

ไดโอดเปล่งแสง: การประยุกต์สู่การปลูกพืชยุคใหม่

Light emitting diode: Application to modern plant cultivation

นภัทร วัฒนเทพินทร์¹ ขนิษฐา วรรณคำ^{1*} พัฒนพงษ์ สินธุ์ไพฑูรย์²
และ ปกรณ์ สมบูรณ์กิจ¹

Napat Watjanatepin¹, Khanittha Wannakam^{1*}, Pattanapong Sinpaition²
and Pakorn Somboonkit¹

บทคัดย่อ

การเกษตรที่แม่นยำ (precision agricultural) เป็นการปลูกพืชยุคใหม่ที่ให้ผลผลิตจำนวนมาก มีคุณภาพสูงภายในพื้นที่จำกัดและใช้ทรัพยากรเท่าที่จำเป็น ผู้เขียนนำเสนอรูปแบบของการทำงานไดโอดเปล่งแสงในการปลูกพืชยุคใหม่ โดยการสังเคราะห์ข้อมูลจากบทความทางวิชาการในฐานข้อมูล ScienceDirect, TCI และข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตไดโอดเปล่งแสง ผลการศึกษาพบว่า แสงสีน้ำเงิน 430-450 นาโนเมตร เพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสง เพิ่มคลอโรฟิลล์ สนับสนุนการเจริญเติบโตและเพิ่มชีวมวลของพืช แสงสีแดงผสมกับแสงสีน้ำเงินที่มีสัดส่วนของแสงสีน้ำเงินที่มากกว่าหรือแสงสีน้ำเงินเพียงอย่างเดียว ช่วยเพิ่มปริมาณแอนโทไซยานิน แคโรทีนอยด์ และคลอโรฟิลล์ ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชดีขึ้น เหมาะสมที่จะนำไปใช้เพื่อเพาะต้นกล้าของพืชมากที่สุด แสงสีแดง 660 นาโนเมตร จะช่วยเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ ลูทีน ฟีนอลิก กระตุ้นการติดตาและการออกดอก เพื่อเร่งอัตราการเจริญเติบโต เพิ่มผลผลิตและมีประโยชน์อย่างมากต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช แสงอินฟราเรด 730 นาโนเมตร เหมาะสมที่จะนำไปใช้ร่วมกับแสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินในการผลิตพืชในระบบการปลูกพืชในอาคารสามารถนำมาเสริมให้พืชในช่วงการเจริญเติบโต เพื่อให้มีขนาดของใบขยายใหญ่ขึ้นซึ่งมีส่วนช่วยให้การสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้น แสงประดิษฐ์จากไดโอดเปล่งแสงมีความคุ้มค่า มีอายุการใช้งานยาวนานและมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นโฟตอนพลังงานสูงซึ่งช่วยเร่งการเจริญเติบโตของพืชได้ดี มีการประยุกต์ใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงในโรงเรือนกระจกสำหรับปลูกพืชผลด้วยการให้แสงด้านบนและด้านในต้นพืช สำหรับโรงงานผลิตพืชแสงประดิษฐ์และฟาร์มแนวตั้งที่ปลูกผักกินใบจะให้แสงด้านบน ไดโอดเปล่งแสงที่นิยมใช้มากที่สุดในการปลูกพืชยุคใหม่คือไดโอดเปล่งแสงสีแดง 630 นาโนเมตร และสีแดงเข้ม 660 นาโนเมตร สีน้ำเงิน 430 นาโนเมตรและสีน้ำเงินรอยัล 450 นาโนเมตร แสงอินฟราเรด 730 นาโนเมตร และแสงสีขาวที่อุณหภูมิสี 4000-5700 เคลวิน

คำสำคัญ: ไดโอดเปล่งแสง แสงอินฟราเรด แสงสีน้ำเงิน แสงสีแดง แสงสีขาว การสังเคราะห์ด้วยแสง การเจริญเติบโตของพืช การปลูกพืชยุคใหม่

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

¹ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

² คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

² Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

* Corresponding author. E-mail: khanittha.w@rmutsb.ac.th

Abstract

Precision agriculture is a new generation of crops that produce large, high-quality crops in limited spaces and use the resources as needed. The author presents a model of the use of light-emitting diodes in modern crops by synthesizing data from academic articles in the ScienceDirect and TCI databases, and data from light-emitting diode manufacturers. The results of the study found that 430-450 nm blue light enhances photosynthesis efficiency and growth, also increases chlorophyll and plant biomass. Red light mixed with blue light with a greater proportion of blue light, or blue light alone, increase anthocyanin, carotenoid and chlorophyll, improving the plant's photosynthetic rate. Therefore, it is most suitable to be used for cultivating seedlings of plants. 660 nm red light increases the amount of chlorophyll, lutein phenolic and yield, stimulates persistence and flowering to accelerate growth rate, which is highly beneficial for plant photosynthesis. 730 nm infrared light is suitable to be used in conjunction with red and blue lights in the production of plants in indoor horticulture systems. It can be supplemented during the growth phase of the plant to enlarge the leaf size, thereby contributing to increase photosynthesis. The artificial light from light-emitting diodes is cost-effective, long-lasting, and has a high efficiency of converting electrical energy into photon flux, which greatly accelerates plant growth. Light-emitting diode lamps are used in greenhouses for growing crops by illuminating the top and inside of the plants. In artificial lighting plants and vertical farms where leafy vegetables are grown, top lighting is provided. The most popular light-emitting diodes used in modern crops are 630 nm red light and 660 nm dark red light, 430 nm blue light and 450 nm royal blue light, 730 nm infrared light and white light at a color temperature of 4000-5700 K.

Keywords: light emitting diode, infrared light, blue light, red light, white light, photosynthesis, plant growth, modern plant cultivation

1. แสงที่พืชใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง

1.1 องค์ประกอบแสงที่ส่งผลต่อการปลูกพืช

แสงธรรมชาติที่มาจากดวงอาทิตย์ประกอบด้วยสเปกตรัมของแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 10 นาโนเมตร ถึง 1000 ไมโครเมตร แบ่งเป็น 3 ย่านคือ แสงอัลตราไวโอเล็ต (ultra violet, UV) เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 400 นาโนเมตร แสงสว่าง (visible light) เป็นแสงที่มีความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร และแสงอินฟราเรด (infrared) ที่มีความยาวคลื่นสูงกว่า 700 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาในช่วงแสงสว่างพบว่าประกอบด้วยคลื่นแสงสีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม และแดง ซึ่งเป็นย่านแสงที่มี

อิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืชมากที่สุด ลักษณะสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ธรรมชาติ ดัง (Figure 1)

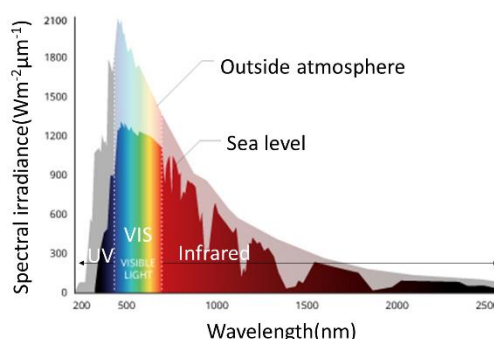


Figure 1 Spectrum of natural sunlight (Fondriest Environmental Learning Center, 2022).

แสงนั้นเมื่อพิจารณาในเชิงปริมาณคือความเข้มของแสง และเชิงคุณภาพคือสเปกตรัมแสง เมื่อแสงมีความเข้มมากขึ้นจะทำให้โฟตอนฟลักซ์ (photon flux) มีจำนวนมากขึ้น โฟตอนฟลักซ์คือพลังงานแสงที่ช่วยสนับสนุนกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชอย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้พืชมีชีวมวลสูงและมีอัตราการเจริญเติบโตที่ดี สเปกตรัมของแสงแต่ละสีจะช่วยให้พืชมีลักษณะพื้นฐานของพืชที่ดี ส่วนช่วงเวลาให้แสงจะมีผลต่อสรีรวิทยาและการติดดอกของพืช เป็นต้น ความสัมพันธ์ดังกล่าว แสดงดัง (Figure 2) การวัดจำนวนโฟตอนฟลักซ์ที่แสงผลิตออกมาจะอยู่ในรูปของพลังงานต่อพื้นที่หรือพีพีเอฟดี (photosynthesis photon flux density, PPFD) พลังงานแสงนี้มีหน่วยเป็นไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที

1.2 การดูดกลืนแสงและอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง

แสงอาทิตย์ธรรมชาติเป็นแสงที่ดีที่สุดสำหรับการเจริญเติบโตของพืช แสงแดดให้ความสมดุลอย่างแท้จริงของแสงสีน้ำเงินและแสงสีแดงที่พืชต้องการ ความสมดุลนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการเจริญเติบโตและการออกดอกของพืช แสงที่พืชนำมาใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์ด้วยแสงคือแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 400-700 นาโนเมตร จาก (Figure 2) พบว่าพืชจะดูดกลืนแสงโดยรงควัตถุ (pigment) ที่อยู่ในใบเพื่อการสังเคราะห์ด้วยแสงและจะสร้างคลอโรฟิลล์ชนิดเอและบี (chlorophyll molecules type a & b) ได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่นแสงสูงสุด 435 นาโนเมตรและ 455 นาโนเมตร หรือแสงสีน้ำเงินและแสงสีแดงที่ความยาวคลื่นสูงสุดที่

640 นาโนเมตร และ 660 นาโนเมตร (Gacomelli, 1998) ส่วนแสงสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นสูงสุด 465 นาโนเมตรจะช่วยสร้างแคโรทีนอยด์ (carotenoid) ทำให้พืชมีสีแดงหรือสีส้ม เช่น แครอทและบีทรูท เป็นต้น และช่วยปกป้องคลอโรฟิลล์ไม่ให้แสงอาทิตย์ทำลายอีกด้วย นอกจากนั้นแสงที่มีย่านความยาวคลื่นมากกว่า 700 นาโนเมตร เรียกว่าแสงอินฟราเรด (infrared) แบ่งออกเป็นอินฟราเรดใกล้ (near infrared) คืออินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นใกล้แสงสว่าง และอินฟราเรดไกล (far infrared) คืออินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นไกลคลื่นไมโครเวฟ แสงในช่วงดังกล่าวไม่มีสิ่งจ้องมองไม่เห็นแต่แสงอินฟราเรดใกล้จะเข้าไปกระตุ้นไฟโตโครมฟราเรด (phytochrome far-red, P_{FR}) ซึ่งมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช และพบว่าแสงอินฟราเรดใกล้ช่วยกระตุ้นการงอกของเมล็ด สร้างใบ เพิ่มขนาดใบ เพิ่มขนาดและมวลของลำต้น และช่วยกระตุ้นการติดดอกของพืชดอกบางชนิด (Park, & Runkle, 2017)

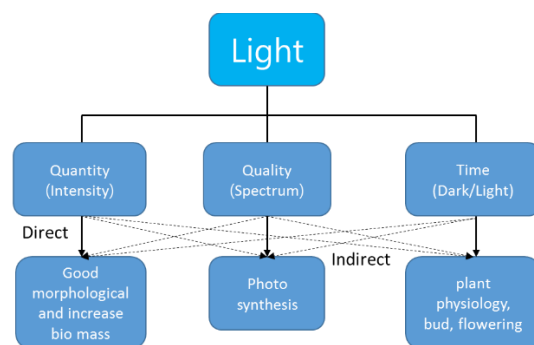


Figure 2 Quantity, quality and duration of light exposure affect biomass, plant physiology, photosynthesis and flowering (Stefanie, & Alexander, 2019a).

1.3 คุณภาพแสงกับการเจริญเติบโตของพืช

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ประกอบไปด้วย พันธุ์พืช สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ความชื้นในดิน น้ำและธาตุอาหาร คาร์บอนไดออกไซด์ และแสง พืชแต่ละชนิดต้องการแสงในปริมาณและคุณภาพแสงที่ต่างกัน คุณภาพแสงคือแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ทำให้มีสี และพลังงานของแสงต่างกัน จาก (Figure 3) อาจสรุปได้ว่าแสงสีน้ำเงินและแสงสีแดงเป็นแสงหลักที่สนับสนุนกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช

สำหรับแสงสีอื่น ๆ ก็มีประโยชน์ต่อพืช เช่น แสงสีเหลืองและส้ม ช่วยในการเจริญเติบโตของพืชและแสงอินฟราเรด ช่วยในการงอกของเมล็ด ขยายลำต้นและใบ เพิ่มชีวมวลของพืช เป็นต้น จาก (Figure 3) แสดงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชจะพบว่าแสงสีน้ำเงินในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 400-500 นาโนเมตร และแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 600-700 นาโนเมตร ช่วยให้พืชสังเคราะห์ด้วยแสงในอัตราสูงที่สุด แต่แสงสีเขียวที่มีความยาวคลื่น 530-560 นาโนเมตร ไม่ช่วยในการสังเคราะห์ด้วยแสงมากนัก

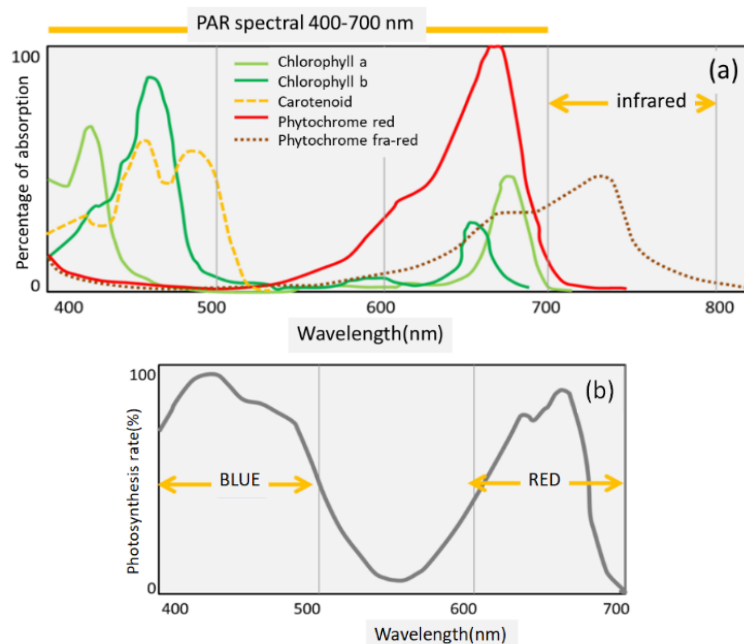


Figure 3 PAR wavelength range, plant light absorption and the rate of photosynthesis (Stefanie, & Alexander, 2019a). Re-drawn by Watjanatepin (2021).

1.4 ปริมาณของแสง (ฟิโตนพลักซ์) ที่พืชต้องการ

เมื่อทราบถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของแสงแต่ละสเปกตรัมที่มีประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตและการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชแล้ว อีกคำถามหนึ่งที่

น่าสนใจคือพืชแต่ละชนิดต้องการปริมาณแสงหรือฟิโตนพลักซ์มากน้อยเพียงใดเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตได้อย่างสมบูรณ์และได้ผลผลิตที่ดี ประเด็นนี้มีการศึกษาวิจัยเพื่อหาคำตอบมาพอสมควร

แม้จะไม่ใช่คำตอบสำหรับพืชทุกชนิดในโลก แต่สามารถใช้เป็นข้อมูลขั้นต้นในการศึกษาต่อไป ได้แสดงดัง (Figure 4) ตัวอย่างเช่น มะเขือเทศ กล้วยและแตงกวาต้องการแสงที่มีค่าฟิโตนฟลักซ์ เฉลี่ยเท่ากับ 185 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที กล้วยไม้และต้นเยอบีร่าเหมาะสมกับค่าฟิโตนฟลักซ์ เฉลี่ยเท่ากับ 92.50 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที เป็นต้น (Stefanie, & Alexander, 2019b)

1.5 ช่วงเวลาแสง

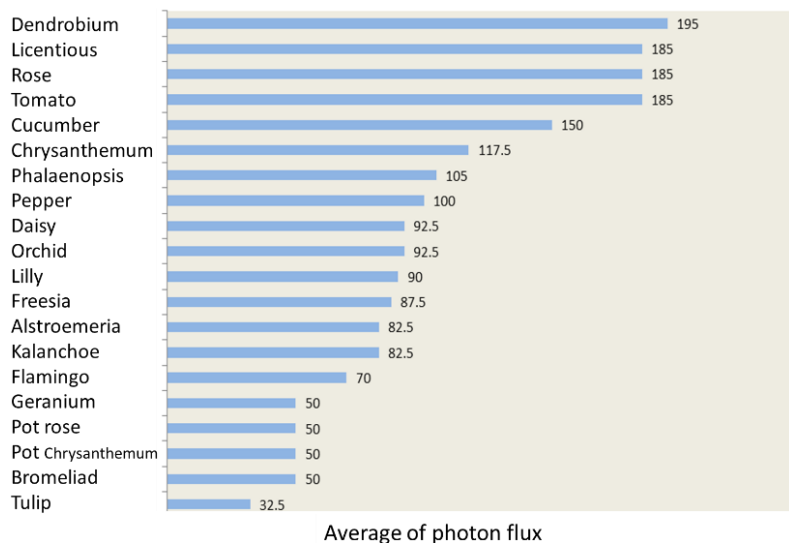


Figure 4 Average amount of photon flux suitable for many specimen plants. Adapted from Stefanie, & Alexander (2019a).

ช่วงเวลาแสง (photoperiod) คือวัฏจักรแสงที่เกิดซ้ำของช่วงเวลามีแสง (light period) และช่วงเวลามืด (dark period) ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงในแต่ละวัน เช่น 14/10 หมายถึงช่วงมีแสง 14 ชั่วโมง และช่วงมืด 10 ชั่วโมง เป็นต้น ที่ผ่านมามีการทดลองจำนวนมากเกี่ยวกับชั่วโมงแสงที่ดีที่สุด สำหรับแสงประดิษฐ์ในการปลูกพืชในระบบปิด ผู้เขียนส่วนมากนิยม

พืชที่ไม่ได้รับแสงจากธรรมชาติเพียงพอ ควรจัดหาแสงประดิษฐ์เพื่อเสริมหรือทดแทนแสงธรรมชาติ แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ทำให้สามารถควบคุมการเจริญเติบโตของพืชและผลิตได้เร็วขึ้น พืชที่ขาดแสงมักจะเติบโตสูงขึ้นเพื่อแสวงหาแสง นี่คือการอยู่รอดของพืช หากพืชได้รับแสงไม่เพียงพอใบจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ลำต้นจะอ่อนแอ พืชจะสูญเสียสีและตายในที่สุด

ทำการศึกษาดลองกับพืชผักสลัด เช่น กรีนโอ๊ค เรดโอ๊ค ผักคอส ผักกาดหอม และผักกวางตุ้ง ที่ช่วงเวลาแสงเท่ากับ 16/8 เป็นต้น (Watjanatepin, 2022)

2. ผลของแสงจากไดโอดเปล่งแสงต่อสรีรวิทยาและสารสำคัญของพืช

ไดโอดเปล่งแสงเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถกำเนิดสเปกตรัมแสงในช่วงความยาวคลื่นช่วง

แคบ ๆ จึงสามารถเลือกสเปกตรัมแสงเฉพาะเจาะจงได้ เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง การเจริญเติบโตและการพัฒนาสรีรวิทยาของพืช เช่น แสงสีแดงที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 600-700 นาโนเมตร และแสงสีน้ำเงินที่มีความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร แสงอินฟราเรดใกล้ 701-800 นาโนเมตร หรือแสงสีขาว เป็นต้น ในบทความนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างการทำงาน และคุณลักษณะทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสง เพราะว่ามีผู้เขียนจำนวนมากได้นำเสนอรายละเอียดดังกล่าวแล้ว ผู้อ่านสามารถศึกษาได้จากบทความเรื่อง ไดโอดเปล่งแสง สีอะไรเหมาะสมกับการปลูกพืช (Watjanatepin, & Boonmee, 2017) ในบทความนี้ผู้เขียนขอนำเสนอผลกระทบของแสงจากไดโอดเปล่งแสงต่อสรีรวิทยาและสารสำคัญของพืชบางส่วนจากฐานข้อมูล ScienceDirect ดังต่อไปนี้

2.1 ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน (401-500 นาโนเมตร)

จากรายงานผลการศึกษเกี่ยวกับอิทธิพลของแสงสีน้ำเงินต่อพืชจำนวนมาก พบว่า การให้แสงสีน้ำเงินผสมแสงสีแดงและสีเขียวที่ค่าไฟตอนฟลักซ์รวม 300 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้นกล้ามะเขือเทศเชอร์รี่ (Lu et al., 2012) และแสงสีน้ำเงิน 470 นาโนเมตร เพียงอย่างเดียวจะช่วยเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์และการยึดตัวของก้านใบของต้นกล้าของกะหล่ำปลี (Mizuno, Amaki, & Watanabe, 2011) ในขณะที่ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน 476 นาโนเมตร ฟิฟตีเอฟดี 130 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ยังช่วยเพิ่มปริมาณแอนโทไซยานินและแคโรทีนอยด์ ในผักกาดหอมเรดคอส (Li, & Kubota, 2009) นอกจากนี้ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน 455 นาโนเมตร

ฟิฟตีเอฟดีเท่ากับ 7-16 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ร่วมกับแสงจากหลอดโซเดียมความดันสูง จะช่วยเพิ่มปริมาณชีวมวลสดและชีวมวลแห้งของแตงกวาพันธุ์โบโดกา ต้นกล้าของแตงกวาพันธุ์แมนดี้เอฟ 1 และมะเขือเทศมัดเดี่ยวที่ปลูกในเรือนกระจก (Ménard, Dorais, Hovi, & Gosselin, 2006; Novičkovas et al., 2012)

การใช้แสงสีแดง 660 นาโนเมตรร้อยละ 75 ผสมกับแสงสีน้ำเงิน 460 นาโนเมตรร้อยละ 25 จากไดโอดเปล่งแสงที่ค่าฟิฟตีเอฟดีรวมเท่ากับ 180 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที มีความเหมาะสมที่สุดในการปลูกผักกวางตุ้งจะช่วยเพิ่มปริมาณชีวมวลเพิ่มขนาดของใบและปริมาณแอนโทไซยานินเมื่อเปรียบเทียบกับแสงสีอื่น (Mickens et al., 2019) นอกจากนี้ผู้เขียน Namphila, Isarangkun Na Ayutthaya, & Techawongsathien (2016) ยังพบว่าต้นกล้ามะละกอ (*Carica papaya* L.) พันธุ์ 'แซกด้า' ภายใต้การให้แสงด้วยไดโอดเปล่งแสงสีแดงร้อยละ 25 ผสมกับแสงสีน้ำเงินร้อยละ 75 มีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมมากที่สุด นอกจากนี้รายงานของ Moosavi-Nezhad et al. (2021) พบว่าต้นกล้าของแตงโมที่ตอกึ่งที่ปลูกภายใต้แสงสีน้ำเงินจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์สูงสุด และการทำงานของ การสังเคราะห์แสงโดยรวมดีขึ้น ส่วนต้นกล้าแตงโมที่ได้รับแสงสีขาวมีพื้นที่ใบที่ใหญ่ที่สุด เนื่องจากมีผลต่อปริมาณรงควัตถุที่ลำต้น และประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bantis, Koukounaras, Siomos, Fotelli, & Kintzonidis (2020) ในทำนองเดียวกันกับรายงานของ Seedapalee, Inkham, Ruamrungsri, Jogloy, & Hongpakdee (2021) ที่พบว่าแสงจากไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินช่วย

เพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง เพิ่มน้ำหนักแห้งของลำต้น เพิ่มอัตราการดูดซึมของต้นกล้า เยอร์ซาเล็มอาร์ติโชก (Jerusalem artichoke) ได้ดีกว่าแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์

สรุปว่าแสงจากไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสง เพิ่มคลอโรฟิลล์ สนับสนุนการเจริญเติบโตและช่วยเพิ่มชีวมวลของพืชหลายชนิด แสงสีแดงผสมกับแสงสีน้ำเงินที่มีสัดส่วนของแสงสีน้ำเงินที่มากกว่า หรือแสงสีน้ำเงินเพียงอย่างเดียวมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการเพาะต้นกล้าของพืชมากที่สุด

2.2 ไดโอดเปล่งแสงสีเขียว

ในทางทฤษฎี แม้ว่าแสงสีเขียวจะไม่ช่วยพืชในการสังเคราะห์ด้วยแสงมากนัก แต่ก็มีส่วนช่วยในด้านสรีรวิทยาพืช และการเจริญเติบโตของพืช เช่น รายงานของผู้เขียน Johkan, Shoji, Goto, Hahida, & Yoshihara (2012) สรุปว่าผลของแสงสีเขียวจากไดโอดเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นแสง 3 ชนิด ที่ค่าพีพีเอฟดีแตกต่างกัน พบว่าแสงสีเขียวที่ความยาวคลื่น 510, 520 และ 530 นาโนเมตร ที่พีพีเอฟดี 300 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ส่งผลให้ผักทดลองมีการเจริญเติบโตดีที่สุด ต่อมาผู้เขียน Orlando, Trivellini, Incrocci, Ferrante, & Mensuali (2022) ศึกษาผลกระทบของแสงสีเขียวต่อการเจริญเติบโต และคุณภาพทางโภชนาการในผักไมโครกรีน 4 ชนิด ที่ปลูกในสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุมโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงสีแดงผสมน้ำเงิน, สีแดงผสมน้ำเงินและสีเขียว พบว่าแสงสีเขียวภายใต้ความเข้มสูงสุดมีผลดีต่อการสะสมฟีนอล แครโทีนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ การศึกษานี้บ่งชี้ว่าการเพิ่มแสงสีเขียวที่พีพีเอฟดี 340 ไมโครโมล

ต่อตารางเมตรต่อวินาที ในสภาพแวดล้อมที่มีแสงสีแดงผสมน้ำเงินส่งเสริมการเจริญเติบโต และการสะสมของสารพฤกษเคมีที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสายพันธุ์ไมโครกรีนส่วนใหญ่

นอกจากนี้มียางานว่าแสงสีเขียวมีส่วนช่วยในการส่งเสริมการรักษาและการฟื้นฟูรากของต้นกล้ามะเขือเทศทาบกิงแบบสองราก และพบว่าแสงสีเขียวช่วยให้การงอกของรากของต้นกล้าที่ตอกิ่งเป็นไปอย่างสะดวก และเพิ่มการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระและการสังเคราะห์ด้วยแสงอีกด้วย (Li et al., 2021) แล้วยังพบอีกว่าดอกเห็ดถั่งเช่าสีทองที่เจริญภายใต้แสงสีเขียวมีน้ำหนักผลผลิตดอกเห็ดต่อขวดสูงที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการผลิตสูงสุดร้อยละ 68 ในภาพรวมพบว่าการให้แสงสีเขียวในช่วงการกระตุ้นดอกเห็ดถั่งเช่าสีทองจะให้ทั้งผลผลิตสารคอร์ไดเซปินและอะดีโนซีนสูงกว่าแสงสีแดง น้ำเงิน ม่วง ชมพู และสีขาว (Srijumpa, Norarat, Na-Nan, & Maneerat, 2022)

2.3 ไดโอดเปล่งแสงสีแดง (600-700 นาโนเมตร)

ผู้เขียน Mizuno, Amaki, & Watanabe (2011) รายงานว่าแสงสีแดงจากไดโอดเปล่งแสงช่วยให้พืชมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงที่สูงขึ้น ช่วยเพิ่มแอนโทไซยานินและเพิ่มความเข้มข้นของปริมาณฟีนอลิกขึ้นร้อยละ 6 ในผักกาดหอม และยังพบว่าแสงสีแดง 658 นาโนเมตร จะช่วยเพิ่มผลผลิตของมะเขือเทศมดเดี่ยวที่ปลูกแบบความหนาแน่นสูงในโรงเรือนกระจก (Lu et al., 2012) และผลการศึกษาของ Lefsrud, Kopsell, & Sams (2008) ยืนยันว่าไดโอดเปล่งแสงสีแดง 640 นาโนเมตร ที่ให้เสริมกับแสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์

ชนิดคูลไวท์จะช่วยให้ผักคะน้ามีปริมาณของลูทีน และคลอโรฟิลล์ เอและบี เพิ่มขึ้นอีกด้วย

นอกจากนี้ผลการศึกษาของ Samuolienė et al. (2009) พบว่าผักกาดหอมและต้นหอมที่ปลูกในโรงเรือนกระจกด้วยแสงธรรมชาติและแสงจากหลอดโซเดียมความดันสูงที่พีพีเอฟดี 90 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที เมื่อเสริมด้วยแสงจากไดโอดเปล่งแสง 638 นาโนเมตร เป็นเวลา 3 วัน จะช่วยลดปริมาณของไนเตรทลงได้ร้อยละ 44 ถึง 65 ต่อมาผู้เขียน Samuolienė, Sirtautas, Brazaitė, Viršilė, & Duchovskis (2012) รายงานว่าผักกาดหอมใบเขียวจะมีปริมาณฟีนอลิก และโทโคฟีรอล (tocopherols) เพิ่มขึ้นร้อยละ 28.5 ถึง 33.50 มีปริมาณน้ำตาลและสารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นร้อยละ 52.50 และ 14.50 ตามลำดับ มากไปกว่านั้น แสงสีแดง 638 นาโนเมตร ที่ให้เป็นแสงเสริมกับแสงสีขาวจากหลอดโซเดียมความดันสูงจะช่วยลดปริมาณไนเตรทในผักกาดหอมอีกด้วย (Samuolienė, Brazaitė, Sirtautas, Novičkovas, & Duchovskis, 2011) นอกจากนี้ Watjanatepin, & Sritanauthaikorn (2020) นำเสนอผลการปลูกโหระพาและกะเพราด้วยแสงสีแดงผสมน้ำเงินที่มีสัดส่วนสีแดงสูงกว่าสีน้ำเงิน 7 เท่าที่ความหนาแน่นของฟotonฟลักซ์ 200 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที สนับสนุนการเจริญเติบโตของลำต้นและใบได้ดีและยังเพิ่มน้ำหนักสดของโหระพาและกะเพราได้สูงกว่าแสงสีแดงผสมน้ำเงินที่มีสัดส่วนสีแดงสูงกว่าสีน้ำเงิน 3.5 เท่า ที่ค่าฟotonฟลักซ์เท่ากัน

จากข้อมูลดังกล่าวอาจสรุปได้ว่า แสงสีแดงช่วยการเจริญเติบโตของพืช เพิ่มผลผลิตของพืชหลายชนิด

และแสงสีแดงมีประโยชน์อย่างมากต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช แล้วยังช่วยเพิ่มสารสำคัญบางชนิดในพืชหลายชนิด เช่น แอนโทไซยานิน ฟีนอลิก ลูทีน คลอโรฟิลล์เอและบี เป็นต้น และพบว่าแสงสีแดงยังช่วยลดปริมาณไนเตรทในผักบางชนิดอีกด้วย

2.4 ไดโอดเปล่งแสงอินฟราเรด (701-800 นาโนเมตร)

แสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่น 735 นาโนเมตร ร่วมกับแสงสีแดง 660 นาโนเมตร มีค่าพีพีเอฟดีรวม 300 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ส่งผลให้พริกหวานมีลำต้นใหญ่และสูงขึ้นและเพิ่มชีวมวลของพริกหวาน (Brown, Shuerger, & Sager, 1995) และมีรายงานยืนยันว่าการให้แสงสีแดง 640 นาโนเมตร พีพีเอฟดี 300 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ร่วมกับแสงอินฟราเรด 730 นาโนเมตร พีพีเอฟดี 20 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที จะช่วยเพิ่มชีวมวลของผักกาดหอมใบแดง แต่กลับลดปริมาณของแอนโทไซยานิน และสารต้านอนุมูลอิสระลง (Stutte, Edney, & Skeritt, 2009) สอดคล้องกับรายงานของ Li, & Kubota (2009) สรุปว่าแสงอินฟราเรดช่วยเพิ่มน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของผักเรดคอสรวมทั้งขนาดลำต้นและความสูงของผักเรดคอส แต่ส่งผลให้แอนโทไซยานิน แคโรทีนอยด์ และปริมาณคลอโรฟิลล์ในผักเรดคอสลดลง ซึ่งเป็นผลการศึกษามีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Stutte, Edney, & Skeritt (2009)

ผักกาดหอมและโหระพาในระยะเพาะกล้าเมื่อเพิ่มแสงอินฟราเรดให้กับแสงสีแดงร่วมกับน้ำเงินที่ใช้ในการปลูกพืชจะช่วยเพิ่มขนาดของใบ ทำให้มีการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ดีขึ้นทั้งของผักกาดหอมและโหระพา แสงอินฟราเรดจะมีอิทธิพลอย่างชัดเจนเมื่อ

สัดส่วนของแสงสีแดงกับน้ำเงินมีค่าพีพีเอฟดีสูงและต่ำ และให้ความเห็นว่าแสงอินฟราเรดมีความเหมาะสมที่จะนำไปรวมกับแสงสีแดงและน้ำเงินในการผลิตพืชในระบบการปลูกพืชด้วยแสงประดิษฐ์ (Meng, & Runkle, 2019) นอกจากนี้ผู้เขียน Meng, Kelly, & Runkle (2011) ทดลองปลูกผักกาดหอมและเคล (kale) ภายใต้แสงสีแดงและสีน้ำเงินแล้วทดแทนแสงสีน้ำเงินด้วยแสงอินฟราเรดด้วยการลดแสงสีน้ำเงินและเพิ่มแสงอินฟราเรด โดยควบคุมพีพีเอฟดีรวมให้คงที่ พวกเขาพบว่าเมื่อให้แสงอินฟราเรดทดแทนแสงสีน้ำเงินจะทำให้ขนาดของใบและมวลลำต้นของพืชทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มขนาดใบมีความสัมพันธ์กับมวลของลำต้น

ผู้เขียน Watjanatepin, & Sritanauthaikorn (2020) รายงานว่า โหระพาและกะเพราที่ปลูกด้วยแสงสีแดงผสมสีน้ำเงินและแสงอินฟราเรดมีการเจริญเติบโตมีขนาดลำต้น มีใบที่ดึกกว่าและให้ผลผลิตที่สูงกว่า อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับโหระพาที่ปลูกด้วยแสงสีแดงผสมสีน้ำเงินที่ค่าพีพีเอฟดีเท่า ๆ กัน แสดงดัง (Figure 5)

สรุปว่าแสงอินฟราเรดมีส่วนสนับสนุนการเจริญเติบโตของพืช ช่วยเพิ่มขนาดของใบและมวลลำต้นของพืช ขนาดและความสูงของลำต้นเพิ่มผลผลิตของพืชผักใบหลายชนิด แสงอินฟราเรดช่วยในการสังเคราะห์แสงทางอ้อม เพราะใบพืชที่ขยายขึ้นจากอิทธิพลของแสงอินฟราเรดทำให้พื้นที่ใบพืชรับแสงได้มากขึ้นมีส่วนทำให้การสังเคราะห์ด้วยแสงดีขึ้นตามไปด้วย

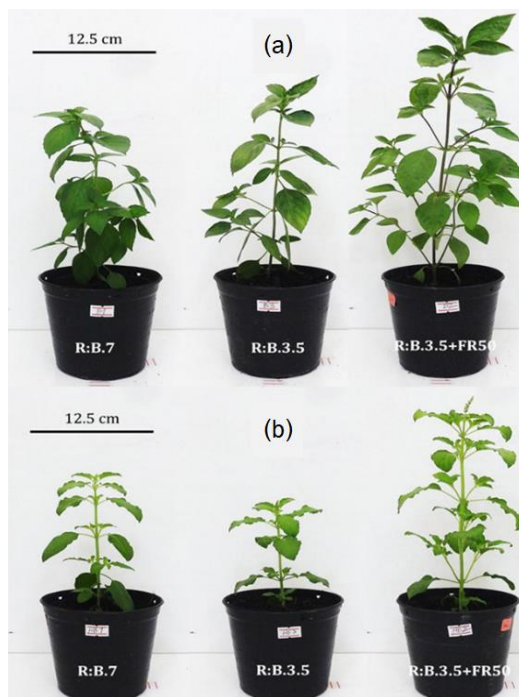


Figure 5 Comparison between sweet basil and holy basil under red and blue lights with and without infrared light (Watjanatepin, & Sritanauthaikorn, 2020).

- Red light to blue light is 7 (R:B=7).
- Red light to blue light is 3.5 (R:B=3.5)
- Red light to blue light is 3.5, increasing the PPFD of infrared light is 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (R:B=3.5+FR50)

(a) sweet basil

(b) holy basil under a light-emitting diode.

3. แสงประดิษฐ์ในอุตสาหกรรมการปลูกพืช

3.1 หลอดไฟฟ้าที่ใช้ในการปลูกพืช

3.1.1 หลอดฟลูออเรสเซนต์ นิยมใช้กันมากในโรงเรือนเพาะปลูกมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 เพราะทำให้แสงสีขาวในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นซึ่งเหมาะสมที่จะใช้ในการสังเคราะห์แสงของพืช แต่ก็ให้แสงในย่านอัลตราไวโอเลตออกมาด้วย หลอดฟลูออเรสเซนต์มีอายุการใช้งานประมาณ 6,000 ชั่วโมง ยาวนานกว่าหลอดอินแคนเดสเซนต์ (Johkan, Shoji, Goto, Hahida, & Yoshihara, 2012) และมีรายงานว่าเมื่อใช้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อของมันฝรั่งหวานที่พีพีเอฟดี 35 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที แสงดังกล่าวจะช่วยให้การเจริญเติบโตของลำต้นและรากไม่แตกต่างกับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อภายใต้แสงของไดโอดเปล่งแสงสีแดง 660 นาโนเมตร ผสมกับแสงสีน้ำเงิน 450 นาโนเมตร (Lefsrud, Kopsell, & Sams, 2008) นอกจากนี้ยังมีการนำหลอดฟลูออเรสเซนต์ไปใช้ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อของพืชหลายชนิด เช่น วานิลลา ยูคาลิปตัส กล้วยไม้สกุลหวาย และมีการศึกษาพบว่า การเจริญเติบโตของโปรโตคอร์ม

และต้นอ่อนของกล้วยไม้ลำเภางาม ภายใต้แสงสีขาว คลื่นยาวของหลอดฟลูออเรสเซนต์ สามารถกระตุ้นต้นอ่อนให้มีการสร้างโปรโตคอร์มไลท์บอดี และเกิดตายอดได้มากที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากภายใต้แสงของหลอดไดโอดเปล่งแสงสีขาวคลื่นยาว (Samuoliene et al., 2009)

3.1.2 หลอดโซเดียมความดันสูง นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสงภายในโรงเรือนเพาะปลูกแบบเรือนกระจกทั่วโลก เพราะทำให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นแสงที่ดี หลอดโซเดียมความดันสูงนี้ให้ค่าพีพีเอฟดีจำนวนมากในช่วงความยาวคลื่นแสง 550-650 นาโนเมตร แต่ให้พีพีเอฟดีของแสงสีน้ำเงินจำนวนไม่มากนัก หลอดไฟชนิดนี้มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 20,000 ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดอินแคนเดสเซนต์ และให้ค่าฟोटอนฟลักซ์ที่สูงมากในช่วงสเปกตรัมเพื่อการสังเคราะห์ด้วยแสง (Yang, Xiao, & Yang, 2011) การกระจายสเปกตรัมแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงมีลักษณะดัง (Figure 6)

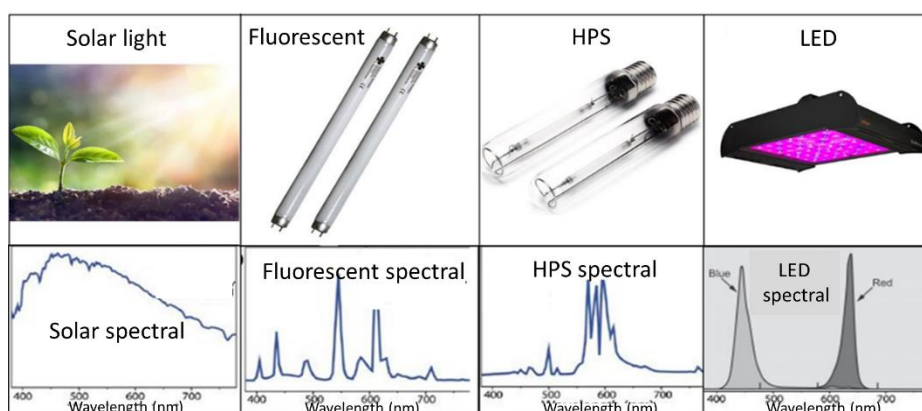


Figure 6 Comparison of incandescent lamps, the spectrum of natural and artificial lights in the horticultural industry, modified from Watjanatepin (2022).

3.1.3 หลอดไดโอดเปล่งแสง เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีบทบาทสำคัญมากขึ้นในอุตสาหกรรมการเพาะปลูกสมัยใหม่ ตั้งแต่ต้น ค.ศ. 2000 เพราะข้อดีของหลอดไดโอดเปล่งแสง คือ แม้ว่าจะเปิดปิด บ่อยครั้งเท่าใดก็ตาม อายุการใช้งานของมันจะไม่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับหลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดโซเดียมความดันสูง (Krizek, Mirecki, Britz, Harris, & Thimijan, 1998) หลอดไดโอดเปล่งแสงมีอายุการใช้งานที่นานกว่าหลอดไฟฟ้านิดอื่น ๆ นอกจากนี้หลอดไดโอดเปล่งแสงยังมีความสามารถในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสงได้สูงกว่าในช่วงสเปกตรัมของแสงที่พืชใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Watjanatepin, & Boonmee (2017) พบว่าไดโอดเปล่งแสงสีแดงและสีน้ำเงินใช้สเปกตรัมแสงเหมาะสมกับการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช ที่ค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthetically efficient) เท่ากับร้อยละ 98.50 ในขณะที่หลอดฟลูออเรสเซนต์มีประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงร้อยละ 52.9 ในช่วงแสงสีแดงและสีน้ำเงิน

นอกจากนี้การที่ไดโอดเปล่งแสงให้แสงแต่ละชนิดจะได้เฉพาะสีใดสีหนึ่ง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช เช่น การงอก การขยาย/ยืดลำต้น เพิ่มขนาดของใบและความหนาของใบ กระตุ้นการติดตาดอก การออกผล มีผลการศึกษาของ Kato, Morio, Murakami, & Nakamura (2011) รายงานว่าปริมาณ ชีวมวลของต้นมะเขือเทศที่ปลูกภายใต้แสงจากไดโอดเปล่งแสงสีขาวจะเพิ่มขึ้นมากกว่าการปลูกภายใต้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ร้อยละ 4 ถึงร้อยละ 11 ที่ค่าพีพีเอฟดีเท่ากันคือ 100 ไมโครโมลต่อตารางเมตร

ต่อวินาที ผู้เขียน Piovene et al. (2015) รายงานผลการศึกษาค่าเจริญเติบโตของโหระพาและสตรอเบอร์รี่ภายใต้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ และแสงจากไดโอดเปล่งแสงผสมสีแดงร่วมกับสีน้ำเงิน ที่มีสัดส่วนแตกต่างกันระหว่าง 0.7-5.5 ที่ค่าพลังงานแสง 200 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าแสงจากไดโอดเปล่งแสงสีแดงร่วมกับสีน้ำเงิน ช่วยเพิ่มชีวมวลของพืชเพิ่มการติดผลของสตรอเบอร์รี่ และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (energy use efficiency) ดีกว่าการปลูกพืชทั้งสองชนิดภายใต้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ Piovene et al. (2015) สรุปว่าสัดส่วนแสงสีแดงกับสีน้ำเงินที่ 0.7 มีความเหมาะสมกับการปลูกพืชทั้งสองชนิดมากที่สุดในการช่วยเพิ่มสารต้านอนุมูลอิสระ และช่วยลดปริมาณไนโตรเจนในพืชทดลองอีกด้วย นอกจากนี้มีผลการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการปลูกข้าวพันธุ์ไทยภายใต้แสงธรรมชาติและแสงจากไดโอดเปล่งแสง ผลการศึกษาพบว่าแสงจากไดโอดเปล่งแสงมีอิทธิพลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงและลักษณะอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสงในข้าว เช่นเดียวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวและสภาพแวดล้อม (Rungrat, & Thaw-Uthum, 2021) เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดแสงที่ประยุกต์เพื่อการเพาะปลูกในมุมมองของประสิทธิภาพพลังงานพบว่า หลอดไฟฟ้ายีนแคนเดสเซนส์มีค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานระหว่างร้อยละ 6-7 หลอดฟลูออเรสเซนต์หลอดโซเดียมความดันสูง มีค่าระหว่างร้อยละ 22-27 หลอดเมทัลฮาไลด์มีค่าระหว่างร้อยละ 20-21 และหลอดไดโอดเปล่งแสงมีค่าประสิทธิภาพพลังงานสูงที่สุด คือมากกว่าร้อยละ 50 (Mitchell et al., 2012)

สรุปหลอดไดโอดเปล่งแสงจึงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมปลูกพืชมากกว่าหลอดไฟฟ้าชนิดอื่นทั้งในเรือนกระจก ในโรงงานผลิตพืช และการผลิตพืชที่มีความหนาแน่นสูงแบบฟาร์มแนวตั้ง การปลูกพืชภายในอาคาร และการอนุบาลพืช เพราะข้อดีของมันคือการประหยัดพลังงาน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และมีความคุ้มค่ามากกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์

3.2 ชิปไดโอดเปล่งแสงสำหรับการปลูกพืช

บริษัทผู้ผลิตชิปไดโอดเปล่งแสงสำหรับปลูกพืช (horticultural LEDs chip) จะผลิตไดโอดเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผู้เขียนกล่าวมาแล้วข้างต้น กล่าวคือ พวกเขาจะผลิตไดโอดเปล่งแสงอินฟราเรด 730 นาโนเมตร สีแดง 630 และสีแดงเข้ม 660 นาโนเมตร สีน้ำเงิน 430 และสีน้ำเงินรอยัล 450 นาโนเมตร และสีขาวที่อุณหภูมิสี (color temperature, CCT) เท่ากับ 2200-6500 K โดยมากจะผลิตในแพ็คเกจแบบเอสเอ็มดี (SMD) และซีโอบี (COB) โดยแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มไดโอดเปล่งแสงที่มีกำลังไฟฟ้าปานกลาง (mid power) และกำลังไฟฟ้าสูง (high power) เช่น บริษัทนิเชีย (Nichia), ลูมิแอลอีดี (LUMILEDS), ออสแรม (Osram), ฟิลิปส์ (Phillips) และซัมซุง (Samsung) เป็นต้น คุณลักษณะของชิปดังกล่าวมีรายละเอียดดัง (Table 1) และแสดงตัวอย่างลักษณะของชิปไดโอดเปล่งแสงเหล่านั้น ดัง (Figure 7) นอกจากนี้ยังพบว่าบางบริษัทมีการผลิตโคมไดโอดเปล่งแสงสำหรับปลูกพืชอีกด้วยทั้งที่ใช้กับฟาร์มแนวตั้ง และใน

โรงเรือน เช่น โคมของออสแรม ฟิลิปส์ และซัมซุง เป็นต้น ลักษณะของสเปกตรัมแสงจากไดโอดเปล่งแสงสีแดงผสมสีน้ำเงินและแสงจากไดโอดเปล่งแสงสีขาวชนิด full spectrum ที่ทดสอบมาจากผลิตภัณฑ์ของบริษัทซัมซุงแสดงดัง (Figure 7g)

3.3 แสงสีแดงผสมสีน้ำเงินที่พืชแต่ละช่วงวัยใช้ในการเจริญเติบโต

พืชมีวงจรการเจริญเติบโตเริ่มตั้งแต่การออกไปจนถึงช่วงเวลาการออกดอกและผล วงจรดังกล่าวแบ่งเป็น 3 ระยะ คือ ช่วงเวลาเพาะกล้า ช่วงเวลาการเจริญเติบโต และช่วงเวลาการติดดอกและออกผล ผู้เขียนทำการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูล ScienceDirect ระหว่างปี ค.ศ. 2000-2017 จำนวนมาก แล้วจึงสังเคราะห์ข้อมูลจากบทความที่เกี่ยวข้องกับสัดส่วนของแสงสีแดงและสีน้ำเงินต่อการเจริญเติบโตของพืช ผู้เขียนได้ตีพิมพ์ผลการสังเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวไว้ในบทความ (Watjanatepin, & Boonmee, 2017) จากข้อมูลดังกล่าวพอที่จะสรุปได้ว่าแสงที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช คือ แสงสีน้ำเงินที่มีความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร แสงสีแดงที่มีความยาวคลื่นแสง 660 นาโนเมตร และแสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นแสง 735 นาโนเมตร โดยช่วงระยะเวลาการปลูกพืช ตั้งแต่เพาะเมล็ดจนถึงเก็บเกี่ยวผลผลิตนั้น พืชส่วนมากต้องการแสงที่มีความยาวคลื่นและสัดส่วนของแสงที่มีสีแตกต่างกัน 3 ระยะคือ

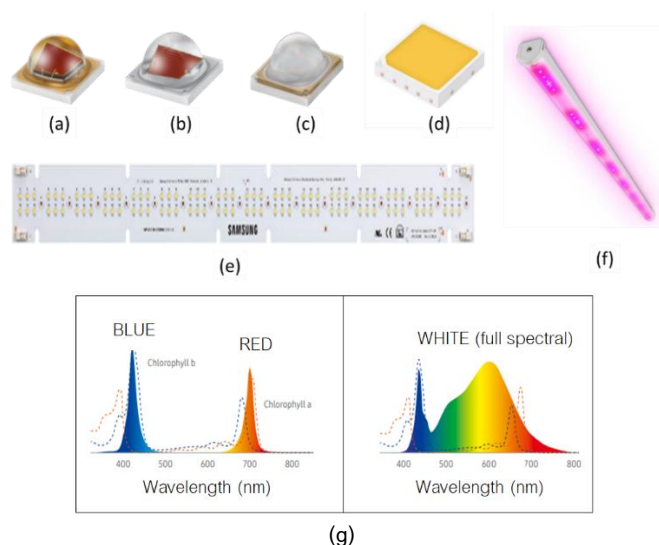


Figure 7 Appearance of a light-emitting diode chip and modules used in the modern horticulture industry, sourced from Samsung (2022).

- (a) Infrared light-emitting diode (730nm) Photon flux $2.07\mu\text{mol/s}$ (IF 350mA, 25°C , 0.7W)
- (b) Deep red light-emitting diode (660 nm) Photon flux $5.65\mu\text{mol/s}$ (IF 700mA, 25°C , 1.4W)
- (c) Royal blue light-emitting diode (450nm), photon flux $2.8\mu\text{mol/s}$ (IF 350mA, 25°C , 1.0W).
- (d) White light-emitting diode 5000K photon flux $5.36\mu\text{mol/s}$ (IF 350mA, 25°C , 2.2W)
- (e) Red and blue light-emitting diode lamps Green Power LED module Philips products (Philips, 2022)
- (f) Plant Light Emitting Diode Module size 561 mmx41mm, using 3350K white light emitting diode mixed with 660nm red, $150\mu\text{mol}$ photon flux per second (1.2A), 25°C , 50.4W, 178lm/W)
- (g) Spectrum of red and blue light-emitting diodes. Compared to white light Samsung products (Samsung, 2022)

(1) ช่วงระยะเวลาการเพาะกล้า เป็นช่วงเริ่มต้นปลูกจากการงอกจากเมล็ดจนเป็นต้นกล้าควรให้แสงสีน้ำเงิน 450 นาโนเมตร และแสงสีแดงที่ 660 นาโนเมตร ในสัดส่วนสีแดงน้อยกว่าสีน้ำเงิน เช่น แสงสีแดงร้อยละ 25 ร่วมกับแสงสีน้ำเงินร้อยละ 75

(Krames et al., 1999; Runkle, 2007; Godo, Fujiwara, Guan, & Miyoshi, 2011; Lin et al., 2013)

(2) ช่วงระยะเวลาเจริญเติบโต เป็นช่วงที่พืชมีใบและลำต้นสมบูรณ์ควรให้แสงที่เหมาะสมกับการสังเคราะห์ด้วยแสงสีน้ำเงิน 450 นาโนเมตรต่อ

แสงสีแดง 660 นาโนเมตร ที่สัดส่วน 50:50 (Bello, Martínez-Estrada, Caamal-Velázquez, & Morales-Ramos, 2016; Senol, Kilic, & Tasdelen, 2016; Watjanatepin, Chung, & Ruangpattanawiwat, 2018; Kim, & Hwang, 2019)

(3) ช่วงการติดดอกออกผลควรให้แสงสีน้ำเงิน 450 นาโนเมตรต่อแสงสีแดง 660 นาโนเมตร ในสัดส่วน 25:75 (Bantis, Ouzounis, & Radoglou, 2016; Jishi, Kimura, Matsuda, & Fujiwara, 2016)

Table 1 Characteristics and properties of light-emitting diode chips from a number of manufacturers.

type	⁶ LUMILEDs	⁶ OSRAM	⁶ SAMSUNG
⁵ NIR light	730 nm	730 nm	730 nm
Red light	Dark red 660 nm	Dark red 660 nm	Red 630 and Dark red 660 nm
Blue light	Royal blue 450 nm	Dark blue 450 nm	Blue 433 and royal blue 450 nm
White light	2200-6500 K	2200-6500 K	2200-6500 K ⁴ full spectrum
Power	medium-high (0.2– 6W)	low (< 0.15W) medium (< 0.7W) high (0.7-2W)	medium (0.2-1W) high (>1-7W)
Type/	¹ SMD: 2020, 3535, 2835, 5050	SMD: 2020, 3535	SMD: 2835, 3030, 3535, 5050,
Package	² COB 15- 32 mm ²	to 2835, 5050 ³ (tape and reel)	5630
Voltage	SMD:1.5-3.6V COB 6-30V	SMD 1.5-30V	SMD:

¹ SMD: Surface mount device

² COB: Chip on board device

³ Tape and reel referenced from IEC 60286–3

⁴ Full spectrum: white LED that provided continuous spectral over 400-700 nm

⁵ NIR: near infrared

⁶ LUMILEDs (2022); Osram (2022); Samsung (2022)

หากผู้อ่านสนใจศึกษาเพิ่มเติมได้จากบทความทางวิชาการเรื่องไดโอดเปล่งแสงสีอะไรเหมาะกับการปลูกพืช? (Watjanatepin, & Boonmee, 2017; Watjanatepin, 2019) นอกจากนี้แล้วอาจนำรูปแบบของแสงในสัดส่วนแสงสีแดงต่อแสงสีน้ำเงินเท่ากับ 25:75 ไปพัฒนาเป็นแสงประดิษฐ์สำหรับการเพาะต้นกล้าที่มีคุณภาพสูงก่อนที่จะนำไปลงแปลงปลูกในโรงเรือน ซึ่งอาจเป็นวิธีช่วยลดการสูญเสียระหว่างการเพาะกล้า และจะได้ต้นกล้าที่มีความแข็งแรงซึ่งเป็นแนวทางในการเพิ่มผลผลิตพืชที่มีคุณภาพสูงต่อไป

4. การประยุกต์

4.1 โรงเรือนกระจก

เรือนกระจก คือโรงเรือนเพาะปลูกพืชแบบกึ่งปิดโดยทั่วไปการปลูกพืชในเรือนกระจกจะใช้แสงจากธรรมชาติ แต่อาจจะมีการใช้แสงสว่างจากหลอดไฟฟ้า เช่น หลอดโซเดียมความดันสูงหรือหลอดไดโอดเปล่งแสง เป็นต้น เพื่อช่วยพัฒนาคุณภาพของพืช ช่วยให้พืชสังเคราะห์ด้วยแสงได้ดีขึ้น ในวันที่พืชเวลาที่แสงธรรมชาติไม่เพียงพอระบบการให้แสงเสริมในเรือนกระจกมี 2 รูปแบบ คือ

(1) การให้แสงด้านบน (top lighting) และ (2) การให้แสงภายใน (inter lighting) การให้แสงด้านบนโดยใช้หลอดโซเดียมความดันสูง จะต้องติดตั้งให้สูงกว่ายอดพืชเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดความร้อนสูงมากเกินไปที่ใบพืช ซึ่งความร้อนนี้จะทำให้ใบไหม้หลอดโซเดียมความดันสูงเมื่อทำงานตามปกติจะเกิดความร้อนขึ้นบริเวณรอบ ๆ หลอด ประมาณร้อยละ 11 ซึ่งไม่มากนัก แต่มีความร้อนที่ออกมาจากรังสีของแสงสูงประมาณร้อยละ 55 และให้พลังงานแสงเพียงร้อยละ 34 การที่ติดตั้งหลอดโซเดียมความดันสูงให้มีระยะห่างจากยอดใบพืชมากจะช่วยลดความร้อนลงแต่ทำให้พลังงานแสงที่พืชได้รับลดลงตามไปด้วย อาจต้องใช้จำนวนหลอดโซเดียมความดันสูงจำนวนมากทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น

ปัจจุบันนิยมใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงเข้ามาทดแทนหลอดโซเดียมความดันสูงกันมากขึ้น เพราะหลอดไดโอดเปล่งแสงมีข้อดีในการประหยัดพลังงานและให้ความร้อนออกมาพร้อมกับแสงต่ำประมาณร้อยละ 15 นั่นคือมันสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสงสูงถึงร้อยละ 50 (Piovene et al., 2015) จึงทำให้พืชได้รับพลังงานแสงจากฟोटอนฟลักซ์สูงกว่าหลอดโซเดียมความดันสูง และช่วยลดผลกระทบด้านความร้อนที่ทำให้จำนวนใบพืชใหม่ลดลง จึงทำให้การใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงเพื่อเป็นแสงประดิษฐ์ในโรงเรือนกระจกจะช่วยให้ประหยัดพลังงานมากกว่าหลอดโซเดียมความดันสูงดังมีรายงานจาก Dieleman, de Visser, & Vermeulen (2016) ว่าหลอดไดโอดเปล่งแสงประหยัดพลังงานมากกว่าหลอดโซเดียมความดันสูงร้อยละ 44 แต่ไดโอดเปล่งแสงต้องใช้เงินลงทุนครั้งแรกมากกว่า

แต่จะมีจุดคุ้มทุนเมื่อระยะเวลาผ่านไป 2.2 ปี และยังช่วยประหยัดพลังงานของระบบการระบายอากาศในโรงเรือนที่ใช้หลอดโซเดียมความดันสูงได้อีกส่วนหนึ่งด้วย ในขณะที่ผลผลิตพืชที่ปลูกภายในโรงเรือนที่ใช้หลอดทั้งสองชนิดนั้นไม่แตกต่างกัน (Hao, Little, Zheng, & Cao, 2016)

การปลูกพืชในโรงเรือนกระจก เช่น มะเขือเทศ สตรอเบอร์รี่ แตงกวา พริกหวาน เมล่อน การให้แสงทางด้านบนเพียงอย่างเดียววันนี้อาจจะไม่เพียงพอเพราะพืชเหล่านี้มีลำต้นสูงและใบมีขนาดใหญ่ ทำให้ใบพืชด้านบนจะบดบังแสงที่จะส่องลงมาให้กับใบด้านล่าง ใบส่วนล่างไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้ปริมาณและคุณภาพของผลผลิตพืชลดลง ปัญหานี้แก้ไขได้โดยวิธีการให้แสงเสริมภายใน ด้วยการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงสีแดงผสมกับแสงสีน้ำเงินดัง (Figure 8) จากผลการศึกษาของ Trouwborst et al. (2011) ยืนยันว่าโรงเรือนปลูกแตงกวาที่ให้แสงด้านบนรวมกับการให้แสงเสริมภายในระหว่างลำต้นจะช่วยให้แตงกวามีผลผลิตมากขึ้นร้อยละ 8 เพราะว่าแสงภายในต้นพืชทำให้ใบพืชที่อยู่ด้านล่างและช่วงกลางลำต้นได้รับแสงอย่างเต็มที่ โดยเฉพาะการใช้แสงสีแดง 660 นาโนเมตรผสมแสงสีน้ำเงิน 460 นาโนเมตร จึงช่วยสนับสนุนการติดดอกออกผลได้เร็วขึ้น จึงช่วยเร่งผลผลิตของพืชได้อย่างมีคุณภาพ ในการปลูกพืชสวนโดยใช้การให้แสงภายในต้นพืชช่วยเสริมกันกับแสงด้านบนจึงช่วยเพิ่มผลผลิตของพืชได้เป็นอย่างดีสอดคล้องกับรายงานของ Zhang, Zhang, Yang, & Li (2019)

สรุปว่าการปลูกพืชสวนในโรงเรือนกระจกด้วยแสงธรรมชาติร่วมกับแสงเสริมด้านบน และแสงเสริม

ภายในแปลงปลูก มีประสิทธิภาพสูงขึ้นใน 3 ด้าน คือ (1) เพิ่มผลผลิตสูงกว่าวิธีอื่น ๆ ทำให้รอบการปลูกสั้นลง สามารถปลูกพืชได้ตลอดทั้งปี และมีของเสียจากการผลิตพืชน้อยกว่าการปลูกแบบปกติ (2) เพิ่มคุณภาพได้ผลผลิตที่มีสีสวย มีรูปทรงดีมีความสมบูรณ์ดัง (Figure 9a) ผลมีรสชาติดีและควบคุมสารอาหารได้ (3) เพิ่มความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภคเพราะได้ผลผลิตที่มีคุณภาพสูงและปลอดภัย เพื่อให้การใช้แสงเสริม

ด้านบนโรงเรือนด้วยไดโอดเปล่งแสงมีประสิทธิภาพต่อการสังเคราะห์แสงสูงสุด บริษัทผู้ผลิตหลอดไฟฟ้าแนะนำให้ใช้แสงที่มีค่าพีพีเอฟดี 700 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที และสำหรับแสงเสริมภายในแนะนำให้ใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงที่ให้ค่าพีพีเอฟดี 100 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาทีและวางหลอดให้มีระยะห่างกันแถวละ 1 เมตร ดัง (Figure 9b) (Stefanie, & Alexander, 2019a).



Figure 8 Supplemental downward lighting for horticultural cultivation in a greenhouse.

(a) High pressure sodium lamps (Ceres Green House Solutions, 2022)

(b) Light-emitting diode lamps (Philips, 2022)



Figure 9 (a) Illumination from red and blue light-emitting diodes inside a tomato plant (Signify, 2017)

(b) Red and blue light-emitting diode lamps inside the cucumber plant combined with top lighting by high-pressure sodium lamps (Both, Mattson, & Lopez, 2018)

4.2 การปลูกพืชแนวตั้ง

การปลูกพืชแนวตั้ง (vertical farming) เป็นการปลูกพืชที่มีชั้นปลูกหลายชั้น (multi-layer cultivation) เป็นระบบการผลิตพืชแบบใหม่ปลูกในอาคารที่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมและแสงที่ให้ผลผลิตผักและผลไม้คุณภาพสูงในท้องถิ่นสำหรับเมืองที่เติบโตอย่างรวดเร็ว การปลูกพืชเสนอโอกาสและทางออกที่จะเปลี่ยนจากการตัดแปลงพันธุกรรมพืชไปสู่การตัดแปลงสิ่งแวดล้อมแทน เพื่อผลิตพืชที่มีคุณภาพสูงและปริมาณที่รับประกันได้โดยไม่ขึ้นกับสภาพอากาศ สภาพดิน หรือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ลักษณะของการปลูกพืชแนวตั้ง คือการวางชั้นปลูกพืชเป็นชั้น ๆ สูงขึ้นไปโดยติดตั้งแสงประดิษฐ์อยู่ด้านบนของชั้นปลูกพืชแต่ละชั้น แสงดังกล่าวจะ

มีระยะห่างจากพืชที่ปลูกไม่มากนัก ดังนั้นจึงแสงประดิษฐ์จากไดโอดเปล่งแสงจึงเหมาะสมกับการปลูกพืชวิธีนี้ เพราะเป็นหลอดที่ให้แสงที่ดีให้ความร้อนต่ำไม่ส่งผลกระทบต่อพืชใบพืช การปลูกพืชแนวตั้งนี้ ความสม่ำเสมอของแสงบนพื้นที่เพาะปลูกมีความสำคัญ ควรออกแบบแสงให้มีค่าฟลักซ์โฟตอนใกล้เคียงกันบนพื้นที่เพาะปลูกเพื่อให้ได้ผลผลิตมีคุณภาพดี ระบบปลูกพืชแนวตั้งนี้เหมาะที่จะใช้สำหรับการปลูกผักกินใบ ระบบที่สมบูรณ์จะประกอบไปด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติที่ควบคุมสภาพแวดล้อมของพืช (แสงจากไดโอดเปล่งแสง อุณหภูมิ ความชื้น คาร์บอนไดออกไซด์ การไหลของอากาศ) และสภาพแวดล้อมรากที่ไม่มีดิน (EC, pH, ความเข้มข้นของสารอาหาร และ O_2 และอุณหภูมิราก) แสดงดัง (Figure 10)

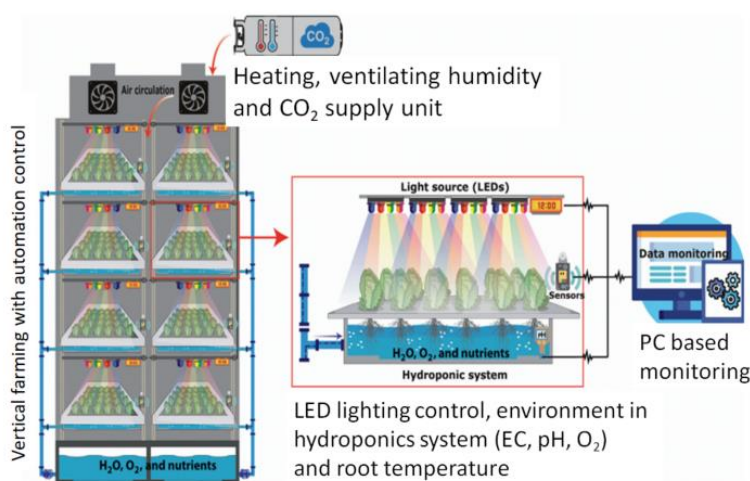


Figure 10 Vertical planting multi-layered system with automatic control that controls environmental (LED lighting, temperature, humidity, CO₂, and air flow) and soilless root environment (EC, pH, nutrient concentration and O₂, and root temperature) (SharathKumar, Heuvelink, & Marcelis, 2020).

แสงประดิษฐ์ที่ใช้ในระบบของการปลูกพืชแนวตั้ง จะติดตั้งอยู่ด้านบนของแปลงปลูกโดยมีระยะห่างไม่มากนัก โดยทั่วไปจะใช้ระยะประมาณ 30 เซนติเมตร และควรเลือกไดโอดเปล่งแสงที่มีเลนส์กระจายแสงมุมแคบประมาณ 60 องศา ประเด็นนี้มีความสำคัญเพราะมุมกระจายแสงแคบจะช่วยให้พลังงานแสงทั้งหมดพุ่งตรงลงมายังพืชที่ปลูกด้วยความเข้มแสงสูง และช่วยลดการสูญเสียของแสงออกไปนอกแปลงปลูกน้อยลง (Cocetta et al., 2017)

การปลูกพืชแนวตั้งที่ความหนาแน่นสูงอาจทำให้ใบพืชด้านบนได้รับแสงเพียงพอ แต่ใบที่อยู่ส่วนล่างหรือใบที่อยู่ด้านข้าง อาจถูกพืชต้นอื่น ๆ บังแสง อาจไม่ได้รับแสงที่ดีพอส่งผลให้พืชมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง จะส่งผลให้ผลผลิตของพืชลดลงแล้วยังเพิ่มค่าแรงคนงานที่ทำการตกแต่งใบพืชอีกด้วย ปัญหานี้แก้ไขได้ด้วยการให้แสงเสริมด้านล่างซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Zhang, Shen, Takagaki, Kozai, & Yamori (2015) ได้ทดลองให้แสงจากด้านล่างร่วมกับแสงจากด้านบนในการปลูกผักกาดโรมาเนียน (*Lactuca sativa* L.) ในโรงงานผลิตพืช โดยให้แสงด้านบนด้วยไดโอดเปล่งแสงสีขาว 200 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ร่วมกับแสงด้านล่างจากไดโอดเปล่งแสงสีขาวที่โฟตอนฟลักซ์ 40 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที หลังจากการทดลอง 16 วัน พบว่าผักกาดโรมาเนียนมีน้ำหนักสดของใบสูงขึ้นร้อยละ 11 ถึง 18 นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์เอและบี ในใบพืชที่ปลูกแบบให้แสงทั้งสองด้านสูงกว่าการให้แสงด้านบนเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.3 โรงงานผลิตพืชระบบปิด

โรงงานผลิตพืชระบบปิด (plant factory closed system) หมายถึง โรงงานผลิตพืชแสงประดิษฐ์ (plant factory artificial light, PFAL) ที่มีระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในโรงงาน เช่น การควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น ความเข้มแสง และธาตุอาหารสำหรับพืช เป็นต้น โรงงานผลิตพืชแสงประดิษฐ์ขนาดใหญ่ เริ่มต้นเมื่อปี ค.ศ. 1990 ในประเทศญี่ปุ่นโดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ ในระยะต่อมาพบว่าโรงงานผลิตพืชมีแสงประดิษฐ์ทั่วโลกมีการพัฒนาให้ดีขึ้นโดยเฉพาะการประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากแสงประดิษฐ์ ระบบควบคุมอุณหภูมิ และพัฒนาสู่การเป็นระบบปลูกพืชสมัยใหม่ที่ให้ผลผลิตพืชที่มีคุณภาพระดับพรีเมียมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และตอบสนองเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนขององค์การสหประชาชาติ

ประเทศญี่ปุ่น มีโรงงานผลิตพืชสเปรด (SPREAD) สร้างขึ้นที่เมืองเกียวโตในปี ค.ศ. 2006 ผลิตผักสลัดหลายชนิด ในระยะแรกใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ ต่อมาพวกเขาพบว่าการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงเข้ามาทดแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์จะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลงร้อยละ 30 และเมื่อใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติเข้าไปช่วยในกระบวนการผลิตจะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านแรงงานลงได้ถึงร้อยละ 50 ต่อมาในปี ค.ศ. 2014 โรงงานผลิตพืช “มิเรอิ” (MIRAI) สร้างขึ้นที่เมืองคาชิว่า จังหวัดชิบะ ใช้สำหรับผลิตพืชผักใบเขียวและสมุนไพรหลายชนิด และพบว่าการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงประหยัดพลังงานไฟฟ้ามากกว่าใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ประมาณร้อยละ 40 และช่วยเพิ่มผลผลิตมากขึ้นร้อยละ 50 โดยหลอดไดโอดเปล่งแสง

ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงได้มากกว่า นอกจากนี้มีโรงงานผลิตพืช “โยโกะสึกะ”(YOKOSUKA) สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2014 สามารถผลิตพืชผักใบเขียว และผักสลัดตัดใบบรรจุผสมในถ้วยเพื่อส่งขายตาม ซูเปอร์มาร์เก็ต และมีรายงานว่าโรงงานผลิตพืชโยโกะสึกะ เดิมเคยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ 800 หลอด เมื่อเปลี่ยนไปใช้หลอดหลอดไดโอดเปล่งแสงแทนทั้งหมดทำให้สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณร้อยละ 50 โดยมีมหาวิทยาลัยชิบะ และศาสตราจารย์ โตโยกิ โคซายิ (Toyoki Kozai) เป็นศูนย์กลางของการวิจัยและพัฒนาโรงงานผลิตพืชแสงประดิษฐ์ที่มีชื่อเสียงมากที่สุด (Kozai, Niu, & Takagaki, 2015; Watjanatepin, 2022)

ประเทศสหรัฐอเมริกา มีการพัฒนาโรงงานผลิตพืช ชื่อ “ฟาร์ม บ็อกซ์ กรีน” ขึ้นในปี ค.ศ. 2011 โรงงานผลิตพืชแสงประดิษฐ์ดังกล่าวสามารถผลิตพืชมากกว่า 15 ชนิด เช่น ผักไมโครกรีน โหระพา พาร์สลีย์ และสมุนไพรอื่น ๆ โดยการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสง สีขาว และสีแดง ร่วมกับสีน้ำเงินเป็นแหล่งกำเนิดแสง

ประเทศเนเธอร์แลนด์เป็นประเทศที่มีชื่อเสียงมากในด้านการเป็นแหล่งผลิตพืชผักผลไม้คุณภาพสูงของทวีปยุโรป ด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัยของแสงประดิษฐ์ทั้งในโรงเรือนรวมไปถึงในโรงงานผลิตพืช เมื่อปี ค.ศ. 2014 เนเธอร์แลนด์มีการพัฒนาโรงงานผลิตพืชที่ชื่อ “แฟลนส์ แลป” ผลิตพืชผักมูลค่าสูง เช่น ผักสลัด สมุนไพร พืชตัดดอกและพืชผลใช้ เป็นต้น โรงงานผลิตพืชที่ชื่อ “แฟลนส์ แลป” ใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงเป็นแหล่งกำเนิดแสง

ประเทศไต้หวัน มีการพัฒนาโรงเรือนเพาะปลูก และระบบการปลูกพืชมาอย่างยาวนานประเทศหนึ่งในเอเชีย และได้พัฒนาโรงงานผลิตพืช “เยส-เฮลท์-ไอ-ฟาร์ม” ขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 2018 นับว่าเป็นโรงงานผลิตพืชที่ใหญ่ที่สุด สามารถผลิตได้ทั้งพืชผักและพืชผล เช่น แอปเปิล เมลอน และสตรอเบอร์รี่ เป็นต้น “เยส-เฮลท์-ไอ-ฟาร์ม” มีกำลังผลิต 1.6 ตันต่อวัน บนพื้นที่ 2,646 ตารางเมตร โรงงานผลิตพืชนี้ใช้ไดโอดเปล่งแสงสีขาวยุโรปเป็นแหล่งกำเนิดแสง และหลอดไดโอดเปล่งแสงสีแดงร่วมกับสีน้ำเงิน แสดงดัง (Figure 11b) อาจกล่าวได้ว่าไดโอดเปล่งแสงที่นิยมใช้กันมากที่สุดในโรงงานผลิตพืชคือ ไดโอดเปล่งแสงสีขาวยุโรปและหลอดไดโอดเปล่งแสงสีแดงร่วมกับสีน้ำเงิน

ในประเทศไทยเริ่มต้นมีโรงงานผลิตพืชแสงประดิษฐ์ต้นแบบ สำหรับการศึกษาและการวิจัยของ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีชีวภาพของกระทรวงวิทยาศาสตร์ อุดมศึกษา วิจัยและนวัตกรรม เมื่อ ปี ค.ศ. 2017 แสดงดัง (Figure 11a) สำหรับโรงงานผลิตพืชแสงประดิษฐ์ในเชิงพาณิชย์เริ่มต้นอย่างจริงจังเมื่อประมาณ ปี ค.ศ. 2019 และโรงงานผลิตพืชแสงประดิษฐ์ “วังรี แพลนต์ แฟคตอรี” เป็นโรงงานผลิตพืชแห่งหนึ่งที่มีความน่าสนใจและมีเอกสารอ้างอิงที่นำมาศึกษาเรียนรู้ได้อย่างสมเหตุสมผลและในโรงงานผลิตพืช “วังรี แพลนต์ แฟคตอรี” นี้ใช้ไดโอดเปล่งแสงสีขาวยุโรปเป็นแสงประดิษฐ์หลักและมีระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมในโรงงานที่ทันสมัยโดยใช้เทคโนโลยีไอโอที (Santiteerakul, Sopadang, Yaibuathet Tippayawong, & Tamvimol, 2020)



Figure 11 An example of an artificial light plant using a light-emitting diode lamp.

- (a) artificial light plant factory of the National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (Biotech), National Science and Technology Development Agency (NSTDA) 2019 (NSTDA, 2021)
- (b) artificial lighting in the plant factory of Yes-Health-I-Farm Taiwan (YesHealthGroup, 2022)

นอกจากนี้ Zhang, He, Niu, Yan, & Song (2018) ได้ศึกษาวิจัยเพื่อหาความเหมาะสมที่จะใช้แสงจาก ไดโอดเปล่งแสงแบบใดที่ดีที่สุดในการปลูกผักกาดหอม ภายในโรงงานผลิตพืชระบบปิดที่ มหาวิทยาลัย เกษตรแห่งประเทศจีน ที่ปักกิ่ง โดยทำการศึกษาคัดลองเปรียบเทียบการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงสีแดงร่วมกับสีน้ำเงินที่อัตราส่วน R : B เท่ากับ 1.2, 1.8 และ 2.2 โดยศึกษาที่ช่วงเวลาให้แสง 12 และ 16 ชั่วโมงต่อวัน ที่ความหนาแน่นของฟotonฟลักซ์ 150, 200, 250 และ 300 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที เปรียบเทียบกับแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ผลการศึกษพบว่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของ ผักกาดหอมที่ปลูกภายใต้แสงที่มีค่าฟotonฟลักซ์ 250 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที มีอัตราสูงกว่าที่ค่า 300 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที สำหรับ ผลการเจริญเติบโตของผักกาดหอม คุณภาพผลผลิต และการประหยัดพลังงาน ผลการวิจัยพบว่าแสงจาก

ไดโอดเปล่งแสงสีแดงร่วมกับสีน้ำเงินที่ค่า R : B เท่ากับ 2.2 ที่มีค่าฟotonฟลักซ์ 250 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที โดยให้แสง 16 ชั่วโมงต่อวัน ส่งผลให้ผลผลิต ผักกาดหอมที่ปลูกในโรงงานผลิตพืชที่ควบคุมสภาวะแวดล้อมแบบปิดได้ดีที่สุด ซึ่งมีความสอดคล้องกับ ผลการศึกษาของ Yan, He, Niu, & Zhai (2019) ที่รายงานว่าแสงจากไดโอดเปล่งแสงสีแดงร่วมกับสีน้ำเงินที่ค่า R : B = 2.2 ช่วงเวลาให้แสงเท่ากับ 16 ชั่วโมงต่อวัน มีค่าฟotonฟลักซ์ 200 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาทีที่เหมาะสมกับการปลูก ผักกาดหอมชนิด “lettuce (cv. Frill ice)” ที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ในพื้นที่ควบคุมสภาวะแวดล้อมแบบปิดได้ดี จากผลการศึกษาทั้งสองแสดงให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ว่าความเข้มของฟotonฟลักซ์ที่เหมาะสมกับการเพิ่มผลผลิตผักกาดหอมแต่ละชนิด อาจมีค่าไม่เท่ากัน

ผู้เขียน Ritthiram, & Teeraampon (2019) ปลูกผักสลัดกรีนโอ๊ค ในระบบไฮโดรโปนิคส์น้ำลึก แบบแนวตั้ง เปิดไฟนาน 16 ชั่วโมงต่อวัน ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส เก็บเกี่ยวผลผลิต 45 วันหลังเพาะ เมล็ด พบว่าผักกาดหอมที่ปลูกภายใต้ระบบ โรงงานผลิตพืชแสงประดิษฐ์ ให้ค่าเฉลี่ยความกว้าง

ทรงพุ่ม จำนวนใบ และพื้นที่ใบของผักกาดหอม สูงที่สุดแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับปลูก กลางแจ้ง แต่หลังจากเก็บเกี่ยว พบว่าการปลูก กลางแจ้งให้น้ำหนักสด น้ำหนักแห้งและปริมาณ คลอโรฟิลล์สูงสุดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ



Figure 12 Lettuce growing under white light-emitting diode light and 240 g Cantonese lettuce under the artificial light plant factory by Watjanatepin, & Srichanin (2021).

นอกจากนี้ผู้เขียน Watjanatepin, & Srichanin (2021) ออกแบบและสร้างโรงงานผลิตพืชแสงประดิษฐ์ ระดับห้องปฏิบัติการที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ มีปริมาตร 27 ลูกบาศก์เมตร โดยใช้ไดโอดเปล่งแสงสีขาวที่ให้ค่าฟิฟิเพดี 187 ± 23 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที มีระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฝังตัว สภาพแวดล้อมในโรงผลิตพืชภายใต้อุณหภูมิ 24.05°C , RH 79.3% และความเข้มข้นของ CO_2 เท่ากับ 923 ppm ด้วยระยะเวลาแสง 16/8 h ให้ผลผลิตผักสลัดกรีนโอ๊ค เฉลี่ยเท่ากับ 76.23 กรัมต่อต้น ระบบการตรวจสอบบนพีซีและการควบคุมสภาวะแวดล้อมทำงานได้ดีในระหว่างการทดลอง พารามิเตอร์ด้านสิ่งแวดล้อมระบุว่าให้ผลลัพธ์ไม่แตกต่างจากโรงงานผลิตพืชอื่น ๆ ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสง

เครื่องปรับอากาศ และอุปกรณ์ประเภทอื่น ๆ มีความ สมเหตุสมผลที่ร้อยละ 45, 37 และ 17 ตามลำดับ

สรุป

แสงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช พืชจะมีการเจริญเติบโตได้ดีเมื่อได้รับแสงที่มีความเข้มแสงที่เพียงพอและมีคุณภาพแสง และเวลา ให้แสงที่เหมาะสม ไดโอดเปล่งแสงเป็นแสงประดิษฐ์ ที่มีบทบาทสำคัญมากในการปลูกพืชสมัยใหม่ ด้วยข้อดีด้านการประหยัดพลังงาน อายุการใช้งาน และการให้สเปกตรัมแสงแบบเฉพาะเจาะจง แสงจาก ไดโอดเปล่งแสงสีแดงช่วยให้พืชมีการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ดี ช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโต กระตุ้นการติดตาดอกและการออกดอก ช่วยเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ ลูทีน ฟีนอลิก ส่วนแสงสีน้ำเงินช่วยเพิ่มอัตราการ

สังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้น เพิ่มปริมาณแอนโทไซยานิน แครโทีนอยด์ และคลอโรฟิลล์ของพืชบางชนิดเหมาะกับการประยุกต์เพื่อเพาะต้นกล้าของพืช นอกจากนี้แสงอินฟราเรดสามารถนำมาเสริมให้พืชในช่วงการเจริญเติบโต เพื่อให้มีขนาดของใบขยายใหญ่ขึ้น จะมีส่วนช่วยให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงในทางอ้อม แสงประดิษฐ์จากหลอดโซเดียมความดันสูง และหลอดไดโอดเปล่งแสง นิยมใช้กันมากในการให้แสงเสริมเพื่อการปลูกพืชในโรงเรือนกระจก ส่วนการปลูกพืชแนวตั้งนิยมใช้เฉพาะหลอดไดโอดเปล่งแสงผสมระหว่างแสงสีแดงและแสงสีน้ำเงิน และหรือไดโอดเปล่งแสงสีขาว การปลูกพืชแนวตั้งในระบบปิดเป็นระบบการผลิตพืชแบบใหม่ที่ทำให้ผลผลิตผักและผลไม้คุณภาพสูงในท้องถิ่นสำหรับเมืองที่เติบโตอย่างรวดเร็ว การปลูกพืชแนวตั้งเป็นโอกาสและทางออกที่จะเปลี่ยนจากการดัดแปลงพันธุกรรมพืชไปสู่พืชพันธุ์ตามธรรมชาติที่ทำการดัดแปลงสิ่งแวดล้อมแทน ปัจจุบันองค์ความรู้ด้านการปลูกพืชกำลังก้าวไปข้างหน้าด้วยการผสมผสานของเทคโนโลยีดิจิทัลและอุปกรณ์ สมาร์ทไอโอที (smart internet of thing, SiOT) สำหรับฟาร์มแนวตั้ง โรงงานผลิตพืชแสงประดิษฐ์ และเรือนกระจกแบบไฮโดรโปนิคส์ ทำให้ฟาร์มสามารถขยายตัวตามความต้องการของผู้บริโภคในเมืองใหญ่ การวิจัยเพื่อพัฒนาไดโอดเปล่งแสง เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ และการประมวลผลบนระบบคลาวด์อย่างต่อเนื่อง จะช่วยให้ผู้เชี่ยวชาญด้านพืชสวนสามารถตอบสนองความต้องการด้านอาหารสุขภาพ และยาสมุนไพรที่เพิ่มขึ้นของผู้บริโภคในปัจจุบันได้อย่างเหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- Bantis, F., Ouzounis, T., & Radoglou, K. (2016). Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects transplant success. *Scientia Horticulturae*, 198, 277-283.
- Bantis, F., Koukounaras, A., Siomos, A., Fotelli, M., & Kintzonidis, D. (2020). Bichromatic red and blue LEDs during healing enhance the vegetative growth and quality of grafted watermelon seedlings. *Scientia Horticulturae*, 261, 109000.
- Bello-Bello, J. J., Martínez-Estrada, E., Caamal-Velázquez, J. H., & Morales-Ramos, V. (2016). Effect of LED light quality on *in vitro* shoot proliferation and growth of Vanilla (*Vanilla planifolia* Andrews). *African Journal of Biotechnology*, 15(8), 272-277.
- Both, A. J., Mattson, N., & Lopez, R. (2018). Utilizing supplemental and sole-source lighting in urban crop production environments. Retrieved 17 August 2022, from <https://www.producegrower.com/article/utilizing-supplemental-and-sole-source-lighting-in-urban-crop-production-environments/>
- Brown, C., Shuerger, A. C., & Sager, J. C. (1995). Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 120(5), 808-813.
- Ceres Green House Solutions. (2022). LED V HPS: How to Choose The Best Supplemental Lighting For Your Greenhouse. Retrieved 17 August 2022, from <https://cerescann.com/led-v-hps-lighting/>
- Cocetta, G., Casciani, D., Bulgari, R., Musante, F., Kotton, A., Rossi, M., & Ferrante, A. (2017). Light use efficiency

- for vegetables production in protected and indoor environments. *The European Physical Journal Plus*, 132, 43.
- Dieleman, J. A., de Visser, P. H. B., & Vermeulen, P. C. M. (2016). Reducing the carbon footprint of greenhouse grown crops: re-designing LED-based production systems. *Acta Horticulturae*, 1134, 395-402.
- Fondriest Environmental Learning Center. (2022). *Solar Radiation & Photosynthetically Active Radiation*. Retrieved 8 May 2022, from <http://www.fondriest.com/environmentalmeasurements/parameters/weather/photosynthetically-active-radiation/>
- Gacomelli, G. A. (1998). *Components of Radiation: Definition of Units, Measuring Radiation Transmission, Sensors in Greenhouse Glazing and Solar Radiation Transmission Workshop* (pp. 1-19). AZ, USA: Center for Controlled Environment Agriculture, Rutgers University, Cook College.
- Godo, T., Fujiwara, K., Guan, K., & Miyoshi, K. (2011). Effect of wavelength of LED-light on *in vitro* a symbiotic germination and seedling growth of *Bletilla Ochracea* Schltr. (Orchidaceae). *Plant Biotechnology*, 28(4), 397-400.
- Hao, X., Little, C., Zheng, J. M., & Cao, R. (2016). Far-red LEDs improve fruit production in greenhouse tomato grown under high-pressure sodium lighting. *Acta Horticulturae*, 1134, 95-102.
- Jishi, T., Kimura, K., Matsuda, R., & Fujiwara, K. (2016). Effects of temporally shifted irradiation of blue and red LED light on cos lettuce growth and morphology. *Scientia Horticulturae*, 198, 227-232.
- Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hahida, S., & Yoshihara, T. (2012). Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environmental and Experimental Botany*, 75, 128-133.
- Kato, A., Morio, Y., Murakami, K., & Nakamura, K. (2011). Plant growth under white LEDs compared with under fluorescent lamps. *Acta Horticulturae*, 907, 227-232.
- Kim, H. M., & Hwang, S. J. (2019). The growth and development of 'Mini Chal' tomato plug seedlings grown under various wavelengths using light emitting diodes. *Agronomy*, 9, 157.
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2015). *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Amsterdam: Academic Press.
- Krames, M. R., Ochiai-Holcomb, M., Höfler, G. E., Carter-Coman, C., Chen, E.I., Tan, I.-H., Grillot, P., Gardner, N. F., Chui, H. C., Huang, J.-W., Stockman, S. A., Kish, F. A., & Craford, M. G. (1999). High-power truncated-inverted pyramid ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$) $_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{GaP}$ light-emitting diodes exhibiting >50% external quantum efficiency. *Applied Physics Letters*, 75(16), 2365-7.
- Krizek, D. R., Mirecki, R. M., Britz, S. J., Harris, W. G., & Thimijan, R. W. (1998). Spectral properties of microwave-powered sulfur lamps in comparison to sunlight and high pressure sodium/metal halide lamps. *Biotronics*, 27, 69-80.
- Lefsrud, M. G., Kopsell, D. A., & Sams, C. E. (2008). Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affect secondary metabolites in kale. *HortScience*, 43(7), 2243-2244.

- Li, Q., & Kubota, C. (2009). Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), 59-64.
- Li, F., Li, Y., Li, S., Wu, G., Niu, X., & Shen, A. (2021). Green light promotes healing and root regeneration in double-root-cutting grafted tomato seedlings. *Scientia Horticulturae*, 289, 110503.
- Lin, K. H., Huang, M. Y., Huang, W. D., Hsu, M. H., Yang, Z. W., & Yang, C. M. (2013). The effects of red, blue, and white light emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically growth lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*). *Scientia Horticulturae*, 150, 86-91.
- Lu, N., Maruo, T., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukakoshi, S., Ito, Y., Ichimura, T., & Shinohara, Y. (2012). Effects of supplemental lighting with light-emitting diodes (LEDs) on tomato yield and quality of single-truss tomato plants grown at high planting density. *Environmental Control in Biology*, 50(1), 63-74.
- LUMILEDS. (2022). *LED technology*. Retrieved 14 February 2022, from <http://lumileds.com/>
- Ménard, C., Dorais, M., Hovi, T., & Gosselin, A. (2006). Developmental and physiological responses of tomato and cucumber to additional blue light. *Acta Horticulturae*, 711, 291-296.
- Meng, Q., Kelly, N., & Runkle, E. S. (2011). Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 383-391.
- Meng, Q., & Runkle, E. S. (2019). Far-red radiation interacts with relative and absolute blue and red photon flux densities to regulate growth, morphology, and pigmentation of lettuce and basil seedlings. *Scientia Horticulturae*, 255, 269-280.
- Mickens, M. A., Torralba, M., Robinson, S. A., Spencer, L. E., Romeyn, M. W., Massa, G. D., & Wheeler, R. M. (2019). Growth of red pak choi under red and blue, supplemented white, and artificial sunlight provided by LEDs. *Scientia Horticulturae*, 245, 200-209.
- Mitchell, C., Both, A.-J., Bourget, M., Burr, J., Kubota, C., Lopez, R., Morrow, R., & Runkle, E. (2012). LEDs: The future of greenhouse lighting!. *Chronica Horticulturae*, 52(1), 6-12.
- Mizuno, T., Amaki, W., & Watanabe, H. (2011). Effects of monochromatic light irradiation by LED on the growth and anthocyanin contents in leaves of cabbage seedlings. *Acta Horticulturae*, 907, 179-184.
- Moosavi-Nezhad, M., Salehi, R., Aliniaieifard, S., Tsaniklidis, G., Woltering, E. J., Fanourakis, D., Żuk-Goleśzewska, K., & Kalaji, H. M. (2021). Blue light improves photosynthetic performance during healing and acclimatization of grafted watermelon seedlings. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(15), 8043.
- Namphila, R., Isarangkun Na Ayutthaya, S., & Techawongsathien, S. (2016). Influence of Light Emitting Diodes (LEDs) on Germination and Growth of Papaya Seeds (*Carica papaya* L.). *Journal of Plant Science Songkla Nakarin*, 3(suppl.), M06/13-17. (in Thai)
- Novičkovas, A., Brazaitytė, A., Duchovskis, P., Jankauskienė, J., Samuolienė, G., Viršilė, A., Sirtautas, R., Bliznikas, Z., & Žukauskas, A. (2012). Solid-state lamps (LEDs) for the short-

- wavelength supplementary lighting in greenhouses: experimental results with cucumber. *Acta Horticulturae*, 927, 723-730.
- NSTDA. (2021). *NSTDA set up 'plant factory' to drive value-adding of Thai herbs*. Retrieved 6 August 2022, from <https://www.nstda.or.th/home/news/post/20190325-plant-factory/>
- Orlando, M., Trivellini, A., Incrocci, L., Ferrante, A., & Mensuali, A. (2022). The inclusion of green light in a red and blue light background impact the growth and functional quality of vegetable and flower microgreen species. *Scientia Horticulturae*, 8(3), 217.
- Osram. (2022). *Horticulture lighting*. Retrieved 23 April 2022, from <https://www.osram.com/os/horticulture-lighting/index.jsp>
- Park, Y., & Runkle, E. S. (2017). Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation. *Environmental and Experimental Botany*, 136, 41-49.
- Philips. (2022). *What is a Philips GreenPower LED production module?*. Retrieved 9 July 2022, from <https://www.lighting.philips.com/main/products/horticulture/greenpower-products/led-production-module>
- Piovene, C., Orsini, F., Bosi, S., Sanoubar, R., Bregola, V., Dinelli, G., & Gianquinto, G. (2015). Optimal red: blue ratio in led lighting for nutraceutical indoor horticulture. *Scientia Horticulturae*, 193, 202-208.
- Ritthiram, J., & Teeraampon, A. (2019). Effect of light intensity on growth and yield of lettuce in plant factory system. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 6, 1243-1250. (in Thai)
- Rungrat, K., & Thaw-Uthum, N. (2021). Light-emitting diode (LED) on photosynthetic efficiency and other related characteristics in rice. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 5, 1279-1287. (in Thai)
- Runkle, E. (2007). Technically speaking: Light quality defined. *Greenhouse Product News*, 17(6), 82.
- Samsung. (2022). *Experience a new level of cultivating*. Retrieved 3 May 2022, from <https://www.samsung.com/led/lighting/applications/horticulture-lighting/>
- Samuolienė, G., Urbonavičiūtė, A., Duchovskis, P., Bliznikas, Z., Vitta, P., & Žukauskas, A. (2009). Decrease in nitrate concentration in leafy vegetables under a solid-state illuminator. *HortScience*, 44, 1857-1860.
- Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Sirtautas, R., Novičkovas, A., & Duchovskis, P. (2011). Supplementary red-LED lighting affects phytochemicals and nitrate of baby leaf lettuce. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 9, 271-274.
- Samuolienė, G., Sirtautas, R., Brazaitytė, A., Viršilė, A., & Duchovskis, P. (2012). Supplementary red-LED lighting and the changes in phytochemical content of two baby leaf lettuce varieties during three seasons. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 10, 701-706.
- Santiteerakul, S., Sopadang, A., Yaibuathet Tippayawong, K., & Tamvimol, K. (2020). The role of smart technology in sustainable agriculture: A case study of Wangree plant factory. *Sustainability*, 12(11), 4640.
- Seedapalee, T., Inkham, Ch., Ruamrungsri, S., Jogloy, S., & Hongpakdee, P. (2021). Physiological responses of sun choke's seedlings under different wavelength LED lighting. *Scientia Horticulturae*, 282, 110029.

- Senol, R., Kilic, S., & Tasdelen, K. (2016). Pulse timing control for LED plant growth unit and effects on carnation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 125-134.
- SharathKumar, M., Heuvelink, Ep., & Marcelis F. M. (2020). Vertical farming: Moving from genetic to environmental modification. *Trends in Plant Science*, 25(8), 724-727.
- Signify. (2017). *Philips lighting begins largest LED horticultural lighting project in the world*. Retrieved 30 August 2021, from https://www.signify.com/b-dam/b2b-li/en_AA/company/news/news/2017/horticulture/Philips-Lighting-Agro-Invest-Cherry-Tomato.jpg
- Srijumpa, N., Norarat, R., Na-Nan, S., & Maneerat, T. (2022). Effect of different LED color on yield and cordycepin production of *Cordyceps militaris*. *Thai Agricultural Research Journal*, 40(1), 81-89. (in Thai)
- Stefanie, R., & Alexander, W. (2019a). *LEDs for horticultural lighting applications*. Retrieved 30 August 2021, from www.osram-os.com
- Stefanie, R., & Alexander, W. (2019b). *LEDs for horticultural lighting applications (Application Note No. AN133)*. Regensburg Germany: OSRAM Opto-Semiconductors.
- Stutte, G. W., Edney, S., & Skerritt, T. (2009). Photo regulation of bio protectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes. *HortScience*, 44, 79-82.
- Trouwborst, G., Schapendonk, Ad H. C. M., Rappoldt, K., Pot, S., Hogewoning, S. W., & van Ieperen, W. (2011). The effect of intracanopy lighting on cucumber fruit yield—Model analysis. *Scientia Horticulturae*, 129(2), 273-278.
- Watjanatepin, N., & Boonmee, C. (2017). What color light-emitting diodes are suitable for growing plants?. *Journal of Science and Technology*, 25(1), 158-176. (in Thai)
- Watjanatepin, N., Chung, H., & Ruangpattanawiwat, C. (2018). Morphological response of tomato seedling under two periods of different red and blue photon flux ratio. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 5(10), 22-27.
- Watjanatepin, N. (2019). Effect of three specific spectra of LED light on the growth, yield, and fruit quality of Sida tomato. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 6(6), 15-21.
- Watjanatepin, N., & Sritanauthaikorn, P. (2020). Increasing growth and yield of sweet basil and holy basil by application of far-red radiation for indoor horticulture. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15, 1709-1716.
- Watjanatepin, N., & Srichanin, T. (2021). Laboratory scale plant factory artificial light: primary evaluation of the light environment, resources consumption and yields. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 56(6), 500-516.
- Watjanatepin, N. (2022). *Light emitting diode: Technology and applications* (2nd Ed.). Pathumthani: Skybooks. (in Thai)
- Yan, Z., He, D., Niu, G., & Zhai, H. (2019). Evaluation of growth and quality of hydroponic lettuce at harvest as affected by the light intensity, photoperiod and light quality at seedling stage. *Scientia Horticulturae*, 248, 138-144.
- Yang, Y. T., Xiao, P., & Yang, Q. C. (2011). Effects of LED light quality R/B to growth of sweet potato plantlets *in vitro* and energy consumptions of lighting. *Acta Horticulturae*, 907, 403-407.

- YesHealthGroup. (2022). *Vertical farming can be profitable*. Retrieved 16 August 2022, from <https://www.yeshealthgroup.com/insight/vertical-farming-can-be-profitable>
- Zhang, G., Shen, S., Takagaki, M., Kozai, T., & Yamori, W. (2015). Supplemental upward lighting from underneath to obtain higher marketable lettuce (*Lactuca sativa*) leaf fresh weight by retarding senescence of outer leaves. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1110.
- Zhang, X., He, D. X., Niu, G. H., Yan, G. H., & Song, J. X. (2018). Effects of environment lighting on the growth, photosynthesis, and quality of hydroponic lettuce in a plant factory. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(2), 33-40.
- Zhang, Y., Zhang, Y., Yang, Q., & Li, T. (2019). Overhead supplemental far-red light stimulates tomato growth under intra-canopy lighting with LEDs. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(1), 62-69.