

ไดโอดเปล่งแสงสีอะไรเหมาะสมกับการปลูกพืช ?

Which Color of Light from the Light Emitting Diodes is Optimal for Plant Cultivation?

นภัทร วัจนเทพินทร์* และไชยยันต์ บุญมี

ศูนย์วิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000

Napat Watjanatepin* and Chaiyant Boonmee

Solar Energy Research and Technology Transfer Center, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suan Yai, Muang, Nonthaburi 11000

บทคัดย่อ

ไดโอดเปล่งแสง (light emitting diodes, LEDs) หรือแอลอีดี เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำทางแสงที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้ชีวิตของมนุษย์ โดยเฉพาะด้านการติดต่อสื่อสาร ที่อยู่อาศัย การประหยัดพลังงานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เพราะว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่างและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีจอแสดงผลในปัจจุบันล้วนใช้เทคโนโลยีของไดโอดเปล่งแสงทั้งสิ้น บทความนี้นำเสนอการค้นพบและการพัฒนาไดโอดเปล่งแสงชนิดต่างๆ โครงสร้างการทำงานและวงจร รวมถึงเทคโนโลยีของไดโอดเปล่งแสง นอกจากนี้ได้อธิบายถึงคุณลักษณะของแสง ความยาวคลื่นแสง สีของแสง และความเข้มของแสง ที่มีความจำเป็นต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชและการเจริญเติบโตของพืช รวมถึงการค้นคว้าเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ไดโอดเปล่งแสงเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์เพื่อการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อและการเจริญเติบโตของพืช รวมทั้งการเสนอทวิเคราะห์ผลของการใช้ไดโอดเปล่งแสงในกระบวนการเพาะปลูกพืช ว่าแสงสีเหล่านั้นมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชอย่างไร และหากต้องการเลือกใช้ไดโอดเปล่งแสงมาเป็นแสงเทียมสำหรับการปลูกพืช ควรจะเลือกแสงที่มีความยาวคลื่นแสงเท่าไร จึงจะทำให้พืชเจริญเติบโตดีที่สุดสำหรับช่วงเวลาเพาะกล้า ช่วงเวลาการเจริญเติบโตและช่วงเวลาการออกดอกและแพร่พันธุ์

คำสำคัญ : ไดโอดเปล่งแสง; การเจริญเติบโตของพืช; ความยาวคลื่นแสง; วัสดุสารกึ่งตัวนำ; การสังเคราะห์ด้วยแสง

Abstract

Light emitting diodes or LEDs are one of the most influential semi-conductors for the use in human activities which ranges from telecommunication, housing, energy saving to environmental conservation. This also includes the LEDs for lighting an application in monitor and display devices.

This article will review the development of innovative LED structures, their circuits and the applications of the LED technology. In addition to that, the article will discuss the characteristics of light, wavelength, color and the intensity of light required for the photosynthesis and metabolic pathways of plants. The results will include the data obtained from the actual use of the LED-based sun simulator for plant cultivation. These data will indicate the color or wavelengths that will be the most optimal for the cultivation of plants in different stages including seedling, vegetative growth and germination through flowering.

Keywords: light emitting diodes; vegetative growth; wavelength of the light; semi-conductor materials; photosynthesis

1. การค้นพบไดโอดเปล่งแสง

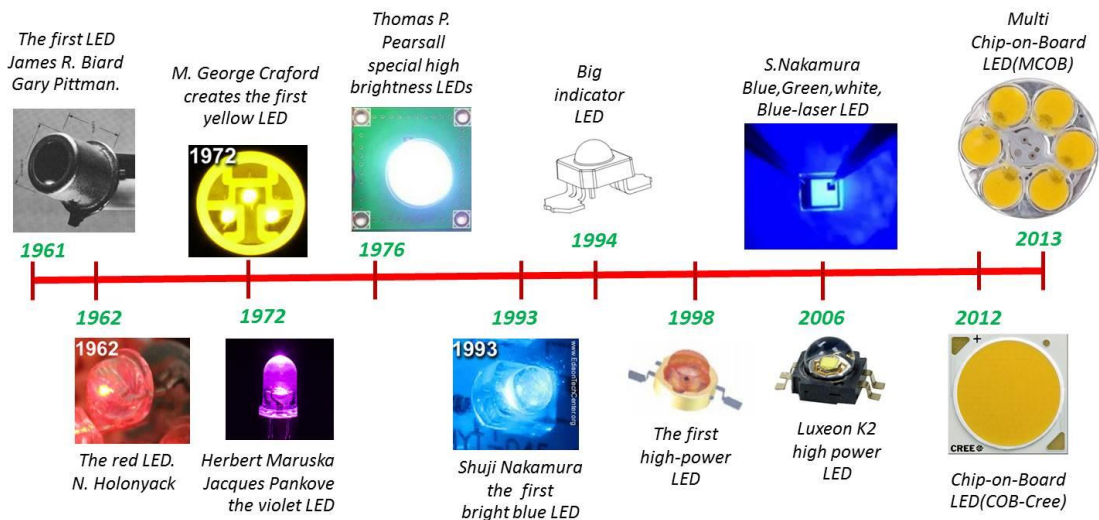
ระหว่าง ค.ศ. 1902-1907 Henry Joseph Round วิศวกรอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสารชาวอังกฤษได้ค้นพบปรากฏการณ์ “electroluminescence” จากการทดลองสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิคอน-คาร์ไบด์ ที่ปล่อยแสงออกมาเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการของมารโคนี (Marconi Laboratory) นั่นคือ การค้นพบปรากฏการณ์ของไดโอดเปล่งแสงเป็นครั้งแรก และได้ตีพิมพ์ผลการค้นพบดังกล่าวในวารสาร Electrical World (S.D. Gupta, 2013) [1] นับว่าเป็นครั้งแรกที่มีการศึกษาเกี่ยวกับไดโอดเปล่งแสง และได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ในปี ค.ศ. 1962 J.R. Nick Holonyack ได้ค้นพบไดโอดเปล่งแสงสีแดงเป็นคนแรกจากสารกึ่งตัวนำชนิด gallium arsenide phosphide (GaAsP) ระหว่างการทำงานให้กับห้องปฏิบัติการของ General Electric และต่อมา N. Holonyack ได้รับการยกย่องให้เป็นบิดาแห่งไดโอดเปล่งแสง “father of the LEDs” ถัดไปในปี ค.ศ. 1972 M.G. Crawford ได้ค้นพบไดโอดเปล่งแสงสีเหลืองที่ทำจากสารกึ่งตัวนำชนิด GaAsP และเป็นผู้พัฒนาไดโอดเปล่งแสงสีแดงให้มีความสว่างมากขึ้นอีกด้วย ในปีเดียวกัน Herbert Maruska และ Jacques Pankove ได้ร่วมกันพัฒนาไดโอดเปล่งแสงสีม่วง

(violet) ขึ้นเป็นครั้งแรกจากสารกึ่งตัวนำชนิด gallium nitride (GaN) (รูปที่ 1) ซึ่งผลการค้นพบนี้นำไปสู่การพัฒนาไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินต่อไป [2]

ค.ศ. 1997 Shuji Nakamura คือ ผู้ค้นพบไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินเป็นคนแรก โดยการพัฒนาจากสารกึ่งตัวนำชนิด indium gallium nitride (InGaN) และมีการผลิตในเชิงพาณิชย์ในช่วงเวลาประมาณปี ค.ศ. 1990 และต่อมาเขาได้เป็นศาสตราจารย์ในมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียที่ซานตาบาร์บารา (UCSB) และได้วิจัยและพัฒนาไดโอดเปล่งแสงมาอย่างต่อเนื่องจนปี ค.ศ. 2006 เขาได้ประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงสีเขียว และเลเซอร์ไดโอดสีน้ำเงิน (blue laser diode) สิ่งที่เขาค้นพบนำไปสู่เทคโนโลยีบลูเรย์ (blue ray) ในปัจจุบัน [2] (ต่อมาในปี ค.ศ. 2014 ศาสตราจารย์ Nakamura ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ร่วมกับศาสตราจารย์ Akasaki และศาสตราจารย์ Amano) ในปี ค.ศ. 1998 ได้มีการพัฒนาไดโอดเปล่งแสงและกำลังสูงเป็นครั้งแรกในเชิงพาณิชย์ได้ทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูง ความส่องสว่างสูงและมีราคาถูกลงอย่างมาก ที่ห้องปฏิบัติการของ Lumileds ได้ผลิตไดโอดเปล่งแสงรุ่น Luxeon-K2 มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 4 วัตต์ (รูปที่ 1) มีอายุการใช้งานนานกว่า 10,000 ชั่วโมง ทำให้เกิดการแข่งขันเพื่อพัฒนาไดโอดเปล่งแสงกำลัง

สูงอย่างต่อเนื่องถึงปัจจุบัน คุณลักษณะของ ไดโอดเปล่งแสงที่กำเนิดแสงสีต่าง ๆ ความยาวของ คลื่นแสง แรงดันไบแอสตรงตกคร่อมไดโอดเปล่งแสง

เมื่อนำกระแส และวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างไดโอด เปล่งแสงแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 เส้นเวลาแสดงการพัฒนาไดโอดเปล่งแสง

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของไดโอดเปล่งแสงสีต่าง ๆ และวัสดุสารกึ่งตัวนำ [1,3]

Year	Color of Light	Wavelength range (nm)	Forward voltage drop (V)	Semiconductor material
1972	Ultraviolet	<400	3.1-4.4	(AlN), (AlGaIn), (AlGaInN)
1972	Violet	400-450	2.8-4.0	(InGaIn)
1993	Blue	450-500	2.5-3.7	(InGaIn), (SiC)
Mid-1990s	Green	500-570	1.9-4.0	(GaP), (AlGaInP), (AlGaP)
1972	Yellow	570-590	2.1-2.2	(GaAsP), (AlGaInP), (GaP)
Mid-1980s	Orange/amber	590-610	2.0-2.1	(GaAsP), (AlGaInP), (GaP)
Mid-1980s	Red	610-760	1.6-2.0	(AlGaAs), (GaAsP), (AlGaInP), (GaP)
Mid-1970s	Infrared	>760	<1.9	(GaAs), (AlGaAs)

ค.ศ. 2012-2013 มีการพัฒนาไดโอดเปล่งแสง กำลังสูงชนิด Chip-On-Board (COB) และชนิด Multi-Chip-On-Board (MCOB) มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูง 200 วัตต์ ต่อหนึ่งดวง (รูปที่ 1) ปัจจุบันผู้ใช้งานสามารถ

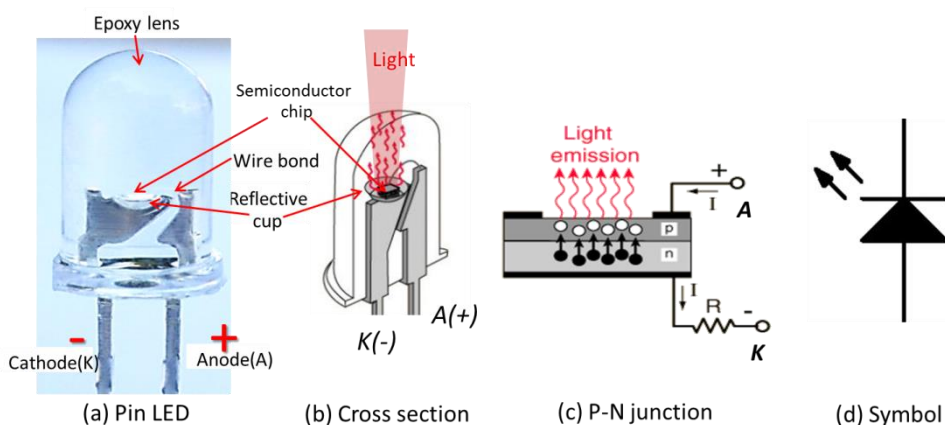
เลือกใช้ไดโอดเปล่งแสงได้ทุกสี และมีการนำมาใช้งานทดแทนแหล่งกำเนิดแสงแบบเดิม เช่น หลอดมีไส้ (incandescent lamp) หลอดฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent lamp) หรือหลอดฮาโลเจน (halogen

lamp) เพราะว่าไดโอดเปล่งแสงนั้นใช้กำลังไฟฟ้าต่ำกว่าที่ค่าความส่องสว่างเท่ากัน มีขนาดเล็กติดตั้งได้ง่าย ในขณะทำงานจะแผ่รังสีความร้อนน้อยกว่า และมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า 50,000 ชั่วโมง และมีราคาต่ำกว่า

2. การทำงานของไดโอดเปล่งแสง

ไดโอดเปล่งแสงมีโครงสร้างประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำสองชนิด คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor) ประกบเข้าด้วยกัน มีผิวข้างหนึ่ง

เรียบคล้ายกระจก เมื่อส่งไฟฟ้ากระแสตรงผ่านไดโอดเปล่งแสง โดยจ่ายไฟบวกให้ขาแอนโนด (A) และจ่ายไฟลบให้ขาแคโทด (K) ทำให้อิเล็กตรอนที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีพลังงานสูงขึ้นจนสามารถวิ่งข้ามรอยต่อจากสารชนิดเอ็น ไปรวมกับโฮล (hole) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี การที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อพี-เอ็น จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล ส่งผลให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปและจะคายพลังงานออกมาในรูปคลื่นแสง โครงสร้างและการทำงานของไดโอดเปล่งแสงแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้าง การทำงาน และสัญลักษณ์ของไดโอดเปล่งแสง [4]

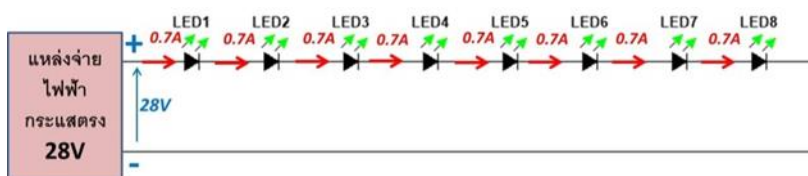
แสงสีต่าง ๆ ที่เกิดจากรอยต่อ พี-เอ็น นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้าง ไดโอดเปล่งแสง ทั้งชนิดที่เป็นของเหลวและก๊าซ เช่น ใช้แกเลียม-ฟอสไฟด์ (gallium phosphide, GaP) ทำให้เกิดแสงสีแดง ใช้แกเลียม-อาซีนไนด์-ฟอสไฟด์ (gallium arsenide phosphide, GaAsP) เกิดแสงสีเหลืองและเขียว (ตารางที่ 1) การควบคุมปริมาณแสงสว่างทำได้โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดเปล่งแสง หากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสูงตลอด จะมีความสว่างมาก แต่ถ้ากระแสไฟฟ้าสูงมากเกินไป

จะทำให้บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำเกิดความร้อนปริมาณมากจนทำให้โครงสร้างไดโอดเปล่งแสงเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้อีก

3. วงจรไดโอดเปล่งแสง

วงจรต่อไดโอดเปล่งแสงนิยมใช้ใน 2 ลักษณะ คือ (1) การต่ออนุกรม (series connection) และ (2) การต่อขนาน (parallel connection) จะใช้วิธีการต่อแบบใดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานหรืออาจใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันก็ได้ ในกรณีที่ใช้งานไดโอดเปล่งแสงขนาด

เล็กกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า 3 วัตต์ ไดโอดเปล่งแสงแต่ละตัว จะมีค่าแรงดันตกคร่อม (voltage drop) ระหว่างแอโนดและแคโทดต่ำในสภาวะไบแอสตรง (forward bias) 1.6-4.4 โวลต์ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุสารกึ่งตัวนำ เมื่อต้องการต่อใช้งานไดโอด เปล่งแสงหลาย ๆ ดวง จะนิยมต่อแบบอนุกรม เพื่อให้เหมาะสมกับค่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้า [1] ตัวอย่าง เช่น การต่อไดโอดเปล่งแสง 3 วัตต์ อนุกรมกัน จำนวน 8 หลอด

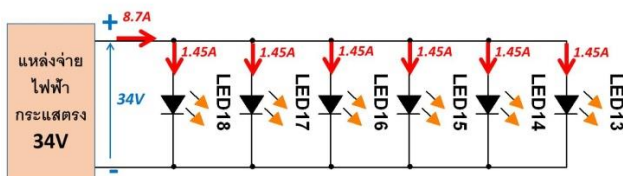


รูปที่ 3 วงจรไดโอดเปล่งแสงต่อแบบอนุกรม

การต่อวงจรไดโอดเปล่งแสงแบบขนาน นิยมใช้กับไดโอดเปล่งแสงกำลังสูง (ขนาด 10 วัตต์ ขึ้นไป) เพราะไดโอดเปล่งแสงกำลังสูงนั้นต้องการแรงดันไฟฟ้าสูงตามไปด้วย โดยทั่วไปจะมีแรงดันไฟฟ้า 10-36 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 0.3-2 แอมแปร์ เช่น ไดโอดเปล่งแสงชนิด COB หรือ MCOB ตัวอย่าง เช่น การต่อไดโอดเปล่งแสงกำลังสูงขนาด 50 วัตต์ 34 โวลต์ 1.45 แอมแปร์ จำนวน 6 หลอด ขนานกันเพื่อต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาด 34 โวลต์ 10 แอมแปร์ การต่อแบบนี้

แต่ละหลอดมีแรงดันตกคร่อมเมื่อได้รับไบแอสตรง (VF) 3.51 โวลต์ และกระแสไบแอสตรง (IF) 700 มิลลิแอมแปร์ กรณีนี้จะได้แรงดันรวมเท่ากับ $V_{tot} = 8 \times 3.51 \text{ โวลต์} = 28.08 \text{ โวลต์}$ และกำลังไฟฟารวม $P_{tot} = V_{tot} \times I_F = 28.08 \text{ โวลต์} \times 0.7 \text{ แอมแปร์} = 19.66 \text{ วัตต์}$ [5] วงจรไดโอดเปล่งแสงต่อแบบอนุกรมแสดงในรูปที่ 3

ไดโอดเปล่งแสงแต่ละหลอดจะรับแรงดันไฟฟ้า 34 โวลต์ และใช้กระแสไฟฟ้า 1.45 แอมแปร์ รวม 6 หลอด จะใช้กระแสไฟฟารวม $I_{tot} = 1.45 \text{ แอมแปร์} \times 6 = 8.7 \text{ แอมแปร์}$ และแรงดันไฟฟารวมเท่ากับ 34 โวลต์ เพราะการต่อแบบขนานนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ไดโอดเปล่งแสงแต่ละหลอดจะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า ดังรูปที่ 4 [6] กรณีนี้กำลังไฟฟารวมของไดโอดเปล่งแสง คือ $P_{tot} = I_{tot} \times V_{tot} = 8.7 \text{ แอมแปร์} \times 34 \text{ โวลต์} = 295.8 \text{ วัตต์}$



รูปที่ 4 วงจรไดโอดเปล่งแสงต่อแบบขนาน

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดที่เกิดขึ้น คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอยู่ทั่วไปในท้องตลาดนั้น มีค่าแรง

ดันคงที่ เช่น 12, 24, 36, และ 48 โวลต์ ในบางกรณีจึงต้องใช้ตัวต้านทาน (resistor) ต่ออนุกรมกับ

ไดโอดเปล่งแสงเพื่อจำกัดกระแสไฟฟ้าไม่ให้เกินพิกัด และแบ่งแรงดันไฟฟ้าส่วนเกินไม่ให้เกินกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ไดโอดเปล่งแสงต้องการอีกด้วย

4. ชนิดของไดโอดเปล่งแสง

ไดโอดเปล่งแสงได้รับการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตมาอย่างต่อเนื่อง เริ่มจากไดโอดเปล่งแสงชนิดที (T-type LED) รูปร่างเป็นแบบโดม มี 2 ขา หุ้มด้วยอีพอกซีใสสีต่าง ๆ ให้ค่าความส่องสว่าง (ลูเมน, lumen, Lm) ต่ำอยู่ระหว่าง 60-70 ลูเมนต่อวัตต์ ใช้เป็นหลอดสัญญาณแสดงผล การติดตั้งต้องบัดกรีลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ มีความยุ่งยากและเมื่อประกอบจำนวนมาก ๆ แล้ว จะมีค่าความต้านทานความร้อนสูงมาก กำลังไฟฟ้าสูญเสียเหมือนกัน ในปัจจุบันยังใช้กันอยู่มากสำหรับเป็นไฟแสดงสภาวะการทำงาน ต่อมา คือ ไดโอดเปล่งแสงชนิด เอส.เอ็ม.ดี (SMD LED) ได้พัฒนาให้มีความส่องสว่างมากขึ้นโดยมีค่าความส่องสว่าง 70-80 ลูเมนต่อวัตต์ มีลักษณะเป็นชิพ (chip) เล็ก ๆ อายุการใช้งานยาวนานขึ้น มีค่าความต้านทานความร้อนลดลง กระจายความร้อนได้ดีถึง 50 % ต่อมาในปี ค.ศ. 1998 ได้มีการพัฒนาไดโอดเปล่งแสงกำลังสูง (สิทธิบัตรการประดิษฐ์ของบริษัท LumiLED) มีกำลังไฟฟ้า 1-3 วัตต์ ให้ค่าความส่องสว่างระหว่าง 60-80 ลูเมนต่อวัตต์ และมีการระบายความร้อนได้ดีเช่นกัน ไดโอดเปล่งแสงกำลังสูงยุคต่อมา คือ ชนิดกำลังสูงมาก (very high power LED) มีกำลังไฟฟ้ามากกว่า 5 วัตต์ จนถึง 200 วัตต์ มีโครงสร้างชนิด COB ใน 1 ชิพจะประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสงเม็ดเล็ก ๆ จำนวนมากต่อวงจรภายในชิพ ให้ค่าความส่องสว่าง 90-100 ลูเมนต่อวัตต์ และมีความต้านทานความร้อนลดลงอย่างมากเพราะไม่มีการเชื่อมต่อวงจรไดโอดเปล่งแสงแต่ละดวงจากภายนอกและชนิดที่ให้ความส่องสว่างมากที่สุด คือ ชนิด MCOB มีกำลังไฟฟ้า 20-200 วัตต์ ให้ความส่อง

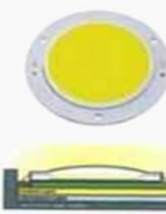
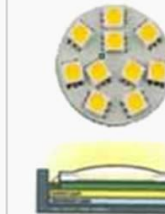
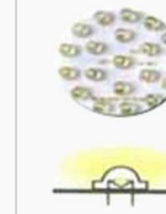
สว่างมากกว่า 100-140 ลูเมนต่อวัตต์ มีค่าความต้านทานความร้อนต่ำมากกระจายความร้อนได้ดีถึง 97 % แต่วงจรการควบคุมจะซับซ้อนมากขึ้น [7,8] ดังตารางที่ 2

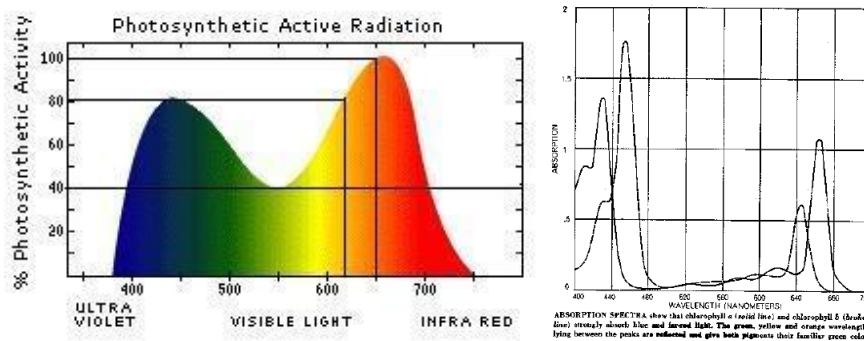
5. ประโยชน์ของแสงในการผลิตพืช

แสงมีความสำคัญและจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ แสงสามารถอธิบายได้ในเชิงปริมาณ (ความเข้มของแสง) และในเชิงคุณภาพ (ความยาวคลื่นของแสง) การวัดปริมาณของแสง หรือจำนวนพลังงานรวมที่แสงผลิตออกมา จะอยู่ในรูปของพลังงานต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) หรือเทอมของจำนวนโฟตอน (moles of photons) หน่วยเป็นไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) แสงธรรมชาติที่มาจากดวงอาทิตย์ ประกอบด้วยสเปกตรัมของแสง (light spectrum) ในช่วงความยาวคลื่นแสงระหว่าง 250-3000 นาโนเมตร (nm) การที่แสงมีความยาวคลื่นแตกต่างกัน ทำให้เกิดสีที่แตกต่างกันไปด้วย

แสงที่พืชนำมาใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อการเจริญเติบโต สร้างใบ ดอก และผล คือ แสงในช่วงที่มนุษย์มองเห็น (visible light) ซึ่งเป็นแสงที่มีความยาวคลื่น 380-770 นาโนเมตร แต่จะมีช่วงแสงเฉพาะที่พืชใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง ที่เรียกว่า photo synthetically active radiation (PAR) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ซึ่งสำคัญมากต่อพืชในการใช้พลังงานเพื่อสังเคราะห์ด้วยแสง จากรูปที่ 5 พบว่าพืชจะดูดซึมแสงเพื่อสร้างคลอโรฟิลล์ชนิด a และ b (chlorophyll molecules type a & b) ได้ดีที่สุดระหว่างความยาวคลื่น 400-480 นาโนเมตร (แสงสีน้ำเงิน) และระหว่าง 630-680 นาโนเมตร (แสงสีแดง) [9] โดยช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร พืชต้องการแสงเหล่านั้นในช่วงเวลาใดบ้าง

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบรูปแบบ ค่าความส่องสว่าง และเทคโนโลยีของไดโอดเปล่งแสงชนิดต่าง ๆ ดัดแปลงจาก [8]

MCOB LED	COB LED	High power LED	SMD LED	T-type LED
				
Single Layer Aluminum Plate	Big LED Chip on 3 Layers Plate	High Power Chip on 3 Layers	Small LED Chip on	LED Pin On PC Board
100 lm/w - 140 lm/w	70 lm/w - 90 lm/w	60 lm/w - 80 lm/w	70 lm/w - 90 lm/w	60 lm/w 70 lm/w
ติดตั้งซิลิคอนชิปลงบนแผ่นอลูมิเนียมโดยตรงทำให้การกระจายความร้อนดีขึ้นร้อยละ 97 ควรใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบมีวงจรควบคุม	ติดตั้งซิลิคอนชิปขนาดใหญ่ลงบนแผ่นอลูมิเนียมภายในมีเม็ดไดโอดเปล่งแสงจำนวนมากต่อสายไว้ภายในมีการกระจายความร้อนดีขึ้นร้อยละ 50	ติดตั้งเพียง 2 ขาลงบนผิวหน้าของแผ่นวงจรพิมพ์มีเลนส์ทั้งแบบรวมแสงและกระจายสิทธิบัตรการประดิษฐ์ของ LumiLED	ติดตั้งซิลิคอนชิปลงบนผิวหน้าของแผ่นอลูมิเนียมชั้นที่ 3 ทำให้การกระจายความร้อนดีขึ้นร้อยละ 50 แต่มีราคาสูง	ติดตั้งแต่ละหลอดลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ให้การกระจายแสงดี ติดตั้งยากซับซ้อนกระจายความร้อนไม่ดีมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียมาก



รูปที่ 5 PAR wavelengths และการดูดกลืนคลื่นแสงเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช [10]

และต้องการแสงสีอะไรบ้าง เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การเพาะเมล็ด และการสร้างดอกใบ และผลที่ดีที่สุด พิจารณาได้จากตารางที่ 3

แสงที่เรียกว่า near infrared (NIR) มีช่วงความยาวคลื่น 770-850 นาโนเมตร เป็นช่วงแสงที่ติดกับ

แสงสีแดง บางครั้งเรียกว่าแดงไกล (far-red, FR) ช่วงแสงนี้มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืชและเป็นช่วงแสงที่สายตามนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ ช่วงแสง FR มีช่วงคลื่น 700-800 นาโนเมตร ทั้งนี้อัตราส่วนระหว่างแสงสีแดงต่อสีแดงไกลนั้น มีความสำคัญต่อการเจริญ

เติบโตของพืชเช่นกัน [9,11]

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของแสง ความยาวคลื่นแสง และประโยชน์ต่อพืช

ช่วงคลื่น (นาโนเมตร)	สี	มีประโยชน์ต่อพืช
380-436	ม่วง	ไม่แน่นอน อาจมีผลมาจากแสงใกล้สีน้ำเงินที่มีความยาวคลื่นใกล้กับ 436 นาโนเมตร บ้าง
436-495	น้ำเงิน	ความเข้มต่ำ ๆ มีความจำเป็นในการเพาะเมล็ดและการอนุบาลพืช
495-566	เขียว	ไม่มีความจำเป็น แต่มีส่วนช่วยในการสังเคราะห์ด้วยแสง
566-589	เหลือง	ไม่มีความจำเป็น แต่มีส่วนช่วยในการสังเคราะห์ด้วยแสง
589-627	ส้ม	ดีที่สุดสำหรับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงสุด
627-770	แดง	ดีที่สุด ทำให้เกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงสุด ช่วยเร่งดอก ลำต้น (อัตราส่วนของแสงสีแดง : แดงไกล มีความสำคัญมาก)

มีการพัฒนาระบบการผลิตพืชแบบปิดเพื่อการผลิตพืชผักคุณภาพสูงมาอย่างต่อเนื่อง และมีโครงการตัวอย่างที่ประสบความสำเร็จและน่าศึกษาเพื่อนำมาพัฒนาประเทศไทยหลายโครงการ ได้แก่ โครงการ TerraSphere ของแคนาดา โครงการ VertiCrop™ ของแคนาดา ร่วมกับสหราชอาณาจักร โครงการ Plant Factory ของญี่ปุ่น และโครงการ NextFarm ของสาธารณรัฐเกาหลี เป็นต้น โครงการตัวอย่างเหล่านี้เป็นการผลิตพืชที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถควบคุมปัจจัยการผลิตให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชได้ดี ทั้งเรื่องแสง ที่ใช้แสงจากไดโอดเปล่งแสงเฉพาะช่วงแสงสีแดงและสีน้ำเงินทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อย มีการควบคุมธาตุอาหารพืช ความชื้น อุณหภูมิ แสง น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และการจัดการโรคและแมลงอย่างดี เป็นระบบการผลิตที่ประหยัดน้ำประหยัดพลังงาน ทำให้ได้ผลผลิตที่มีความปลอดภัย ระบบการผลิตแบบนี้พืชโตเร็วได้ผลผลิตสูงใช้พื้นที่น้อยผลผลิตมีความปลอดภัยผลิตได้ตลอดทั้งปีจึงเป็นระบบการผลิตที่ยั่งยืน [12] ในประเทศญี่ปุ่น องค์กร JPFA (Japan Plant Factory Association) พยายามแก้ไขปัญหา

ด้านอาหาร สิ่งแวดล้อม พลังงาน และทรัพยากรในศตวรรษที่ 21 ของประเทศโดยการมุ่งเน้นการพัฒนาการสาธิต และการขยายระบบการปลูกพืชโดยใช้แสงอาทิตย์เทียม (plant factory with artificial light, PFAL) (รูปที่ 6) ระบบดังกล่าวสามารถผลิตพืชอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพในประเด็นของการประหยัดทรัพยากร เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ได้ผลผลิตสูงและมีคุณภาพ ระบบการปลูกพืชโดยใช้แสงเทียมนี้เหมาะสำหรับการปลูกผักใบและพืชใบที่มีความสูงไม่มากนักนับเป็นการส่งเสริมการเพาะปลูกสินค้าเกษตรในเขตเมืองได้เป็นอย่างดี [13,14]

ในประเทศไทยมีการนำแสงอาทิตย์เทียมไปใช้ทดแทนแสงธรรมชาติอยู่บ้างในงานวิจัยและการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ เช่น การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อของกล้วยไม้ ยูคาลิปตัส และการปลูกผักสลัดเรดโอ๊ค โดยใช้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์หรือแสงจากไดโอดเปล่งแสง นอกจากนี้ยังมีการทดลองใช้แสงจากไดโอดเปล่งแสงในการศึกษาการเจริญเติบโตของกล้วยไม้และพืชสวนครัว เป็นต้น [16-21] การปลูกพืชโดยใช้แสงเทียมต้องการระบบการปลูกที่มีความแม่นยำพิเศษ

เช่น เป็นระบบให้แสงอัตโนมัติ แสงที่กำเนิดขึ้นสามารถปรับเปลี่ยนให้มีความเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชแต่ละชนิดได้ เป็นระบบปิดสามารถปลูกพืชแบบอินทรีย์ได้ มีการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น น้ำ และสารอาหารในดินอย่างเหมาะสม ระบบดังกล่าว

เรียกว่า การเกษตรแม่นยำ (precision agriculture) [13] ซึ่งมีการใช้แสงจากไดโอดเปล่งแสงและมีการควบคุมสเปกตรัมของแสงให้เหมาะสมกับความต้องการในการเจริญเติบโตของพืชได้



รูปที่ 6 โครงการ Plant Factory with Artificial Light [14] และโครงการ VertiCrop™ [15]

6. การประยุกต์ไดโอดเปล่งแสงกับการเจริญเติบโตของพืช

การเจริญเติบโตของพืช หมายถึง การที่พืชมีการเพิ่มความสูง เพิ่มขนาด และมีการเปลี่ยนแปลงอวัยวะต่างๆ ไปตามขั้นตอนของพืชนั้น ๆ เช่น เมล็ดที่สมบูรณ์เมื่อได้รับความชื้นที่เหมาะสมจะเริ่มงอกรากและสร้างต้นอ่อน แล้วเติบโตเป็นต้นกล้า ต้นกล้าจะเติบโตเป็นต้นใหญ่ ที่มีใบ และกิ่งก้านสาขามากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น จนกระทั่งเจริญเติบโตเต็มที่จึงออกดอกและผลต่อไป เกณฑ์การวัดการเจริญเติบโตของพืช ประกอบด้วย การวัดความสูงของพืช การนับจำนวนโครงสร้างที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพืช และการวัดน้ำหนักแห้งของพืช ลักษณะที่แสดงว่าพืชมีการเจริญเติบโตนั้น อาจสังเกตได้จากเมล็ดมีการงอกไปเป็นต้นอ่อน รากจะยาวและใหญ่ขึ้น จำนวนรากที่งอกมีเพิ่มขึ้น มีการแตกแขนงของรากมากขึ้น ลำต้นจะสูงและใหญ่ขึ้น มีการผลิตน้ำตาลทั้งทางตาใบ และตาดอก ดอกจะใหญ่ขึ้น หรือดอกเปลี่ยนแปลงไปเป็นผล ใบและผลจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นต้น โดยทั่วไปแบ่งการ

เจริญเติบโตของพืชออกเป็น 3 ระยะ คือ (1) ระยะการเพาะกล้า (seeding) (2) ระยะการเจริญเติบโต (vegetative growth) และ (3) ระยะการออกดอกและแพร่พันธุ์ (germinate through flowering) การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไดโอดเปล่งแสงสีต่าง ๆ ในการปลูกพืช และการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อของพืช เพื่อศึกษาว่าผลของแสงสีใดบ้างที่กำเนิดจากไดโอดเปล่งแสงจะมีความเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชในแต่ละช่วงการเจริญเติบโตมากที่สุด รวมถึงทราบความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสม

จิตรพรพรณ [16] ประยุกต์ใช้หลอดแอลอีดีให้แสงประดิษฐ์แทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้ โดยใช้หลอดแอลอีดีสีแดงและสีน้ำเงินโดยใช้หลอดแอลอีดีสีแดง 90 % และสีน้ำเงิน 10 % พบว่าการใช้หลอดแอลอีดีช่วยในการพัฒนาตาบนก้านช่อดอกได้สูงกว่าการใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ และช่วยเพิ่มจำนวนเนื้อเยื่อมากกว่า 2.5 เท่า และในการเลี้ยงต้นกล้าขนาดเล็กในสภาพปลอดเชื้อเป็นเวลา 120 วัน ทำให้ต้นกล้ามีน้ำหนักสดและความสูงมาก

กว่าต้นกล้าที่เลี้ยงด้วยแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์อย่างมีนัยสำคัญ

ศิริพร [17] เสนอวิทยานิพนธ์ เรื่อง ผลของไดโอดเปล่งแสงและสูตรอาหารต่อการงอกของเมล็ดกล้วยไม้ช้างกระ เอื้องพวงหยก และการพัฒนาโปรโตคอร์มไลท์บอดี้ (PLBs) ของ *Renanstylis hybrid* ในสภาพปลอดเชื้อ โดยเฉพาะเมล็ดบนอาหารสูตรเดียวกันนาน 2 เดือน ผลการวิจัยพบว่าเมล็ดช้างกระมีร้อยละของการงอกมากที่สุดเมื่อเลี้ยงในแสงแอลอีดีสีแดงต่อสีน้ำเงิน 80 : 20 และต้นกล้ามีค่าดัชนีการเจริญเติบโตสูงสุดเมื่อเพาะบนสูตรอาหารที่เพิ่มน้ำสกัดจากมันฝรั่ง 100 กรัมต่อลิตร ในสภาพแสงแอลอีดีสีแดงต่อสีน้ำเงิน 90 : 10 ส่วนเมล็ดเอื้องพวงหยกมีร้อยละของการงอกไม่ต่างกันในทุกสภาพแสง แต่มีค่าดัชนีการเจริญเติบโตสูงสุดในสภาพแสงแอลอีดีสีแดงเพียงสีเดียว หลังการย้ายต้นกล้าอายุ 2 เดือน ไปเลี้ยงบนอาหารใหม่นาน 2 เดือน พบว่าต้นกล้าช้างกระมีค่าเฉลี่ยจำนวนใบ ความยาวใบ จำนวนราก และความยาวรากสูงสุดในสภาพแสงแอลอีดีสีแดงต่อสีขาว 50 : 50 ส่วนต้นกล้าเอื้องพวงหยกมีการเจริญเติบโตสูงสุดในสภาพแสงฟลูออเรสเซนต์ และแสงแอลอีดีสีแดงต่อสีขาว 50:50 บนอาหารสูตรที่เพิ่มกล้วยหอม 50 กรัมต่อลิตร และผลของแสงจากแอลอีดีร่วมกับสูตรอาหารต่อการพัฒนา PLBs 3 รูปแบบของกล้วยไม้ลูกผสม *Renanstylis hybrid* คือ (1) กลุ่ม PLBs สีเขียวใส (2) กลุ่ม PLBs สีเขียวขุ่น และ (3) กลุ่ม PLBs สีเขียวมีใบยอดยาว 1-2 มิลลิเมตร ที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตรเดิมเพิ่มน้ำตาล 5 และ 10 กรัม และน้ำมะพร้าว 0 และ 150 มิลลิลิตรต่อลิตร ในสภาพแสงทั้ง 5 แบบ นาน 2 เดือน พบว่ากลุ่ม PLBs แบบที่ 2 และ 3 มีการพัฒนาไปเป็นยอดและต้นอ่อนได้ดีกว่ากลุ่ม PLBs แบบที่ 1 เมื่อเลี้ยงในสภาพแสงจากหลอดแอลอีดีสีแดงต่อสีน้ำเงิน 80 : 20 หรือแสงแอลอีดีสีแดงต่อสีขาว 50 : 50 บนอาหารสูตรที่เพิ่มน้ำตาล 5

กรัม และน้ำมะพร้าว 150 มิลลิลิตรต่อลิตร

จุนธิภา และคณะ [18] รายงานการปลูกพืชสวนครัว คือ กะเพรา โหระพา และแมงลัก ภายใต้แสงเทียมเปรียบเทียบระหว่างแสงจากหลอดแอลอีดีและหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยปลูกในกล่องทดลอง พบว่าพืชสวนครัวที่ได้แสงจากหลอดแอลอีดีมีชีวิตรอดและมีอัตราการเจริญเติบโต (ความสูง ความกว้างของพุ่ม และจำนวนใบ) ดีกว่าพืชที่ใช้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ และพืชที่ได้รับแสง 12 ชั่วโมงต่อวัน มีชีวิตรอดและมีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่าพืชที่ได้รับแสง 8 และ 4 ชั่วโมงต่อวัน โดยพืชที่ได้รับแสงที่ความเข้มแสง 1,100 ลูเมน จะมีชีวิตรอดและมีการเจริญเติบโตดีกว่าพืชที่ได้รับแสงที่ความเข้มแสง 900, 700 และ 500 ลูเมน ตามลำดับ ผู้วิจัยยังให้ข้อเสนอแนะว่าแหล่งกำเนิดแสงแอลอีดีควรปรับค่าความเข้มแสงได้ เพื่อให้สามารถควบคุมความเข้มแสงให้เหมาะสมกับพืชนั้น ๆ ตลอดระยะเวลาการปลูกพืช เพราะระหว่างที่พืชเจริญเติบโตระยะห่างระหว่างต้นพืชกับแหล่งกำเนิดแสงจะลดลง

ปัญญา [19] พัฒนาเครื่องต้นแบบแหล่งกำเนิดแสงเทียมสำหรับปลูกต้นไม้ โดยใช้หลอดแอลอีดีสีแดง (ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร) ผสมกับหลอดแอลอีดีสีน้ำเงิน (ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร) ในสัดส่วน 3 : 1 (แดง 30 หลอด : น้ำเงิน 10 หลอด) และใช้หลอดต่างเป็นพืชทดลอง โดยกลุ่มทดลองปลูกในแสงแอลอีดีส่วนกลุ่มควบคุมปลูกในห้องเดียวกันโดยใช้แสงธรรมชาติ ภายในห้องนั้น ระยะปลูก 5 วัน พบว่าพืชมืดที่ปลูกภายใต้แสงเทียมจะมีขนาดใบและกิ่งใหญ่กว่าและมีสีที่สวยงามกว่าพืชมืดที่ปลูกในห้องเดียวกันที่ใช้แสงธรรมชาติ

อภิชาติ และคณะ [20] ได้ประยุกต์ไดโอดเปล่งแสงเป็นแหล่งกำเนิดแสงในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อยูคาลิปตัสในสภาพปลอดเชื้อ โดยใช้การผสมกันระหว่างสี

น้ำเงิน : สีแดง : สีขาว 3 วิธี คือ วิธีที่ 1 10:81:9 (615 ลักซ์) วิธีที่ 2 7:88:5 (910 ลักซ์) และวิธีที่ 3 6:90:4 (1,105 ลักซ์) เปรียบเทียบกับแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (2,426 ลักซ์) ระยะเวลาให้แสงนาน 16 ชั่วโมงต่อวัน ระยะเวลาทดลอง 4 สัปดาห์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ายูคาลิปตัสมีจำนวนยอดมากที่สุดเมื่อเลี้ยงด้วยแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ และยังให้ความยาวยอดและน้ำหนักแห้งของชิ้นส่วนมากที่สุด และพบว่าทุกวิธีมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และคลอโรฟิลล์ทั้งหมดไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาอัตราการประหยัดพลังงานพบว่าการใช้หลอดแอลอีดีตามวิธีที่ 1, 2 และ 3 จะลดพลังงานไฟฟ้าได้ร้อยละ 90.9, 88.52 และ 81.35 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับหลอดฟลูออเรสเซนต์

สุทธิดา และคณะ [21] ศึกษาผลการเจริญเติบโตของผักสลัดเรดโอ๊คต่อแสงของหลอดแอลอีดี สีแดง สีขาวและสีน้ำเงิน ที่ความเข้มแสงต่างกันภายในโรงเรือน โดยแหล่งกำเนิดแสงมีระยะห่างจากถาดปลูก 30 เซนติเมตร ใช้เวลาการทดลอง 21 วัน พบว่าการปลูกภายใต้หลอดแอลอีดีสีแดงร่วมกับสีน้ำเงินและการเพิ่มความเข้มของแสงจะช่วยให้อัตราการเจริญเติบโตของเรดโอ๊คเพิ่มขึ้น

วันทนา และคณะ [22] รายงานการวิจัย เรื่องผลของไดโอดเปล่งแสงต่อการเพิ่มจำนวน PLBs ของกล้วยไม้สกุลหวายไซเนียเยียสกุล ผลการศึกษาพบว่า PLBs ที่เลี้ยงภายใต้แสงสีแดงจากหลอดแอลอีดี มีจำนวน PLBs ค่าอัตราการขยายพันธุ์ (propagation rate) น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งสูงที่สุด โดยมีจำนวน PLBs เพิ่มขึ้นมากกว่าแสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ถึง 28.6 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แสงสี อื่น ๆ จากหลอดแอลอีดี มีผลต่อการเพิ่มจำนวนของ PLBs ไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่แสงสีแดงจากหลอดแอลอีดีส่งผลให้ PLBs มีปริมาณรงควัตถุ ได้แก่ คลอโรฟิลล์ a

คลอโรฟิลล์ b คลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์น้อยที่สุด ทำให้ PLBs มีสีเขียวซีด อย่างไรก็ตาม ปริมาณรงควัตถุดังกล่าวมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับ PLBs ที่เลี้ยงภายใต้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์

K. Phanumas [23] พัฒนาระบบกำเนิดแสงเทียมด้วยไดโอดเปล่งแสงสีแดง (640 นาโนเมตร) และสีน้ำเงิน (470 นาโนเมตร) เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตของกล้วยไม้ “ช้างแดง” ไทย โดยใช้ระบบควบคุมความเข้มแสงคงที่แบบย้อนกลับซึ่งใช้โฟโตไดโอดเป็นตัวเซนเซอร์แสงและใช้วงจรป้อนกลับควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้มอสเฟตกำลังเป็นตัวควบคุมไดโอดเปล่งแสง พบว่ากล้วยไม้ที่ทดลองโดยใช้ไดโอดเปล่งแสงสีแดงมีอัตราการเจริญเติบโต (ขนาดใบ จำนวนใบ ความยาวราก และจำนวนราก) ต่ำกว่ากล้วยไม้ที่ปลูกด้วยแสงสีน้ำเงินและแสงธรรมชาติ

Sun-Ja Kim และคณะ [24] ศึกษาอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้นเบญจมาศภายใต้แสงประดิษฐ์ที่ผู้วิจัยประดิษฐ์ขึ้น 6 รูปแบบ การทดลองที่แตกต่างกัน คือ (1) แสงฟลูออเรสเซนต์ (2) แสงจากแอลอีดีสีน้ำเงิน (3) แสงจากแอลอีดีสีแดง (4) แสงจากแอลอีดีสีแดงและสีน้ำเงิน (5) แสงจากแอลอีดีสีแดงและแดงไกล (6) แสงผสมแอลอีดีสีน้ำเงินและแสงแดงไกลใช้ระยะเวลาการทดลอง 35 วัน ผลการศึกษาพบว่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงที่สุดภายใต้การทดลองที่ 4 และต่ำสุดภายใต้แสงจากการทดลองที่ 2 และ 6 น้ำหนักสดน้ำหนักแห้งและขนาดของใบดีที่สุดภายใต้การทดลองที่ 1 และ 4 ความยาวก้านดอกยาวที่สุดภายใต้แสงจากการทดลองที่ 3 และ 5 ต้น จะเจริญเติบโตได้ดีที่สุดภายใต้แสงจากการทดลองที่ 4 จึงอาจพัฒนาให้เกิดการควบคุมการผสมกันระหว่างแสงสีแดง สีน้ำเงิน และฟลูออเรสเซนต์ในแต่ละช่วงเวลาของการปลูกดอกเบญจมาศอย่างเหมาะสม เนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยแสงนั้นแต่ละช่วงเวลาต้องการความยาว

คลื่นของแสงที่แตกต่างกัน

Na Lu และคณะ [25] รายงานผลการใช้แสงประดิษฐ์จากไดโอดเปล่งแสงเพื่อเพิ่มผลผลิตมะเขือเทศแบบมัดเดี่ยว (single-uruss tomato) ที่ปลูกในสภาพแวดล้อมที่มีความหนาแน่นสูง โดยใช้ไดโอดเปล่งแสงสามชนิด คือ สีแดง สีขาว และสีน้ำเงินเป็นแหล่งกำเนิดแสงวางห่างจากต้นมะเขือเทศ 25 เซนติเมตร ทดลองในระยะเวลา 28 วัน ผลการวิจัยพบว่าผลผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 12 และ 14 ภายใต้แสงสีขาวและแสงสีแดงตามลำดับ และผลการวัดค่าความหวานและกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) พบว่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่าแอลอีดีสีขาวและสีแดงมีผลต่อผลผลิตมะเขือเทศ และหากใช้แสงสีขาวผสมกับแสงสีแดงและสีน้ำเงินจะเหมาะสมมากในการเพิ่มผลผลิตสำหรับการปลูกแบบมัดเดี่ยวในสภาพแวดล้อมที่มีความหนาแน่นสูง

Akira Yano และคณะ [26] พัฒนาระบบการกำเนิดแสงเทียมโดยใช้ไดโอดเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน 5 ชนิด คือ สีม่วง (405 นาโนเมตร) สีน้ำเงิน (460 นาโนเมตร) สีส้มแดง (630 นาโนเมตร) สีแดง (660 นาโนเมตร) และสีแดงไกล (735 นาโนเมตร) โดยมีพื้นที่กำเนิดแสง 40 x 70 เซนติเมตร ใช้ระบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมความเข้มของแสงที่กำเนิดจากไดโอดเปล่งแสง (PFD control, photon flux density control) และการควบคุมแสงของไดโอดเปล่งแสงทั้ง 5 สี แบ่งเป็น 35 ชุด แยกอิสระและควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม LabVIEW ผลการวิจัยพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมความเข้มของแสงได้ทั้ง 5 สี แบบผสมผสานสามารถเพิ่มและลดความเข้มแสงได้ทั้ง 5 ความยาวคลื่น

Le-Yan Chin และคณะ [5] รายงานผลการเจริญเติบโตของผักกาดหอม (*Lactuca sativa*) ที่ปลูกภายในอาคารโดยใช้แสงจากไดโอดเปล่งแสงกำลังสูงสี

แดงที่ให้ความยาวคลื่นระหว่าง 620-645 นาโนเมตรร่วมกับไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินที่ให้ความยาวคลื่นแสง 440-460 นาโนเมตร โดยใช้ไดโอด เปล่งแสงรุ่น Luxeon Rebel มีสัดส่วนระหว่างสีแดงต่อสีน้ำเงินเท่ากับ 1 : 1 โดยใช้ไดโอดเปล่งแสงสีแดงและสีน้ำเงินอย่างละ 8 หลอด แต่ละหลอดมีกำลัง ไฟฟ้า 2.457 วัตต์ การศึกษานี้ได้เปรียบเทียบระหว่างการให้แสงอาทิตย์ธรรมชาติกับแสงประดิษฐ์จากไดโอดเปล่งแสง โดยทดลองในระยะ 8 และ 11 วัน ผลการศึกษพบว่าแสงจากไดโอดเปล่งแสงกำลังสูงทำให้ผักกาดหอมเจริญเติบโตได้ดีกว่าทั้ง 2 ระยะเวลา โดยการเปรียบเทียบพื้นที่ของใบ ความกว้างของใบ และน้ำหนักต้นสด ได้ผลดีกว่าแสงธรรมชาติอย่างชัดเจน

Xiao-Xue Fan และคณะ [27] นำเสนอผลการศึกษาการเจริญเติบโตของต้นอ่อนมะเขือเทศที่ปลูกภายใต้แสงเทียมจากไดโอดเปล่งแสงผสมกันระหว่างสีแดงและสีน้ำเงิน โดยการควบคุมความเข้มแสงที่แตกต่างกันระหว่าง 50-550 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ผลการศึกษพบว่าที่ความเข้มแสงระหว่าง 300-550 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที มีผลให้น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นมะเขือเทศและ health index มีอัตราการเติบโตที่ดีมาก และที่ความเข้ม 300-450 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที จะได้ขนาดความหนาของใบสูงที่สุดและอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงดีที่สุดที่ความเข้มแสง 300 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที

Kuan-Hung Lin และคณะ [28] รายงานผลการเจริญเติบโตของต้นผักกาดหอมภายใต้แสงเทียม 3 รูปแบบ คือ (1) แสงจากไดโอดเปล่งแสงสีแดง-สีน้ำเงิน (2) แสงจากไดโอดเปล่งแสงผสมสีแดง-สีน้ำเงิน-สีขาว และ (3) แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยการศึกษาการสร้างโครโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ และน้ำตาล รวมทั้งสมบัติทางกายภาพของต้นและใบด้านรูปร่าง สี ความ

หวาน ความกรอบ โดยการให้แสงวันละ 16 ชั่วโมง ตลอดเวลาทดลอง 20 วัน ผลการศึกษาพบว่าน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง รูปร่างของใบ สี ความหวาน และความกรอบของผักกาดที่ปลูกภายใต้แสงรูปแบบที่ 2 ดีที่สุด รองลงมา คือ รูปแบบที่ 1 และ 3 ตามลำดับ และพบว่าสารอาหารของผักกาดที่ปลูกภายใต้แสงรูปแบบที่ 2 มีค่าสูงกว่ารูปแบบอื่น ๆ และมีข้อเสนอแนะว่าการควบคุมความยาวคลื่นของแสงให้ตรงกับความต้องการของพืช สำคัญที่สุดการพัฒนาาระบบควบคุมและการวัดแสงที่มีความละเอียดและพัฒนาเข้าสู่อุตสาหกรรมการเกษตรที่มีคุณภาพต่อไป

Jerico และคณะ [29] ศึกษาอัตราการงอกและการเจริญเติบโตของวานิลลา โดยใช้แสงเทียมเปรียบเทียบกับ 5 แบบ คือ (1) แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (2) แสงจากแอลอีดีสีขาว (3) แสงจากแอลอีดีสีน้ำเงิน (4) แสงจากแอลอีดีสีแดง (5) แสงจากแอลอีดีสีแดง : น้ำเงิน สัดส่วน 1 : 1 ทดลองให้แสงวันละ 16 ชั่วโมง ระยะเวลาทดลอง 60 วัน ผลการศึกษาพบว่า การงอกของเมล็ดวานิลามีความยาวของยอด (shoot) มากกว่า 3 เซนติเมตร ภายใต้แสงแบบ 3, 4 และ 5 และยว้นน้อยกว่า 3 เซนติเมตร ภายใต้แสงแบบที่ 1 และ 2 และพบว่าน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นอ่อนวานิลาสูงที่สุดเมื่อปลูกภายใต้แสงแบบที่ 5 สำหรับอัตราการเจริญเติบโต (ความสูง จำนวนใบ จำนวนราก และความยาวของราก) ของต้นวานิลาเติบโตได้ดีกว่าภายใต้แสงแบบที่ 1 และ 2

Aoi Shimada และคณะ [31] ออกแบบและสร้างชุดควบคุมไดโอดเปล่งแสงแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ (pulse width modulation, PWM) โดยแยกการควบคุมไดโอดเปล่งแสงสองชุด ชุดสีแดง และชุดสีน้ำเงิน พบว่าวิธีการควบคุมแบบ PWM ควบคุมด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีรูปแบบให้แสงทั้งสองสีปล่อยออกมาพร้อมกันที่ความถี่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ ด้วยตัว

ไซเกิล (duty cycle) ร้อยละ 50 โดยแสงแต่ละสีกำเนิดที่ความเข้มแสงเท่ากับ 200 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ทดลองมากที่สุด [30] และสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Ramazan S และคณะ (2016) แต่ใช้การควบคุมด้วย Programmable logic control และทดสอบภายใต้โรงเรือนเพาะปลูกระบบอัตโนมัติ

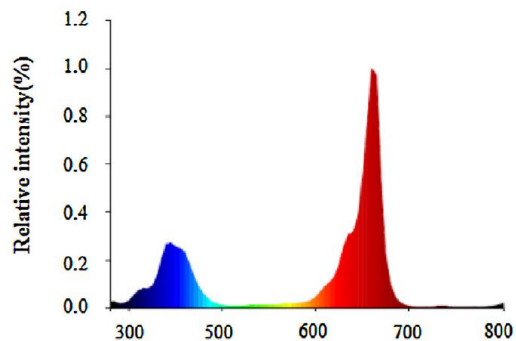
Hyo Gil Choi และคณะ [32] วิจัยเพื่อทดสอบผลของการใช้ไดโอดเปล่งแสง สีแดงและน้ำเงินต่อการปลูกสตรอว์เบอร์รี่ภายใน growth chamber (GC) โดยใช้ไดโอดเปล่งแสงและ plastic greenhouse (PG) ใช้ไดโอดเปล่งแสงร่วมกับแสงธรรมชาติ ผลการศึกษาพบว่าสตรอว์เบอร์รี่ที่ปลูกภายใน PG โดยใช้ไดโอดเปล่งแสง (สีแดงร่วมกับสีน้ำเงิน) ร่วมกับแสงธรรมชาติ เพิ่มผลผลิตและได้กรดอินทรีย์ (organic acid) มากกว่าที่ปลูกภายใน GC โดยใช้ไดโอดเปล่งแสงเพียงอย่างเดียว (สีแดงร่วมกับสีน้ำเงิน)

Chiara Piovene และคณะ [33] นำเสนอการทดลองปลูกพืชใบ คือ โหระพา และไม้ผล คือ สตรอว์เบอร์รี่ โดยการใช้ไดโอดเปล่งแสงสีแดงต่อสีน้ำเงินในสัดส่วน 0.7, 1.1, 1.5 และ 5.5 ผลการศึกษาพบว่าแสงเทียมจากไดโอดเปล่งแสงที่สัดส่วนสีแดงต่อสีน้ำเงินเท่ากับ 0.7 ช่วยเพิ่มผลผลิตทั้งพืชใบและไม้ผลและช่วยเพิ่มโภชนาการในพืชทั้งสองชนิดมากกว่าการผสมสีของแสงในสัดส่วนอื่น ๆ

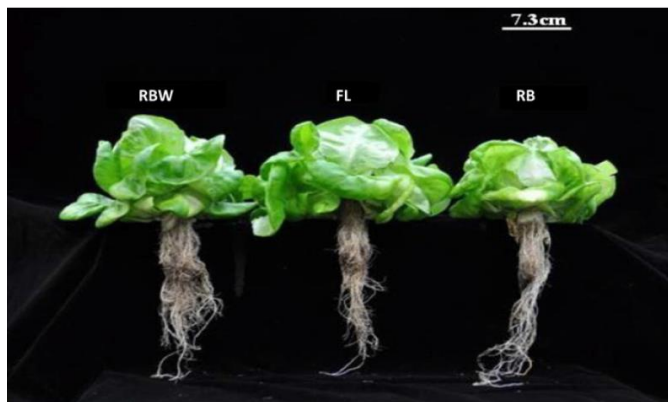
จากการศึกษาผลงานวิจัยที่กล่าวมาแล้ว และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติมจาก C.C. Chia และคณะ [34] Filippou และคณะ [35] Tomohiro และคณะ [36] W. Jun และคณะ [37] Yingchao Xu [38] T. Godo [39] E.J. Hahn [40] M.L Lian [41] เพื่อวิเคราะห์หาสัดส่วนของการใช้ไดโอดเปล่งแสงสีต่าง ๆ ว่าส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชทดลอง ในประเด็นใดบ้างและความยาวคลื่น

ของแสงที่นักวิจัยนำมาใช้มีช่วงใดบ้างแสดงในตารางที่ 4 ลักษณะของแหล่งกำเนิดแสงสำหรับพืชโดยใช้ไดโอดเปล่งแสงแสดงดังรูปที่ 7 และภาพการเปรียบเทียบจำนวนราก ใบ และต้นของผักกาดหอมที่ปลูกภายใต้

แสงจากไดโอดเปล่งแสงสีแดง สีนํ้าเงิน และสีขาว (RBW) และแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (FL) และแสงจากไดโอดเปล่งแสงสีแดงและสีนํ้าเงิน (RB) แสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 แหล่งกำเนิดแสงสำหรับพืชที่ใช้ไดโอดเปล่งแสงสีแดง สีนํ้าเงิน และสีขาว (RBW) และแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (FL) และแสงจากไดโอดเปล่งแสงสีแดงและสีนํ้าเงิน (RB) แสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 เปรียบเทียบจำนวนราก ใบ และต้นของผักกาดหอมที่ปลูกภายใต้แสงจากไดโอดเปล่งแสงสีแดง สีนํ้าเงิน และสีขาว (RBW) และแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (FL) และแสงจากไดโอดเปล่งแสงสีแดงและสีนํ้าเงิน (RB) แสดงในรูปที่ 8

7. สรุป

มีการใช้แสงเทียมจากไดโอดเปล่งแสงเป็นแหล่งกำเนิดแสงอย่างแพร่หลาย ทั้งที่ใช้ในห้องปลอดเชื้อเพื่อการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ และใช้ในการเพาะปลูกพืชภายใต้โรงเรือนแบบปิด และแบบเปิด โดยทดลองใช้กับพืชหลายชนิด เช่น เบญจมาศ [24] ถั่วลิสง [16,

17,22,23,35] ผักสลัด [21] ผักกาดหอม [5,24,28] มะเขือเทศ [25,27] สตรอว์เบอร์รี [32] วานิลลา [29] ยูคาลิปตัส [20] และโหระพา [18,32] ฯลฯ และพบว่าสีของแสงและช่วงความยาวคลื่นแสงที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช คือ แสงสีน้ำเงินที่มีความยาวคลื่นแสง 400 - 500 นาโนเมตร แสงสีแดงที่มีความ

ตารางที่ 4 สีและความยาวคลื่นแสงจากไดโอดเปล่งแสงที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลให้พืชทดลองมีอัตราการเจริญเติบโตดีที่สุด

Blue (nm)	Green (nm)	Yellow orange (nm)	Red (nm)	White (nm)	Far-red (nm)	Author/Year	Ratio of the LED's color	Results to promote
466	-	-	665	-	-	Hahn <i>et al.</i> , 2000	R+B (1:1)	V.G.
450	-	-	660	-	-	Lian <i>et al.</i> , 2002;	R+B (1:1)	V.G.
						Heo <i>et al.</i> , 2006	R+B (1:1)	V.G.
						lin <i>et al.</i> 2013	R+B (1:2)	Shooting
						chin <i>et al.</i> , 2008	R+B (1:1)	V.G.
440	-	-	650	-	720	Kim <i>et al.</i> , 2004	R+B (1:1)	V.G.
450	-	-	660-640	-	735	Kurilcik <i>et al.</i> , 2008	N.A.	V.G.
460	-	-	660	-	-	Li <i>et al.</i> , 2010	R+B (1:1)	V.G.+root
460	530	590	660	-	-	Mengxi <i>et al.</i> , 2010	R and B	R=Prolife-ration
								B=Promote enzyme
470	525	590	625	-	-	Godo <i>et al.</i> , 2011	R+B (0.3:0.7)	Seeding
440-460	-	-	620-645	-	-	Chin <i>et al.</i> , 2012	R+B (1:1)	V.G.
454	-	-	660	Φ	-	Kvan <i>et al.</i> , 2013	N.A.	V.G.
448	-	-	634-661	-	-	Chai <i>et al.</i> , 2015	R+B (0.7:0.3)	G.F.
450-490	-	-	635-700	Φ	-	Chiara <i>et al.</i> , 2015	R+B (R/B=0.7)	V.G.
450	525	-	660	-	730	Chia <i>et al.</i> , 2016	9IR	Callus Growth
460	-	-	660	560	-	Jerico <i>et al.</i> , 2016	R+B (1:1)	V.G.
Φ	Φ	-	Φ	-	Φ	Filippos <i>et al.</i> , 2016	B+G+R+FR (14:16:53:17:2.77)	V.G.
463	533	-	656	-	-	Tomohiro <i>et al.</i> , 2016	N.A.	V.G.
450	-	-	657	-	-	Jun <i>et al.</i> , 2016	R/B=1	P _m , C _i , S _m
							R/B=12	Ls
455/460/475	-	-	615/630/660	-	-	Ramazan <i>et al.</i> , 2016	R+B (1:1)	V.G.
460	-	-	650	-	-	Xu <i>et al.</i> , 2016	R/B=4:1	V.G.
440-490	525-533		615-700		720-735	Summary	R+B (0.3:0.7)*	Seeding
450*	525*	590*	660*	560*			R+B (1:1)	V.G.
							R+B (0.7:0.3)*	G.F.

V.G. = vegetative growth; G.F. = germination through flowering; N.A. = not available; Φ = not defined the specific of wavelengths; * = recommended by frequency; - = not used

ยาวคลื่นแสง 589-627 นาโนเมตร แสงสีแดงที่ความยาวคลื่นแสง 600-700 นาโนเมตร และแสงแดงไกลที่มีความยาวคลื่นแสง 700-800 นาโนเมตร โดยช่วง

ระยะเวลาการปลูกพืช ตั้งแต่เพาะเมล็ดจนถึงเก็บเกี่ยวผลผลิตนั้น พืชต้องการแสงที่มีความยาวคลื่นและสัดส่วนของแสงที่มีสีแตกต่างกัน 3 ช่วงเวลา คือ (1)

ช่วงการเพาะกล้า เป็นช่วงเริ่มต้นปลูกจากการเพาะเมล็ดจนเป็นต้นกล้าควรให้แสงสีน้ำเงินที่มีความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร และแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่นแสง 660 นาโนเมตร ในสัดส่วนแสงสีน้ำเงินต่อแสงสีแดง ประมาณ 75 : 25 [28,39] (2) ช่วงการเจริญเติบโต เป็นช่วงที่พืชมีใบและลำต้นสมบูรณ์ควรเร่งการเจริญเติบโตด้วยการให้แสงที่เหมาะสมกับการสังเคราะห์ด้วยแสง เช่น การให้แสงสีน้ำเงิน (450 นาโนเมตร) ต่อ แสงสีแดง (660 นาโนเมตร) ผสมกับแสงสีแดงไกล (790 นาโนเมตร) ที่สัดส่วน 50 : 50 [28,29,31,33,35, 36] (3) ช่วงการออกดอกและแพร่พันธุ์ควรให้แสงสีน้ำเงิน (450 นาโนเมตร) ต่อแสงสีแดง (660 นาโนเมตร) ผสมกับแสงสีแดงไกล (790 นาโนเมตร) ในสัดส่วน 25 : 75 และทุกช่วงเวลาของการเพาะปลูกควรให้แสงสีขาวผสมเข้าไปด้วยประมาณร้อยละ 1 [32] นอกจากนี้การใช้แหล่งกำเนิดแสงจากไดโอดเปล่งแสงยังช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าการใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นอย่างมาก โดยไดโอดเปล่งแสงมีข้อได้เปรียบที่สำคัญ คือ ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ร้อยละ 81-90 [20] และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า 50,000-100,000 ชั่วโมง ในขณะที่หลอดฟลูออเรสเซนต์มีอายุการใช้งานเพียง 2,000-3,000 ชั่วโมง ในอนาคตจะมีการประยุกต์ใช้ไดโอดเปล่งแสงเพื่อการผลิตพืชในระบบปิดมากยิ่งขึ้นเพราะสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้โดยไม่ต้องพึ่งพาแสงจากธรรมชาติ และได้ผลผลิตที่มีปริมาณและคุณภาพสูงส่งผลให้ผลผลิตมีราคาสูงตามไปด้วย แนวทางดังกล่าวอาจเป็นส่วนหนึ่งในการช่วยลดปัญหา ด้านการขาดแคลนอาหาร วิกฤติพลังงาน และสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรในศตวรรษที่ 21 อีกด้วย [12,13]

8. รายการอ้างอิง

[1] Gupta, S.D. and Jatothu, B., 2013, Funda-

mentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in *in vitro* plant growth and Morphogenesis, Plant Bioethanol. Rep. 7: 211-220.

[2] INVENTORS AND DEVELOPMENTS, Available Source: <http://www.edisontechcenter.org/LED.html>, April 15, 2016.

[3] Khanna, V.K., 2014, Fundamental of Solid-State Lighting LEDs, OLEDs, and Their Applications in Illumination and Displays, RC Press, New York.

[4] ทวีศักดิ์ กอนันตกุล, สุธี ผู้เจริญชนะชัย และ กัลยา อุดมวิทิต, เทคโนโลยีไดโอดเปล่งแสง (LED) และโอกาสของไทย, แหล่งที่มา : <http://www.nstda.or.th/nstda-knowledge/22-knowledge/8773-led-technology>, 16 มิถุนายน 2559.

[5] Chin, L.Y. and Chong, K.K., 2012, Study of high power light emitting diode (LED) lighting system in accelerating the growth rate of *Lactuca sativa* for indoor cultivation, Int. J. Phys. Sci. 7: 1773-1781.

[6] Watjanatepin, N., 2016, Fabrication and study of non-uniformity of single color chip-on board LED solar simulator, Acad. J. Sci. 5: 227-236.

[7] Reynolds, K., LED-Based Sun-Simulator Design: Technical and Commercial Considerations, Available Source: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=57253>, June 1, 2016.

[8] LED lighting technology comparison, Available Source: <http://www.ledaladdin.com>

- /Technology/LED/LED-lighting-comparison.html, May 22, 2016.
- [9] Gacomelli, G.A., Greenhouse Glazing and Solar Radiation Transmission Workshop, October 1998 @CCEA, Center for Controlled Environment Agriculture, Rutgers University, Cook College, AZ, 85721, USA.
- [10] Leviene, R.P., 1969, The mechanism of photosynthesis.
- [11] Applications for LED Lights: Plant Research, Available Source: <https://www.illumitex.com/horticulture/horticultural-plant-research-application/>, May 22, 2016.
- [12] กมล เลิศรัตน์, 2555, เทคโนโลยีการผลิตพืชแห่งศตวรรษที่ 21, ว.แก่นเกษตร 40(พิเศษ 4): 1-8.
- [13] Sustainable Agriculture: The Best Practices in Japan, 2556, บทพิสูจน์เกษตรยั่งยืนจากแดนปลาดิบ, น.ฟูโตโกส ไทยแลนด์, พฤศจิกายน: 18-28
- [14] Kozai, T., Sakaguchi, S., Akiyama, T., Ohshima, K. and Yamada, K., 2015, Plant Production Management System for PFAL (Plant Factory with Artificial Lighting) Beijing, China, Available Source: <https://vertical-farming.net/wp-content/uploads/2015/03/2015-05-10-Dr.-Toyoki-Kozai-Plant-Production-Management-System-for-PFAL.pdf>, June 11, 2016.
- [15] Vertical Farming, Farming in URBAN centres, Available Source: <http://www.verticrop.com/>, June 20, 2016.
- [16] จิตราพรณ พิธิ์, 2550, การเพาะเมล็ดและเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้, เอกสารประกอบการฝึกอบรมประชาชน หลักสูตรการเพาะเมล็ดและเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้, ณ สวนกล้วยไม้ระพีสาคริก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [17] ศิริพร ชื่นสำโรง, 2552, ผลของไดโอดเปล่งแสง (LEDs) และสูตรอาหารต่อการงอกของเมล็ดกล้วยไม้ช้างกระเอื้อง พวงหยก และการพัฒนา Protocorm-Like Body ของ Renanstylis Hybrid ในสภาพปลอดเชื้อ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [18] จุนธิภา โยธาทิพย์, พาสินี สุนากร และพัชรียา บุญกอแก้ว, 2553, การศึกษาการปลูกพืชภายในอาคารโดยใช้แสงประดิษฐ์, การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 7, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.
- [19] ปัญญามะศร, 2554, เครื่องต้นแบบแหล่งกำเนิดแสงเทียม สำหรับการปลูกต้นไม้ด้วยระบบการควบคุมการเปิดและปิดแสงแบบอัตโนมัติ, การประชุมวิชาการ ระบบเกษตรแห่งชาติครั้งที่ 5 : พลังงานทดแทนและความมั่นคงทางอาหารเพื่อมนุษยชาติ, ศูนย์แสดงนิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา, กรุงเทพฯ.
- [20] อภิชาติ ชิดบุรี, อนนท์ นานิน, กริช แสนสุภา และธีรวัฒน์ กลายเพศ, 2557, ผลของหลอดไดโอดเปล่งแสงร่วมกันสีน้ำเงิน/สีแดง/สีขาวที่มีต่อการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อแคลิฟอร์เนียในสภาพปลอดเชื้อ, ว.แก่นเกษตร 42(พิเศษ 3): 409-414.
- [21] สุทธิดา มณีเมือง, เนตรนภา อินสูลุด, นิติ คำเมืองลือ, ประดิษฐ์ เทอดทูล, พงษ์ สกุลช่างสังกะทัย, 2558, ผลของความเข้มแสงจากชุดหลอดแอลอีดีสำหรับการเพาะปลูกที่มีต่อผัก

- สลัดเรดโอ๊คในระบบโรงเรือนไฮโดรโปนิคส์, ว. วิจัย มทร อีสาน 8(1): 63-72.
- [22] วันทนา สมบูรณ์ทรัพย์ และคณะ, 2558, ผลของไดโอดเปล่งแสงต่อการเพิ่มจำนวนโปรโตคอร์มไลต์บอดี้ของกล้วยไม้สกุลหวายไซเนียเอียสกุล, การประชุมทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [23] Phanumas, K. and Kamplon, P., 2007, Lighting system for growth enhancement of Thai orchids, Proceeding of the 2007 ECTI International Conference, Thailand.
- [24] Sun-Ja, K., Eun-Joo, H., Jeong-Wook, H. and Kee-Yoeup, P., 2004, Effect of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of *Chrysanthemum plantets* *in vitro*, Sci. Host. 101: 143-151.
- [25] Lu, N., Maruo, T., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Ito, Y., Ichimara, T. and 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, Environ. Control Biol. 50: 63-74.
- [26] Yano, A. and Fujiwara, K., 2012, Plant lighting system with five wavelength-band light-emitting diodes providing photon flux density and mixing ratio control, Plant Methods 8: 46.
- [27] Fan, X.X., Xu, Z.G., Liu, X.Y., Tang, C.M., Wang, L.W. and Han, X.L., 2013, Effect of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light, Sci. Hort. 153: 50-55.
- [28] Lin, K.H., Huang, M.Y., Huang, W.D., Hsu, M.H., Yang, Z.W. and 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), Sci. Hort. 105: 86-91.
- [29] Jerico, J.B.B., Eduardo, M.E., Jose, H.C.C.V. and Victorino, M.R., 2016, Effect of LED light quality on *in vitro* shoot proliferation and growth of Vaniila plan folia Andrews, Afr. J. Biotechnol. 15: 272-277.
- [30] Shimada, A. and Taniguchi, Y., 2011, Red and blue pulse timing control for pulse width modulation light dimming of light emitting diodes for plant cultivation, J. Photochem. Photobiol. B Biol. 104: 399-404.
- [31] Senol, R., Kilic, S. and Tasdelen, K., 2016, Pulse timing control for LED plant growth unit and effects on carnation, Comp. Electron. Agric. 123: 125-134.
- [32] Choi, H.G., Moon, B.Y. and Kang, N.J., 2015, Effects of LED light on the production of strawberry during cultivation in a plastic greenhouse and in a growth chamber, Sci. Hort. 189: 22-31.
- [33] Piovene, C., Orsini, F., Bosi, S., Sanoubar, R., Bregola, V., Dinelli, G., Gianquinto, G., 2015, Optimal red:blue ratio in led light-

- ting for nutraceutical indoor horticulture, Sci. Hort. 193: 202-208.
- [34] Chen, C.C., Agrawal, D.C., Lee, M.R., Lee, R.J., Kyo, C.L., Wu, C.R., Tsay, H.S. and Chang, H.C., 2016, Influence LED light spectra on *in vitro* somatic embryogenesis and LC-MS analysis of chlorogenic acid and rutin in *Peucedenum japonicum* Thunb.: A medical herb, Bot. Stud. J. 57: 9.
- [35] Bantis, F., Ouzounis, T. and Radoglou, K., 2016, Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects transplant success, Sci. Hort. 198: 277-283.
- [36] Jishi, T., Kimura, K., Matsuda, R. and Fujiwara, K., 2016, Effects of temporally shifted irradiation of blue and red LED light on cos lettuce growth and morphology, Sci. Hort. 198: 227-232.
- [37] Wang, J., Lu, W., Tong, Y. and Yang, Q., 2016, Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light, Front. Plant Sci. 7: 250.
- [38] Xu, Y., Chang, Y., Chen, G. and Lin, H., 2016, The research on LED supplementary lighting system for plants, Optik Int. J. Light Electron Opt. 127: 7193-7201.
- [39] Godo, T., Fujiwara, K., Guan, K., Miyoshi, K., 2011, Effect of wavelength of LED-light on *in vitro* asymbiotic germination and seedling growth of *Bletilla ochracea* Schltr. (Orchidaceae), Plant Biotechnol. 28: 397-400.
- [40] Hahn, E.J., Kozai, T. and Paek, K.Y., 2000, Blue and red light-emitting diodes with or without sucrose and ventilation affects *in vitro* growth of *Rehmannia glutinose* plant lets, J. Plant Biol. 43: 247-250.
- [41] Lian, M.L., Murhy, H.N. and Pack, K.Y., 2002, Effects of light emitting diodes (LEDs) on the *in vitro* induction and growth of bulblets of *Lilium oriental* hybrid 'Pesaro', Sci. Hort. 94: 365-370.