การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตร : กรณีศึกษาการปลูกกระเจี๊ยบแดง

Performance Evaluation of Conventional PV and Colored PV (Red) Panels on Electricity Generation and Roselle Growth under an Agrivoltaics System

รุ่งเพชร ก่องนอก[1] ศศิวิมล ทรงไตร[2*], พีระวุฒิ ชินวรรังสี[3], สิริมงคล สังฆะวงศ์[2], สุพจน์ โสดารัตน์[3], นพดล นันทวงศ์[2], เกรียงไกร โมสาลียานนท์[4] และ กอบศักดิ์ ศรีประภา[2]

Rungphet Kongnok[1] Sasiwimon Songtrai[2*], Perawut Chinnavornrungsee[3], Sirimongkon Sangkhawong[3], Supoj Sodarat[3], Noppadon Nuntawong[2], Kriengkrai Mosaleeyanon[4] and Kobsak Sriprapha[2]

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000

[2]ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

[3]ศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

[4]ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

[1] Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000

[2]National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathum Thani, 12120

[3]National Energy Technology Center (ENTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathum Thani, 12120

[4]National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathum Thani, 12120

*Corresponding author: Tel.: 02-5647000 ext. 2718. E-mail address: sasiwimon.songtrai@nectec.or.th

Abstract

This study investigates the effects of different photovoltaic (PV) panel structures on plant growth under an agrivoltaics system, using roselle, an economically important crop, as a case study. The experiment was conducted at the National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), Pathum Thani, Thailand, over 30 days under two PV configurations: Conventional PV and Colored PV (Red). The results showed that the Conventional PV system generated a higher average electricity output of 84 kWh/day, compared with 40 kWh/day from the Colored PV (Red). However, both systems exhibited similar performance ratios (PR) of approximately 70%. Notably, the Colored PV (Red) transmittance (%TT) exceeded 55% for infrared light, and the system maintained a lower temperature, which enhanced light availability for photosynthesis. As a result, roselle grown under the Colored PV

(Red) panels exhibited superior crop quality, with an average inflorescence length of 57 cm and a fresh weight of 10 g, outperforming both field conditions and growth under Conventional PV. These findings suggest that although the Colored PV (Red) produces less electricity, it significantly supports plant growth and crop quality, demonstrating strong potential for agrivoltaics applications that balance energy generation, food security, and environmental sustainability.
Keywords: Photovoltaic, Solar Cell, Colored PV, Agrivoltaics System, Roselle

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของโครงสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันต่อการเจริญเติบโตของพืชภายใต้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตร (Agrivoltaics System) โดยใช้พืชเศรษฐกิจ คือ กระเจี๊ยบแดง เป็นกรณีศึกษา การดำเนินการทดลองที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ จังหวัดปทุมธานี เป็นระยะเวลา 30 วัน ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ชนิด คือ Conventional PV และ Colored PV (Red) พบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV มีปริมาณการผลิตไฟฟ้ามากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) แต่ค่า Performance Ratio (PR) ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 70% โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) สามารถส่งผ่านแสงในช่วง Infrared ได้มากกว่า 55% และมีอุณภูมิต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV ซึ่งทำให้ส่งผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืช เป็นผลให้กระเจี๊ยบแดงที่ปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) มีคุณภาพผลผลิตที่ดีกว่า โดยมีความยาวช่อดอกเฉลี่ย 57 cm และน้ำหนักเปียกประมาณ 10 g มากกว่าการปลูกแบบกลางแจ้งและการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV ดังนั้นถึงแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) จะผลิตไฟฟ้าได้น้อย แต่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและมีคุณภาพผลผลิตได้ดีกว่า จึงมีศักยภาพต่อการประยุกต์ใช้ในระบบ Agrivoltaics
คำสำคัญ: แผงเซลล์แสงอาทิตย์, ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตร, กระเจี๊ยบแดง, แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีสันสวยงาม

บทนำ

จากสถานะการณ์ในปัจจุบันความต้องการพลังงานและความมั่นคงทางอาหารที่มีแนวโน้วเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและเป็นสิ่งที่ทั่วโลกให้ความสำคัญ การพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคม โดยเฉพาะการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูง และสามารถตอบสนองความต้องการพลังงานได้อย่างยั่งยืน โดยเฉพาะในส่วนของการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas Emissions) และการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาด (Energy Transition) [1-2]

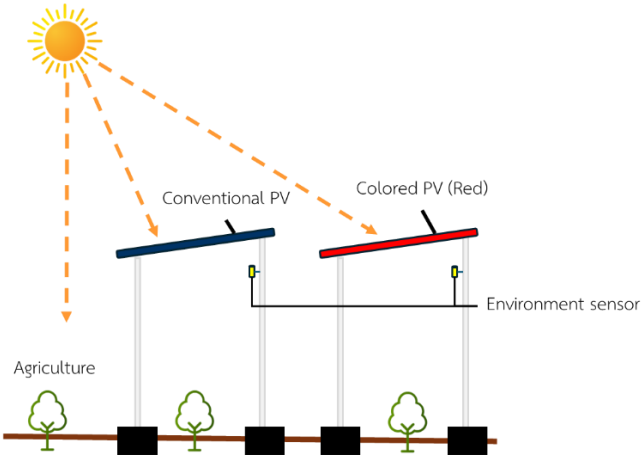
อย่างไรก็ตามการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่เกษตรกรรมมักก่อให้เกิดปัญหาการใช้ที่ดินระหว่างการผลิตพลังงานกับการเกษตร เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว แนวคิดระบบเกษตรร่วมกับการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Agrivoltaics System) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีเป้าหมายในการใช้พื้นที่ได้อย่างสมดุลทั้งในด้านการผลิตไฟฟ้าและการเกษตร และจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงเห็นถึงศักยภาพของระบบ Agrivoltaics อาทิเช่น การปลูกพืชภายใต้โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ที่ดิน (Land Equivalent Ratio, LER) ได้มากกว่าเมื่อเทียบกับการทำการเกษตรหรือการผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว [3] ขณะที่ผลกระทบจากเงาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

สามารถช่วยลดความเครียดจากอุณหภูมิและการสูญเสียน้ำของพืชได้ [4-6] อีกทั้งสามารถรักษาระดับผลผลิตให้ใกล้เคียงกับการเพาะปลูกกลางแจ้ง พร้อมกับการผลิตไฟฟ้าได้ควบคู่กัน [7] เป็นต้น และเมื่อพิจารณาคุณสมบัติแสงต่อการเจริญเติบโตของพืช ผลงานวิจัยมีระบุว่า แสงสีแดง (600 nm – 700 nm) มีความสำคัญต่อการยืดตัวของลำต้น และการกระตุ้นการออกดอก ในขณะที่แสงสีน้ำเงิน (400 nm – 500 nm) มีผลต่อการพัฒนาใบและการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ [8-10] แต่เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดังเดิม (Conventional PV) มีโครงสร้างทึบแสงมีผลให้ปริมาณแสงที่ผ่านลงสู่พื้นที่เพาะปลูกไม่เพียงพอ ทำให้ส่งผลกระทบต่อการสังเคราะห์แสงและการเจริญเติบโตของพืช เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ทางคณะวิจัยจึงมีแนวคิดในการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV ที่ได้พัฒนาขึ้น มาประยุกต์ใช้ในระบบ Agrivoltaics เนื่องจากแผงดังกล่าว มีคุณสมบัติโปร่งแสง และสามารถปรับแต่งการส่องผ่านสเปกตรัมแสงบางช่วงได้ ทำให้มีผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืช และสามารถเพิ่มผลผลิตได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้า

วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (ex-perimetral research) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของโครงสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันต่อการการเจริญเติบโตของพืชภายใต้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตร (Agrivoltaics System) โดยดำเนินการทดลองที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ จังหวัดปทุมธานี เป็นระยะเวลา 30 วัน ภายใต้สภาวะสิ่งแวดล้อมเดียวกัน โดยโครงสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV ที่มีโครงสร้างแผงประกอบด้วย Front (Glass)/Encapsulant/Solar Cell/ Encapsulant /Black sheet (Opaque) ขนาดกำลังการผลิตเท่ากับ 260 Wp พื้นที่แผงเท่ากับ 1.57 m^2 และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) ซึ่งมีโครงสร้าง Front (Glass)/Encapsulant/Solar Cell/ Encapsulant (Color) /Black sheet (Translucent) ขนาดกำลังการผลิตเท่ากับ 150 Wp พื้นที่แผงเท่ากับ 1.64 m^2 และจากภาพที่ 1 ภายใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ชนิดได้มีการปลูกพืชทดลองชนิดเดียวกัน คือ กระเจี๊ยบแดง ซึ่งเป็นพืชสมุนไพรและพืชเศรษฐกิจที่ท้องตลาดมีความต้องการค่อนข้างมาก เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลของโครงสร้างแผงต่อการเจริญเติบโตของพืชดังกล่าว

ในการเก็บข้อมูลในการทดลอง ประกอบด้วย ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบเซลล์แซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ค่าการส่องผ่านแสง อุณหภูมิ และ ปริมาณการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากกระบบ เป็นต้น และ ข้อมูลด้านการเจริญเติบโตของพืช เช่น ค่าความสูง จำนวนใบ ขนาดของดอก และน้ำหนักเปียก เป็นต้น โดยข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลองถูกบันทึกอย่างเป็นระบบและนำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพของระบบ Agrivoltaics ที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด



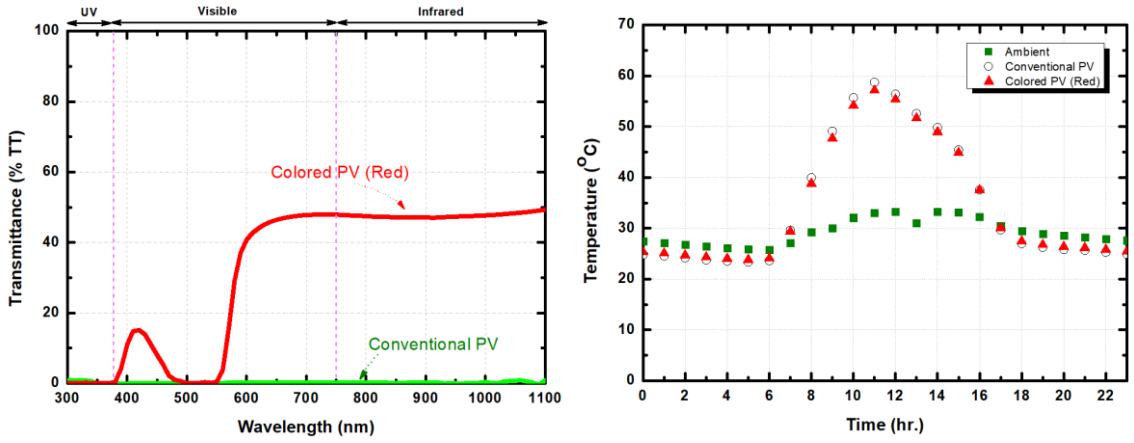
ภาพที่ 1 แบบจำลองของการทดสอบผลของโครงสร้างแผงต่อการเจริญเติบโตของพืช

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. ผลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

1.1 ผลของการส่องผ่านแสง และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากภาพที่ 2 (ก) ผลการศึกษาค่าการส่องแสง (Transmittance, %TT) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าในช่วงความยาวคลื่น 300 nm-1,100 nm แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV มีค่าการส่องผ่านแสงต่ำกว่า 5% ซึ่งเป็นผลมาจากแผ่นหลัง (Black Sheet) ที่มีความทึบแสงทำให้แสงไม่สามารถส่องผ่านได้ ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) มีค่าการส่งผ่านแสงสูงกว่า 55% ในช่วง Infrared (780 nm -1,100 nm) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) สามารถส่องผ่านแสงมายังพืชที่อยู่ด้านล่าง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช และในภาพที่ 2 (ข) ผลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิของแผง แสดงให้เห็นว่า ในช่วงเวลาประมาณ 12:00 น. ค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม มีค่าประมาณ 33 °C ในขณะที่อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Conventional PV อยู่ที่ประมาณ 57 °C และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) อยู่ที่ประมาณ 55 °C ซึ่งน้อยว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV แสดงให้เห็นว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) สามารถช่วยลดการสะสมความร้อนที่ด้านใต้แผงได้

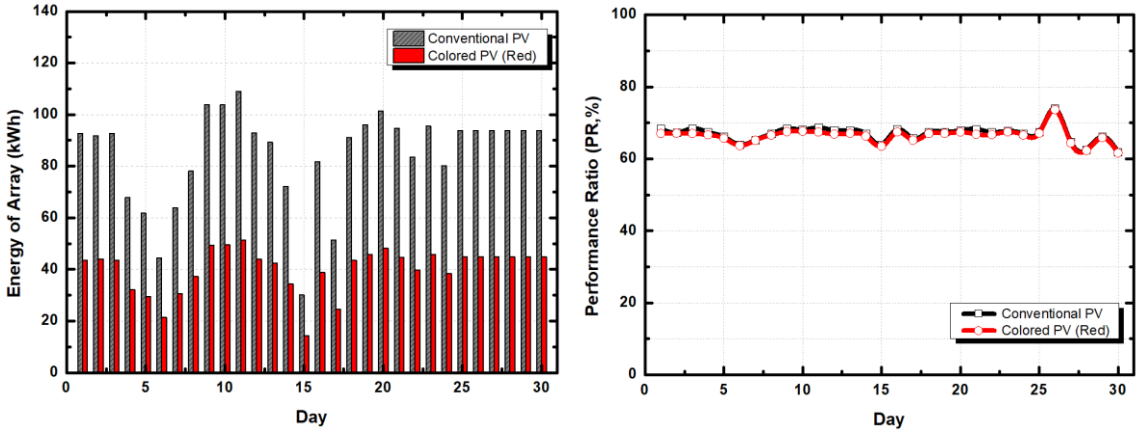


(ก) (ข)

ภาพที่ 2 (ก) ค่าการส่องแสง (Transmittance, %TT) และ (ข) ค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิของแผง

1.2 ผลของการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากการทดลองในช่วงระยะเวลา 30 วัน พบว่า ปริมาณการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV มีค่าเฉลี่ยประมาณ 84 kWh/day ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) มีค่าเฉลี่ยประมาณ 40 kWh/day โดยที่ค่า Performance Ratio (PR) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV มีค่าเฉลี่ยประมาณ 67% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 66% เป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเทียบเท่ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV ดังภาพที่ 3



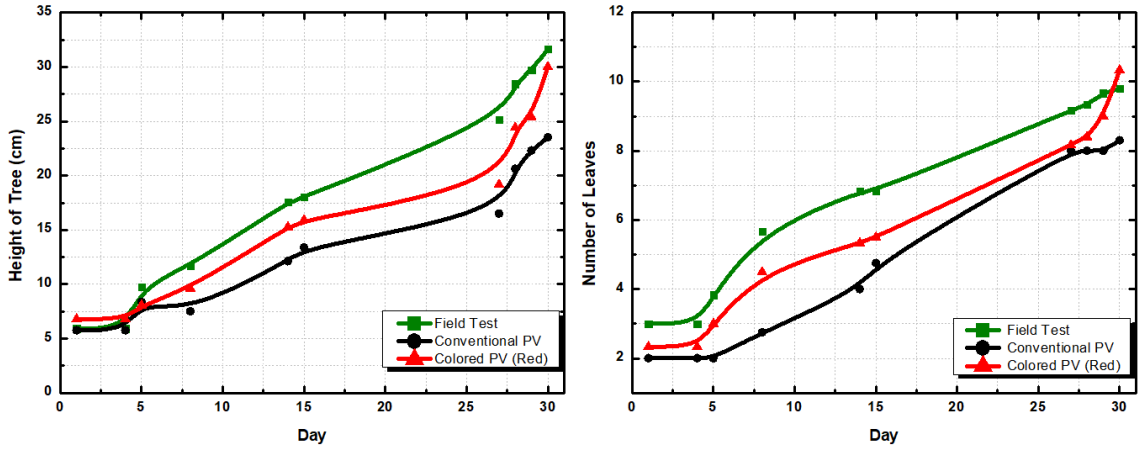
(ก) (ข)

ภาพที่ 3 (ก) ค่าปริมาณการผลิตไฟฟ้า และ (ข) ค่า Performance Ratio (PR) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2. ผลของการเจริญเติบโตของกระเจี๊ยบแดง

2.1 ผลอัตราการเจริญเติบโตของกระเจี๊ยบแดง

ผลการทดลองการเจริญเติบโตของกระเจี๊ยบแดงภายใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่างชนิด ในสภาวะการปลูกแบบกลางแจ้ง การปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV และชนิด Colored PV (Red) เป็นเวลา 30 วัน พบว่า จากภาพที่ 4 การปลูกกระเจี๊ยบแดงแบบกลางแจ้ง (Field Test) มีค่าความสูงมากที่สุด ซึ่งมีค่าประมาณ 33 cm รองมาเป็นการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) มีความสูงประมาณ 30 cm และการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV ที่มีความสูงประมาณ 24 cm ตามลำดับ ในขณะที่ผลของจำนวนใบ พบว่า การปลูกแบบกลางแจ้ง มีประมาณ 11 ใบ รองมาเป็นการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) ที่มีประมาณ 10 ใบ และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Conventional PV ที่มีประมาณ 8 ใบ ตามลำดับ ซึ่งจากผลความสูง และจำนวนใบ แสดงให้เห็นว่า การปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) ได้ผลดีกว่าการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV คาดว่าน่าจะมาจากคุณสมบัติในการส่งผ่านแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) ซึ่งทำให้พืชได้รับแสงที่เพียงพอและเหมาะสมจึงส่งผลทำให้มีการเจริญเติมโตได้ดี

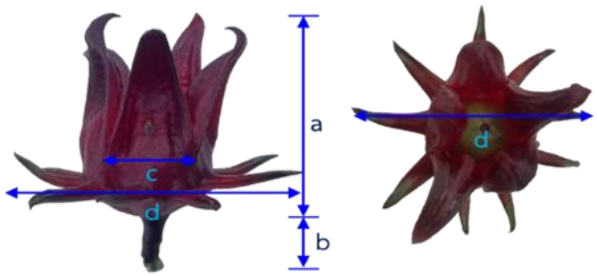


(ก) (ข)

ภาพที่ 4 (ก) ความสูงของต้น และ (ข) จำนวนใบของกระเจี๊ยบแดง

2.1 ผลลักษณะและคุณภาพของดอกกระเจี๊ยบแดง

ผลการวิเคราะห์ลักษณะของดอกระเจี๊ยบแดง พบว่า การปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) ให้ค่าความยาวช่อดอกยาวเฉลี่ย 57 cm และมีน้ำหนักเปียกเฉลี่ย 10 g เป็นค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกแบบกลางแจ้ง ที่มีค่าความยาวช่อดอกเฉลี่ย 52 cm และน้ำหนักเปียกเฉลี่ย 9 g และการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Conventional PV ที่มีค่าความยาวช่อดอกเฉลี่ย 54 cm และน้ำหนักเปียกเฉลี่ย 7 g ดังตารางที่ 1 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ลักษณะของดอกกระเจี๊ยบแดง แสดงให้เห็นว่าการปลูกกระเจี๊ยบแดงใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) ให้ดอกที่มีคุณลักษณะที่ดี คาดว่าเป็นผลมากจากมีคุณสมบัติการส่งผ่านแสงที่เหมาะสมต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ทำให้ส่งผลต่อคุณภาพของดอก และปริมาณของผลผลิตที่ได้



ภาพที่ 5 ลักษณะของกระเจี๊ยบแดง

ตารางที่ 3 ขนาดของส่วนประกอบของกระเจี๊ยบแดง

พื้นที่ปลูก	ค่าเฉลี่ยขนาดของดอกกระเจี๊ยบแดง (cm)					น้ำหนักเปียก
	ดอก [a]	ก้านดอก [b]	ช่อดอก [a+b]	กลีบเลี้ยงดอก [c]	ดอก [d]	(g)
Field Test	47.8	4.3	52.0	18.0	30.5	9.3
Colored PV (Red)	48.3	8.8	57.0	18.5	29.0	10.0
Conventional PV	44.5	9.5	54.0	15.8	25.5	7.4

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV และชนิด Colored PV (Red) ภายใต้ระบบ Agrivoltaics System โดยใช้พืชเศรษฐกิจ คือ กระเจี๊ยบแดงเป็นตัวอย่างทดลอง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันส่งผลทั้งต่อการผลิตไฟฟ้าและการเจริญเติบโตของพืชอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งพบว่า ในด้านคุณสมบัติทางการส่องผ่านแสงและอุณหภูมิ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) มีค่าการส่งผ่านแสงมากกว่า 55% ในช่วง 780 nm – 1,100 nm และสามารถช่วยลดอุณหภูมิใต้แผงได้ ในขณะที่ด้านการผลิตพลังงานไฟฟ้า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV มีปริมาณการผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย 84 kWh/day ซึ่งมากกว่ากว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) ที่มีค่าเฉลี่ย 40 kWh/day แต่ในขณะที่ค่า PR ของทั้ง 2 ระบบมีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 70% และส่วนด้านการเจริญเติบโตของพืช พบว่า การปลูกกลางแจ้งให้ความสูงและจำนวนใบมากที่สุด แต่ในการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) ให้คุณภาพดอกที่ดีกว่า โดยมีความยาวช่อดอกเฉลี่ย 57 cm และน้ำหนักเปียก 10 g ซึ่งมากกว่าการปลูกแบบกลางแจ้งและการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV แสดงให้เห็นว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) ถึงจะผลิตไฟฟ้าได้น้อยกว่า แต่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพผลผลิตของพืชได้มากกว่า ซึ่งเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระบบ Agrivoltaics ได้

เอกสารอ้างอิง

[1] O. Alšauskas, “World Energy Outlook 2024”.

[2] F. J. M. M. Nijsse et al., “The momentum of the solar energy transition,” Nat. Commun., vol. 14, no. 1, p. 6542, Oct. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-41971-7.

[3] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, and Y. Ferard, “Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes,” Renew. Energy, vol. 36, no. 10, pp. 2725–2732, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.renene.2011.03.005.

[4] H. Marrou, J. Wery, L. Dufour, and C. Dupraz, “Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels,” Eur. J. Agron., vol. 44, pp. 54–66, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.eja.2012.08.003.

[5] G. A. Barron-Gafford, R. L. Minor, N. A. Allen, A. D. Cronin, A. E. Brooks, and M. A. Pavao-Zuckerman, “The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures,” Sci. Rep., vol. 6, no. 1, p. 35070, Oct. 2016, doi: 10.1038/srep35070.

[6] A. Ali Abaker Omer et al., “Impacts of agrivoltaic systems on microclimate, water use efficiency, and crop yield: A systematic review,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 221, p. 115930, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.115930.

[7] C. De Francesco, L. Centorame, G. Toscano, and D. Duca, “Opportunities, Technological Challenges and Monitoring Approaches in Agrivoltaic Systems for Sustainable Management,” Sustainability, vol. 17, no. 2, p. 634, Jan. 2025, doi: 10.3390/su17020634.

[8] H. Dinesh and J. M. Pearce, “The potential of agrivoltaic systems,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 54, pp. 299–308, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.024.

[9] R. Paradiso et al., “Spectral dependence of photosynthesis and light absorptance in single leaves and canopy in rose,” Sci. Hortic., vol. 127, no. 4, pp. 548–554, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.scienta.2010.11.017.

[10] E. J. Stallknecht et al., “Designing plant–transparent agrivoltaics,” Sci. Rep., vol. 13, no. 1, p. 1903, Feb. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-28484-5.