบด้วย แสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 225–2,500 นาโนเมตร แต่แสงอาทิตย์ที่ตกลงมายังพื้นโลก จะมีความยาวคลื่นระหว่าง 310–2,300 นาโนเมตร ทั้งนี้ คลื่นสั้น หรือแสงเหนือม่วง (Ultraviolet; UV) ซึ่งเป็นแสงที่มีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต โดยส่วนใหญ่จะถูกดูดซับไว้โดยชั้นของโอโซน (ozone) ในบรรยากาศ ส่วนแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่าแสงสีแดง (Infra-red) ความยาวคลื่นมากกว่า 2,300 นาโนเมตร จะถูกดูดซับไว้โดยไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแสงอาทิตย์ที่ตกลงมายังพื้นผิวโลกแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

(1) คลื่นแสงที่มองเห็น (visible light)

อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 390–810 นาโนเมตร แต่ละช่วงความยาวคลื่นจะมีสีต่างกัน แสงในกลุ่มนี้จะมีผลต่อพืช

(2) คลื่นแสงที่มองไม่เห็น (invisible light)

ได้แก่ แสงเหนือม่วง (Ultra Violet, UV) ช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 390 นาโนเมตร เป็นตัวการในการยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช และแสง Infra-red ช่วงความยาวคลื่นสูงกว่า 810 นาโนเมตร จะทำให้ปล้องของพืชยืดยาวออก ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.5.1.3 ช่วงแสง (photoperiodism)

ระยะเวลาที่พืชได้รับแสงในแต่ละวัน มีช่วงแสงแตกต่างกันไปตามฤดูกาล และท้องถิ่น โดยทั่วไปช่วงแสงมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตด้านลำต้น และการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์โดยการตอบสนองต่อช่วงแสง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ พืชวันสั้น เป็นพืชที่มีความต้องการช่วงแสงในวันหนึ่ง ๆ สั้นกว่าช่วงวันวิกฤติจึงออกดอก โดยช่วงวันวิกฤตินี้มีค่าที่แตกต่างกันไปตามชนิดของพืช โดยส่วนใหญ่ช่วงวันวิกฤติของพืชทั่วไปอยู่ในช่วง 12–14 ชั่วโมงต่อวัน ตัวอย่างพืชวันสั้นได้แก่ กะหล่ำดอก ผักกาดหอม เป็นต้น พืชวันยาว เป็นพืชที่ต้องการช่วงแสงในวันหนึ่ง ๆ ยาวกว่าช่วงวันวิกฤติพืชชนิดนี้ ได้แก่ ผักโขม เป็นต้น และพืชที่ไม่ตอบสนองต่อช่วงแสง เป็นพืชที่สามารถเจริญได้ดีไม่ว่ามีช่วงวันสั้นหรือยาวก็ตาม เช่น มะเขือเทศ และข้าวโพด เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของแสง ความยาวคลื่น และประโยชน์ต่อพืช

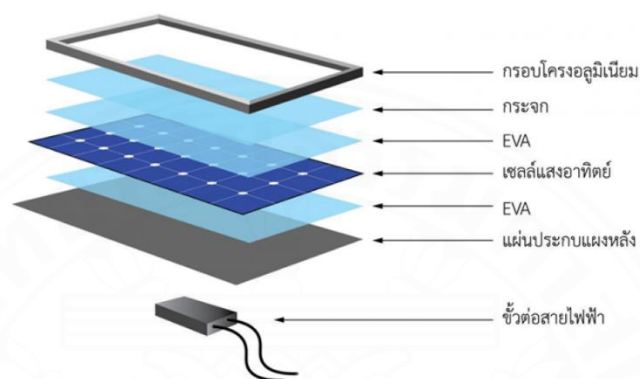
ช่วงคลื่น (นาโนเมตร)	สี	ประโยชน์ต่อพืช
380 – 436	ม่วง	ให้ผลไม่แน่ชัด ผลที่เกิดขึ้นอาจมาจากช่วงคลื่นที่ใกล้กับสีน้ำเงิน
436 – 495	น้ำเงิน	ให้ผลเกี่ยวข้องกับการตอบสนองของพืชต่อแสงที่เรียกว่า Phototropism และความเข้มแสงปริมาณต่ำมีผลต่อการเพาะเมล็ดและการอนุบาลต้นกล้า
495 – 566	เขียว	ให้ผลไม่แน่ชัด แต่มีส่วนช่วยในการสังเคราะห์แสง
566 - 589	เหลือง	ไม่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่มีส่วนช่วยในการสังเคราะห์แสง
589 – 627	ส้ม	ให้ผลเกี่ยวข้องกับการงอกของเมล็ด
627 - 770	แดง	ส่งเสริมการงอกของเมล็ด และมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชเพราะทำให้เกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงสุด ช่วยเร่งการออก ดอก เร่งการเจริญเติบโตทางด้านลำต้น

ที่มา : นภัทร และไชยยันต์ (2560) และ ธนากร (2562)

2.6 ระบบกริดวอลเทอิกส์

พลังงานแสงอาทิตย์ (solar energy) เป็นพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดและอุดมสมบูรณ์ที่สุด สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายรูปแบบ โดยเฉพาะการแปลงพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งทำได้โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) ผ่านระบบโฟโตโวลตาอิก (photo-voltaic: PV) (Kumpanalaisatit et al., 2022a) ซึ่งตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบไปด้วย กรอบโครงอลูมิเนียม/กระจก/EVA Film/เซลล์แสงอาทิตย์/ EVA Film/แผ่นประกอบหลังแผง/ขั้วต่อสายไฟ ดังแสดงในภาพที่ 2.8 (Ev power energy, 2024) ทั้งนี้ตามรายงานของ Masson et al. (2021) พบว่า ในช่วงสิ้นปี 2020 กำลังการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วโลก มีมากกว่า 760 กิกะวัตต์ (GW) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Jäger-Waldau (2018) ที่รายงานเพิ่มเติมว่า กำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วโลกเพิ่มขึ้นประมาณ 34.21 เปอร์เซ็นต์ จากปี 2018 โดยแหล่งผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใหญ่ที่สุดสามอันดับแรกของโลก ได้แก่ ประเทศจีน ยุโรป และ

สหรัฐอเมริกา ซึ่งมีการติดตั้งระบบโฟโตโวลตาอิกรวม อยู่ที่ 48.2, 19.6 และ 19.2 กิกะวัตต์ ตามลำดับ สำหรับประเทศไทย มีกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์รวม อยู่ที่ 1.6 กิกะวัตต์ โดยมีโครงการที่อยู่ระหว่างการก่อสร้างอีก 1.3 กิกะวัตต์ รวมเป็นกำลังการผลิตทั้งหมด 2.9 กิกะวัตต์ (Chimres and Wongwises, 2016)



ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา : <https://evpowerenergy.com/-solar-panel>

ตามแนวโน้มของการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินทั่วโลก ความต้องการใช้พื้นที่เพื่อการก่อสร้างโรงไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการแข่งขันในการใช้ที่ดิน เกษตรกรรมและการบุกรุกพื้นที่ป่า ซึ่งอาจกระทบต่อความมั่นคงทางอาหารและทรัพยากรป่าของประเทศ (Evans et al., 2022) เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการเสนอแนวคิด “ระบบอกริวอลเทอิกส์” (Agrivoltaic system) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ที่ดินร่วมกันระหว่างภาคเกษตรกรรมและการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเป็นการสร้างสมดุลระหว่างการผลิตอาหารและพลังงานในอนาคต (Gorjian et al., 2022) จากการรายงานขององค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน (2567) พบว่า การปรับระบบอกริวอลเทอิกส์ให้เข้ากับประเทศไทยต้องพิจารณาถึงการออกแบบ สภาพแวดล้อม สภาพภูมิอากาศ รวมถึงชนิดของพืชที่เหมาะสมเพื่อคำนึงถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ และผลผลิตที่จะได้รับ

2.6.1 ลักษณะของระบบบอกรีวอลเทจิกส์

สามารถแบ่งตามลักษณะของการวางแผนออกแบบระบบ ได้ 2 ลักษณะดังนี้ (Kumpanalaisatit et al. 2022b)

2.6.1.1 ระบบประยุกต์ใช้พื้นที่ทำการเกษตรร่วมกับพื้นที่ของพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่แล้ว

เป็นการนำกิจกรรมทางการเกษตรมาปรับใช้ในพื้นที่ว่างใต้แผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

(1) การปลูกพืชภายใต้แผงโซลาร์เซลล์

เหมาะสำหรับพืชที่สามารถเติบโตได้ดีในสภาพแสงที่น้อยหรือที่ร่ม เช่น ผักกาดหอม มันเทศ มะเขือ ถั่วเหลือง และถั่วลิสง (Wolff and Coltman, 1990) เนื่องจากความเข้มแสงที่มีอยู่อย่างจำกัด ทำให้การเพาะปลูกภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ยังไม่ค่อยได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง (Katsikogiannis et al., 2022) ซึ่งในด้านการผลิตไฟฟ้าพบว่า การปลูกพืชภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ไม่ส่งผลกระทบต่อการผลิตไฟฟ้า ดังเช่นในงานวิจัยของ Kumpanalaisatit et al. (2022a) ที่ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นในระบบบอกรีวอลเทจิกส์ โดยการปลูกวางตั้ง (*Brassica rapa* subsp. *chinensis* L.) พบว่า แผงโซลาร์เซลล์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 2.28 กิโลวัตต์ และให้ผลผลิตวางตั้งภายใต้แผงโซลาร์เซลล์เท่ากับ 1.50 กิโลกรัม ซึ่งน้อยกว่าในแปลงที่ปลูกกลางแจ้ง (ควบคุม) ที่ให้ผลผลิตสูงสุด ที่ 17.31 กิโลกรัม แม้ว่าผลผลิตวางตั้งที่ปลูกภายใต้แผงโซลาร์เซลล์จะต่ำมาก อาจเกิดจากความเข้มแสงที่จำกัด แต่การปลูกพืชภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ จะช่วยลดอุณหภูมิลงประมาณ 0.18 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับแปลงควบคุม ทำให้แรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตเพิ่มขึ้นประมาณ 0.09 เปอร์เซ็นต์

(2) การปลูกพืชในพื้นที่ระหว่างแถวของแผงโซลาร์เซลล์

เหมาะสำหรับพืชที่ใช้พื้นที่ปลูกน้อย โดยปลูกพืชระหว่างแผงโซลาร์เซลล์ เป็นที่แคบและเป็นพื้นที่สำหรับการดูแลและบำรุงรักษาแผงโซลาร์เซลล์ ทำให้การปลูกพืชลักษณะนี้จึงต้องออกแบบพื้นที่เพาะปลูกอย่างเหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดการดูแลและบำรุงรักษาแผงโซลาร์เซลล์ (Evans et al., 2022) ดังเช่น Ravi et al. (2016) ที่สาธิตการปลูกถั่วทางจระเข้ระหว่างแผงโซลาร์เซลล์ซึ่งใช้พื้นที่ปลูกน้อยและไม่กีดขวางการเข้าไปดูแลรักษาและสะดวกต่อการเพาะปลูก โดยมีการติดตั้งระบบน้ำเพื่อทำความสะอาดแผงโซลาร์ จากนั้นน้ำที่ใช้แล้วจะถูกรดลงในแปลงถั่วทางจระเข้ เพื่อให้การใช้น้ำมีประสิทธิภาพสูงสุด และในด้านการลงทุน Malu et al. (2017) รายงานว่า การใช้ระบบการเกษตรร่วมกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในไร่ถั่ว ประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนมากกว่าการปลูกไร่ถั่วธรรมดา 15 เท่า และคาดการณ์ว่าหากใช้ระบบการเกษตร

ร่วมกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในโรงเรือนทั่วประเทศอินเดียจะมีไฟฟ้าเพียงพอสำหรับประชากร 15 ล้านคน (ปฏิวดี, 2566)

(3) การใช้พื้นที่โซลาร์เซลล์สำหรับการเลี้ยงสัตว์ร่วมด้วย

เหมาะสำหรับทั้งสัตว์บกและสัตว์น้ำ ดังเช่น Pringle et al. (2017) ที่ศึกษาการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ไว้เหนือบ่อเลี้ยงปลา เพื่อให้ร่มเงาช่วยเร่งการเจริญเติบโตของปลาได้ และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าได้ร้อยละ 30 เนื่องจากน้ำในบ่อที่ระเหยขึ้นมาช่วยลดอุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์ นอกจากนี้จากการรายงานของ Maia et al. (2020) ที่ศึกษาการใช้พื้นที่สำหรับเลี้ยงแกะ โดยจากการสังเกตพฤติกรรมของแกะพบว่า แกะใช้เวลาร้อยละ 70 ในช่วงกลางวัน เข้าไปหลบแดดอยู่ใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 5.19 เมกะวัตต์ต่อชั่วโมง รวมทั้งเป็นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลง 2.77 ตันต่อปี

2.6.1.2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ออกแบบให้เหมาะสมต่อการทำ

เกษตร

เป็นระบบที่ได้ประโยชน์มากที่สุด เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าและการทำเกษตรย่อมมีปัจจัยความต้องการที่แตกต่างกัน เช่น ความเข้มแสง พื้นที่ ทิศทางการรับแสง ดังนั้นระบบนี้จึงออกแบบให้สอดคล้องกับการทำงานของเกษตรกร โดยสร้างสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับพืชและสัตว์ที่ต้องการผลิต พร้อมทั้งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในเวลาเดียวกัน (Evans et al., 2022; Gorjian et al., 2022) จากการศึกษาของ Marrou et al. (2013a) พบว่า การปลูกผักกาดหอม แตงกวา และข้าวสาลี ในประเทศฝรั่งเศสภายใต้พื้นที่โล่งแจ้ง(รับแสงปกติ) ภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ที่มีการบังแสงครึ่งแปลง และภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ที่มีการบังแสงทั้งแปลง ทำให้ผลผลิตไม่แตกต่างกัน แต่การปลูกภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ที่มีการบังแสงครึ่งแปลง และบังแสงทั้งแปลง มีขนาดใหญ่กว่าการปลูกในพื้นที่โล่งแจ้ง

นอกจากนี้รูปแบบของระบบอกริวอลเทจิกส์ ยังมีรูปแบบของการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ไว้บนหลังคาโรงเรือนปลูกพืชอีกด้วย ซึ่ง Colantoni et al. (2018) ได้การทดลองติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาโรงเรือน โดยครอบคลุมพื้นที่หลังคาประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ปลูกดอกพิทูเนียและดอกแคนดี้ทัทพ์ พบว่า อัตราการเจริญเติบโตพืชทั้งสองชนิดแทบไม่มีความแตกต่าง แม้ว่าความเข้มแสงจะแตกต่างกัน

2.6.2 ประเภทของแผงโซลาร์เซลล์

ประเภทของแผงโซลาร์เซลล์ แบ่งตามการจัดวางที่ตอบสนองการผลิตพลังงานและการเจริญเติบโตของพืช (Zainol-Abidin et al., 2021)

2.6.2.1 แผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง (Opaque PV panels)

เป็นแผงโซลาร์มาตรฐานที่ไม่ให้แสงผ่านลงไปด้วยด้านล่าง และมักติดตั้งในลักษณะมีระยะห่างระหว่างแถว เพื่อให้แสงส่องถึงพื้นดินบางส่วน เหมาะสำหรับพืชที่ต้องการแสงน้อย หรือสามารถเติบโตในเงาบางส่วน (Alinejad et al., 2020; Nagashima, 2020)

2.6.2.2 แผงโซลาร์เซลล์แบบโปร่งแสง (Semi-transparent PV panels)

เป็นแผงโซลาร์เซลล์ที่สามารถให้แสงบางส่วนผ่านลงไปยังพืชด้านล่างได้ ช่วยให้สามารถปลูกพืชได้แม้ได้ โดยไม่ส่งผลเสียต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง เหมาะกับพืชที่ต้องการปริมาณแสงปานกลางถึงสูง (Tani et al., 2014, Hassanien et al., 2018)

2.6.2.3 แผงโซลาร์เซลล์แบบปรับมุมได้ (Adjustable PV panels)

เป็นแผงโซลาร์เซลล์ที่สามารถปรับมุมตามการรับแสงอาทิตย์ตามเวลาของวันหรือฤดูกาล ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า และยังสามารถปรับให้มีแสงลงสู่พืชตามความเหมาะสม ช่วยในการจัดการแสงที่ตกกระทบกับพืชอย่างมีประสิทธิภาพ (Steffan, 2023; Opttraffic, 2024)

2.6.2.4 แผงโซลาร์เซลล์แบบติดตั้งยกสูง (Elevated PV structures)

เป็นแผงโซลาร์เซลล์ที่ถูกติดตั้งบนโครงสร้างสูงจากพื้นมากกว่าปกติ เพื่อให้มีพื้นที่เพียงพอสำหรับการเพาะปลูกหรือใช้เครื่องจักรทางการเกษตร เหมาะสำหรับพืชที่มีความสูง หรือกิจกรรมการเกษตรแบบเต็มรูปแบบได้แผงโซลาร์เซลล์ (Nechyporenko and Dima, 2024)

2.6.2.5 แผงโซลาร์เซลล์แบบเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ (Tracking PV panels)

เป็นแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแสง ซึ่งเพิ่มแสงที่กระจายลงบนพืชได้ในบางช่วงของวันได้ (wp, 2567)

2.6.2.6 แผงโซลาร์เซลล์ชนิดรับแสงได้ 2 ด้าน (Bifacial solar panel)

เป็นแผงโซลาร์เซลล์ที่สามารถรับแสงอาทิตย์โดยตรงจากพื้นผิวด้านหน้า และแสงสะท้อนจากด้านหลังของแผง ส่งผลให้ตัวแผงสามารถผลิตพลังงานได้มากขึ้น ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบทั่วไปนั้นสามารถรับแสงจากพื้นผิวด้านหน้าของแผงเท่านั้น ทำให้แผงประเภทรับแสงสองด้านผลิตไฟได้มากกว่าแผงแบบทั่วไปประมาณ 15-20% (พิมพ์พร, 2564)

2.6.2.7 แผงโซลาร์เซลล์ชนิดออร์แกนิก (Organic photovoltaics)

เป็นแผงโซลาร์เซลล์ที่สามารถยอมให้แสงบางความยาวคลื่นส่องผ่าน เนื่องจากมีคุณสมบัติการดูดกลืนคลื่นความถี่แคบจึงทำให้มีค่าประสิทธิภาพต่ำ แต่ในการออกแบบสามารถ

ทำให้สเปกตรัมแสงที่มองเห็นสามารถผ่านได้ และใช้แสง UV หรือ IR ที่มองไม่เห็นสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า (Friman-Peretz, 2020; Ravishankar, 2024)

2.6.2.8 แผงโซลาร์เซลล์ชนิดรวมแสง (Concentrator photovoltaics)

เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เลนส์หักเหแบบ Fresnel หรือกระจกสะท้อนแสงแบบจานพาราโบลา ซึ่งจะรวมแสงอาทิตย์จากพื้นที่กว้างและนำไปสู่เซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก ผ่านระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรับแสงโดยเฉพาะแสงตรง ขณะเดียวกันแสงจะกระจายไปยังพื้นที่อยู่ใต้แผงโซลาร์เซลล์ (Askins, 2016; Rabie, 2021)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 ผลของการพรางแสงที่มีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต

Liphan and Detpiratmongkol (2017) ศึกษาอิทธิพลของระดับการพรางแสงที่แตกต่างกันต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของฟ้าทะลายโจร โดยศึกษาฟ้าทะลายโจร 4 สายพันธุ์ (พิษณุโลก 5-4, ปราจีนบุรี, ราชบุรี และพิจิตร 4-4) ที่มีการพรางแสง 5 ระดับ (0, 20, 40, 50 และ 80 เปอร์เซ็นต์) พบว่า ไม่พบปฏิสัมพันธ์กันระหว่างสายพันธุ์และการพรางแสง โดยสายพันธุ์ปราจีนบุรีมีจำนวนกิ่งต่อต้น จำนวนใบต่อต้น พื้นที่ใบ น้ำหนักแห้งส่วนเหนือดิน และผลผลิตน้ำหนักแห้งของใบสูงสุด รองลงมาคือ สายพันธุ์ราชบุรี พิจิตร 4-4 และ พิษณุโลก 5-4 ตามลำดับ และการพรางแสงมีผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของฟ้าทะลายโจรอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่า ฟ้าทะลายโจรที่ปลูกภายใต้การพรางแสง 20 เปอร์เซ็นต์ มีจำนวนใบต่อต้น พื้นที่ใบ น้ำหนักแห้งส่วนเหนือดิน และน้ำหนักแห้งของใบสูงสุด สรุปผลการทดลองได้ว่า สายพันธุ์ปราจีนบุรี ทำให้การเจริญเติบโตและมีผลผลิตดีที่สุดเมื่อปลูกภายใต้การพรางแสง 20 เปอร์เซ็นต์

Liphan and Detpiratmongkol (2020) ศึกษาอิทธิพลของระดับการพรางแสงต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และปริมาณสารแอนโดรกราโฟไลด์ของฟ้าทะลายโจร โดยศึกษาฟ้าทะลายโจร 3 สายพันธุ์ (ปราจีนบุรี, นครปฐม และสระบุรี) ที่มีการพรางแสง 4 ระดับ (0, 25, 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์) โดยใช้ตาข่ายพรางแสงสีดำ ผลการทดลองพบว่า สายพันธุ์ปราจีนบุรีที่การเจริญเติบโตดีที่สุดภายใต้ทุกระดับการพรางแสง รองลงมาคือสายพันธุ์นครปฐม และสระบุรี นอกจากนี้ระดับการพรางแสงที่แตกต่างกันส่งผลต่อการเจริญเติบโต และผลผลิต โดยพบว่า การพรางแสงที่ระดับ 25 เปอร์เซ็นต์ มีการเจริญเติบโตดีที่สุด น้ำหนักแห้งของลำต้น ใบ ราก น้ำหนักแห้งรวม ผลผลิตเมล็ด

น้ำหนักแห้งของใบ และปริมาณแอนโดรกราโฟไลด์สูงสุด รองลงมาคือการพรางแสงที่ระดับ 0, 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Omar et al. (2016) ศึกษาเกี่ยวกับการเจริญเติบโตและการตอบสนองทางไฟโตเคมีคอลของฟ้าทะลายโจร ภายใต้อิทธิพลของระดับการพรางแสง (0, 20, 30 และ 50 เปอร์เซ็นต์) และการตัดแต่งกิ่ง (ไม่ตัด, ตัด 1 ครั้ง และ ตัด 2 ครั้ง) จากผลการทดลอง พบว่า ที่ระดับร่มเงาและการตัดแต่งกิ่งมีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญต่อพื้นที่ใบรวม น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดิน ซึ่งไม่มีผลต่อน้ำหนักรากสดและแห้ง เมื่อระดับพรางแสงเพิ่มขึ้น น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินเพิ่มขึ้นตาม โดยพืชที่ปลูกในแสงเต็มที่จะมีน้ำหนักแห้งต่ำที่สุด ซึ่งในการตัดแต่งกิ่งช่วยเพิ่มน้ำหนักสดของลำต้น 18.6 เปอร์เซ็นต์ และน้ำหนักแห้ง 15.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการไม่ตัดแต่งกิ่ง อย่างไรก็ตาม ปริมาณฟีนอลิก ปริมาณฟลาโวนอยด์ และสารต้านอนุมูลอิสระ (FRAP) ลดลงเมื่อระดับพรางแสงและความถี่ในการตัดแต่งกิ่งเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่า ฟ้าทะลายโจรที่ปลูกภายใต้ระดับการพรางแสง (30-50 เปอร์เซ็นต์) และมีการตัดแต่งกิ่ง 1 ครั้ง ทำให้ผลผลิตชีวมวลสูงที่สุด

Rezai et al. (2018) ศึกษาผลของความเข้มแสงต่อลักษณะของใบ ความสามารถในการสังเคราะห์แสง และปริมาณคลอโรฟิลล์ในต้นเสจ (*Salvia officinalis* L.) โดยทำการพรางแสง 3 ระดับ (30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์) และการไม่พรางแสง จากผลการทดลอง พบว่า การพรางแสงที่ระดับ 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ต้นเสจมีขนาดใบใหญ่ที่สุด แต่ใบมีสีเขียวอมเหลือง ความสามารถในการสังเคราะห์แสงมีค่ามากที่สุดเมื่อไม่มีการพรางแสง นอกจากนี้หากมีการพรางแสงเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น

2.7.2 ผลของระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่มีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต

Liphan and Detpiratmongkol (2019) ศึกษาการตอบสนองของฟ้าทะลายโจรต่อการพรางแสงในระยะการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน โดยศึกษาฟ้าทะลายโจร 3 สายพันธุ์ (ปราจีนบุรี, พิจิตร 4-4, และพิษณุโลก 5-4) มีการพรางแสงที่ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ตาข่ายพรางแสงสีดำ ในระยะการเจริญเติบโต 3 ระยะ (30, 60 และ 90 วันหลังย้ายปลูก) จนถึงการเก็บเกี่ยว และมีแปลงควบคุมที่ไม่มีการพรางแสง ผลการทดลองพบว่า สายพันธุ์ปราจีนบุรี มีความสูงของต้นมากที่สุด รวมถึงน้ำหนักแห้งของใบและราก น้ำหนักแห้งรวม และผลผลิตน้ำหนักแห้งของใบสูงที่สุด และการพรางแสงที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ในระยะ 30 วันหลังย้ายปลูก พบว่า ทำให้ฟ้าทะลายโจรมีการเจริญเติบโตและผลผลิตสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการไม่มีการพรางแสง

Himbindu et al. (2017) ศึกษาผลของระยะเวลาปลูกและเก็บเกี่ยวต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และปริมาณแอนโดรกราโฟไลด์ในฟ้าทะลายโจร โดยทำการศึกษาช่วงเวลาการปลูก 4 ช่วง (1 กรกฎาคม, 16 กรกฎาคม, 1 สิงหาคม และ 16 สิงหาคม) และระยะการเก็บเกี่ยว 3

ระยะ (ระยะก่อนออกดอก, ระยะออกดอก และระยะติดฝัก) ผลการทดลอง พบว่า การปลูกในวันที่ 1 สิงหาคม ให้การเจริญเติบโตสูงสุด ได้แก่ ความสูงของต้น จำนวนกิ่งต่อต้น จำนวนใบต่อต้น น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของทั้งต้น และในระยะเวลาการเก็บเกี่ยว พบว่า การเก็บเกี่ยวในระยะติดฝัก ให้การเจริญเติบโตสูงสุด และในระยะออกดอก พบว่า มีจำนวนใบต่อต้น และปริมาณสารแอนโดรกราโฟไลด์สูงสุด ดังนั้นการปลูกฟัทะลายโจรในวันที่ 1 สิงหาคม และการเก็บเกี่ยวในระยะติดฝัก ให้ผลดีกว่าการปลูกและการเก็บเกี่ยวในช่วงเวลาอื่น โดยให้การเจริญเติบโตและผลผลิตโดยรวมดีที่สุด

2.7.3 ผลของการปลูกพืชภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต

Dal Prà et al. (2024) ศึกษาผลกระทบของโซลาร์เซลล์ต่อผลผลิตของผักสลัด เอสคาโรล (escarole) ที่ปลูกภายใต้ระบบ Agrivoltaics โดยทดลองปลูกผักเอสคาโรลในพื้นที่ที่มีการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ และเปรียบเทียบกับพื้นที่ที่ได้รับแสงแดดเต็มที่ พบว่า การปลูกผักสลัดเอสคาโรลภายใต้ระบบ Agrivoltaics ทำให้น้ำหนักสดและขนาดของหัวผักสลัดเอสคาโรลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับพื้นที่ที่ได้รับแสงแดดเต็มที่ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผักสลัดเอสคาโรลสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะร่มเงา และการปลูกภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ช่วยรักษาความชื้นของบริเวณที่ปลูก

Marrou et al. (2013b) ศึกษาเกี่ยวกับการปลูกผักสลัด 4 สายพันธุ์ ประกอบด้วยสายพันธุ์หัวแน่น 2 สายพันธุ์ และสายพันธุ์ใบตัด 2 สายพันธุ์ ภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ที่มีพรางแสงที่ 50 เปอร์เซ็นต์ และ 70 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ผลผลิตของผักสลัดไม่ได้ลดลงตามสัดส่วนของแสงที่ลดลง แต่พบว่า ผลผลิตของผักสลัดภายใต้ร่มเงามีพื้นที่ใบรวมต่อพืชเพิ่มขึ้น แม้ว่าจำนวนใบจะลดลง ทั้งนี้พืชที่เจริญเติบโตภายใต้ร่มเงาจะพยายามปรับตัวโดยการเพิ่มพื้นที่ใบและขนาดใบ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแสงและคงผลผลิตไว้ได้

Hickey et al. (2024) ศึกษาผลของการปลูกพืชผักใต้แผงโซลาร์เซลล์ ที่ระดับการพรางแสงต่างกัน โดยทำการปลูกพริก ผักกาดหอม พักทอง และมะเขือเทศใต้แผงโซลาร์เซลล์ที่มีการบังแสงในระดับต่างๆ ได้แก่ แผงชนิดแบบทึบแสง (standard solar panels) ที่พรางแสง 100 เปอร์เซ็นต์ แผงโซลาร์เซลล์ 2 หน้า (bifacial solar panels) ที่พรางแสง 95 เปอร์เซ็นต์ และแผงชนิดฟิล์มบางกึ่งโปร่งแสง (thin-film solar panels) ที่พรางแสง 60 เปอร์เซ็นต์ พบว่า การปลูกพืชผักใต้แผงโซลาร์เซลล์ชนิดฟิล์มบางกึ่งโปร่งแสงเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่สุดสำหรับระบบการปลูกพืช อย่างไรก็ตาม พบว่า ร่มเงาจากแผงโซลาร์เซลล์มีผลต่อผลผลิตของพักทองมากที่สุด เนื่องจากพักทองปลูกอยู่ในแนวแถวกลางใต้แผงพอดี ในขณะที่พริก ผักกาดหอม และมะเขือเทศได้รับผลกระทบน้อยกว่า เนื่องจากมีการปลูกอยู่ในแนวเหนือและแนวใต้ของแผง ดังนั้นตำแหน่งของการปลูกพืชภายใต้แผงส่งผลต่อผลผลิตพืช

Scarano et al. (2024) ศึกษาผลของระบบเกษตรพลังงานแสงอาทิตย์ต่อการผลิตพืชในกรณีศึกษามะเขือเทศ (*Solanum lycopersicum* L.) โดยมีปัจจัยในการปลูก 2 ปัจจัยหลัก คือ สภาพการปลูก (การปลูกภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ และสภาพกลางแจ้ง) และระดับน้ำที่ให้ (การให้น้ำในระดับสูง (ปกติ); HW และการให้น้ำในระดับต่ำ (จำกัดน้ำ/จำลองภาวะแล้ง); LW) พบว่าการปลูกมะเขือเทศภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ทำให้ปริมาณผลผลิตน้อยกว่าการปลูกในสภาพแปลงที่ได้แสงเต็มที่อยู่แล้วก็ตาม การปลูกมะเขือเทศภายใต้แผงโซลาร์เซลล์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขนาดของผลและปริมาณน้ำในผลมะเขือเทศได้ นอกจากนี้ การปลูกมะเขือเทศภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ที่ให้น้ำระดับปกติ ทำให้มะเขือเทศมีระดับความหวานความใกล้เคียงกับมาตรฐานผลไม้ในเชิงพาณิชย์มากกว่าผลที่ปลูกกลางแจ้ง ซึ่งบ่งชี้ว่าคุณภาพของมะเขือเทศยังคงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) ประกอบด้วย 5 สิ่งทดลอง สิ่งทดลองละ 12 ซ้ำ (ต้น) ดังนี้

สิ่งทดลองที่ 1 พื้นที่โล่งแจ้ง (Control)

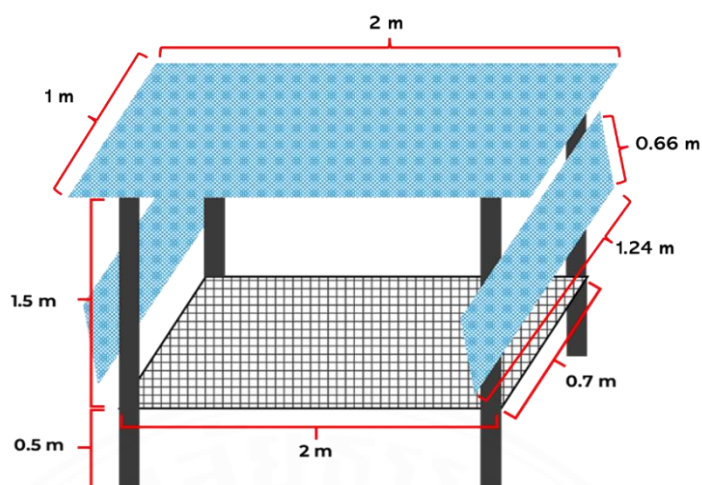
สิ่งทดลองที่ 2 หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra (MU)

สิ่งทดลองที่ 3 หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง (Standard solar panel)

สิ่งทดลองที่ 4 หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง (Agri-PV)

สิ่งทดลองที่ 5 หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech- Ultra (Agri-PV+MultiTech-Ultra)

ทั้งนี้สิ่งทดลองที่ 3 ใช้แผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง ที่มีส่วนประกอบเป็น แผ่นกระจก (glass) โซลาร์เซลล์ (solar cells) และแผ่นพลาสติกแบบทึบแสง (Tedlar (PVF) backsheet) ตามลำดับ พัฒนาขึ้นเพื่อให้แผงโซลาร์เซลล์มีน้ำหนักลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แผ่นกระจกทั้งด้านบนและด้านล่างของโซลาร์เซลล์ ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 4 ใช้แผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง (semi-transparent solar panels) มีส่วนประกอบเป็น แผ่นกระจก (glass) โซลาร์เซลล์ (solar cells) และพลาสติกใส (PET) ใช้สัญลักษณ์เป็น Agri-PV และสิ่งทดลองที่ 5 ใช้แผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงเช่นเดียวกับสิ่งทดลองที่ 4 แต่เพิ่มพลาสติกใสที่มีคุณสมบัติคัดกรองสเปกตรัมแสง (MultiTech-Ultra film) และช่วยกระจายแสงให้พืชได้รับอย่างสม่ำเสมอ โดยที่โต๊ะปลูกมีขนาด 0.7 × 2.0 เมตร พื้นโต๊ะปลูกอยู่สูงจากพื้นดิน 0.5 เมตร ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์สูงจากพื้นโต๊ะปลูก 1.5 เมตร และแผงโซลาร์เซลล์มีขนาด 1×2 เมตร และ 0.66 × 1.24 เมตร โดยที่โต๊ะปลูกหันหน้าไปทางทิศใต้ มีการวางตามแนวตะวันออก-ตะวันตก และแผงโซลาร์เซลล์แผ่นใหญ่ด้านบนเอียง 5 องศา (ภาพที่ 3.1) ซึ่งพัฒนาโดยทีมผู้วิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



ภาพที่ 3.1 ขนาดของโครงสร้างโต๊ะปลุกฟ้าทะเลจร

3.2 วัสดุที่ใช้ทำการทดลอง

3.2.1 เมล็ดพันธุ์ฟ้าทะเลจร

เมล็ดพันธุ์ฟ้าทะเลจร ใช้สายพันธุ์ราชบุรี BT-1 ที่มีลักษณะเด่นพิเศษ คือ มีปริมาณสารออกฤทธิ์สำคัญ ได้แก่ สารแอนโดรกราโฟไลด์ (AP1) สูง และให้ผลผลิตสูง 2,700-3,800 กิโลกรัมต่อไร่ ทรงต้นสูงปานกลาง มีจำนวนใบมาก แต่มีจำนวนก้านใบน้อย ออกดอกเร็วทำให้สามารถเก็บเกี่ยวได้เร็วขึ้นประมาณ 25-30 วัน (สถาบันการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรมเกษตร, 2568)

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 การเพาะต้นกล้า

แช่เมล็ดฟ้าทะเลจรพันธุ์ราชบุรี BT-1 นาน 6-12 ชั่วโมง ก่อนนำมาเพาะ จากนั้นเพาะเมล็ดลงถาดเพาะโดยใช้วัสดุเพาะเป็นพีทมอส เพาะหลุมละ 2-3 เมล็ด รดน้ำให้ชุ่มทุกวัน วันละ 1 ครั้ง เมื่อเมล็ดงอกเลือกต้นที่สมบูรณ์โดยถอนให้เหลือ 1 ต้นต่อหลุม

3.3.2 การปลูก

เมื่อต้นกล้ามีอายุ 30 วัน หรือมีใบจริง 2-4 ใบ ทำการย้ายปลูกลงในกระถาง ขนาด 6 นิ้ว ที่บรรจุวัสดุปลูก ได้แก่ ดิน:กาบมะพร้าวสับ สัดส่วน 1:1 โดยปริมาตร รองก้นกระถาง

ด้วยกบมะพร้าวสับ ใส่ปุ๋ยแต่งหน้าเป็นปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 อัตรา 1 กรัมต่อต้น ในวันย้ายปลูก จัดวางกระถางให้อยู่ภายใต้โตะปลูกที่มีหลังคาแตกต่างกันตามสิ่งทดลอง จำนวน 48 กระถางต่อสิ่งทดลอง ให้น้ำวันละ 1 ครั้ง (เช้า คือ 7.00 น.) ครั้งละ 5 นาที ด้วยระบบน้ำหยด ปริมาตร 250 มิลลิลิตรต่อต้นต่อวัน เมื่อต้นกล้ามีอายุ 60 วันหลังย้ายปลูก ทำการเก็บเกี่ยว โดยตัดให้เหลือความสูงต้นประมาณ 15 เซนติเมตร จากโคนต้น ตัดเก็บเกี่ยวทุกๆ 40 วัน จำนวน 4 รอบการเก็บเกี่ยว โดยหลังจากการตัดเก็บเกี่ยวทุกครั้ง ใส่ปุ๋ยน้ำ AB กำหนดความเข้มข้นของปุ๋ยที่ 200X โดยให้มีค่า EC เท่ากับ 2.0 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร และค่า pH อยู่ในช่วง 6.0-6.5 ให้น้ำและปุ๋ยวันละ 2 ครั้ง (เช้า-เย็น คือ 7.00 และ 17.00 น.) ครั้งละ 5 นาที ด้วยระบบน้ำหยด ปริมาตร 500 มิลลิลิตรต่อต้นต่อวัน และมีการให้แสงจากหลอด LED Grow Light ขนาด 200 วัตต์ โดยติดตั้งจากขอบกระถาง 1 เมตร เพื่อให้ฟ้ามะลายโกลาได้รับแสงครบ 8 ชั่วโมง (Picture This, 2024) ในวันที่มีแสงไม่เพียงพอ โดยใช้ระบบเซนเซอร์ เพื่อชะลอการออกดอกเร็ว (ศุภธิดา, 2565) เนื่องจากทำการปลูกฟ้ามะลายโกลาในช่วงวันสั้น (ซึ่งปลูกระหว่างเดือนมิถุนายน - เดือนธันวาคม)

3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุปลูก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

3.3.3.1 ความหนาแน่นรวมของวัสดุปลูก วิธีดัดแปลงจาก โอภาส (2558)

ใช้วิธี core method ซึ่งกระบอกหรือภาชนะเปล่า (m_1) แล้ววัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในกระบอก (d) และความสูง (h) เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาตรของกระบอกเก็บดิน (V_b) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$V_b = \frac{1}{4} \pi d^2 h \text{ หรือ } V_b = \pi r^2 h$$

นำกระบอกดินที่ทราบน้ำหนักแล้ว ไปเก็บวัสดุปลูกโดยจะได้มีปริมาตรที่ทราบแน่นอน (V) และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักของวัสดุปลูกนั้นมีหน่วยเป็นกรัม (m_2) และนำไปคำนวณหาความหนาแน่นรวมจากสมการ

$$\rho_b = (m_2 - m_1) / V \text{ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)}$$

โดย m_1 คือ น้ำหนักกระบอกเก็บตัวอย่าง (กรัม)

m_2 คือ น้ำหนักตัวอย่างและกระบอกที่ผ่านการอบแห้ง (กรัม)

V คือ ปริมาตรของกระบอกเก็บตัวอย่าง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

3.3.3.2 ความพรุนของวัสดุปลูก

นำ volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร นำไปชั่งน้ำหนัก (m_1) และเติมน้ำกลั่นให้ถึงขีดปริมาตร แล้วชั่งน้ำหนัก (m_2) เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาตร volumetric flask (V_1) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$V_1 = (m_2 - m_1) / \rho_w \quad \text{โดยที่ } \rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$$

เทน้ำออกจาก volumetric flask ให้เหลือประมาณหนึ่งในสาม จากนั้นนำตัวอย่างวัสดุปลูกน้ำหนัก 10 กรัม เทลงใน volumetric flask ขณะเดียวกันเขย่าขวดเบาๆ ให้อนุภาควัสดุปลูกจมน้ำเพื่อลดฟองอากาศที่อาจติดกับอนุภาควัสดุปลูก ค่อยๆ ฉีดน้ำกลั่นจากขวดฉีดน้ำ ลงตามข้างขวดเพื่อล้างอนุภาคดินให้ลงไปให้น้ำให้หมด จากนั้นนำ volumetric flask ไปวางบน hot plate เขย่าเป็นครั้งคราวขณะที่อุณหภูมิเริ่มมีไอน้ำที่ปากขวด อุณหภูมิอีก 3 นาที ยกลงแล้วนำไปวางในอ่างที่ใส่น้ำเย็น จากนั้นเติมน้ำกลั่นให้ถึงขีดปริมาตรที่กำหนดไว้ 100 มิลลิลิตร จากนั้นชั่งและบันทึกน้ำหนัก (m_3) แล้วคำนวณปริมาตรของน้ำใน volumetric flask หลังจากที่มีการแทนที่วัสดุปลูกด้วยน้ำได้จาก

$$V_2 = (m_3 - m_1 - m_s) / \rho_w$$

คำนวณปริมาตรของแข็งใน volumetric flask ได้จาก

$$V_s = V_1 - V_2$$

คำนวณความหนาแน่นอนุภาค ได้จาก

$$\rho_s = m_s / V_s$$

จากนั้นคำนวณความพรุนรวมของของวัสดุปลูก (E) ได้จาก

$$E = 1 - (\rho_b / \rho_s) \times 100 (\%)$$

โดย ρ_b คือ ความหนาแน่นรวมของวัสดุปลูก

ρ_s คือ ความหนาแน่นอนุภาค

3.3.3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (EC)

วิเคราะห์โดยวิธี Electrometric method ในสัดส่วนวัสดุปลูก:น้ำ เท่ากับ 1:10 (pH) และ 1:5 (EC) และวัดค่าด้วยเครื่อง pH/EC meters

3.3.3.4 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

วิเคราะห์โดยวิธีของ Walkley and Black ซึ่งตัวอย่างวัสดุปลูก 0.2 กรัม ใส่ลงในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร เติม 1N $K_2Cr_2O_7$ 10 มิลลิลิตร เติม conc. H_2SO_4 20 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ และตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร หยดอินดิเคเตอร์ออร์โทฟอสโฟรีน 5 หยด นำไปไตเตรดด้วย 0.5N $Fe(NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$ (FAS) เมื่อถึง ending point สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นน้ำตาลแดง บันทึกปริมาณ 0.5N FAS ที่ใช้ในการไตเตรด แล้วนำไปคำนวณตามสูตรดังนี้

$$\% \text{ organic matter} = \frac{10 \times B - S \times 100 \times 100 \times 3 \times 100 \times N}{B \times 77 \times 58 \times 1000 \times W}$$

เมื่อ B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรด (มิลลิลิตร)
 S = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรดตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)
 N = ความเข้มข้นของ $K_2Cr_2O_7$ (normality)

ตารางที่ 3.1 สมบัติของวัสดุปลูกที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติของวัสดุปลูก	ค่าวิเคราะห์	การแปลผล
ความหนาแน่นรวมของวัสดุปลูก (g/cm^3) ^{1/}	0.32	ดินไม่จำกัดการเจริญเติบโตกับพืช เหมาะกับการเจริญของรากพืช
ความพรุนของวัสดุปลูก (%) ^{1/}	90.83	พรุนมาก ระบายน้ำดี แต่ถ้าสูง เกินไปอาจเก็บน้ำไม่ดี
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ^{2/}	6.42	กรดเล็กน้อย
ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ^{3/} (dS/m)	0.37	ไม่เค็ม
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%) ^{4/}	6.07	สูงมาก

^{1/}ดัดแปลงจากวิธี Handreck and Black; ^{2/}pH (1:1 H₂O); ^{3/}EC (1:5 H₂O); ^{4/}OM (Walkley and Black method)

3.4 การบันทึกข้อมูล

3.4.1 ข้อมูลสภาพแวดล้อม

บันทึกค่าต่างๆ ในช่วงเวลา 08.00 – 16.00 น. ซึ่งบันทึกข้อมูลดังนี้ ได้แก่

3.4.1.1 อุณหภูมิบริเวณโถะปลูก (องศาเซลเซียส)

วัดอุณหภูมิด้วยเครื่อง Weather sensor

3.4.1.2 ความเข้มแสง (ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)

วัดความเข้มแสงด้วยเครื่อง PAR sensor

3.4.1.3 ปริมาณแสงที่พืชได้รับ (โมลต่อตารางเมตรต่อวัน)

คำนวณโดยใช้ข้อมูลจากค่าความเข้มแสง

3.4.2 การเจริญเติบโต

3.4.2.1 ความสูง (เซนติเมตร)

สุ่มเก็บฟ้าทะลายโจรอายุ 0, 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก สุ่มวัดสิ่ง
ทดลองละ 12 กระถาง วัดความสูงจากโคนต้นถึงปลายยอดสูงสุดของต้น

3.4.2.2 ความกว้างทรงพุ่ม (เซนติเมตร)

สุ่มเก็บฟ้าทะลายโจรอายุ 0, 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก สุ่มวัดสิ่ง
ทดลองละ 12 กระถาง วัดความกว้างพุ่มจากฝั่งที่กว้างที่สุด

3.4.2.3 เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น (มิลลิเมตร)

สุ่มเก็บฟ้าทะลายโจรอายุ 0, 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก สุ่มวัดสิ่ง
ทดลองละ 12 กระถาง ใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดสูงจากโคนต้น 2 เซนติเมตร

3.4.2.4 จำนวนข้อ (ข้อต่อต้น)

สุ่มเก็บฟ้าทะลายโจรอายุ 0, 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก สุ่มวัดสิ่ง
ทดลองละ 12 กระถาง นับจากโคนต้นขึ้นไป

3.4.3 น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ)

เก็บฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก ทำการเก็บ
ฟ้าทะลายโจรโดยคัดเลือกฟ้าทะลายโจรบริเวณแถวกลางของโต๊ะปลูก ตัดเก็บเกี่ยวจากต้นเดิม และ
เก็บเกี่ยวโดยตัดสูงจากโคนต้น 15 เซนติเมตร เพื่อหาน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง สำหรับน้ำหนักแห้ง
นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักแห้งคงที่ และบันทึก
ผล

3.4.4 คุณภาพผลผลิต

3.4.4.1 ค่าความเขียวของใบ

สุ่มเก็บฟ้าทะลายโจรที่มีอายุ 0, 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก สุ่มวัดสิ่ง
ทดลองละ 12 กระถาง เลือกใบที่อยู่ในตำแหน่งตรงกลางของลำต้น วัดบริเวณกลางใบ โดยใช้เครื่อง
SPAD 502 Plus

3.4.4.2 ปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์

วิเคราะห์ตามวิธีการของ ศุภชาติ (2562) โดยเตรียมสารอะซิโตนที่ความ
เข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นดูดสารใส่หลอดพลาสติก ปริมาตร 10 มิลลิลิตรต่อหลอด ซึ่งเตรียม
Blank ไว้ 1 หลอด จากนั้นเตรียมตัวอย่างใบพืชสด เก็บตัวอย่างใบที่อายุ 60, 100, 140 และ 180 วัน
หลังย้ายปลูก สิ่งทดลองละ 5-10 ใบ โดยนำมาเจาะรูด้วย Cork borer no.3 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6
เซนติเมตร) เจาะตัวอย่างละ 10 รูต่อสิ่งทดลอง ทำ 3 ซ้ำ ใส่ตัวอย่างที่เจาะในหลอดทดลอง จากนั้น

รีบเก็บหลอดทดลองในที่มืดทันที แล้วเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าสีเขียวของตัวอย่างจะละลายออกมาหมด ซึ่งสังเกตจากแผ่นเนื้อเยื่อมีสีเขียวซีดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการสกัดเทสารสกัดที่ได้ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในคิวเวตเพื่อนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 480 647 และ 664 นาโนเมตร บันทึกค่าการดูดกลืนแสง โดยนำค่าการดูดกลืนแสงมาคำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์จากสูตร Wellburn (1994) ดังนี้

$$\text{คลอโรฟิลล์ เอ} = (12 \times A_{664} - 3.11 \times A_{647})$$

$$\text{คลอโรฟิลล์ บี} = (20.78 \times A_{647} - 4.88 \times A_{664})$$

$$\text{คลอโรฟิลล์รวม} = \text{Chlorophyll a} + \text{Chlorophyll b}$$

$$\text{แคโรทีนอยด์} = (1000 \times A_{480} - 1.12 \times \text{Chlorophyll a} - 34.07 \times \text{Chlorophyll b})/245$$

เมื่อ A_{480} คือ ค่าดูดกลืนแสงที่ 480 นาโนเมตร

A_{647} คือ ค่าดูดกลืนแสงที่ 647 นาโนเมตร

A_{664} คือ ค่าดูดกลืนแสงที่ 664 นาโนเมตร

3.4.4.3 ปริมาณแลคโตนรวม

วิเคราะห์ด้วยวิธีวิธีสเปกโตรโฟโตเมตรี (Spectrophotometer) ซึ่งดัดแปลงวิธีจาก Aromdee et al. (2005) เตรียมตัวอย่างความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยชั่งตัวอย่างแห้ง 10 มิลลิกรัม เติมตัวทำละลาย 95% Ethanol 10 มิลลิลิตร นำไป sonicate เป็นเวลา 30 นาที ปิเปตสารสกัด 800 ไมโครลิตร ใส่หลอดทดลอง ขนาด 2 มิลลิลิตร เติม 2% Solution of dinitro-benzoic acid ปริมาตร 200 ไมโครลิตร และเติม 5.7% of potassium hydroxide ปริมาตร 200 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันด้วย Vortex mixture จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 549 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Microplate Reader

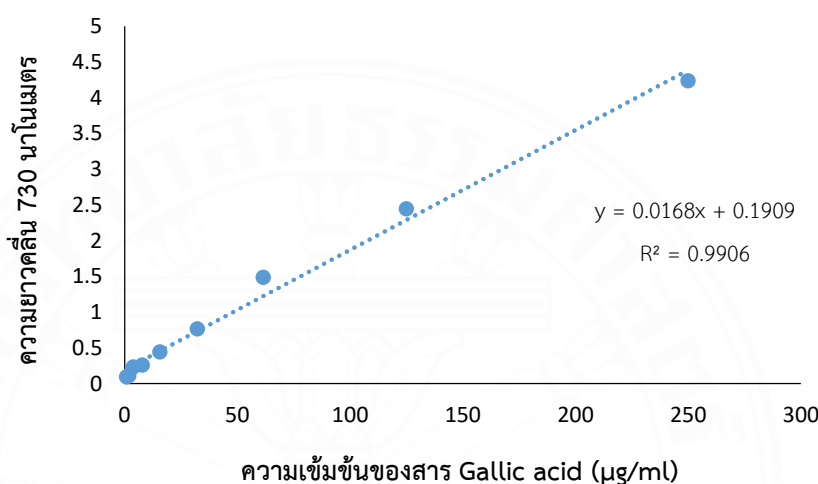
3.4.4.4 สารต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

เตรียมสารสกัด โดยสกัดตัวอย่างตามวิธีการของ Chutimanukul et al. (2022) โดยชั่งตัวอย่างแห้ง 10 มิลลิกรัม เติมตัวทำละลาย 1% HCl ในเมทานอล ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าและทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นสารละลายตัวอย่างในการวิเคราะห์ขั้นต่อไป

(1) สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Chutimanukul et al. (2022) วิเคราะห์ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu colorimetric ปิเปตสารสกัด 200 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดทดลอง ขนาด 2 มิลลิลิตร เติม 1N Folin ปริมาตร 200 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันด้วย Vortex mixture และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 12,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที ทิ้งไว้ 15 นาที

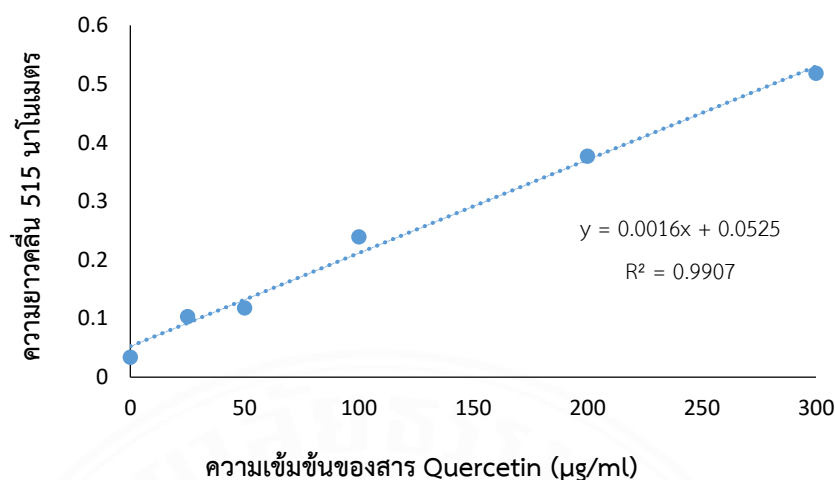
เติม 7.5% Na_2CO_3 ปริมาตร 600 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันด้วย Vortex mixture และนำไปปั่นเหวี่ยง 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที แล้วจึงเก็บไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 730 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Microplate Reader และหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดยใช้ Gallic acid เป็นสารมาตรฐาน (ภาพที่ 3.1) และรายงานในรูปมิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง



ภาพที่ 3.2 กราฟมาตรฐานของ Gallic acid

(2) สารประกอบฟลาโวนอยด์ทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Chutimanukul et al. (2022) วิเคราะห์ด้วยวิธี Colorimetric method ปิเปตสารสกัด 350 ไมโครลิตร ลงหลอดทดลองขนาด 2 มิลลิลิตร เติม 5% NaNO_2 ปริมาตร 75 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน รอ 5 นาที และเติม 10% AlCl_3 ปริมาตร 75 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน รอ 5 นาที จากนั้นเติม 1M NaOH ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันและนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที แล้วจึงเก็บไว้ในที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที เมื่อครบเวลา นำตัวอย่างมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Microplate Reader และหาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ทั้งหมด โดยใช้ Quercetin เป็นสารมาตรฐาน (ภาพที่ 3.2) และรายงานเป็นมิลลิกรัมแควอซีตินต่อกรัมน้ำหนักแห้ง



ภาพที่ 3.3 กราฟมาตรฐานของ Quercetin

(3)ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

เตรียมสารสกัด วิเคราะห์ตามวิธีการของ ศิริพงษ์ (2565) โดยชั่งตัวอย่างแห้ง 5 กรัม เติมตัวทำละลาย 95% Ethanol ในอัตราส่วนตัวอย่างต่อตัวทำละลาย 1:5 เขย่าและหมักทิ้งไว้ 3 วัน เมื่อครบ 3 วัน นำสารสกัดกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ทำการสกัดซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อให้ได้สารออกฤทธิ์สูงสุด โดยนำสารสกัดที่ได้ไประเหยตัวทำละลายออกด้วยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน ทำซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นเก็บสารสกัดหยาบด้วยเอทานอล (Ethanol crude extract) ใส่หลอดทดลอง เก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ในการทดสอบดัดแปลงวิธีการของ ณพัชรอร และผกามาศย์ (2562) โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical scavenging activity (DPPH) เตรียมสารสกัดตัวอย่าง (2) ให้มีความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ละลายด้วย 95% Ethanol นำไป sonicate จากนั้นปิเปตสารสกัด (2) ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงในหลุมของ 96-Well plate และเติมสารละลาย 0.1 mM DPPH ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ทำซ้ำ 3 หลุม ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นจึงนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Microplate Reader โดยใช้ 95% Ethanol ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ร่วมกับสารละลาย 0.1 mM DPPH ปริมาตร 100 ไมโครลิตร เป็น Control คำนวณหา % inhibition จากสูตร

$$\% \text{ inhibition} = [(A_{\text{control}} - A_{520}) / A_{\text{control}}] \times 100$$

เมื่อ A_{control} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของ control

A_{520} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของ sample

3.4.4.5 ปริมาณธาตุอาหารหลักของส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

(1) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen)

วิเคราะห์ด้วยวิธี Kjeldahl method ประกอบด้วย การย่อยทำการชั่งตัวอย่างพืชประมาณ 1 กรัม ใส่ Digest tube เติม Catalyst mixer (สัดส่วน $K_2SO_4:CuSO_4 \cdot 5H_2O$ เท่ากับ 9:1 ยี่ห้อ KJELBLET /COPPER for protein analysis บริษัท OSKON CO., Ltd) จำนวน 2 เม็ด เติม conc H_2SO_4 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และนำหลอดตัวอย่างที่ใส่สาร ไปตั้งบน Digester block เริ่มที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปรับอุณหภูมิเป็น 400 องศาเซลเซียส ตั้งไว้นาน 3 ชั่วโมง หรือจนกว่าสารละลายจะใส หลังจากนั้นตั้งหลอดตัวอย่างทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปสู่การกลั่น (distillation) โดยนำหลอดตัวอย่างเข้าเครื่องกลั่น โดยให้ปลายด้านหนึ่งของ Condenser จุ่มใน 4% Boric acid (H_3BO_3) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่เติม Indicator 3-5 หยด แล้วเติม 40% Sodium hydroxide (NaOH) ลงในตัวอย่าง หลอดละประมาณ 20-40 มิลลิลิตร หรือจนกว่าสารละลายในหลอดตัวอย่างจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้ม จากนั้นกลั่นจนได้ Ammonia (NH_3) ด้วยเครื่องกลั่นไนโตรเจน ใช้เวลาประมาณ 4 นาที จากนั้นนำไปไตเตรทกับ Standard 0.1N Sulfuric acid จนสีของสารเปลี่ยนจากสีเขียวใสเป็นสีชมพูใสหรือม่วงใส และบันทึกปริมาณของ Standard 0.1N Sulfuric acid (H_2SO_4) แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณไนโตรเจน คำนวณตามสูตรคำนวณดังนี้

$$\text{Total N (\%)} = \frac{(\text{ml } H_2SO_4 - \text{ml Blank}) \times Y \times 0.014 \times 100}{W \text{ (g)}}$$

เมื่อ Y คือ ค่า Normality ของ H_2SO_4

(2) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorus)

ชั่งตัวอย่างพืชประมาณ 1 กรัม ใส่ลง digestion tube ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร และกรดเปอร์คลอริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร ย่อยตัวอย่างในตู้ดูดควันที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เมื่อควันสีน้ำตาลเริ่มหมด ปรับอุณหภูมิเป็น 220 องศาเซลเซียส ย่อยตัวอย่างประมาณ 3-4 ชั่วโมง หรือจนกว่าตัวอย่างเป็นสารละลายใส แล้วทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 และปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร และบรรจุใส่ขวดพลาสติกเพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป ในการทำการภาพมาตรฐาน ให้มีความเข้มข้น 50 ppm โดยเตรียม Potassium dihydrogen phosphate (KH_2PO_4) ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

นาน 3 ชั่วโมง ชั่ง 0.2195 กรัม แล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร Standard phosphate solution จากนั้นดูด Standard phosphate solution ความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 0, 1, 2, 3 และ 4 มิลลิลิตร ลงใน Volumetric flask ขนาด 25 มิลลิลิตร เพื่อเตรียม Standard phosphate 6 ระดับ คือ 0, 2, 4, 6 และ 8 ppm เติมน้ำยา Ammonium vanadomolybdate ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรครบ 25 มิลลิลิตร ปิดฝาเขย่าให้เข้ากัน แล้ววางทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดโดยสมบูรณ์ แล้วจึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย Spectrophotometer ที่ 420 nm ทำการบันทึกค่า Absorbance ของแต่ละความเข้มข้น นำไปข้อมูลนี้สร้างกราฟมาตรฐานเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับตัวอย่างต่อไป และในการวิเคราะห์ทำได้โดยเติมน้ำยา Ammonium vanadomolybdate ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ตามแบบการเตรียมกราฟมาตรฐาน จากนั้นคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดเทียบกับกราฟมาตรฐาน น้ำยา Ammonium vanadomolybdate โดยเตรียมจาก น้ำยา A เตรียมจากการละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 25 กรัม ในน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร และ น้ำยา B เตรียมจากแอมโมเนียมเมตาวานาเดต (NH_4VO_3) 1.25 กรัม ในน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร ทั้งให้เย็นแล้วเติมกรด HNO_3 250 มิลลิลิตร แล้วนำน้ำยา A ผสมกับน้ำยา B แล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร โดยสูตรคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัส

$$\text{Total P (\%)} = \frac{\text{ppm จาก standard curve} \times \text{ปริมาตรสารละลายตัวอย่างเริ่มต้น (ml)} \times \text{d.f.} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ชั่ง (g)} \times 10^6}$$

โดย d.f. คือ dilution factor เช่น 25/5

(3) ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (total potassium)

ชั่งตัวอย่างพืชบดละเอียดที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร และกรดเปอร์คลอริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปย่อยตัวอย่างในตู้ดูดควันที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยปิดขวดแก้วรูปชมพู่ด้วยกระจกนาฬิกา เมื่อควันสีน้ำตาลเริ่มหมดไป ปรับอุณหภูมิเป็น 220 องศาเซลเซียส ย่อยตัวอย่างประมาณ 3-4 ชั่วโมง หรือจนกว่าตัวอย่างเป็นสารละลายใส ทิ้งไว้ให้เย็นและปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร และบรรจุใส่ขวดพลาสติกเพื่อการวิเคราะห์ต่อไป เตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมที่ความเข้มข้น 0, 2, 4, 6 และ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำไปวัดปริมาณโพแทสเซียมด้วยเครื่อง Flame spectrophotometer โดยให้เครื่องอ่านค่าของสารละลายมาตรฐานที่ไม่มีปริมาณโพแทสเซียมอยู่ให้เป็นศูนย์ แล้วจึงวัดสารละลายมาตรฐานตามความเข้มข้นที่

เพิ่มขึ้น การวัดโพแทสเซียมทั้งหมดจากสารละลายตัวอย่าง ทำโดยเจือจางสารละลายตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นสัดส่วน 1:10 วัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณโพแทสเซียมในสารละลายตัวอย่าง คำนวณปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดได้จากสมการ

$$\text{Total K (\%)} = \frac{\text{ppm ที่อ่านได้จากเครื่อง} \times \text{ปริมาตรสารละลายตัวอย่างเริ่มต้น (ml)} \times \text{d.f.} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ชั่ง (g)} \times 10^6}$$

โดย d.f. คือ dilution factor เช่น 10/1

3.4.5 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

บันทึกในช่วงเวลา 08.00 – 16.00 น. ด้วยเครื่องมือ Data Logger หน่วยกิโลวัตต์ต่อวันต่อตารางเมตร

3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรม SPSS

3.6 สถานที่ทำการทดลอง

พื้นที่ทดสอบการปลูกพืชภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และห้องปฏิบัติการสาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร A404 สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ข้อมูลสภาพแวดล้อม

จากการบันทึกข้อมูลสภาพแวดล้อมโดยเซนเซอร์แบบอัตโนมัติภายในบริเวณใต้ปลูก ฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน แบ่งออกเป็น 4 รอบการเก็บเกี่ยว ได้แก่ ฟ้ายะลวยโจรอายุ 60 วันหลังย้ายปลูก ระหว่างวันที่ 13 กรกฎาคม ถึง 13 สิงหาคม 2567 ฟ้ายะลวยโจรอายุ 100 วัน หลังย้ายปลูก ระหว่างวันที่ 14 สิงหาคม ถึง 16 กันยายน 2567 ฟ้ายะลวยโจรอายุ 140 วันหลังย้ายปลูก ระหว่างวันที่ 17 กันยายน ถึง 25 ตุลาคม 2567 และฟ้ายะลวยโจรอายุ 180 วันหลังย้ายปลูก ระหว่างวันที่ 26 ตุลาคม ถึง 4 ธันวาคม 2567 ซึ่งเป็นการบันทึกอุณหภูมิ ความชื้นแสง และปริมาณแสงที่พืชได้รับ ในช่วงเวลา 8.00-16.00 น. และนำมาหาค่าเฉลี่ยต่อรอบการเก็บเกี่ยว ซึ่งมีระยะเวลา ประมาณ 40 วัน พบว่า ค่าความชื้นแสงเฉลี่ยของพื้นที่โล่งแจ้งมีค่าเท่ากับ 1107.10 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ซึ่งหากพิจารณาความชื้นแสงภายใต้หลังคาชนิดอื่นๆ ในสิ่งทดลอง พบว่า มีความชื้นแสงเฉลี่ยจากทั้ง 4 รอบเก็บเกี่ยวของหลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra เท่ากับ 616.36, 204.06, 554.62 และ 416.01 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยลดลงจากพื้นที่โล่งแจ้ง เท่ากับ 44, 82, 50 และ 62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ในขณะที่ปริมาณแสงที่พืชได้รับตลอด 4 รอบการเก็บเกี่ยว มีค่าสอดคล้องกับค่าความชื้นแสง ซึ่งพบว่า ปริมาณแสงที่พืชได้รับของการปลูกในพื้นที่โล่งแจ้งมีค่าเท่ากับ 35.38 โมลต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งหากพิจารณาจากปริมาณแสงที่พืชได้รับภายใต้หลังคาชนิดอื่นๆ ในสิ่งทดลอง พบว่า ปริมาณแสงที่พืชได้รับเฉลี่ยจากทั้ง 4 รอบเก็บเกี่ยว ของหลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra เท่ากับ 20.57, 7.40, 18.59, และ 14.09 โมลต่อตารางเมตรต่อวัน ตามลำดับ โดยลดลงจากพื้นที่โล่งแจ้ง เท่ากับ 42, 79, 47 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

นอกจากนี้หากพิจารณาที่อุณหภูมิตลอด 4 รอบการเก็บเกี่ยว พบว่า การใช้หลังคาหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง ทำให้อุณหภูมิบริเวณใต้ปลูกฟ้ายะลวยโจรในช่วง 8.00-16.00 น. มีค่าลดลงประมาณ 1 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่โล่งแจ้ง หลังคาพลาสติก

MultiTech-Ultra หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra กล่าวคือ การใช้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง ทำให้อุณหภูมิบริเวณโตะปลุกฟ้าทะลายโจรมีค่าเฉลี่ยจากทั้ง 4 รอบเก็บเกี่ยว เท่ากับ 33.00 องศาเซลเซียส ในขณะที่การปลูกในพื้นที่โล่งแจ้ง หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra มีอุณหภูมิเฉลี่ยจากทั้ง 4 รอบเก็บเกี่ยว เท่ากับ 33.94, 33.63, 33.68 และ 33.47 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า การใช้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra มีแนวโน้มทำให้อุณหภูมิบริเวณโตะปลุกมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง ซึ่งให้ผลในทางตรงกันข้ามกับรายงานของ กาญจน์เจริญ และคณะ (2565) ที่รายงานว่า การใช้ฟิล์ม MultiTech-Ultra ไม่ทำให้อุณหภูมิภายใต้หลังคาหลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra มีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะงานวิจัยก่อนหน้านี้เป็นการบริหารจัดการเป็นโรงเรือนที่ค่อนข้างเป็นระบบ ปิดกว่าโตะปลุกซึ่งเปิดโล่งทั้ง 4 ด้านของโตะปลุก ทำให้อากาศถ่ายเทดีกว่า จึงเห็นผลของการใช้พลาสติก MultiTech-Ultra ที่ช่วยลดอุณหภูมิใต้หลังคาได้ดีกว่า

ตารางที่ 4.1 สภาพแวดล้อมภายในโตะปลูกพืชหลายโรที่แตกต่างกัน จำนวน 4 รอบการเก็บเกี่ยว

สิ่งทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มแสง (ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)	DLI (โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)
60 DAT			
T1: Control	33.50	1126.56	35.84
T2: MU	33.38	636.66	21.38
T3: Standard solar panel	32.72	222.92	7.74
T4: Agri-PV	33.34	559.92	18.95
T5: Agri-PV + MU	33.09	433.48	14.55
100 DAT			
T1: Control	33.57	1094.90	35.52
T2: MU	33.32	632.51	20.71
T3: Standard solar panel	32.64	218.10	7.41
T4: Agri-PV	33.13	504.92	16.82
T5: Agri-PV + MU	33.14	406.86	13.60
140 DAT			
T1: Control	34.65	1191.76	38.20
T2: MU	34.27	647.92	21.69
T3: Standard solar panel	33.59	197.51	7.52
T4: Agri-PV	34.29	613.75	20.59
T5: Agri-PV + MU	34.19	435.40	15.00
180 DAT			
T1: Control	34.03	1015.19	31.95
T2: MU	33.55	548.36	18.49
T3: Standard solar panel	33.04	177.70	6.94
T4: Agri-PV	33.97	539.90	18.00
T5: Agri-PV + MU	33.44	388.29	13.21

T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra

4.2 การเจริญเติบโต

4.2.1 ความสูง

จากการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน พบว่า การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง ทำให้ฟ้าทะลายโจรอายุ 30 วันหลังย้ายปลูก มีความสูงมากที่สุด คือ 5.50 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra (5.17 และ 5.00 เซนติเมตร ตามลำดับ) และการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ฟ้าทะลายโจรอายุ 60 วันหลังย้ายปลูก มีความสูงมากที่สุด คือ 28.17 เซนติเมตร ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง (24.33 เซนติเมตร) อย่างไรก็ตาม การปลูกฟ้าทะลายโจรในพื้นที่โล่งแจ้ง ทำให้ฟ้าทะลายโจรอายุ 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก มีความสูงเฉลี่ยน้อยที่สุดอยู่ที่ 7.94 เซนติเมตร (ตารางที่ 4.2)

4.2.2 ความกว้างทรงพุ่ม

จากการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน พบว่า การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง ทำให้ฟ้าทะลายโจรอายุ 30 วันหลังย้ายปลูก มีความกว้างทรงพุ่มมากที่สุด คือ 9.00 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra (8.83, 8.17 และ 7.67 เซนติเมตร ตามลำดับ) และการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ฟ้าทะลายโจรอายุ 60 วันหลังย้ายปลูกมีความกว้างทรงพุ่มมากที่สุด คือ 22.00 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra (20.30, 19.20 และ 18.20 เซนติเมตร ตามลำดับ) อย่างไรก็ตาม การปลูกฟ้าทะลายโจรในพื้นที่โล่งแจ้ง ทำให้ฟ้าทะลายโจรอายุ 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก มีความกว้างทรงพุ่มน้อยที่สุด คือ 5.67 และ 12.00 เซนติเมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3)

ตารางที่ 4.2 ความสูงของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 0, 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	ความสูง (เซนติเมตร)			
	0 DAT	30 DAT	60 DAT	ค่าเฉลี่ย
T1: Control	3.33±0.29	3.67±0.29 ^{c1/}	16.83±1.76 ^c	7.94±0.51 ^c
T2: MU	3.50±0.50	4.50±0.50 ^{bc}	24.33±3.06 ^{ab}	10.78±0.82 ^b
T3: Standard solar panel	3.17±0.29	5.50±0.50 ^a	24.33±1.53 ^{ab}	11.00±0.60 ^b
T4: Agri-PV	3.17±0.58	5.17±0.76 ^{ab}	23.83±2.36 ^b	10.72±0.82 ^b
T5: Agri-PV + MU	3.83±0.29	5.00±0.00 ^{ab}	28.17±2.02 ^a	12.33±0.67 ^a
F-test	ns	**	**	**
C.V.(%)	12.38	11.49	9.40	6.68

DAT = Days after transplanting; ^{1/}ค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ตามด้วยตัวอักษรพิมพ์เล็กเหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยวิธี DMRT, ns ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, ** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%, T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra

ตารางที่ 4.3 ความกว้างทรงพุ่มของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 0, 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	ความกว้างทรงพุ่ม (เซนติเมตร)			
	0 DAT	30 DAT	60 DAT	ค่าเฉลี่ย
T1: Control	4.67±0.29	5.67±0.29 ^{b1/}	12.00±1.00 ^c	7.44±0.19 ^b
T2: MU	4.50±0.50	8.83±1.26 ^a	22.00±2.00 ^a	11.78±1.06 ^a
T3: Standard solar panel	4.50±0.50	9.00±1.32 ^a	20.30±1.76 ^{ab}	11.28±1.11 ^a
T4: Agri-PV	4.67±0.76	8.17±1.61 ^a	19.20±1.26 ^{ab}	10.67±0.83 ^a
T5: Agri-PV + MU	4.83±0.29	7.67±1.15 ^{ab}	18.20±2.02 ^b	10.22±0.42 ^a
F-test	ns	*	**	**
C.V.(%)	11.11	16.37	9.06	7.93

DAT = Days after transplanting; ^{1/}ค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ตามด้วยตัวอักษรพิมพ์เล็กเหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยวิธี DMRT, ns ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, *, ** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ 99% ตามลำดับ, T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra

4.2.3 เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น

จากการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน พบว่า การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ฟ้าทะลายโจรอายุ 30 วันหลังย้ายปลูกมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด คือ 1.61 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra (1.52 มิลลิเมตร) ขณะที่การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ฟ้าทะลายโจรอายุ 60 วันหลังย้ายปลูก มีเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นมากที่สุด คือ 3.53 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง (3.27 มิลลิเมตร) อย่างไรก็ตาม การปลูกฟ้าทะลายโจรที่ปลูกในพื้นที่โล่งแจ้ง ทำให้ฟ้าทะลายโจรอายุ 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุด คือ 1.06 และ 2.20 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4)

4.2.4 จำนวนข้อ

จากการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน พบว่า การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน ทำให้ฟ้าทะลายโจรอายุ 30 วันหลังย้ายปลูก มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง ทำให้ฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60 วันหลังย้ายปลูก มีจำนวนข้อมากที่สุด คือ 11.67 ข้อ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้พลาสติก MultiTech-Ultra และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra (11.00 และ 10.33 ข้อ ตามลำดับ) อย่างไรก็ตาม การปลูกฟ้าทะลายโจรที่ปลูกในพื้นที่โล่งแจ้ง ทำให้ฟ้าทะลายโจรอายุ 60 วันหลังย้ายปลูก มีจำนวนข้อน้อยที่สุด คือ 7.00 ข้อ (ตารางที่ 4.5)

ตารางที่ 4.4 เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 0, 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น (มิลลิเมตร)			
	0 DAT	30 DAT	60 DAT	ค่าเฉลี่ย
T1: Control	0.00±0.00	1.06±0.16 ^{c1/}	2.20±0.26 ^c	1.09±0.14 ^c
T2: MU	0.00±0.00	1.52±0.05 ^{ab}	3.53±0.64 ^a	1.68±0.23 ^a
T3: Standard solar panel	0.00±0.00	1.61±0.08 ^a	3.27±0.06 ^{ab}	1.63±0.01 ^{ab}
T4: Agri-PV	0.00±0.00	1.32±0.19 ^b	2.77±0.35 ^{bc}	1.36±0.06 ^{bc}
T5: Agri-PV + MU	0.00±0.00	1.61±0.16 ^a	2.63±0.15 ^{bc}	1.41±0.10 ^b
F-test	ns	**	**	**
C.V.(%)	0	9.85	12.37	10.49

DAT = Days after transplanting; ^{1/}ค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ตามด้วยตัวอักษรพิมพ์เล็กเหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยวิธี DMRT, ns ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, ** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra

ตารางที่ 4.5 จำนวนข้อของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 0, 30 และ 60 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	จำนวนข้อ (ข้อ)			
	0 DAT	30 DAT	60 DAT	ค่าเฉลี่ย
T1: Control	0.00±0.00	3.67±0.58	7.00±1.00 ^{b1/}	3.56±0.38 ^b
T2: MU	0.00±0.00	4.00±1.00	11.00±1.00 ^a	5.03±0.58 ^a
T3: Standard solar panel	0.00±0.00	4.00±1.00	11.67±1.15 ^a	5.23±0.51 ^a
T4: Agri-PV	0.00±0.00	3.67±0.58	8.33±0.58 ^b	4.00±0.33 ^b
T5: Agri-PV + MU	0.00±0.00	4.67±0.58	10.33±0.58 ^a	5.00±0.00 ^a
F-test	ns	ns	**	**
C.V.(%)	0	19.36	8.94	8.62

DAT = Days after transplanting; ^{1/}ค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ตามด้วยตัวอักษรพิมพ์เล็กเหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยวิธี DMRT, ns ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, ** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra

4.3 น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ)

สำหรับน้ำหนักสดส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) จากการปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน พบว่า การปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ฟ้ายะลวยโจรที่มีอายุ 60 วันหลังย้ายปลูก มีน้ำหนักสดส่วนเหนือดินมากที่สุด คือ 2.86 กรัมต่อต้น ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้แผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง (2.42 กรัมต่อต้น) ขณะที่การปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ฟ้ายะลวยโจรที่มีอายุ 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก มีน้ำหนักสดส่วนเหนือดินมากที่สุด คือ 19.72, 23.07 และ 28.55 กรัมต่อต้น โดยฟ้ายะลวยโจรที่มีอายุ 100 วันหลังย้ายปลูก มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกภายใต้แผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง (18.40 กรัมต่อต้น) นอกจากนี้ หากพิจารณาน้ำหนักสดส่วนเหนือดินทั้งหมด พบว่า การปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ฟ้ายะลวยโจรมีน้ำหนักสดส่วนเหนือดินมากที่สุด คือ 73.47 กรัมต่อต้น และมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดส่วนเหนือดินมากที่สุด คือ 18.37 กรัมต่อต้น (ตารางที่ 4.6)

สำหรับน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) จากการปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน พบว่า การปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ฟ้ายะลวยโจรที่มีอายุ 60 วันหลังย้ายปลูก มีน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินมากที่สุด คือ 0.65 กรัมต่อต้น ขณะที่การปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ฟ้ายะลวยโจรที่มีอายุ 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก มีน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินมากที่สุด คือ 7.79, 8.91 และ 10.31 กรัมต่อต้น โดยฟ้ายะลวยโจรที่มีอายุ 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกภายใต้แผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง (8.12 และ 10.02 กรัมต่อต้น ตามลำดับ) นอกจากนี้ หากพิจารณาน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินทั้งหมด พบว่า การปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ฟ้ายะลวยโจรมีน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินมากที่สุด คือ 27.53 กรัมต่อต้น และมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินมากที่สุด คือ 6.87 กรัมต่อต้น (ตารางที่ 4.7)

จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า การปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้แผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและปริมาณผลผลิตของฟ้ายะลวยโจร เนื่องจากความเข้มแสงที่ลดลง ทำให้พืชต้องปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อม (Zhu et al., 2012) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา โดยจะมีการผลิตฮอร์โมน เช่น ออกซิน (auxin) และจิบเบอเรลลิน (gibberellin) ที่มีบทบาทในการกระตุ้นการขยายขนาดของเซลล์ รวมถึง

การยืดตัวของข้อปล้องทำให้พืชมีความสูงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (Himbindu et al., 2017) ส่งผลให้ฟ้ายะลาโยรมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น เช่น ความสูง น้ำหนักแห้งของใบ ลำต้น และราก รวมถึงผลผลิตที่เพิ่มขึ้น (Kumar et al., 2009; Müller and Leyse, 2011) สอดคล้องกับรายงานของ Liphan and Detpiratmongkol (2017) ที่พบว่า การพรางแสงที่ระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ฟ้ายะลาโยรมีการเจริญเติบโตทางลำต้นที่ดีรวมถึงให้ผลผลิตสูงกว่าการไม่พรางแสง และ Dal Prà et al. (2024) รายงานว่า การปลูกผักสลัดเอสคาโรลภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ ทำให้มีน้ำหนักสดและขนาดของหัวผักสลัดเพิ่มขึ้น และ Marrou et al. (2013b) รายงานว่า ผลผลิตของผักสลัดภายใต้ร่มเงามีพื้นที่ใบรวมต่อพืชเพิ่มขึ้น แม้ว่าจำนวนใบจะลดลง ทั้งนี้พืชที่เจริญเติบโตภายใต้ร่มเงาจะพยายามปรับตัวโดยการเพิ่มพื้นที่ใบและขนาดใบ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแสงและคงผลผลิตไว้ได้



ตารางที่ 4.6 น้ำหนักสดส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) ของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	น้ำหนักสดส่วนเหนือดิน (กรัมต่อต้น)					
	60 DAT	100 DAT	140 DAT	180 DAT	ผลผลิตสดทั้งหมด	ค่าเฉลี่ย
T1: Control	1.34±0.28 ^{d1/}	14.40±0.74 ^{cd}	17.52±1.90 ^c	24.72±1.81 ^{bc}	57.98±2.39 ^{cd}	14.50±0.60 ^{cd}
T2: MU	2.86±0.38 ^a	15.65±2.98 ^{bc}	17.25±1.34 ^c	25.12±0.93 ^{bc}	60.69±2.24 ^c	15.17±0.56 ^c
T3: Standard solar panel	2.42±0.39 ^{ab}	12.39±1.26 ^d	17.52±3.32 ^c	23.42±2.28 ^c	55.09±2.15 ^d	13.77±0.54 ^d
T4: Agri-PV	1.85±0.27 ^c	18.40±3.58 ^{ab}	20.40±1.53 ^b	26.33±0.58 ^b	66.97±2.89 ^b	16.74±0.72 ^b
T5: Agri-PV + MU	2.14±0.17 ^{bc}	19.72±2.92 ^a	23.07±1.67 ^a	28.55±1.26 ^a	73.47±3.46 ^a	18.37±0.86 ^a
F-test	**	**	**	**	**	**
C.V.(%)	14.79	15.24	10.92	5.80	4.25	4.25

DAT = Days after transplanting; ^{1/}ค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ตามด้วยตัวอักษรพิมพ์เล็กเหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยวิธี DMRT, ** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%, T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra

ตารางที่ 4.7 น้ำหนักแห้งส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) ของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	น้ำหนักแห้งส่วนเหนือดิน (กรัมต่อต้น)					ค่าเฉลี่ย
	60 DAT	100 DAT	140 DAT	180 DAT	ผลผลิตแห้งทั้งหมด	
T1: Control	0.32±0.04 ^{c1/}	4.51±0.56 ^c	5.60±0.88 ^b	7.46±0.89 ^b	17.88±1.72 ^c	4.47±0.43 ^c
T2: MU	0.65±0.15 ^a	5.18±0.83 ^c	5.69±1.10 ^b	7.39±0.48 ^b	18.91±1.21 ^c	4.73±0.30 ^c
T3: Standard solar panel	0.41±0.10 ^{bc}	4.01±0.78 ^d	4.89±0.82 ^b	6.19±0.43 ^c	15.50±0.60 ^d	3.95±0.15 ^d
T4: Agri-PV	0.39±0.09 ^{bc}	6.33±1.15 ^b	8.12±1.45 ^a	10.02±0.71 ^a	24.86±1.65 ^b	6.21±0.41 ^b
T5: Agri-PV + MU	0.48±0.04 ^b	7.79±0.57 ^a	8.91±1.18 ^a	10.31±0.95 ^a	27.53±1.62 ^a	6.87±0.41 ^a
F-test	**	**	**	**	**	**
C.V.(%)	21.03	14.50	16.68	8.74	6.81	6.77

DAT = Days after transplanting; ^{1/}ค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ตามด้วยตัวอักษรพิมพ์เล็กเหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยวิธี DMRT ** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ตามลำดับ, T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra

4.4 คุณภาพผลผลิต

4.4.1 ค่าความเขียวใบ

จากการปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน พบว่า การปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาหลังคาหลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงทั้ง 2 ชนิด คือ Agri-PV และ Agri-PV+MultiTech-Ultra ที่อายุ 30 วันหลังย้ายปลูก มีค่าความเขียวใบสูงที่สุดอยู่ในช่วง 29.00–33.01 และฟ้ายะลวยโจรที่อายุ 60 วันหลังย้ายปลูก พบว่า ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.8)

ตารางที่ 4.8 ค่าความเขียวใบของต้นฟ้ายะลวยโจรที่อายุ 0 30 60 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	ค่าความเขียวใบ			
	0 DAT	30 DAT	60 DAT	ค่าเฉลี่ย
T1: Control	0.00±0.00	19.53±0.46 ^{b1/}	50.47±2.12	23.33±0.74 ^c
T2: MU	0.00±0.00	33.01±1.57 ^a	50.50±1.65	27.84±0.65 ^a
T3: Standard solar panel	0.00±0.00	29.87±1.63 ^a	49.46±0.76	26.44±0.34 ^{ab}
T4: Agri-PV	0.00±0.00	29.00±5.58 ^a	48.92±3.50	25.97±1.30 ^b
T5: Agri-PV + MU	0.00±0.00	31.13±2.42 ^a	48.37±1.68	26.50±1.23 ^{ab}
F-test	ns	**	ns	**
C.V.(%)	0	10.61	4.32	3.56

DAT = Days after transplanting; ^{1/}ค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ตามด้วยตัวอักษรพิมพ์เล็กเหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยวิธี DMRT, ns ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, ** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% , T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra

4.4.2 ปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์

สำหรับปริมาณคลอโรฟิลล์ จากการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อฟ้าทะลายโจรมีอายุ 60 วันหลังย้ายปลูก การปลูกฟ้าทะลายโจรในพื้นที่โล่งแจ้ง หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง มีปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์รวมอยู่ในช่วง 29.28-32.97, 10.13-11.49 และ 40.04-44.20 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ขณะที่เมื่อฟ้าทะลายโจรมีอายุ 100 วันหลังย้ายปลูก การปลูกฟ้าทะลายโจรในพื้นที่โล่งแจ้ง มีปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์รวมอยู่ที่ 25.71, 9.96 และ 35.45 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อฟ้าทะลายโจรมีอายุ 140 วันหลังย้ายปลูก พบว่า การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra มีปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์รวมอยู่ที่ 28.09, 11.89 และ 39.97 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และเมื่อฟ้าทะลายโจรมีอายุ 180 วันหลังย้ายปลูก พบว่า การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra มีปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์รวมอยู่ที่ 25.24, 10.46 และ 35.70 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4.9)

สำหรับปริมาณแคโรทีนอยด์ จากการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อฟ้าทะลายโจรมีอายุ 60 วันหลังย้ายปลูก การปลูกฟ้าทะลายโจรในพื้นที่โล่งแจ้ง หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง มีปริมาณแคโรทีนอยด์อยู่ในช่วง 5.71-6.55 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร ขณะที่ฟ้าทะลายโจรมีอายุ 100 วันหลังย้ายปลูก การปลูกฟ้าทะลายโจรในพื้นที่โล่งแจ้ง มีปริมาณแคโรทีนอยด์อยู่ที่ 4.47 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อฟ้าทะลายโจรมีอายุ 140 วันหลังย้ายปลูก พบว่า การปลูกฟ้าทะลายโจรในพื้นที่โล่งแจ้ง หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง มีปริมาณแคโรทีนอยด์อยู่ในช่วง 3.62-3.96 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อฟ้าทะลายโจรมีอายุ 180 วันหลังย้ายปลูก พบว่า การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง มีปริมาณแคโรทีนอยด์อยู่ที่ 3.92 และ 4.16 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4.10)

จากผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานของ Liphan and Detpiratmongkol (2017) ที่พบว่าฟ้าทะลายโจรที่พรางแสง 80% (เปรียบได้กับการปลูกภายใต้แผงโซลาร์เซลล์) มีปริมาณคลอโรฟิลล์เอ และคลอโรฟิลล์บี ในใบสูงสุด เมื่อเทียบกับการไม่พรางแสง เช่นเดียวกับภาวิณี และคณะ (2561) ที่รายงานว่า ใบเตยหอมที่พรางแสง 50, 60 และ 70% มีปริมาณคลอโรฟิลล์สูงสุด เมื่อเทียบกับการปลูกแบบไม่พรางแสง อย่างไรก็ตาม ฟ้าทะลายโจรที่ปลูกภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ และแคโรที

น้อยด้น้อยที่สุด เนื่องจากคุณสมบัติของฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra สามารถกรองรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ทำให้พืชได้รับ UV-A และ UV-B ลดลง โดยเฉพาะช่วง UV-A ซึ่งเป็นช่วงคลื่นที่กระตุ้นการทำงานของ photoreceptor สำคัญ เช่น โฟโตโทรปินส์ และ ครีปโตโครม ที่มีบทบาทในการควบคุมกระบวนการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ในพืช เมื่อรังสี UV-A ถูกกรองออก พืชจึงได้รับสัญญาณแสงไม่เพียงพอ ส่งผลให้การทำงานของ photoreceptor เหล่านี้ลดลง และทำให้อัตราการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ลดลง รวมถึงปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืชลดลงตามไปด้วย (Li et al., 2020; Huang et al., 2022)



ตารางที่ 4.9 ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์รวมของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	รอบการเก็บเกี่ยว				
	60 DAT	100 DAT	140 DAT	180 DAT	ค่าเฉลี่ย
ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร)					
T1: Control	30.98±2.38 ^{a1/}	25.71±0.32 ^a	21.41±0.57 ^c	20.13±1.17 ^b	24.56±0.63 ^{ab}
T2: MU	32.97±2.45 ^a	19.73±0.78 ^b	28.09± 1.60 ^a	25.24±2.55 ^a	26.51±1.28 ^a
T3: Standard solar panel	25.16±1.31 ^b	20.54±2.02 ^b	23.17±1.11 ^{bc}	21.78±2.36 ^{ab}	22.66±0.68 ^c
T4: Agri-PV	29.28±2.99 ^a	19.54±1.59 ^b	24.89±0.87 ^b	20.82±2.03 ^b	23.63±0.18 ^{bc}
T5: Agri-PV + MU	23.12±1.36 ^b	18.71±0.03 ^b	21.30±0.91 ^c	18.41±1.52 ^b	20.39±0.47 ^d
F-test	**	**	**	*	**
C.V.(%)	7.77	5.81	4.48	9.36	4.56
ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี (ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร)					
T1: Control	11.46±1.07 ^a	9.96±0.59 ^a	8.43±0.30 ^c	8.08±0.39 ^{bc}	9.48±0.37 ^{ab}
T2: MU	11.49±1.13 ^a	6.74±0.52 ^c	11.89±0.50 ^a	10.46±0.98 ^a	10.15±0.55 ^a
T3: Standard solar panel	9.62±0.85 ^{ab}	7.77±0.61 ^b	9.60±0.30 ^b	8.59±1.06 ^b	8.90±0.28 ^{bc}
T4: Agri-PV	10.13±0.98 ^a	6.23±0.50 ^c	9.91±0.52 ^b	9.06±0.62 ^b	8.83±0.41 ^{bc}
T5: Agri-PV + MU	7.86±0.80 ^b	6.73±0.08 ^c	9.71±0.12 ^b	7.02±0.34 ^c	7.83±0.28 ^c
F-test	**	**	**	**	*
C.V.(%)	9.62	6.67	3.79	8.54	6.88
ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม (ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร)					
T1: Control	42.44±3.45 ^a	35.45±1.74 ^a	29.84±0.85 ^d	28.21±1.55 ^b	33.98±0.86 ^{ab}
T2: MU	44.20±3.67 ^a	26.48±0.71 ^b	39.97±2.06 ^a	35.70±3.52 ^a	36.59±0.63 ^a
T3: Standard solar panel	31.47±4.06 ^b	28.32±2.41 ^b	32.77±1.40 ^{bc}	30.37±3.42 ^b	30.73±1.30 ^{bc}
T4: Agri-PV	40.04±2.98 ^a	25.77±1.72 ^b	34.80±1.32 ^b	29.94±2.88 ^b	32.64±1.42 ^b
T5: Agri-PV + MU	32.39±2.47 ^b	25.45±0.11 ^b	31.02±1.00 ^{cd}	25.43±1.73 ^b	28.57±0.58 ^c
F-test	**	**	**	*	**
C.V.(%)	8.85	5.54	4.12	9.19	5.03

DAT = Days after transplanting; ^{1/}ค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ตามด้วยตัวอักษรพิมพ์เล็กเหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยวิธี DMRT, *, ** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ 99% ตามลำดับ; T1: พื้นที่ไม่เงา (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra

ตารางที่ 4.10 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูกภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	ปริมาณแคโรทีนอยด์ (ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				
	60 DAT	100 DAT	140 DAT	180 DAT	ค่าเฉลี่ย
T1: Control	6.55±0.35 ^{a1/}	4.47±0.41 ^a	3.62±0.21 ^a	3.51±0.27 ^{bc}	4.54±0.06 ^a
T2: MU	5.71±0.68 ^a	2.82±0.23 ^b	3.96±0.25 ^a	3.92±0.45 ^{ab}	4.10±0.31 ^{ab}
T3: Standard solar panel	4.69±0.76 ^b	2.64±0.18 ^b	3.65±0.15 ^a	4.16±0.39 ^a	3.78±0.17 ^b
T4: Agri-PV	5.76±0.36 ^a	2.55±0.39 ^b	3.95±0.18 ^a	3.40±0.34 ^{bc}	3.92±0.16 ^b
T5: Agri-PV + MU	3.80±0.07 ^b	2.87±0.36 ^b	3.21±0.14 ^b	3.04±0.09 ^c	3.23±0.04 ^c
F-test	**	**	**	*	**
C.V.(%)	9.58	10.56	5.15	9.26	6.51

DAT = Days after transplanting; ^{1/}ค่าเฉลี่ยในแนวดิ่ง±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ตามด้วยตัวอักษรพิมพ์เล็กเหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยวิธี DMRT, *, ** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ 99% ตามลำดับ;
T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra

4.4.3 ปริมาณแลคโตนรวม

จากการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน พบว่า การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ฟ้าทะลายโจรอายุ 60 วันหลังย้ายปลูก มีปริมาณแลคโตนรวมมากที่สุด คือ 9.42 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ฟ้าทะลายโจรที่อายุ 100 วันหลังย้ายปลูก ที่ปลูกภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra มีปริมาณแลคโตนรวมมากที่สุด คือ 7.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง และแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง (6.27, 7.26 และ 6.59 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ) ทั้งนี้ การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ฟ้าทะลายโจรที่มีอายุ 140 วันหลังย้ายปลูก มีปริมาณแลคโตนรวมมากที่สุด คือ 9.69 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง และแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง (9.03 เปอร์เซ็นต์) นอกจากนี้ การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ฟ้าทะลายโจรที่มีอายุ 180 วันหลังย้ายปลูก มีปริมาณแลคโตนรวมมากที่สุด คือ 13.98 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง (13.52 เปอร์เซ็นต์) (ตารางที่ 4.11) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liphan and Detpiratmongkol (2020) พบว่าฟ้าทะลายโจรที่พรางแสง 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ จะมีปริมาณแอนโดรกราโฟไลด์สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่พรางแสงและการพรางแสงที่ 75 เปอร์เซ็นต์ และ Purwanto et al. (2011) รายงานว่าฟ้าทะลายโจรจำเป็นต้องได้รับการพรางแสงในช่วง 25-50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้การเจริญเติบโตและการผลิตแอนโดรกราโฟไลด์สูงสุด เช่นเดียวกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.11 ปริมาณแลคโตนรวมในส่วนเหนือดินของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูกภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	ปริมาณแลคโตนรวม (เปอร์เซ็นต์)				
	60 DAT	100 DAT	140 DAT	180 DAT	ค่าเฉลี่ย
T1: Control	4.39±1.45 ^c	5.69±1.24 ^b	5.45±0.49 ^b	9.45±0.67 ^b	6.24±0.53 ^c
T2: MU	4.47±1.24 ^c	6.27±1.63 ^{ab}	5.97±0.56 ^b	10.12±0.38 ^b	6.71±0.36 ^c
T3: Standard solar panel	7.44±1.15 ^b	7.26±0.95 ^{ab}	9.03±1.25 ^a	10.71±1.65 ^b	8.61±0.94 ^b
T4: Agri-PV	5.48±0.77 ^c	6.59±1.05 ^{ab}	9.03±1.77 ^a	13.52±1.22 ^a	8.71±0.45 ^b
T5: Agri-PV + MU	9.42±0.78 ^a	7.39±1.45 ^a	9.69±1.60 ^a	13.98±0.54 ^a	10.12±0.55 ^a
F-test	**	**	**	**	**
C.V.(%)	17.81	19.41	15.85	8.74	7.43

DAT = Days after transplanting; ^{1/}ค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ตามด้วยตัวอักษรพิมพ์เล็กเหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยวิธี DMRT, ns ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, ** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% , T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra

4.4.4 ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของฟ้าทะลายโจรที่ปลูกภายใต้หลังที่ต่างกัน พบว่า การปลูกฟ้าทะลายโจรในพื้นที่โล่งแจ้ง ทำให้ฟ้าทะลายโจรที่มีอายุ 60, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมากที่สุด คือ 26.46, 20.38 และ 24.26 มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งการปลูกฟ้าทะลายโจรที่มีอายุ 180 วันหลังย้ายปลูก มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra (23.82 มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ในขณะที่การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra ทำให้ฟ้าทะลายโจรที่มีอายุ 100 วันหลังย้ายปลูก มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมากที่สุด คือ 21.98 มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้าทะลายโจรในพื้นที่โล่งแจ้ง (21.69 มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) ขณะที่การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ทั้งหมดของฟ้าทะลายโจรพบว่า การปลูกฟ้าทะลายโจรในพื้นที่โล่งแจ้ง ทำให้ฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก มีปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ทั้งหมดมากที่สุด คือ 7.44, 7.83, 13.44 และ 12.90 มิลลิกรัมเคอซีทินต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra ในช่วงที่ฟ้าทะลายโจรมีอายุ 60, 100 และ 180 วันหลังย้ายปลูก (6.55, 5.09 และ 13.71 มิลลิกรัมเคอซีทินต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ) นอกจากนี้ ยังมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra ในช่วงที่ฟ้าทะลายโจรอายุ 100 วันหลังย้ายปลูก (7.31 และ 6.33 มิลลิกรัมเคอซีทินต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ) และยังมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงในช่วงที่ฟ้าทะลายโจรอายุ 180 วันหลังย้ายปลูก (12.51 มิลลิกรัมเคอซีทินต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)

จากการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของฟ้าทะลายโจรที่ปลูกภายใต้หลังที่ต่างกัน พบว่า การปลูกฟ้าทะลายโจรในพื้นที่โล่งแจ้ง ทำให้ฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100 และ 140 วันหลังย้ายปลูก มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) มากที่สุด คือ 61.05, 50.86 และ 49.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขณะที่การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง ทำให้ฟ้าทะลายโจรที่อายุ 180 วันหลังย้ายปลูก มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) มากที่สุด คือ 37.43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกในพื้นที่โล่งแจ้ง หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง (35.71, 33.90 และ 36.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) (ตารางที่ 4.12) ทั้งนี้เมื่อความเข้มแสงสูงมีอิทธิพลต่อปริมาณสารประกอบฟ

นอลิคและฟลาโวนอยด์ (Swiatek et al., 2019) เช่นเดียวกับการปลูกฟ้าทะลายโจรในพื้นที่โล่งแจ้ง เนื่องจากความเข้มแสงที่สูง ทำให้ฟ้าทะลายโจรอยู่ในสภาวะเครียด จึงสร้างสารเหล่านี้เพื่อป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) ที่เป็นอันตราย และกำจัดอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ (Ghasemzadeh et al. 2010; Ali, 2014; Idris et al., 2018) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Beacker (2014) ที่พบว่า ผักกาดหอมที่ปลูกโดยการได้รับแสงโดยตรงมีการผลิตสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ และฟีนอลิกในปริมาณที่สูง จากรายงานของ Omar et al. (2016) พบว่าฟ้าทะลายโจรที่ปลูกโดยการไม่พรางแสงหรือพรางแสงเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ มีการสะสมของปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การพรางแสงที่สูงขึ้น (30 และ 50 เปอร์เซ็นต์) นอกจากนี้ Chae et al. (2022) ที่รายงานว่า การปลูกบล็อกโคลี่ภายใต้แผงโซลาร์เซลล์ชนิดรับแสง 2 ด้าน มีปริมาณฟีนอลิกลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ การปลูกในพื้นที่โล่งแจ้ง



ตารางที่ 4.12 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในส่วนเนื้อดินของต้นฟ้าทะลายโจรที่อายุ 60, 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูกภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	รอบการเก็บเกี่ยว				
	60 DAT	100 DAT	140 DAT	180 DAT	ค่าเฉลี่ย
ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)					
T1: Control	26.46±0.40 ^{a1/}	21.69±0.78 ^a	20.38±0.50 ^a	24.26±0.73 ^a	23.20±0.54 ^a
T2: MU	21.80±0.77 ^b	21.98±0.75 ^a	18.53±0.32 ^b	23.82±1.21 ^{ab}	20.52±0.77 ^b
T3: Standard solar panel	14.57±0.26 ^e	12.34±0.78 ^c	15.82±0.70 ^d	18.44±0.49 ^d	15.29±0.54 ^d
T4: Agri-PV	19.12±0.77 ^c	17.93±2.04 ^b	17.49±0.44 ^c	22.51±0.85 ^b	20.27±0.66 ^b
T5: Agri-PV + MU	16.48±1.76 ^d	18.61±0.55 ^b	15.13±0.46 ^d	20.10±0.76 ^c	17.58±0.82 ^c
F-test	**	**	**	**	**
C.V.(%)	4.83	6.02	2.84	3.85	3.49
ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (มิลลิกรัมเคอซีทินต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)					
T1: Control	7.44±0.83 ^a	7.83±0.84 ^a	13.44±0.68 ^a	12.90±0.42 ^{ab}	10.40±0.27 ^a
T2: MU	6.55±0.59 ^{ab}	6.09±0.89 ^{ab}	11.83±0.50 ^b	13.71±0.94 ^a	9.55±0.45 ^b
T3: Standard solar panel	4.84±0.36 ^{cd}	7.31±0.60 ^a	12.10±0.82 ^b	11.20±0.11 ^d	8.86±0.33 ^b
T4: Agri-PV	5.98±0.76 ^{bc}	4.02±0.64 ^c	9.65±0.37 ^c	12.51±0.41 ^{ab}	8.04± 0.41 ^b
T5: Agri-PV + MU	4.73±0.43 ^d	6.33±0.90 ^{ab}	7.91±0.77 ^d	11.12±0.52 ^{cd}	7.52±0.26 ^c
F-test	**	**	**	**	**
C.V.(%)	10.50	11.28	5.92	3.84	3.91
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH (เปอร์เซ็นต์)					
T1: Control	61.05±1.35 ^a	50.86±2.73 ^a	49.24±0.82 ^a	35.71±2.23 ^a	49.21±10.41
T2: MU	45.90±1.65 ^{bc}	45.24±1.00 ^b	42.10±1.65 ^b	33.90±0.92 ^a	41.79±5.51
T3: Standard solar panel	42.67±2.18 ^c	42.29±0.29 ^c	25.33±0.44 ^c	36.00±0.29 ^a	36.57±8.09
T4: Agri-PV	47.14±1.51 ^b	46.95±2.01 ^b	44.19±2.16 ^b	37.43±3.02 ^a	43.93±4.54
T5: Agri-PV + MU	47.71±3.02 ^b	45.62±0.16 ^b	42.86±1.03 ^b	21.52±1.44 ^b	39.43±12.10
F-test	**	**	**	**	ns
C.V.(%)	4.18	3.45	3.35	3.78	20.43

DAT = Days after transplanting; ^{1/}ค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ตามด้วยตัวอักษรพิมพ์เล็กเหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยวิธี DMRT, *, ** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ 99% ตามลำดับ T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra

4.4.5 ปริมาณธาตุอาหารหลักของส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ)

จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลักในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) ของการปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน พบว่า การปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง ทำให้ฟ้ายะลวยโจรที่มีอายุ 60 และ 100 วันหลังย้ายปลูก มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมากที่สุด คือ 4.40 และ 4.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขณะที่การปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง ทำให้ฟ้ายะลวยโจรที่มีอายุ 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมากที่สุด คือ 5.18 และ 3.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง (5.09 และ 3.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะไนโตรเจนไม่ถูกนำไปใช้ในการสร้างคลอโรฟิลล์ เนื่องจากความเข้มแสงที่ลดลง ส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ลดลงด้วย จึงเกิดการสะสมไนโตรเจนในรูปของไนเตรทจำนวนมากในบริเวณใบ (Zhou et al., 2019; Wu et al., 2025) สอดคล้องกับงานวิจัยของ รัชธิญา (2563) ที่รายงานว่าการพรางแสงที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ผักกูดมีการสะสมไนเตรทสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ได้รับการพรางแสงและการพรางแสงที่ 50 เปอร์เซ็นต์

ในส่วนของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด พบว่า การปลูกฟ้ายะลวยโจรที่มีอายุ 60 วันหลังย้ายปลูกภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่การปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง ทำให้ฟ้ายะลวยโจรที่มีอายุ 100 และ 180 วันหลังย้ายปลูก มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดมากที่สุด คือ 0.16 และ 0.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ฟ้ายะลวยโจรอายุ 140 วันหลังย้ายปลูก ที่ปลูกภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra มีปริมาณฟอสฟอรัสมากที่สุด คือ 0.17 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เมื่อความเข้มแสงที่ลดลง ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสในส่วนของใบและลำต้นเพิ่มขึ้น (Paschko et al., 2023) แต่การเจริญเติบโตของรากกลับลดลง (Zhou et al., 2019) ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสารอาหารและน้ำลดลง ส่งผลให้ผลผลิตลดลงด้วย

ในส่วนของปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด พบว่า การปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง ทำให้ฟ้ายะลวยโจรที่มีอายุ 60 วันหลังย้ายปลูก มีค่ามากที่สุด คือ 29.40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์แบบกึ่งโปร่งแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra (27.45 และ 26.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) และฟ้ายะลวยโจรที่มีอายุ 100 วันหลังย้ายปลูก ทำให้ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้ายะลวยโจรภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน ขณะที่การปลูกฟ้ายะลวยภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง ทำให้ฟ้ายะลวยโจรอายุ 140 วันหลังย้ายปลูก มีปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดมากที่สุด คือ

20.86 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra (20.61 และ 20.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) นอกจากนี้ ฟ้าทะลายโจรที่ปลูกในพื้นที่โล่งแจ้ง ทำให้ฟ้าทะลายโจรที่มีอายุ 180 วันหลังย้ายปลูก มีปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดมีค่ามากที่สุด คือ 14.09 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง หลังคาแผงโซลาร์แบบกึ่งโปร่งแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra (13.77, 12.92 และ 13.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) (ตารางที่ 4.13)



ตารางที่ 4.13 ปริมาณไนโตรเจน ปริมาณฟอสฟอรัส และปริมาณโพแทสเซียมในส่วนเหนือดินของต้น
ฟักทะลายโจรที่อายุ 60, 100, 140 และ 180 วันหลังย้ายปลูก ภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	รอบการเก็บเกี่ยว				
	60 DAT	100 DAT	140 DAT	180 DAT	ค่าเฉลี่ย
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)					
T1: Control	3.53±0.10 ^c	3.42±0.03 ^e	4.30±0.15 ^c	3.27±0.06 ^b	3.63±0.02 ^e
T2: MU	3.71±0.03 ^b	3.89±0.01 ^d	4.53±0.13 ^b	3.29±0.03 ^b	3.85±0.03 ^d
T3: Standard solar panel	4.40±0.03 ^a	4.45±0.02 ^a	5.09±0.03 ^a	3.47±0.03 ^a	4.35±0.02 ^a
T4: Agri-PV	3.53±0.04 ^c	3.97±0.04 ^c	5.18±0.06 ^a	3.50±0.03 ^a	4.05±0.02 ^b
T5: Agri-PV + MU	3.71±0.03 ^b	4.31±0.03 ^b	4.68±0.05 ^b	3.26±0.04 ^b	3.99±0.00 ^c
F-test	**	**	**	**	**
C.V.(%)	1.38	0.69	1.98	1.16	0.48
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)					
T1: Control	0.10±0.01	0.12±0.01 ^{cd}	0.15±0.00 ^c	0.16±0.00 ^b	0.13±0.01 ^b
T2: MU	0.10±0.01	0.14±0.01 ^{bc}	0.17±0.00 ^a	0.15±0.00 ^c	0.14±0.00 ^b
T3: Standard solar panel	0.13±0.03	0.16±0.01 ^a	0.16±0.00 ^{bc}	0.17±0.01 ^a	0.15±0.01 ^a
T4: Agri-PV	0.12±0.02	0.12±0.01 ^d	0.16±0.01 ^{bc}	0.16±0.00 ^b	0.14±0.01 ^b
T5: Agri-PV + MU	0.11±0.01	0.14±0.00 ^b	0.16±0.00 ^b	0.14±0.00 ^d	0.14±0.00 ^b
F-test	ns	**	**	**	**
C.V.(%)	12.93	7.58	2.80	2.35	3.18
ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)					
T1: Control	16.25±4.94 ^b	18.22±1.53	19.46±0.49 ^c	14.09±1.08 ^a	17.00±1.03 ^b
T2: MU	19.48±1.14 ^b	17.90±4.58	20.61±0.55 ^a	12.28±0.64 ^b	17.57±1.04 ^b
T3: Standard solar panel	29.40±5.05 ^a	24.36±2.81	19.62±0.41 ^{bc}	13.77±0.53 ^a	21.79±1.81 ^a
T4: Agri-PV	27.45±0.76 ^a	20.57±0.42	20.86±0.20 ^a	12.92±0.40 ^{ab}	20.45±0.19 ^a
T5: Agri-PV + MU	26.30±0.98 ^a	20.52±1.70	20.32±0.14 ^{ab}	13.75±0.50 ^a	20.22±0.72 ^a
F-test	**	ns	**	*	**
C.V.(%)	13.66	12.89	1.94	5.03	5.64

DAT = Days after transplanting; ¹/ค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ตามด้วยตัวอักษรพิมพ์เล็กเหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยวิธี DMRT, ns ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, ** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ตามลำดับ, T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra

4.5 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตรต่อเดือน ซึ่งคิดเป็นหน่วยละ 4.6 บาทต่อกิโลวัตต์ (ราคามาตรฐานประเทศไทย) และคำนวณเป็นรอบการผลิตพืชเป็นระยะเวลา 1 เดือน พบว่า โต๊ะปลูกที่ใช้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง มีค่าการผลิตพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด คือ 0.52 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ขายได้ราคามากที่สุด คือ ประมาณ 72 บาทต่อตารางเมตรต่อเดือน ในขณะที่การใช้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra มีค่าการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 0.20 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรต่อวัน ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ขายได้ราคาประมาณ 27 บาทต่อตารางเมตรต่อเดือน ซึ่งน้อยกว่าหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสงถึงประมาณ 62 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มแสงที่ลดลงเช่นกัน ในขณะที่การใช้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra ไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ (ตารางที่ 4.14)

และหากพิจารณาที่รายได้ที่เกิดขึ้นจากการขายผลผลิตที่เป็นพลังงานไฟฟ้าและผลผลิตพืช ซึ่งคิดราคาผลผลิตบางส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) กิโลกรัมละ 120 บาท อ้างอิงจาก Thai publica (2021) พบว่า การปลูกพืชทะเลทรายโอรกายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech- Ultra ให้รายได้จากการขายผลผลิตทั้งพืชและพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 139.27 บาทต่อตารางเมตรต่อเดือน ขณะที่การใช้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง และหลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง ให้รายได้อยู่ที่ 135.41 และ 128.66 บาทต่อตารางเมตรต่อเดือน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่า การปลูกพืชทะเลทรายโอรกายในพื้นที่โล่งแจ้ง และหลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra ซึ่งไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ทำให้รายได้จากผลผลิตพืชน้อยที่สุด คือ 72.96 และ 77.16 บาทต่อตารางเมตรต่อเดือน ตามลำดับ (ตารางที่ 4.14) ดังนั้น การพัฒนาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง เป็นแนวทางที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป โดยเฉพาะการใช้ร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech- Ultra ซึ่งทำให้ได้ผลผลิตพืชที่สูงกว่าพื้นที่โล่งแจ้ง และหลังคาพลาสติก MultiTech- Ultra ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดการทำหลังคาโรงเรือนเพาะปลูกพืชที่สามารถผลิตได้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและพืชได้ต่อไป

ตารางที่ 4.14 พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ผลิตได้และรายได้ที่เกิดขึ้นจากผลผลิตพลังงานไฟฟ้าภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย ที่ผลิตได้ (กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรต่อวัน)	ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อ ตารางเมตร (บาทต่อตารางเมตรต่อเดือน)	ผลผลิตแบ่งส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ)	
			ผลผลิตพืชต่อตารางเมตรต่อ รอบการผลิต 1 เดือน (บาทต่อตารางเมตรต่อเดือน)	ผลผลิตพลังงานและพืชต่อตาราง เมตรต่อรอบการผลิต 1 เดือน (บาทต่อตารางเมตรต่อเดือน)
T1: Control	0.00	0.00	72.96	72.96
T2: MU	0.00	0.00	77.16	77.16
T3: Standard solar panel	0.52	72.17	63.24	135.41
T4: Agri-PV	0.20	27.25	101.41	128.66
T5: Agri-PV + MU	0.20	27.14	112.13	139.27

ราคาไฟ 1 หน่วย เท่ากับ 4.6 บาท, 1 เดือน เท่ากับ 30 วัน, ราคาผลผลิตแห้ง เท่ากับ 120 บาทต่อกิโลกรัม อ้างอิงจาก Thai publica (2021); T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลอง พบว่า การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้ระบบอกริวอลเทอิกส์โดยใช้หลังคาโตะปลูกแตกต่างกันส่งผลต่อการเจริญเติบโต ปริมาณและคุณภาพผลผลิต รวมถึงผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ โดยการปลูกฟ้าทะลายโจรในพื้นที่โล่งแจ้งมีความเข้มแสง ปริมาณแสงที่ได้รับสูงที่สุด ส่งผลให้มีปริมาณแคโรทีนอยด์ สารประกอบฟีนอลิก และฟลาโวนอยด์สูงที่สุด ขณะที่การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra ส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์รวมสูงที่สุด และการปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra ส่งผลให้มีการเจริญเติบโต ปริมาณผลผลิตสดส่วนเหนือดิน ผลผลิตแห้งส่วนเหนือดิน และปริมาณแลคโตนรวมสูงที่สุด นอกจากนี้ยังให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจรวมจากผลผลิตพืชและพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด ในขณะที่การปลูกฟ้าทะลายโจรในพื้นที่โล่งแจ้งและหลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra ซึ่งไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ให้ผลตอบแทนต่ำที่สุด

ดังนั้น การปลูกฟ้าทะลายโจรภายใต้ระบบอกริวอลเทอิกส์ โดยใช้หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra มีศักยภาพสูงในการเพิ่มทั้งปริมาณผลผลิต คุณภาพ และความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปลูกพืชภายใต้โรงเรือนได้ต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การใช้แผงโซลาร์เซลล์แบบโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra อาจจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเพิ่มความเข้มแสงในช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปลูกฟ้าทะลายโจร เพื่อให้ได้ทั้งปริมาณผลผลิตและคุณภาพผลผลิต
2. การทดลองนี้เป็นการปลูกภายใต้โตะปลูกที่มีหลังคาเป็นแผงโซลาร์เซลล์ Agri-PV โดยสามารถนำแผงโซลาร์เซลล์ Agri-PV ไปพัฒนาเป็นหลังคาของโรงเรือนหรือเป็นพัฒนาเป็น Solar

farm ที่มีการปลูกพืชได้แผงโซลาร์เซลล์ดังกล่าวในพื้นที่กว้าง ซึ่งสามารถผลิตได้ทั้งพืชและกระแสไฟฟ้าได้ในพื้นที่เดียวกันเพื่อเป็นการใช้พื้นที่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด



รายการอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. คู่มือการพัฒนาที่ดินสำหรับหมอดินอาสาและเกษตรกร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 236 หน้า.
- กรมวิชาการเกษตร. 2564. คู่มือสำหรับเกษตรกร การผลิตฟ้าทะลายโจร. กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.
- กาญจน์เจริญ ศรีอ่อน, ธรรมศักดิ์ ทองเกตุ, อติยศสา เพ็ชรสุข, ดวงฤทัย ศรีนุ่น, และ ดวงพร ศิริกิตติกุล. 2565. ผลของฟิล์มคลุมโรงเรือนมัลติฟังก์ชันต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของ ผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คและพันธุ์เรดโอ๊ค. วารสารเกษตร, 38(1), 107–120.
- จรัญ ดิษฐไชยวงศ์ เสี่ยงยม แจ่มจำรูญ ทิเรก ตนพะยอม มัลลิกำ แสงเพชร สัจจะ ประสงค์ทรัพย์ จิตาภา สุภาพร แสงมณี ชิงดวง ไกรศร ดำวงศ์ สมพร วนะสิทธิ์ เตือนใจ พุดชัง พุฒนา รุ่งระวี วาสนา โตเลียง และสุวิทย์ ชัยเกียรติยศ. 2554. วิจัยและพัฒนาการผลิต ฟ้าทะลายโจรเพื่อเพิ่มผลผลิตและคุณภาพ. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.
- จิราพร เหล่าบุราณ. 2564. การวิเคราะห์สารพิษจากเชื้อราเบื้องต้นจากสารสกัดเห็บพิษสกุลผักแขยง (*Limnophila* R.Br.). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- ณพัชร บัวฉวน และผกามาศย์ ชูเสน. 2562.ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิกรวมจากใบ ชายา. วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 14(1): 133-143
- ทวีผล เดชาติวงศ์ ณ อยุธยา ประนอม เดชวิศิษฐ์สกุล เย็นจิตร เตชะดำรงสิน จารีย์ บันสิทธิ์ และ อัญชลี จูฑะพุทธิ. 2542. มาตรฐานสมุนไพรไทย ฟ้าทะลายโจร. สถาบันวิจัยสมุนไพร กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. นนทบุรี. 63 หน้า.
- ธนากร น้ำหอมจันทร์. 2562. โรงงานผลิตพืช (Plant factory). วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 13(2): 46-62.
- นางลักษณ์ ห้วยหงษ์ทอง. 2559. การทดสอบสารพิษเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพของสมุนไพรไทยบาง ชนิดที่ใช้รักษาโรคเบาหวาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- นภัทร วัจนเทพินทร์ และไชยยันต์ บุญมี. 2560. ไดโอดเปล่งแสงสีอะไรเหมาะสมกับการปลูกพืช. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 25(1): 158-176.
- บุหรัน พันธุ์สวรรค์. 2556. อนุมูลอิสระสารต้านอนุมูลอิสระและการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 21(3): 275-286.

- ปฏิวดี อ่อนพุทธา. 2566. “Agrivoltaic” นวัตกรรมการทำเกษตรร่วมกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์. แหล่งที่มา: <https://www.nstda.or.th/sci2pub/agrivoltaic/>, 29 กันยายน 2568.
- ปริยรัตน์ โยวะผุย. 2562. ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้านจุลชีพ และความเป็นพิษต่อเซลล์ของสารสกัดหยาบพอลิแซ็กคาไรด์จากเห็ด *Phellinus* spp. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- พรอนันต์ บุญก่อน และหฤทัย ไทยสุชาติ. 2561. การใช้แสงอัลตราไวโอเลตเพื่อกระตุ้นความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและสารต้านอนุมูลอิสระบางชนิดในต้นอ่อนทานตะวัน. วารสารแก่นเกษตร. 46(1): 1248-1253.
- พัชรี ประทุมแย้ม กริยาภา หลายรุ่งเรือง ปิยะนุช ทิมคร สฐิตา โอภาสี และสรวิใจ แสงวิเชียร. 2566. การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิกรวมของตำรับยาปลูกไฟธาตุ. วารสารหมอยาไทยวิชัย. 9(1): 13-27.
- พิมพ์พร โกพล. 2564. การศึกษาการจำลองเปรียบเทียบโครงการพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แผงประเภทรับแสงสองด้านด้วยระบบติดตามแสงอาทิตย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภาวิณี อารีศรีสม นรินทร์ ท้าวแก่นจันทร์ รุ่งทิพย์ กาวารี เทิดศักดิ์ โทณลักษณ์ และกอบลาภ อารีศรีสม. 2561. ผลของการพรางแสงระหว่างการเพาะปลูกต่อปริมาณคลอโรฟิลล์และสาร 2-Acetyl-1-Pyrroline ของใบเตยหอม. วารสารเกษตร. 34(3): 353 -362
- ระวีวรรณ แก้วอมตวงศ์ และทรงพร จึงมั่นคง. 2549. ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH และปริมาณสารฟีนอลรวมของสารสกัดพืชสมุนไพรไทยบางชนิด. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 8(2): 76 -86.
- รัญธิญา เอียดเอก. 2563. การจัดการระบบการผลิตผักกูดเพื่อการค้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ร่ำพิง โพธิ์ศรี. 2560. การศึกษาทางเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพของแฉง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ลือชัย บุตุคุป. 2554. สารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ทางชีวภาพ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 31(4): 443-455.
- วันดี กฤษณพันธ์. 2544 พฤษเคมีเบื้องต้น นพมาศ สมุทรเจริญนทร์ เกสัชวินิจชัย ยาและผลิตภัณฑ์ธรรมชาติเล่มที่ 1. แสงเทียนการพิมพ์. กรุงเทพฯ. 34-120.

- ศรัณภรณ์ งามล้วน. 2563. การศึกษาองค์ประกอบทางพฤกษเคมีและสารต้านอนุมูลอิสระของพืชสมุนไพรแก้แหวงเจ็ดชั้นในจังหวัดศรีสะเกษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ศิริพงษ์ สุกดี. 2565. การพัฒนาสูตรอาหารสำหรับการผลิตเห็ดยามาบูชิตาเกะ (*Hericium erinaceus*). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ศุภชาติ ธรรมนิติเวทย์. 2562. การสกัดสารสีจากใบพืชสำหรับใช้ในการศึกษาทางสรีรวิทยาของพืช. เกษตรนเรศวร. 16(1): 73-81.
- ศุภธิดา อับดุลลาฮาซิม บรรพต แซ่ไคว้ และธรรมศักดิ์ ทองเกตุ. 2565. ผลของแสงต่อการเจริญเติบโตและการออกดอกของต้นซีโอะที่ปลูกในระบบปิด. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร และ การจัดการ. 55(3): 220-235.
- ศุภวรรณ บุญระเทพ. 2549. การผลิตสารทุติยภูมิโดยวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชและเทคโนโลยีชีวภาพ. วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์การแพทย์. 20(2): 185-196.
- สถาบันการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรมเกษตร. 2568. ปลูก “ฟ้าทะลายโจรสายพันธุ์ใหม่” สารสำคัญสูง ผลผลิตมาก รายได้งาม. แหล่งที่มา: <https://www.nstda.or.th/agritec/andrographis/>, 15 สิงหาคม 2568.
- สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดอ่างทอง. 2563. ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช. สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. https://www.opsmoac.go.th/angthong-article_prov-preview-421891791858, 15 สิงหาคม 2568.
- สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า. 2568. สถานการณ์สินค้าสมุนไพรและผลิตภัณฑ์. กระทรวงพาณิชย์. สถานการณ์สินค้าสมุนไพรและผลิตภัณฑ์.
- แสงมณี ชิงดวง สุวรินทร์ บำรุงสุข และสุนิตรา คามิศักดิ์. 2553. วิธีการเก็บรักษาฟ้าทะลายโจรหลังการเก็บเกี่ยว. หน้า 757-760. ใน: การประชุมวิชาการพืชสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 9. วันที่ 11-14 พฤษภาคม 2553. พระนครศรีอยุธยา.
- องค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน (GIZ). (2567). ข้อเสนอแนะด้านนโยบายและกฎระเบียบเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ที่ดินร่วมกันระหว่างเกษตรกรและการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย. วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร. https://caseforsea.org/th/post_knowledge/th-recommended-policies-agrivoltaics-thailand/.
- อรัญญา จุติวิบูลย์สุข. 2556. การใช้สารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติในการป้องกันผิวหนังจากการถูกทำลายโดยรังสีอัลตราไวโอเล็ต. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 5(10): 110-127.

- โอภาส วงศ์ทางประเสริฐ. 2558. การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของดิน: กรณีศึกษาพื้นที่
เพาะปลูกข้าวในจังหวัดฉะเชิงเทรา และชลบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต,
มหาวิทยาลัยบูรพา.
- Ahonen, T., Virrankoski, R. and Elmusrati, M. 2008. Greenhouse monitoring with wireless
sensor network. 403 - 408.
- Akbar, S. 2011. *Andrographis paniculata*: A review of pharmacological activities and
clinical effects. *Alternative Medicine Review*. 16(1): 66-77.
- Ali, M. B. 2014. Secondary metabolites and environmental stress in plants: biosynthesis,
regulation, and function, pp 55-85. *In*: P. Ahmad and R. M. Wani, *Physiological
Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants under Changing Environment*:
Volume 2. Springer, New York.
- Alinejad, T., Yaghoubi, M. and Vadiiee, A. 2020. Thermo-environmental assessment of an
integrated greenhouse with an adjustable solar photovoltaic blind system.
Renewable Energy. 156: 1-13.
- Aromdee, C., Wichitchoye, P. and Jantakun, N. 2005. Spectrophotometric
determination of total lactones in *Andrographis paniculata* Nees.
Songklanakarin Journal of Science and Technology. 27(6): 1227-1231.
- Askins, S., Vallerotto, G., Victoria, M., Herrero, R., Dominguez, C., Anton, I. and Sala, G.
2016. A manufacturable achromatic Fresnel lens for CPV. *In*: 2016 IEEE 43rd
Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). 05-10 June 2016. Portland, Oregon,
United States of America. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Beacker, C. 2014. Impact of radiation, temperature and growth stage on the
concentration of flavonoid glycosides and caffeic derivatives in red leaf lettuce.
Doctoral Dissertation. Technical University of Berlin, Germany.
- Carrillo-Martinez, E.J., Flores-Hernández, F. Y., Salazar-Montes, A. M., Nario-Chaidez, H.
F. and Hernández-Ortega, L.D. 2023. Quercetin, a Flavonoid with Great
Pharmacological Capacity. *Molecules*. 29(5): 1000.
- Center for Study of Science, Technology and Policy [CSTEP]. 2024. Integrated value
chain approach for agrivoltaic systems, India. Integrated Value Chain Approach
for Agrivoltaic Systems.

- Chae, S.H., Kim, H.J., Moon, H.W., Kim, Y.H. and Ku, K.M. 2022. Agrivoltaic systems enhance farmers' profits through broccoli visual quality and electricity production without dramatic changes in yield, antioxidant capacity, and glucosinolates. *Agronomy*. 12(6): 1415.
- Chimres, N., and Wongwises, S. 2016. Critical review of the current status of solar energy in Thailand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 58: 198–207.
- Chutimanukul, P., Wanichananan, P., Janta, S., Toojinda, T., Clive, D. and Kriengkrai, M. 2022. The influence of different light spectra on physiological responses, antioxidant capacity and chemical compositions in two holy basil cultivars. *Scientific Reports*. 12: 588.
- Colantoni, A., Monarca, D., Marucci, A., Cecchini, M., Zambon, I., Di Battista, F. and Beruto, M., 2018. Solar radiation distribution inside a greenhouse prototypal with photovoltaic mobile plant and effects on flower growth. *Sustainability*. 10(3): 855.
- Cunha, L.C.M. Monteiro, M.L.G., Lorenzo, J.M., Munekata, P.E.S., Muchenje, V., Carvalho, F.A.L. and Conte-Junior, C.A. 2018. Natural antioxidants in processing and storage stability of sheep and goat meat products. *Food Research International*. 111: 379–390.
- Dal Prà, A., Genesio, L., Miglietta, F., Carotenuto, F., Baronti, S., Moriondo, M., Greco, A., Morè, N., Svanera, L. and Reboldi, A. 2024. Salad Yields Under Agrivoltaics: A Field Test. *In: The 2nd AgriVoltaics World Conference 2023*. 23 May 2024. Jae Hak Jung, Yeungnam University, Republic of Korea.
- Detpiratmongkol, S. and Liphan, S. 2018. Effects of different harvesting times on growth, yield and quality of Kalmegh (*Andrographis paniculata* Wall Ex. Nees). *International Journal of Agricultural Technology*. 14(7): 1161-1170.
- Edi, P., Samanhudi, S., and Sudarmi, S. 2011. Studies of shading levels and nutrition sources on growth, yield and andrographolide content of Sambiloto (*Andrographis paniculata* Ness). *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*. 33(3): 300-306.

- Edouard, S., Combes, D., Iseghem, M, V., Wing Tin, M, Ng., and Escobar-Gutiérrez, A. J. 2023. Increasing land productivity with Agriphotovoltaics: Application to an alfalfa field. *Applied Energy*. 329: 120207.
- Ev power energy. 2024. ทำความรู้จัก แผงโซลาร์เซลล์ (Solar Panel). แหล่งที่มา: <https://evpowerenergy.com/-solar-panel>, 19 ตุลาคม 2568.
- Evans, M.E., Langley, J.A., Shapiro, F.R. and Jones, G.F. 2022. A validated model, scalability, and plant growth result for an agrivoltaic greenhouse. *Sustainability*. 14(10): 6154.
- Friman-Peretz, M., Ozer, S., Geoola, F., Magadley, E., Yehia, I., Levi, A., Brikman, R., Gantz, S., Levy, A., Kacira, M. and Teitel, M. 2020. Microclimate and crop performance in a tunnel greenhouse shaded by organic photovoltaic modules comparison with conventional shaded and unshaded tunnels. *Biosystems Engineering*. 197: 12-31.
- Gajbhiye, N.A. and Khristi, S. 2010. Distribution pattern of andrographolide and totallactones in different parts of Kalmegh plant. *Indian Journal of Horticulture*. 67(4): 591-593.
- Ghasemzadeh, A., Jaafar, HZ., Rahmat, A., Wahab, PE. and Halim, MR. 2010. Effect of different light intensities on total phenolics and flavonoids synthesis and antioxidant activities in young ginger varieties (*Zingiber officinale* Roscoe). *International Journal Molecular Science*. 11(10): 3885-3897.
- Gorjian, S., Bous, E., Özdemir, Ö.E., Trommsdorff, M., Kumar, N.M., Anand. A., Kant, K., Chopra, S.S. 2022. Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 158: 112126.
- Hassanien, R.H.E., Li, M., and Yin, F. 2018. The integration of semi-transparent photovoltaics on greenhouse roofs for energy and plant production. *Renewable Energy*. 121: 377-88.
- Hickey, T., Uchanski, M., and Bousselot, J. 2024. Vegetable crop growth under photovoltaic (PV) modules of varying transparencies. *Heliyon*. 10(16): e36058.

- Himbindu, T., Hariprasad, Rao. N., Satyanarayana, Reddy. G. and Sastry, K.P. 2017. Effect of time of planting and harvesting on growth, herbage yield and andrographolide content in kalmegh (*Andrographis paniculata* Nees.). Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences. 6(10): 46-49.
- Hörtensteiner, S. and Kräutler, B. 2011. Chlorophyll breakdown in higher plants. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics. 1807(8): 977-988.
- Huang, J., Liu, X., Yang, Q., Lei, B., Zheng, Y., Bian, Z., Wang, S., Li, W., Mao, P. and Xu, Y. 2022. UVA enhanced promotive effects of blue light on the antioxidant capacity and anthocyanin biosynthesis of Pak Choi. Horticulturae. 8: 850.
- Idris, A., Linatoc, A., Muhammad, S.M., Aliyu, A.M. and Abu-Bakar, M.F. 2018. Effect of light intensity on the total flavonoid and total phenolic contents of *Mikania micrantha* and *Tridax procumbens*. Journal of Science and Technology. 10: 1- 7.
- Intharuksa, A., Arunotayanun, W., Yoo-in, W., and Sirisa-ard, P. 2022. A comprehensive review of *Andrographis paniculata* (Burm. f.) Nees and its constituents as potential lead compounds for COVID-19 drug discovery. Molecules. 27(14): 4479.
- Jäger-Waldau, A. 2018. Snapshot of photovoltaics–February 2018. EPJ Photovoltaics 9(6): 1–6.
- Katsikogiannis, O. A., Ziar, H. and Isabella, O. 2022. Integration of bifacial photovoltaics in agrivoltaic systems: a synergistic design approach. Applied Energy. 309: 118475.
- Kumar, R. N., Chakraborty, S. and Kumar, J. I. N. 2009. Effect of light stress on peroxidase, succinate dehydrogenase and total chlorophyll content in *Andrographis paniculata*. Asian Journal of Environmental Science. 4(1): 34-38.
- Kumar, S. 2014. The Importance of antioxidants and their role in pharmaceutical science-A Review. Asian Journal of Research in Chemistry and Pharmaceutical Sciences. 1(1): 27-44.

- Kumar, S. and Kumar, A. 2013. Spatial and harvesting influence on growth, yield, quality, and economic potential of Kalmegh (*Andrographis paniculata* Wall Ex. Nees). Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics. 114(1): 69–76.
- Kumpanalaisatit, M., Settapan, W., Sintuya, H. and Jansri, S.N., 2022a. Efficiency improvement of grounded-mounted solar power generation in agrivoltaic system by cultivation of Bok Choy (*Brassica rapa* subsp. *Chinensis* L.) under the panels. International Journal of Renewable Energy Development. 11(1): 103–110.
- Kumpanalaisatit, M., Setthapun, W., Sintuya, H., Pattiya, A. and Jansri, S.N. 2022b. Current status of agrivoltaic systems and their benefits to energy, food, environment, economy, and society. Sustainable Production and Consumption. 33: 952–963.
- Li, H., Tang, C., Xu, Z., Liu, X. and Han, X. 2012. Effects of different light sources on the growth of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.). Journal of Agricultural Science. 4(4): 262–270.
- Li, Y., Zheng, Y., Zheng, D., Zhang, Y., Song, Sh., Su, W. and Liu, Ho. 2020. Effects of supplementary blue and UV-A LED lights on morphology and phytochemicals of *Brassicaceae* Baby-Leaves. Molecules. 25(23): 5678.
- Liphan, P., and Detpiratmongkol, S. 2017. Influence of Different Shading Levels on Growth and Yield of Kalmegh, *Andrographis paniculata* Burm. F. (Nees). International Journal of Agricultural Technology. 13(1): 79–89.
- Liphan, S. and Detpiratmongkol, S. 2019. Response of kalmegh (*Andrographis paniculata* (Burm. F.) Nees) to shading at different growth stages. Plant Archives. 19(2): 2093–2098.
- Liphan, S., and Detpiratmongkol, S. 2020. Influence of shading levels on growth, yield and andrographolide content of kalmegh. Plant Archives. 20(1): 1349–1354.
- Maia, A. S. C., de Andrade, C. E., Fonsêca, V. D. F. C., Milan, H. F. M., Gebremedhin, K. G., 2020. Photovoltaic panels as shade resources for livestock. Journal of Cleaner Production. 258: 120551.

- Malu, P.R., Sharma, U.S., and Pearce, J.M., 2017. Agrivoltaic potential on grape farms in India. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 23: 104–110.
- Marrou, H., Guilioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., and Wéry, J., 2013a. Microclimate under agrivoltaic systems: is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*. 177: 117–132.
- Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., and Dupraz, C. 2013b. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy*. 44: 54–66.
- Mason P. 2011. *Dietary Supplements* (4th ed.). Pharmaceutical Press.
- Masson, G., Detollenaere, A., Kaizuka, I., Jäger-Waldau, A. and Donoso, J. 2021. Snapshot of Global PV Markets 2021 Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach PVPS. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04>.
- Müller, D. and O. Leyse. 2011. Auxin, cytokinin and the control of shoot branching. *Annals of Botany*, 107(7): 1203-1212.
- Nagashima, S., Tábara, L. C., Tilokani, L., Paupe, V., Anand, H., Joe, H. Pogson, J. H., Zunino, R., McBride, H. M. and Prudent, J. 2020. Golgi-derived PI (4) P-containing vesicles drive late steps of mitochondrial division. *Science*. 367(6484): 1366- 1371.
- Nechyporenko, Dima. V. 2024. ELEVATED SOLAR STRUCTURES & ENVIRONMENTAL EFFECTS. Source: <https://www.linkedin.com/pulse/elevated-solar-structures-dima-nechyporenko-s3acc/>, 1 October 2024.
- Niranjan, A., Tewari, S. K., and Lehri, A. 2010. Biological activities of Kalmegh (*Andrographis paniculata* Nees) and its active principles-A review. *Indian Journal of Natural Products and Resources*. 1(2): 125-135.
- Omar, N. F., Hassan, S. A., Ramlan, M. F., Wahab, P. E. M., and Abdullah, M. P. 2016. Growth and phytochemical responses of *Andrographis paniculata* as influenced by different shade levels and pruning. *Journal of Tropical Plant Physiology*. 8: 61–69.
- Optraffic. 2024. Maximize Solar Power Through Adjustable Solar Panel Mounts. Source: <https://optraffic.com/blog/solar-power-adjustable-solar-panelmounts/Description.>, 1 October 2024.

- Paschko, K., Grabovac, N., Pinker, I. and Böhme, M.H. 2023. Effect of light intensity and spectra on inorganic constituents in Vietnamese coriander (*Persicaria odorata* (Lour.) Soják). *Horticulturae*. 9: 548.
- Pennisi, G., Orsini, F., Landolfo, M., Pistillo, A., Crepaldi, A., Nicola, S., Fernández, J.A., Marcelis, L.F.M. and Gianquinto, G. 2020. Optimal photo period for indoor cultivation of leafy vegetables and herbs. *European Journal of Horticultural Science*. 85(5): 329-338
- Pictrue This. 2024. ฟ้ายะลวยโจร ต้องการแสงแดดมากแค่ไหน?. แหล่งที่มา: https://www.picturethisai.com/th/care/sunlight/Andrographis_paniculata.html, 15 สิงหาคม 2568.
- Pringle, A.M., Handler, R.M. and Pearce, J.M., 2017. Aquavoltaics: synergies for dual use of water area for solar photovoltaic electricity generation and aquaculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 80: 572–584.
- Purwanto, E., Samanhudi, S. and Sudarmi, S. 2011. Studies of shading levels and nutrition sources on growth, yield and andrographolide content of Sambiloto (*Andrographis paniculata* Ness). *Agrivita*, 33(3): 300-306.
- Rabie, R., Emam, M., Elwardany, A., Ookawara, S. and Ahmed, M. 2021. Performance evaluation of concentrator photovoltaic systems integrated with combined passive cooling techniques. *Solar Energy*. 228: 447–463.
- Ramalho, J. C., Marques, N. C., Semedo, J. N., Matos, M. C. and Quartin, V. L. 2001. Photosynthetic performance and pigment composition of leaves from two tropical species is determined by light quality. *Plant Biology*. 4(1): 112-120.
- Ravi, S., Macknick, J., Lobell, D., Field, C., Ganesan, K., Jain, R. and Stoltenberg, B. 2016. Colocation opportunities for large solar infrastructures and agriculture in drylands. *Applied Energy*. 165: 383–392.
- Ravishankar, E., Esh, S., Rozenstein, O., Vitoshkin, H., Kribus, A., Mittelman, G., Jakhar S. and Hernandez, R. 2024. Improved land use efficiency through spectral beam splitting in agrivoltaic farms. In: The 2nd AgriVoltaics World Conference 2023. 23 May 2024. Jae Hak Jung, Yeungnam University, Republic of Korea.

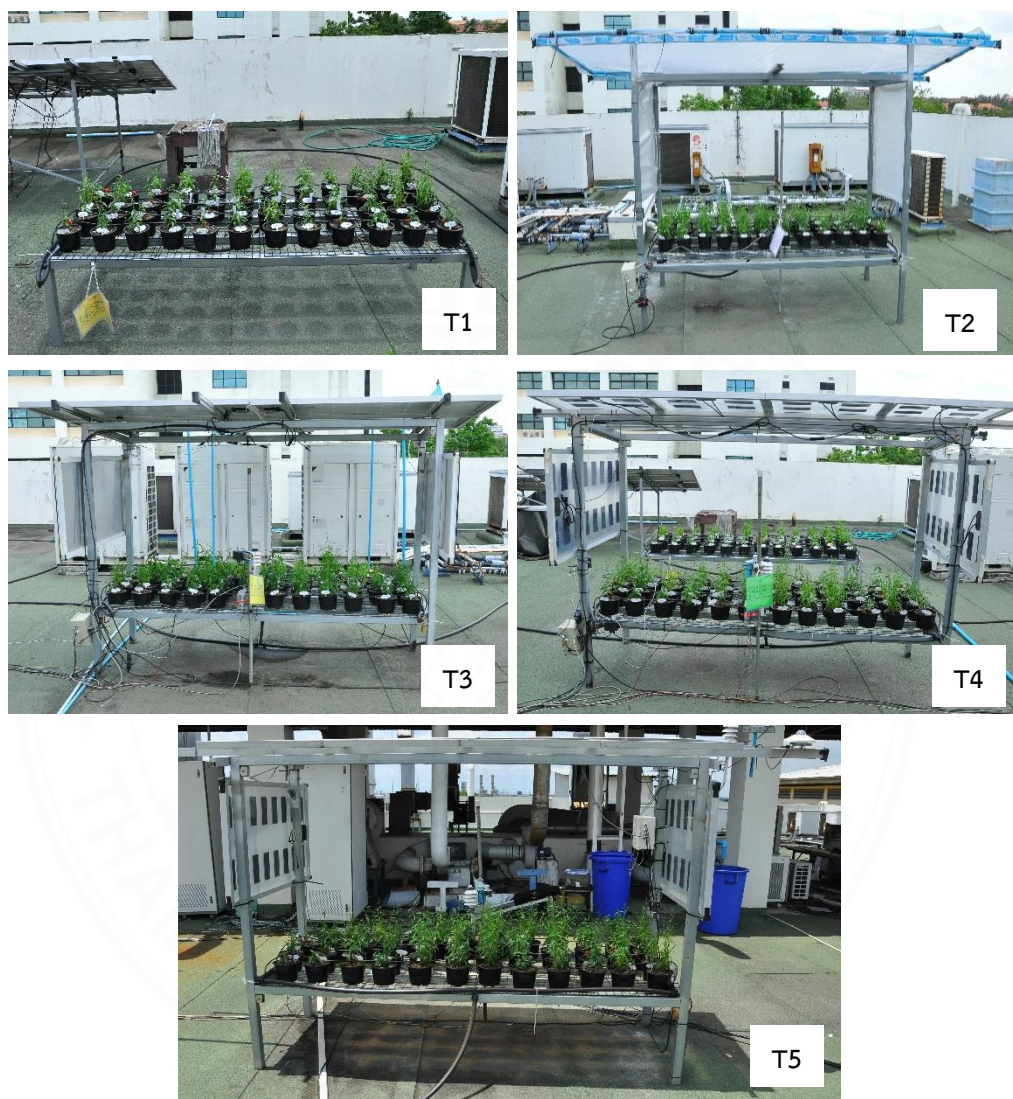
- Rezai, S., Etemadi, N., Nikbakht, A., Yousefi, M. and Majidi, M. M. 2017. Effect of light intensity on leaf morphology, photosynthetic capacity, and chlorophyll content in Sage (*Salvia officinalis* L.). Horticultural Science and Technology. 36(1): 46-57.
- Scarano, A., Semeraro, T., Calisi, A., Aretano, R., Rotolo, C., Lenucci, M.S., Santino, A., Piro, G., and De Caroli, M. 2024. Effects of the agrivoltaic system on crop production: The Case of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.). Applied Sciences. 14: 3095.
- Shah, K., Trivedi, P., and Shivprakash, P. K. 2007. Spectrophotometric determination of andrographolides in *Andrographis paniculata* Nees and its formulation. Indian Journal of Pharmaceutical Sciences. 69(3): 457-458.
- Steffan. 2023. Unveiling the Power of Adjustable Solar Panel Mount Systems. Source: <https://pv-mounts.com/unveiling-the-power-of-adjustable-solar-panel-mount-systems/20applications/>, 1 October 2024.
- Sun, D., Wu, S., Li, X., Ge, B., Zhou Ch., Yan, X., Ruan, R. and Cheng, P. 2024. The structure, functions and potential medicinal effects of chlorophylls derived from microalgae. Marine Drugs. 22(2): 65
- Swiatek, M., Lu Y.-C., Konefał, R., Ferreira, L. P., Cruz, M. M., Ma, Y.-H., and Horák, D. 2019. Scavenging of reactive oxygen species by phenolic compound-modified maghemite nanoparticles. Beilstein Journal of Nanotechnology. 10: 1073-1088.
- Tajidin, N. E., Shaari, K., Maulidiani, M., Salleh, N. S., Ketaren, B. R. and Mohamad, M. 2019. Metabolite profiling of *Andrographis paniculata* (Burm. f.) Nees. young and mature leaves at different harvest ages using ¹H NMR-based metabolomics approach. Scientific Reports. 9(1): 16766
- Tani, A., Shina, S., Nakashima, K. and Hayashi, M. 2014. Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels. Journal of Agricultural Meteorology. 70: 139-49.
- Thai publica. 2021. ‘ฟ้าทะลายโจร’ ราคาพุ่ง 2-3 เท่าตัว หวั่นเหตุวัตถุดิบขาดตลาด. แหล่งที่มา: <https://thaipublica.org/2021/07/andrographis-paniculata-covid-19/>, 22 พฤศจิกายน 2568.

- Wellburn, A.R. 1994. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolutions. *Journal of Plant Physiology* 144(3): 307-313.
- Wolff, X.Y., and Coltman, R.R. 1990. Productivity under shade in Hawaii of five crops grown as vegetables in the tropics. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 115(1): 175–181.
- wp. 2567. รูปแบบการติดตั้งแผง Solar Cell. Source: [https://cyp-engineering.com/2024/solar cell./](https://cyp-engineering.com/2024/solar-cell/), 1 October 2024.
- Wu, W., Wu, H., Liang, R., Huang, S., Meng, L., Zhang, M., Xie, F. and Zhu, H. 2025. Light regulates the synthesis and accumulation of plant secondary metabolites. *Frontiers in Plant Science*. 16:1644472.
- Zainol Abidin, M. A., Mahyuddin, M. N., and Mohd Zainuri, M. A. A. 2021. Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review. *Sustainability*. 13(14): 7846.
- Zhou, T., Wang, L., Li, S., Gao, Y., Du, Y., Zhao, L., Liu, W. and Yang, W. 2019. Interactions between light intensity and phosphorus nutrition affect the p uptake capacity of maize and soybean seedling in a low light intensity area. *Front. Plant Sci*. 10:183.
- Zhu, J., Liang, Y., Zhu, Y., Hao, W., Lin, X., Wu, X. and Luo, X. 2012. The interactive effects of water and fertilizer on photosynthetic capacity and yield in tomato plants. *Australian Journal of Crop Science*. 6(2): 200-209.



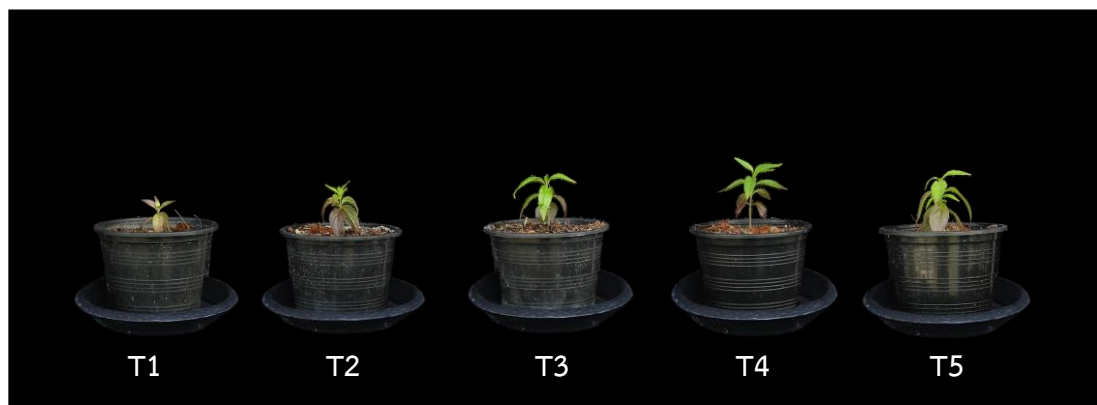
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ลักษณะของหลังคาโตะปลูกพืชหลายใจ

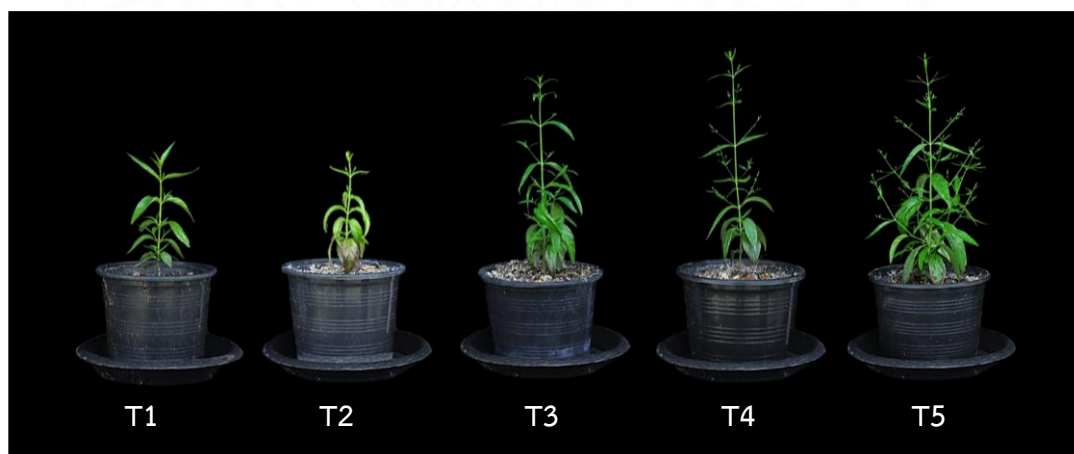


ภาพผนวกที่ ก.1 ลักษณะของหลังคาโตะปลูกพืชหลายใจ (T1: พื้นที่โล่งแจ้ง(Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบกึ่งโปร่งแสงร่วมกับฟิล์มพลาสติก MultiTech- Ultra)

ภาคผนวก ข
ลักษณะทางกายภาพของฟ้าทะลายโจร



ภาพผนวกที่ ข.1 ลักษณะทางกายภาพของฟ้าทะลายโจรที่ปลูกภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน ที่อายุ 30 วันหลังย้ายปลูก (T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบโปร่งแสง+ฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra)



ภาพผนวกที่ ข.2 ลักษณะทางกายภาพของฟ้าทะลายโจรที่ปลูกภายใต้หลังคาที่แตกต่างกัน ที่อายุ 60 วันหลังย้ายปลูก (T1: พื้นที่โล่งแจ้ง (Control), T2: หลังคาพลาสติก MultiTech-Ultra, T3: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบทึบแสง, T4: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบโปร่งแสง, T5: หลังคาแผงโซลาร์เซลล์แบบโปร่งแสง+ฟิล์มพลาสติก MultiTech-Ultra)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ชรินทร์ตน คงเอียด
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2566: วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีการเกษตร) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ทุนการศึกษา	ปีงบประมาณ 2566: ทุนบัณฑิตเรียนดีเพื่อศึกษาต่อระดับ บัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ตามสัญญา เลขที่ ทบ. 19/2566

ผลงานทางวิชาการ

ชรินทร์ตน คงเอียด อรประภา เทพศิลป์วิศุทธิ์ และทวีวัฒน์ กระจำงสังข์. 2568. ผลของการพัฒนาแผงโซลาร์เซลล์ Agri-PV ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของฟักทะเลลายโจรภายใต้ระบบภายใต้ระบบอกริวอลเทอิกส์. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 20 มหาวิทยาลัยศรีปทุม. วันที่ 30 กันยายน 2568. มหาวิทยาลัยศรีปทุม, กรุงเทพฯ. น. 3062-3072.

พัทตร์เพ็ญ ภูมิพันธ์ นัทธรา ทักษิณศรีณย์ บุชบา รุ่งน้อม จิระ มาตรทอง และ**ชรินทร์ตน คงเอียด**. 2566. ผลของเชื้อราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อบั๊กในโครงการเกษตรแปลงใหญ่ไบบั๊กกนิลเพชร อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม. ใน การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม ครั้งที่ 6 (NCST 6th 2023). วันที่ 14 มิถุนายน 2566. มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม, กรุงเทพฯ. น. C39-C47.

พัทตร์เพ็ญ ภูมิพันธ์ **ชรินทร์ตน คงเอียด** นาริรัตน์ ชัยชนะ และณิภัชญา จันทรด้วง. 2565. ผลของการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ร่วมกับเชื้อราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาต่อการเจริญเติบโตและปริมาณสารสำคัญในบั๊กพันธุ์นครปฐม. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 19. วันที่ 8-9 ธันวาคม 2565. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม. น. 2528-2539