



วารสารแก่นเกษตร
THAIJO

Content List Available at ThaiJo

Khon Kaen Agriculture Journal

Journal Home Page : <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/agkasetkaj>



การตอบสนองของต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำต่อสเปกตรัมแสงแอลอีดี

Responses of Brassica microgreens to LED light spectra

ธรรมศักดิ์ ทองเกตุ^{1*}, อาริรัตน์ ประทุมสูตร¹, ศิลัยศุภา อินตะแสน¹, สุภาวิณี สีมูลละ¹,
นงลักษณ์ บดีรัฐ¹ และ เฟิร์น อัครวงศ์¹

Thammasak Thongket^{1*}, Arrirat Pathumsut¹, Sinsupar Intasan¹,
Suphawinee Simunla¹, Nonglak Bordeerat and Fern Akrawong¹

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

¹ Department of Agricultural Science, Faculty of Agriculture, Natural Resources and Environment, Naresuan University

บทคัดย่อ: ผักต้นอ่อนมีคุณค่าอาหารมากกว่าผักชนิดเดียวกันที่โตเต็มที่แล้วจึงเป็นที่นิยมบริโภคของผู้รักสุขภาพและเริ่มมีการผลิตในระบบปิดโดยใช้แสงจากหลอดแอลอีดี ซึ่งสเปกตรัมแสงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพของผลผลิตที่ปลูกภายใต้แสงเทียม ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของสเปกตรัมแสงต่อการเจริญเติบโตและการสร้างสารสำคัญที่มีคุณค่าทางโภชนาการของต้นอ่อนบร็อคโคลี่ อะรูกูล่า และกะหล่ำปลีม่วง แยกเป็น 3 การทดลองสำหรับต้นอ่อนแต่ละชนิด แต่ละการทดลองใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ จำนวน 3 ซ้ำ มีการรมวิธีเป็นแสงแอลอีดีที่มีความยาวคลื่นแสงต่างกัน 6 สเปกตรัม ได้แก่ สีขาว สีแดง สีน้ำเงิน และสีแดงต่อสีน้ำเงินสัดส่วน 2:1, 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ ทุกสเปกตรัมแสงควบคุมให้ความเข้มแสงช่วง PPFD เท่ากับ 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ นาน 12 ชั่วโมงต่อวัน ควบคุมอุณหภูมิอากาศในห้องปลูกที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องปลูกมีค่าอยู่ในช่วง 65–80% และ 350±50 ppm ตามลำดับ เก็บเกี่ยวต้นอ่อนที่อายุ 12 วันหลังเพาะเมล็ด พบว่า สำหรับต้นอ่อนทุกชนิด แสงสีแดงให้ความสูง น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งต่อต้นสูงกว่าสเปกตรัมแสงอื่น แสงสีขาวส่งเสริมการสร้างคลอโรฟิลล์ สเปกตรัมแสงที่สีน้ำเงินในสัดส่วนที่สูงส่งเสริมการสร้างวิตามิน ซี และปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระดีทีพีเอ และสเปกตรัมแสงที่ส่งเสริมการสร้างแคโรทีนอยด์และสารฟีนอลิกสำหรับต้นอ่อนแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันออกไป

คำสำคัญ: โรงงานผลิตพืช; ไดโอดเปล่งแสง; รังควัตถุ; วิตามิน ซี; สารต่อต้านอนุมูลอิสระ

ABSTRACT: Microgreens are seedling-stage vegetables that contain higher nutrition values than their respective mature stage. Hence, they are being popular among health-loving consumer and their production in controlled environment condition by using LED lighting has already begun. Light spectrum is the critical factor affecting the growth and quality of produces grown under artificial lighting. Hence, the objective of this study is to investigate the effects of light spectra on growth and some health-benefit phytochemicals of 3 brassica microgreens namely; Broccoli, Arugula and Purple kohlrabi. Three studies were conducted for each brassica microgreen by using a randomized completely block design with 3 replications and 6 LED light spectrum treatments consisting of white, red, blue, and red and blue with ratio of 2:1, 1:1 and 1:2, respectively. The light intensity and photoperiod were controlled at PPFD 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ for 12 h per day. The air temperature was controlled at 25 °C and the relative humidity and CO₂ concentration in the grow room ranged between 65–80% and 350 ± 50 ppm, respectively. All microgreens were harvested 12 days after sowing. The results revealed that red light gave the highest height, fresh

* Corresponding author: thammasakt@nu.ac.th

Received: date; October 17, 2023 Revised: date; May 11, 2024

Accepted: date; June 21, 2024 Published: date; September 24, 2024

weight and dry weight while white light gave the highest chlorophyll content for all microgreen species. Light spectrum with high blue light proportion promoted vitamin C and DDPH antioxidant capacity. Nevertheless, the optimum light spectrum promoting carotenoids and phenolic compounds varied with microgreen species.

Keywords: plan factory; light emitting diodes; pigments; vitamin C; antioxidants

บทนำ

ผักเป็นอาหารที่มีความสำคัญต่อมนุษย์เพราะเป็นแหล่งวิตามินและเกลือแร่ที่มีความจำเป็นต่อเมตาบอลิซึมของร่างกาย การรับประทานผักที่ไม่เพียงพอ ทำให้ร่างกายเกิดการเจ็บป่วยได้จากโรคระดับอันตรายน้อย เช่น โรคโลหิตจาง จนถึงโรคร้ายแรง เช่น โรคมะเร็ง ได้ จากรายงานโครงการทบทวนสถานการณ์และผลการดำเนินงานป้องกันควบคุมโรคไม่ติดต่อเรื้อรังในประเทศไทย พ.ศ. 2560–2562 โดย ภัทระ แสงไชยสุริยาและคณะ (2563) เสนอต่อกองควบคุมโรคไม่ติดต่อ กรมควบคุมโรค พบว่า ในปี 2559 กลุ่มโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (Non-communicable diseases; NCDs) เป็นสาเหตุหลักของการเสียชีวิตของคนไทย และคิดเป็นร้อยละ 73 ของสาเหตุการเสียชีวิตทั้งหมด และจัดเป็นอันดับต้นของโลก โดยมีการบริโภคอาหารผักและผลไม้ที่ไม่เพียงพอเป็นหนึ่งในปัจจัยเสี่ยง กลุ่มคนไทยรุ่นใหม่ที่ได้เจอสุขภาพจึงหันมานิยมบริโภคผักมากขึ้น ส่งผลให้ผักที่สะอาดและปลอดภัยจึงเป็นที่ต้องการของตลาดและซึ่งคาดว่ายังไม่เพียงพอกับความต้องการ เทียบเคียงจากการเติบโตของสินค้าอาหารสุขภาพของประเทศไทยในปี 2560 พบว่าตลาดมีมูลค่าประมาณ 60,000 ล้านบาท เพิ่มขึ้นจากปีที่ผ่านมาโดยมีอัตราการเติบโตประมาณ 11.5% (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2560) ด้วยความตื่นตัวของกระแสรักสุขภาพดังกล่าว ส่งผลให้ธุรกิจการผลิตผักปลอดสารพิษจึงเติบโตตามไปด้วย โดยมีกรุงเทพมหานครและจังหวัดที่มีประชากรหนาแน่นที่มีผู้บริโภคที่มีกำลังซื้อเป็นตลาดสำคัญ จึงเกิดความพยายามที่จะผลิตผักปลอดสารพิษในเมืองเพื่อลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการขนส่ง หนึ่งในเทคโนโลยีการผลิตพืชที่มีการนำมาใช้ผลิตผักในเมือง ได้แก่ เทคโนโลยีการผลิตพืชในระบบปิดที่ควบคุมสภาพแวดล้อมทุกอย่างที่เกี่ยวข้องกับการปลูกพืช และรู้จักกันในชื่อ “โรงงานผลิตพืช” (plan factory with artificial lighting; PFAL) สามารถผลิตพืชโดยไม่มีการใช้สารกำจัดศัตรูพืช ไม่มีการปนเปื้อนฝุ่นผงและจุลินทรีย์ก่อโรคใดๆ ผลผลิตมีความสด สะอาด คุณภาพดี และเก็บรักษาได้นานกว่า (Kosai et al., 2016) ในปัจจุบัน การผลิตพืชใน PFAL นี้ในประเทศไทยเริ่มเป็นที่แพร่หลายมากขึ้นในกรุงเทพมหานครและเมืองใหญ่ทั่วประเทศ (Mosaleeyanon, 2021)

หนึ่งในประเภทของผักคุณภาพสูงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตในโรงงานผลิตพืชนี้ คือ ผักต้นอ่อนหรือไมโครกรีน (microgreens) ซึ่งเป็นผักที่เก็บเกี่ยวในระยะเป็นต้นอ่อน อายุประมาณ 10–12 วันหลังเริ่มเพาะ มีใบเลี้ยง 1 คู่ และอาจมีใบจริงปรากฏหรือไม่ก็ได้ ข้อดีของผักต้นอ่อนคือ มีคุณค่าทางโภชนาการที่สูงกว่าผักชนิดเดียวกันเมื่อเติบโตเต็มที่ (Xiao et al., 2012) กระบวนการผลิต ไม่ยุ่งยาก ใช้พื้นที่น้อย และยังมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าการผลิตผักชนิดอื่น เนื่องจากมีอายุการเก็บเกี่ยวสั้น (Pattison et al., 2018) อย่างไรก็ตาม การผลิตผักต้นอ่อนพืชในโรงงานผลิตพืชมีต้นทุนที่สูงกว่าการผลิตในแปลงเปิดและจำเป็นต้องจำหน่ายในราคาที่สูงกว่า ดังนั้น การเพิ่มมูลค่าของสินค้า (value added) ให้กับผักต้นอ่อนที่ผลิตใน PFAL จึงกลยุทธ์ทางการตลาดที่จะสร้างแรงจูงใจให้ผู้บริโภครู้สึกคุ้มค่าในการซื้อผักต้นอ่อนผลิตในระบบ PFAL มาบริโภค วิธีในการเพิ่มมูลค่าสินค้าให้กับผักต้นอ่อนผลิตใน PFAL ที่ให้ประโยชน์กับผู้บริโภคคือการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและสารพฤกษเคมีในผักต้นอ่อนให้มากขึ้นกว่าการผลิตในแปลงเปิดธรรมชาติ มีรายงานว่า เสปคตรัมแสงหรือความยาวคลื่นแสงมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตและการสร้างสารพฤกษเคมีของพืชที่ปลูกภายใต้แสงเทียมอย่างมีนัยสำคัญ Qinglu (2020) รายงานว่าแสงแอลอีดีสีแดงผสมน้ำเงินสัดส่วน 85:15 ช่วยเพิ่มความสูงของต้นอ่อนกะหล่ำปลี ผักเคล อะรูกุล่าและผักกาดเขียวปลีเมื่อเทียบกับแสงขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ Lobiuc et al. (2017) รายงานว่าแสงสีน้ำเงินส่งเสริมการเจริญเติบโตของใบเลี้ยงและน้ำหนักสดของต้นอ่อนโหระพาทั้งพันธุ์สีเขียวและสีแดง และยังส่งเสริมการสร้างคลอโรฟิลล์ เอ และแอนโทไซยานินได้สูงกว่าสีอื่น ในขณะที่แสงสีแดงส่งเสริมการสร้างสารฟีนอลิกและสารต่อต้านอนุมูลอิสระในต้นอ่อนโหระพาพันธุ์สีเขียว Meas et al. (2020) รายงานว่าแสงผสมระหว่างสีแดงและสีน้ำเงิน สัดส่วน 70:30 มีผลให้ต้นอ่อนผักโขมจีนมีน้ำหนักสดส่วนยอด คลอโรฟิลล์ เอ บี และเอ+บี แคโรทีนอยด์ แอนโทไซยานิน และกิจกรรมต่อต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) สูงกว่าแสงสีขาว สีแดงและน้ำเงินเพียงลำพัง ดังนั้น การใช้ปัจจัยแสงในการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและสารพฤกษเคมีในผักต้นอ่อนที่ปลูกใน PFAL จึงเป็นวิธีที่มีการมีประสิทธิภาพสูง และไม่ต้องยุ่งยากในการจัดหาวัสดุและอุปกรณ์อื่นใดเพิ่มเติม เนื่องจากการผลิตต้นอ่อนใน PFAL ต้องมีการให้แสง

เทียมแก่ต้นอ่อนอยู่แล้ว และปัจจุบัน แหล่งของพลังงานแสงที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ หลอดไดโอดเปล่งแสง (Light emitting diode: LED) โดยจุดเด่นของหลอด LED คือความประหยัดพลังงาน ในการผลิตพลังงานแสงที่เท่ากัน หลอด LED ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าหลอดไฟประเภทอื่น การใช้หลอด LED ยังสามารถเลือกสเปกตรัมแสงที่ต้องการให้กับพืชได้อีกด้วย (Kozai, 2013)

อย่างไรก็ตาม รายงานผลการวิจัยอิทธิพลของสเปกตรัมแสงต่อการสร้างสารพฤกษเคมีของพืชที่ผ่านมาใช้ให้เห็นว่าสเปกตรัมแสงที่มีประสิทธิภาพในการส่งเสริมการสร้างพฤกษเคมีนั้นแตกต่างกันไปตามชนิดของสารและแตกต่างกันออกไปตามชนิดพืช จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาหาสเปกตรัมแสงที่เหมาะสมกับการเพิ่มสารพฤกษเคมีชนิดต่าง ๆ ของในแต่ละชนิดผักต้นอ่อน พืชผักในวงศ์กะหล่ำ (Brassicaceae) ได้รับความนิยมนำมาทำผักต้นอ่อนมากกว่าพืชในวงศ์อื่น เนื่องจากมีความหลากหลายรูปร่างและสี สัน มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และยังมีสารพฤกษเคมีกลุ่มกลูโคซิโนเลต (glucosinolates) ซึ่งมีฤทธิ์ต่อต้านโรคมะเร็ง และพบได้เฉพาะพืชในวงศ์กะหล่ำนี้เท่านั้นอีกด้วย ผักในวงศ์กะหล่ำที่มีการนำมาทำผักต้นอ่อนนี้ได้แก่ คะน้าใบหยิก (kale) บร็อกโคลี (broccoli) อะรุกล่า (arugula) ผักกาดเขียวปลี (mustard) แรดิช (radish) ผักกาดหัว (Chinese radish) และกะหล่ำปลม (kohlrabi) เป็นต้น (Dereje et al., 2023) ที่ผ่านมามีการศึกษาอิทธิพลของสเปกตรัมแสงต่อการสร้างสารพฤกษเคมีในพืชวงศ์กะหล่ำไว้บ้างแล้ว Craver et al. (2017) เปรียบเทียบสเปกตรัมแสงสีแดง (R) น้ำเงิน (B) สีเขียว (G) และฟาร์เรด (FR) ที่ผสมกันในสัดส่วนต่าง ๆ 3 รูปแบบ คือ R87:B13, R84:FR7:B9 และ R74:G18:B8 ต่อการสร้างสารพฤกษเคมีในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำ พบว่า แสง R87:B13 ให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ในต้นอ่อนกะหล่ำปลมและผักกาดเขียวปลีสูงกว่าแสงผสมอีก 2 รูปแบบ ในขณะที่แสง R87:B13 และ R84:FR7:B9 ให้ปริมาณแอนโทไซยานินในกะหล่ำปลมสูงกว่าแสง R74:G18:B8 ที่ความเข้มแสง $315 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ และในทางตรงกันข้าม แสง R84:FR7:B9 ให้ปริมาณฟีนอลิกรวมในต้นอ่อนกะหล่ำปลมสูงกว่าแสง R74:G18:B8 ที่ระดับความเข้มแสง $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ และรายงานของ Bantis (2021) เปรียบเทียบการเจริญเติบโตและปริมาณพฤกษเคมีของต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำ 2 ชนิด ผักกาดเขียวปลี และแรดิช จากอิทธิพลของสเปกตรัมแสงผสมระหว่างแดง (R) และน้ำเงิน (B) 3 สัดส่วน คือ 1:2 (RB2) 1:5 (RB5) และ 1:9 (RB9) พบว่า RB9 เพิ่มปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ในผักกาดเขียวปลี และเพิ่มสารประกอบฟีนอลในแรดิช RB2 เพิ่มคลอโรฟิลล์ เอ และแคโรทีนอยด์ให้กับผักกาดเขียวปลี ในขณะที่ แรดิช ต้องการ RB5 ในการเพิ่มคลอโรฟิลล์ เอ บี และแคโรทีนอยด์

ผลการวิจัยที่ผ่านมาชี้ว่า การให้สเปกตรัมแสงผสมระหว่างสีแดงกับสีน้ำเงินบางสัดส่วนให้ผลที่ดีต่อการสร้างสารพฤกษเคมีในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำ อย่างไรก็ตามการศึกษาที่ผ่านมามักเลือกใช้สัดส่วนระหว่างสีแดงและสีน้ำเงินเพียงบางสัดส่วนเท่านั้น ไม่ครอบคลุมสัดส่วนจากน้อยไปหามากจนถึงแสงสีเดียว (monochrome) คือ สีแดงและสีน้ำเงิน และขาดการเปรียบเทียบกับแสงสีขาว (full-spectrum white light) ซึ่งมีสเปกตรัมแสงใกล้เคียงกับแสงอาทิตย์ในธรรมชาติด้วย การทราบข้อมูลอิทธิพลของสเปกตรัมแสงต่อการสร้างสารพฤกษเคมีในผักต้นอ่อนที่สมบูรณ์มากขึ้นนอกจากช่วยสร้างเทคโนโลยีการผลิตต้นอ่อนในโรงงานผลิตพืชให้มีโภชนาการและสารพฤกษเคมีให้สูงซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้สินค้าพร้อมกับเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภคแล้ว ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าในการปลูกต้นอ่อนได้ด้วย เนื่องจากเม็ดไดโอดเปล่งแสง (LED chip) แต่ละสีที่จะนำมาประกอบเป็นหลอดไฟ มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสงที่ต่างกัน (Nelson and Bugbee, 2014) ข้อมูลสเปกตรัมที่เหมาะสมจึงเป็นประโยชน์ในการออกแบบสร้างหลอดไฟ LED สำหรับปลูกผักต้นอ่อนที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่สูงขึ้นได้ด้วย วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาอิทธิพลของสเปกตรัมแสงผสมระหว่างสีแดงผสมสีน้ำเงิน แสงสีเดียว (สีแดงและสีน้ำเงิน) และสีขาวต่อการเจริญเติบโตและการสร้างสารสำคัญที่มีคุณค่าทางโภชนาการในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำ 3 ชนิด ได้แก่ บร็อกโคลี อะรุกล่า และกะหล่ำปลมม่วง

วิธีการศึกษา

การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 3 การทดลองแยกตามชนิดพืช 3 ชนิดในวงศ์กะหล่ำปลี ได้แก่ บร็อกโคลี (*Brassica oleraceae* var. *italica*) อะรุกล่า (*Eruca sativa*) และกะหล่ำปลมม่วง (*B. oleraceae* var. *gongylodes*) แต่ละการทดลองมีวิธีการศึกษาเหมือนกัน โดยใช้แผนการทดลองแบบ randomized complete block design 3 ซ้ำ (กล่อ่ง) กันบล็อกตามตำแหน่งใต้แสงไฟแอลอีดีที่มีความเข้มแสงต่างกันเป็น 3 โซนปลูก กรรมวิธีทดลองคือแสงจากหลอดแอลอีดีที่มีสเปกตรัมแสงต่างกัน 6 สเปกตรัม ได้แก่ 1) สีขาว (W) 2) สีแดง (R) มี peak สูงสุดอยู่ที่ 660 nm 3) -5) สีแดงผสมน้ำเงินในสัดส่วน 2:1 (R2B1), 1:1 (R1B1), 1:2 (R1B2) ตามลำดับ

และสีน้ำเงิน (B) มี peak สูงสุดอยู่ที่ 450 nm (**Figure 1a**) ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการทางสรีรวิทยาพืช คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร ระหว่างเดือนมีนาคมถึงกันยายน พ.ศ. 2565

เพาะเมล็ดพืชแต่ละชนิดลงในกล่องพลาสติกขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 11 x 11 x 6 ซม. ใช้โคโคพีท ซูเปอร์® บริษัท สุโขทัยฟาร์ม จำกัด เป็นวัสดุเพาะกล้า และหยอดเมล็ดในอัตรา 300, 400 และ 400 เมล็ด/กล่อง สำหรับบร็อคโคลี่ อะรูกูล่าและกะหล่ำ ปมสีม่วง ตามลำดับ (อัตราการใช้เมล็ดได้มาจากการศึกษาเบื้องต้นหาอัตราการใช้เมล็ดที่เหมาะสม) ทรายเมล็ดให้กระจายสม่ำเสมอ รดน้ำให้ชุ่ม ปิดฝากล่องแล้วนำไปวางในที่มืด เมื่อเมล็ดงอกเกินกว่า 50% ของประชากรที่หยอด จึงเปิดฝากล่องแล้วย้ายไปวางใต้ชั้น ปลูกลงในถาดที่แต่ละชั้นมีพื้นที่ขนาด 60 x 60 ตร.ซม. ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 โซนที่มีความเข้มแสงต่างกัน เนื้อพื้นที่ชั้นปลูก 45 ซม. ติดตั้งไว้ ด้วยชุดหลอดไฟแอลอีดี บริษัทซีวีก อโกรเทค จำกัด รุ่น LED Batten Plug and Grow 50 cm 3-RD-N000212-215 ขนาด 20 วัตต์ (**Figure 1a**) ประกอบด้วยหลอดแอลอีดีสีขาว สีแดง สีน้ำเงิน และฟลูออเรสเซนต์ 3 หลอดเรียงสลับกัน ซึ่งหลอดแอลอีดีแต่ละสี สามารถเปิดและปิดและปรับความเข้มแสงแยกเป็นอิสระ ก่อนเริ่มทดลองทำการปรับสเปกตรัมของแต่ละชั้นปลูกตามกรรมวิธีการ ทดลองที่ต้องการพร้อมปรับความเข้มแสง ณ จุดกึ่งกลางของแต่ละชั้นปลูกให้มีค่าเท่ากับ $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ และเมื่อนำกล่องเพาะไมโครกรีนมาวางตามโซนปลูกซึ่งห่างออกไปจากจุดกึ่งกลางและมีความเข้มแสงลดลง ทำการปรับความเข้มแสงให้เท่าเดิมโดยการหมุน กล่องเพาะให้สูงเข้าใกล้หลอดไฟแอลอีดีมากขึ้น ให้แสงแก่ต้นอ่อนแสงนาน 12 ชม./วัน รักษาความชื้นในวัสดุเพาะให้คงที่ทุกวันโดยการ พ่นละอองน้ำลงในวัสดุเพาะก่อนเที่ยงคืน ควบคุมอุณหภูมิอากาศในห้องที่ 25°C โดยใช้เครื่องปรับอากาศ บันทึกความชื้นสัมพัทธ์และ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องปลูกพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 65%–80% และ 350 ± 50 ppm ตามลำดับ เก็บเกี่ยวต้น ไมโครกรีนทุกพืชที่อายุ 12 วันหลังหยอดเมล็ด นำไปบันทึกความสูง น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งต่อต้น และวิเคราะห์สารสำคัญที่มีคุณค่า ทางโภชนาการ ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ, บี, เอ+บี และแคโรทีนอยด์ ด้วยวิธีการของ Holden (1976) วิตามิน ซี ด้วยวิธีการของ Roe et al. (1948), สารฟีนอลิกรวม ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu colorimetric method (ปิยาภรณ์ และคณะ, 2559) และสารต่อต้านอนุมูล อิสระ DPPH ด้วยวิธีการของ Lee and Yen (2006) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการเจริญเติบโต และปริมาณสารสำคัญที่มี คุณค่าทางโภชนาการ เมื่อพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย ด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$)

ผลการศึกษา

Figure 1 แสดงความเข้มของแสง (photosynthetic photon flux density: PPFD) และสัดส่วนของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินในช่วงความยาวคลื่น 400–700 nm (photosynthetically active radiation: PAR) ของแต่ละสเปกตรัมแสงซึ่งใช้เป็นกรรมวิธี ทดลองครั้งนี้ ทุกกรรมวิธีมีความเข้มแสงรวมใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง $150.6 - 155.6 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ แต่มีสัดส่วนของสีแดง เขียวและน้ำเงินที่แตกต่างกัน กรรมวิธีที่ 1 สเปกตรัมสีขาว (W) เป็นกรรมวิธีเดียวที่มีแสงสีเขียวอยู่ด้วยและมีอยู่ถึง $36.04 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ หรือร้อยละ 24 และหลอดไฟแอลอีดีที่ใช้ในการทดลองให้แสงสีน้ำเงินและสีแดงที่มีค่าความยาวคลื่นแสงสูงสุด (peak) อยู่ที่ 450 และ 650 nm ตามลำดับ (**Figure 1b**)

Table 1 Light intensity ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) and percentage of red, green and blue light for each of LED light spectrum treatments used in the experiment

Light spectrum treatments	PPFD ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)				Percentage by light intensity		
	Red	Green	Blue	Total	Red	Green	Blue
White (W)	65.78	36.04	49.50	151.3	43	24	33
Red (R)	152.3	0.336	0.079	152.7	100	0	0
R2B1	99.96	0.375	50.30	150.6	67	0	33
R1B1	81.52	0.492	73.63	155.6	50	0	50
R1B2	51.54	0.667	98.77	151.0	33	0	67
Blue (B)	0.267	0.835	151.7	152.8	0	0	100

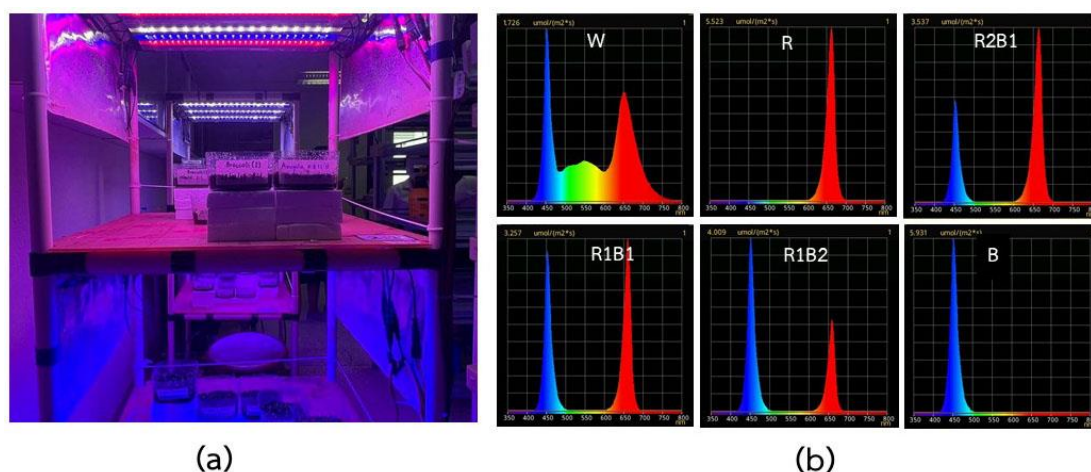


Figure 1 a) the vertical growing tier equipped with LED lighting fixture and b) Light spectra of LED treatments namely, W (white), R (Red), R1B1 (R:B = 2:1), R1B1 (RLB = 1:1), R1B2 (R:B = 1:2) and B (blue)

ในการทดลองครั้งนี้ พบว่า สเปกตรัมแสงแอลอีดีมีผลต่อการเจริญเติบโตและปริมาณสารสำคัญในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำปลี ทั้งสามชนิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสเปกตรัมแสงที่ทำให้การเจริญเติบโต และปริมาณสารสำคัญที่ดีที่สุดสำหรับต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำปลีแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันออกไป ดังนี้

การเจริญเติบโต

1) ความสูง

ผลของสเปกตรัมแสงต่อความสูงของต้นอ่อนกะหล่ำปลีทั้ง 3 ชนิดแสดงอยู่ใน **Figure 2 (a-c)** พบว่า แสงสีแดง 100% (R) มีผลให้ความสูงของต้นอ่อนทั้งสามชนิดมีความสูงมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อสัดส่วนของสีแดงลดลงในสเปกตรัมแสง R2B1 และ R1B1 พบว่า ความสูงของต้นอ่อนทั้งสามชนิดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามเมื่อสัดส่วนของสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นในสเปกตรัม R1B2 และ B พบว่า ความสูงของต้นอ่อนทั้งสามชนิดกลับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมแสง R1B1 ส่วนสเปกตรัม W ให้ความสูงที่อยู่ในระดับปานกลางในต้นอ่อนบร็อคโคลี และอะรูกูล่า (**Figure 1 a, b**) แต่แสงสีขาวให้ความสูงต้นอ่อนกะหล่ำปลีมีม้วนน้อยที่สุด (**Figure 1c**) และเมื่อเปรียบเทียบความสูงของต้นอ่อนทั้งสามชนิด พบว่าต้นอ่อนบร็อคโคลีและกะหล่ำปลีมีม้วนมีความสูงใกล้เคียงกันและสูงกว่าต้นอ่อนอะรูกูล่าในทุกสเปกตรัมแสงที่ได้รับ

2) น้ำหนักสดส่วนยอด

ผลของสเปกตรัมแสงต่อน้ำหนักสดส่วนยอดของต้นอ่อนบร็อกโคลี อะรูกูล่า และกะหล่ำปลีม่วง แสดงอยู่ใน Figure 2 (d-f) พบว่าแสงสีแดง (R) ให้น้ำหนักสดส่วนยอดมากที่สุดในต้นอ่อนทั้งบร็อกโคลีและอะรูกูล่า ในขณะที่แสง W และ R1B1 ให้น้ำหนักสดส่วนยอดต่ำที่สุดในต้นอ่อนบร็อกโคลี และแสง W, R2B1 และ R1B1 ให้น้ำหนักสดส่วนยอดต่ำที่สุดในต้นอ่อนอะรูกูล่า สำหรับต้นอ่อนกะหล่ำปลีม่วง แสง R, R1B1 R1B2 และ B ให้น้ำหนักสดส่วนยอดไม่แตกต่างกัน แต่สูงกว่าของแสง W และ R2B1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในบรรดาต้นอ่อนทั้งสามชนิด ต้นอ่อนบร็อกโคลีมีน้ำหนักสดส่วนยอดที่มากกว่าต้นอ่อนอีก 2 ชนิดเมื่อได้รับสเปกตรัมแสงเดียวกัน

3) น้ำหนักแห้งส่วนยอด

ผลของสเปกตรัมแสงต่อน้ำหนักแห้งส่วนยอดของต้นอ่อนทั้งสามชนิดแสดงอยู่ใน Figure 2 (G-I) ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับผลของสเปกตรัมต่อน้ำหนักสดส่วนยอด โดยสเปกตรัมแสง R ให้น้ำหนักแห้งส่วนยอดของต้นอ่อนบร็อกโคลีและอะรูกูล่าสูงที่สุด ในขณะที่สเปกตรัมแสง W และ R2B1 ให้ค่าต่ำสุดในต้นอ่อนบร็อกโคลี และสเปกตรัมแสง W, R2B1 R1B1 ให้ค่าต่ำสุดในต้นอ่อนอะรูกูล่า สำหรับต้นอ่อนกะหล่ำปลีม่วง สเปกตรัมแสง R, R1B1 R1B2 และ B ให้น้ำหนักแห้งส่วนยอดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ทั้งหมดมีค่ามากกว่าของสเปกตรัมแสง W และ R2B1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักแห้งส่วนยอดระหว่างต้นอ่อนทั้งสามชนิด พบว่าต้นอ่อนบร็อกโคลีมีน้ำหนักแห้งส่วนยอดที่มากกว่าต้นอ่อนอีก 2 ชนิดเมื่อได้รับสเปกตรัมแสงเดียวกัน

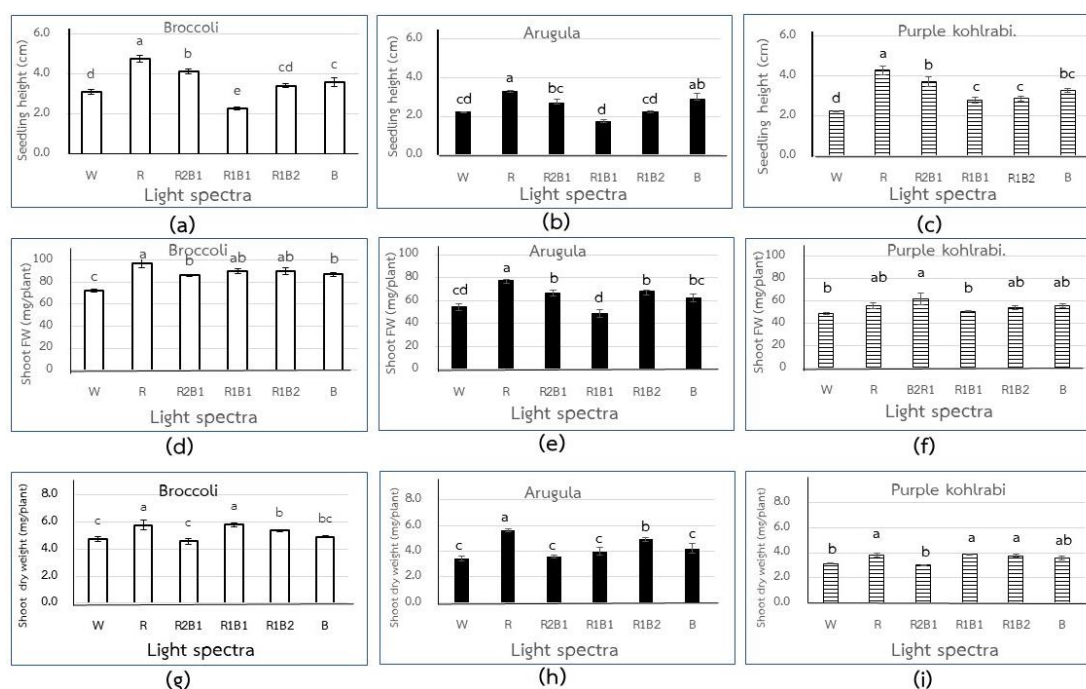


Figure 2 Height (a–c), shoot fresh weight (d–f) and shoot dry weight (g–i) of broccoli, arugula and purple kohlrabi microgreens respectively as affected by 6 LED light spectra namely, w (white), R (red with maximum peak at 650 nm), B (blue with maximum peak at 450 nm), R2B1 (R:B = 2:1), R1B1 (R:B = 1:1) and R1B2 (R:B = 1:2), the error bar indicating the standard error (n = 3)

รังกวักตุลคอร็อฟลล์

Figure 3 แสดงผลของสเปกตรัมแสงต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำ 3 ชนิด ซึ่งพบว่าสเปกตรัมแสงมีผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และ เอ+บี ในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำแต่ละชนิดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม สเปกตรัมแสงที่ส่งเสริมการสร้างคลอโรฟิลล์ เอ บี และ เอ+บี สำหรับต้นอ่อนแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน

ในต้นอ่อนบร็อคโคลี่ สเปกตรัมแสงที่ให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และเอ+บี ที่มีค่าสูงสุด ได้แก่ สเปกตรัมแสง W และ R2B1 และสเปกตรัมแสงที่มีสัดส่วนสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น (R1B1, R1B2 และ B) ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ, บี และเอ+บี ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Figure 3a, 3d, 3g)

ในต้นอ่อนอะรูกูล่าและกะหล่ำปลีม่วง มีการตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงในการสร้างคลอโรฟิลล์ที่เหมือนกัน โดยสเปกตรัมแสงที่ให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ, บี และ เอ+บี ที่มีค่าสูงสุด คือ W และ R2B1 สเปกตรัมแสงผสมระหว่างสีแดงและสีน้ำเงินในสัดส่วนอื่น มีผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และเอ+บี ในต้นอ่อนอะรูกูล่า (Figure 3b, 3e, 3h) และในต้นอ่อนกะหล่ำปลีม่วง (Figure 3c, 3f, 3i) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอโรฟิลล์ a+b ระหว่างต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำทั้ง 3 ชนิด พบว่าต้นอ่อนอะรูกูล่ามีปริมาณคลอโรฟิลล์ a+b โดยเฉลี่ยที่สูงกว่าต้นอ่อนชนิดอื่นเมื่อได้รับสเปกตรัมแสงเดียวกัน (Figure 3 g-i)

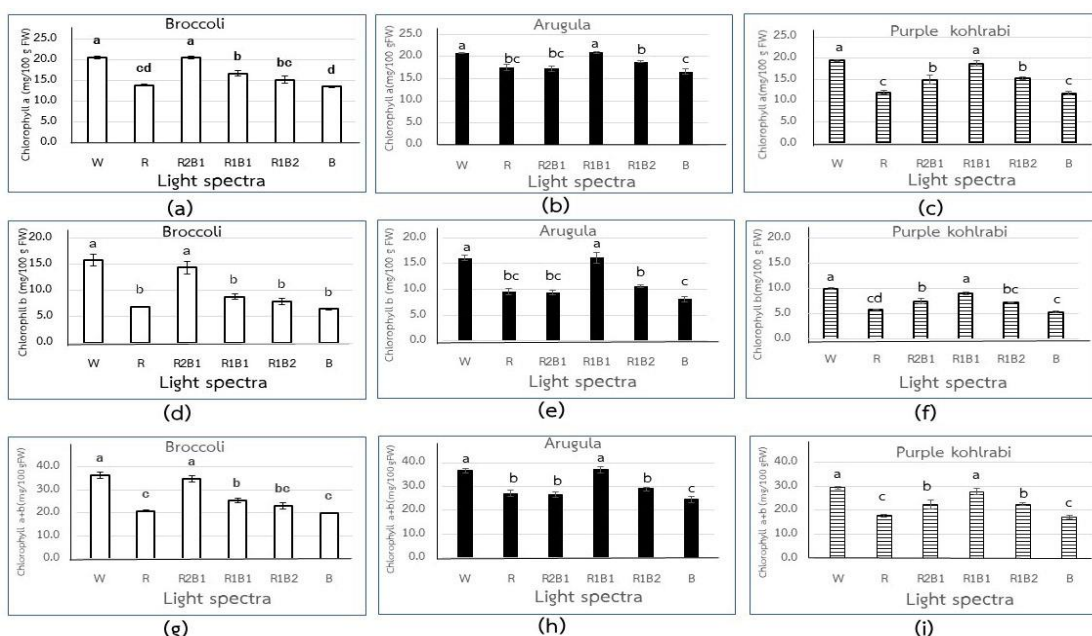


Figure 3 Chlorophyll a (a, b, c), chlorophyll b (d, e, f) and chlorophyll a+b (g, h, i) of broccoli, arugula and purple kohlrabi microgreens respectively as affected by 6 LED light spectra namely, w (white), R (red with maximum peak at 650 nm), B (blue with maximum peak at 450 nm), R2B1 (R:B = 2:1), R1B1 (R:B = 1:1) and R1B2 (R:B = 1:2), the error bar indicating the standard error (n = 3)

รงควัตถุแคโรทีนอยด์

ในต้นอ่อนบร็อคโคลี่ สเปกตรัมแสงที่ส่งเสริมการสร้างแคโรทีนอยด์ได้ดีที่สุด ได้แก่ สเปกตรัมแสง W, R2B1 และ R1B1 และถ้าต้นอ่อนได้รับสเปกตรัมแสงสีแดง(R) หรือ สเปกตรัมแสงผสมแดงและน้ำเงินที่มีสัดส่วนของสีน้ำเงินสูง (R1B2 และ B) ปริมาณแคโรทีนอยด์จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Figure 3a)

ในต้นอ่อนอะรูกูล่า สเปกตรัมแสงที่ส่งเสริมการสร้างแคโรทีนอยด์ได้ดีที่สุด ได้แก่ สเปกตรัม R1B2 หากได้รับแสงที่มีสัดส่วนสีแดงและสีน้ำเงินมากขึ้นหรือน้อยกว่านี้ จะทำให้ปริมาณแคโรทีนอยด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยสเปกตรัมแสง R2B1 และ B ทำให้ปริมาณ แคโรทีนอยด์ในต้นอ่อนอะรูกูล่ามีค่าต่ำที่สุด (Figure 3b)

ในต้นอ่อนกะหล่ำปลีม่วง สเปกตรัมแสงที่ส่งเสริมการสร้างแคโรทีนอยด์ได้ดีที่สุด ได้แก่ สเปกตรัมแสง W . ในขณะที่สเปกตรัมแสงสีแดง (monochrome) ได้แก่ สีแดง (R) และสีน้ำเงิน (B) มีผลให้ปริมาณแคโรทีนอยด์ต่ำที่สุด (Figure 3c)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคโรทีนอยด์ในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำทั้ง 3 ชนิดที่ได้รับสเปกตรัมแสงเดียวกัน พบว่าต้นอ่อนบร็อคโคลีและต้นอ่อนกะหล่ำปมมีปริมาณแคโรทีนอยด์ที่ใกล้เคียงกัน แต่มีค่าสูงกว่าของต้นอ่อนอะรุกล่าเมื่อได้รับสเปกตรัมแสงเดียวกัน (Figure 4 a-c)

วิตามิน ซี

Figure 4 (d-f) แสดงผลของสเปกตรัมแสงต่อปริมาณวิตามิน ซีในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำทั้ง 3 ชนิด ซึ่งพบว่าสเปกตรัมแสงมีผลต่อปริมาณวิตามิน ซี ในต้นอ่อนแต่ละชนิดอย่างมีนัยสำคัญ โดยอิทธิพลของสเปกตรัมแสงต่อปริมาณวิตามิน ซี ในต้นอ่อนบร็อคโคลีและอะรุกล่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ปริมาณวิตามิน ซี ในต้นอ่อนบร็อคโคลีและต้นอ่อนอะรุกล่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อสเปกตรัมแสงมีสัดส่วนของสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น โดยสเปกตรัมแสงสีน้ำเงิน (B) ให้ปริมาณวิตามิน ซี ในต้นอ่อนบร็อคโคลีสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ (Figure 4d) และสเปกตรัมแสง R1B2 และ B. ให้ปริมาณวิตามิน ซี สูงสุดในต้นอ่อนอะรุกล่า (Figure 4e) อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของสเปกตรัมแสงต่อปริมาณวิตามิน ซี ในต้นอ่อนกะหล่ำปมมีความแตกต่างจากต้นอ่อนชนิดอื่น สเปกตรัมแสงที่ส่งเสริมการสร้างวิตามิน ซี ได้ดีที่สุดเป็นสเปกตรัมแสงที่มีสัดส่วนสีแดงและน้ำเงินที่เท่ากัน ได้แก่ R1B1 (Figure 4f) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณวิตามิน ซี ที่พบในต้นอ่อนทั้งสามชนิด พบว่า ต้นอ่อนกะหล่ำปมมีปริมาณวิตามิน ซี สูงกว่าของต้นอ่อนอีก 2 ชนิด เมื่อได้รับสเปกตรัมแสงเดียวกัน โดยเมื่อได้รับสเปกตรัมแสง R1B1 จะมีปริมาณวิตามิน ซี สูงที่สุดอยู่ที่ 94.56 mg/100 g FW (Figure 4f)

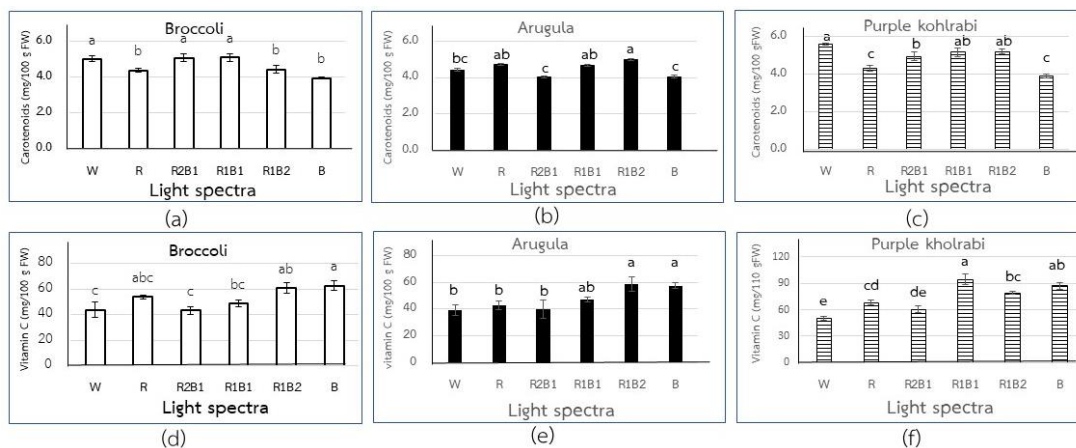


Figure 4 Carotenoid (a-c) and vitamin C (d -f) of broccoli, arugula and purple kohlrabi microgreens respectively as affected by 6 LED light spectra namely, , w (white), R (red with maximum peak at 650 nm), B (blue with maximum peak at 450 nm), R2B1 (R:B = 2:1), R1B1 (R:B = 1:1) and R1B2 (R:B = 1:2), the error bar indicating the standard error (n = 3)

สารต่อต้านอนุมูลอิสระ

ในการทดลองครั้งนี้วิเคราะห์ปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระผ่านการวัดค่ากิจกรรมความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ 1,1-diphenyl-2-picryl hydrazyl (DPPH) Figure 5 (a-c) แสดงผลของสเปกตรัมแสงต่อปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำ ซึ่งพบว่าสเปกตรัมแสงมีอิทธิพลต่อปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำทั้ง 3 ชนิดอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าอิทธิพลของสเปกตรัมแสงต่อปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระของต้นอ่อนทั้งสามชนิดมีทิศทางในทำนองเดียวกัน คือ สเปกตรัมสี W ให้ปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระในระดับต่ำสุด ยกเว้นในกรณีของต้นอ่อนกะหล่ำปม เมื่อสัดส่วนของแสงสีน้ำเงินในสเปกตรัมแสงเพิ่มขึ้นพบว่าปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระในต้นอ่อนทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่สเปกตรัมแสงที่ส่งเสริมให้มีปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดแตกต่างกันไปตามชนิดของต้นอ่อน สเปกตรัมแสง R2B1 และ B ส่งเสริมการสร้างสารต่อต้านอนุมูลอิสระในต้นอ่อนบร็อคโคลีได้มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่ต่างจากสเปกตรัม R1B1 (Figure 5a) สเปกตรัมแสง R2B1 และ B ส่งเสริมการสร้าง

สารต่อต้านอนุมูลอิสระในต้นอ่อนอะรูกูล่าได้ดีที่สุด (Figure 5b) และสเปกตรัมแสง B ส่งเสริมการสร้างสารต่อต้านอนุมูลอิสระในต้นอ่อนกะหล่ำปลีม่วงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่แตกต่างทางสถิติจากสเปกตรัม R2B1 R1B1 R1B2 (Figure 5f) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำทั้ง 3 ชนิดเมื่อรับสเปกตรัมแสงเดียวกัน พบว่า ต้นอ่อนกะหล่ำปลีม่วงมีปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าของในต้นอ่อนอีก 2 ชนิด โดยเมื่อได้รับสเปกตรัมแสง B มีปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระคิดเป็นค่ากิจกรรมความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 317.80 $\mu\text{mol TEAC}/100 \text{ g FW}$

สารประกอบฟีนอลิกรวม

Figure 5 (d–f) แสดงผลของสเปกตรัมแสงต่อปริมาณฟีนอลิกรวมในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำ ซึ่งพบว่าสเปกตรัมแสงมีอิทธิพลต่อการสร้างสารประกอบฟีนอลิกรวมในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำทั้ง 3 ชนิด แตกต่างกันไป

ในต้นอ่อนบร็อคโคลี่ พบว่าสเปกตรัมแสงไม่มีอิทธิพลต่อการสร้างฟีนอลิกรวม แต่พบแนวโน้มว่าสเปกตรัมแสง W ส่งเสริมการสร้างสารฟีนอลิกได้ดีกว่าสเปกตรัมแสงอื่น (Figure 5d)

ในต้นอ่อนอะรูกูล่า พบว่าสเปกตรัมแสง R1B1 ส่งเสริมการสร้างสารประกอบฟีนอลิกรวมได้สูงที่สุด ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากสเปกตรัมแสง W และสเปกตรัมแสง R1B2 และ B ที่มีสัดส่วนสีน้ำเงินระดับสูง แต่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญจากของสเปกตรัมแสงที่มีสัดส่วนสีแดงระดับสูงคือ สเปกตรัมแสง R และ R2B1 (Figure 5e)

ในต้นอ่อนกะหล่ำปลีม่วง พบว่าสเปกตรัมแสง W ส่งเสริมการสร้างสารประกอบฟีนอลิกรวมได้สูงที่สุด รองลงมาคือสเปกตรัมแสงที่มีสัดส่วนสีน้ำเงินระดับสูงได้แก่ B และ R1B2 และปริมาณสารฟีนอลิกรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อได้รับสเปกตรัมแสงที่มีสัดส่วนสีน้ำเงินลดลงตามลำดับจาก R1B1 และ R2B1 จนมีค่าต่ำสุดที่สเปกตรัมแสง R เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมที่พบในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำทั้ง 3 ชนิด พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นเมื่อต้นอ่อนกะหล่ำปลีม่วงที่ได้รับสเปกตรัมแสง W จะมีปริมาณฟีนอลิกรวมสูงถึง 114.7 $\text{mg}/100 \text{ g FW}$ สูงกว่าต้นอ่อนชนิดอื่นที่ได้รับสเปกตรัมแสง W เหมือนกัน (Figure 5f)

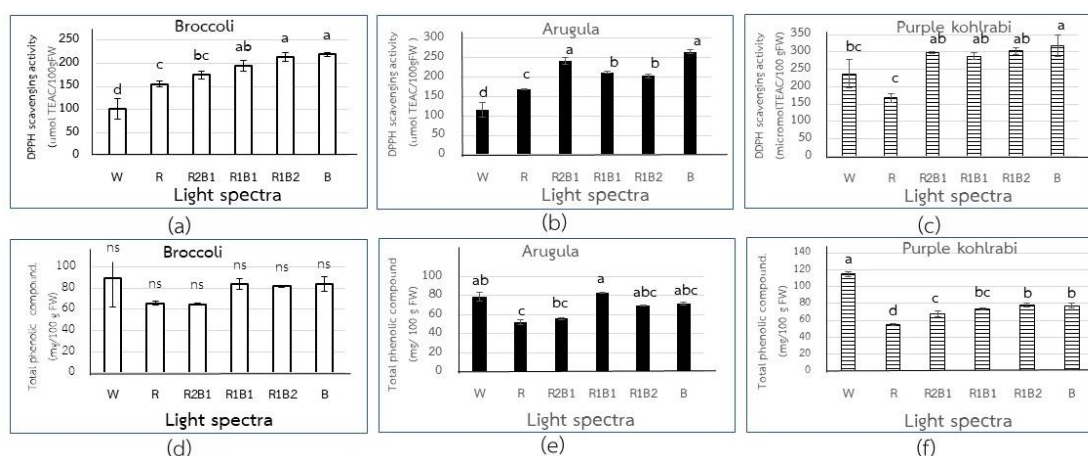


Figure 5 DDPH scavenging activity (a–c) and total phenolic compound (d–f) of broccoli, arugula and purple kohlrabi microgreens respectively as affected by 6 LED light spectra namely, w (white), R (red with maximum peak at 650 nm), B (blue with maximum peak at 450 nm), R2B1 (R:B = 2:1), R1B1 (R:B = 1:1) and R1B2 (R:B = 1:2), the error bar indicating the standard error (n = 3)

วิจารณ์

Table 1 แสดงความเข้มแสง ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ในช่วง PAR และสัดส่วน (%) ของแสงสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงินของแต่ละกรรมวิธีให้สเปกตรัมแสงที่แตกต่างกันทั้ง 6 สเปกตรัมแสง ซึ่งสเปกตรัมแสง W หรือแสงสีขาว เป็นสเปกตรัมแสงเดียวที่มีสีเขียวอยู่ในสัดส่วน 24% ร่วมกับสีแดง และสีน้ำเงิน ในสัดส่วน 43 และ 33% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความเข้มข้นแสงรวมของแต่ละกรรมวิธีให้

สเปกตรัมแสงจะเห็นว่าทั้งหมดมีความเข้มแสงรวมที่ใกล้เคียงกันมากและอยู่ในช่วง $150.6-152.8 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของการเจริญเติบโตและปริมาณสารสำคัญที่พบในต้นอ่อนแต่ละชนิด จึงเกิดจากอิทธิพลของสัดส่วนระหว่างแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินที่ต้นอ่อนได้รับเป็นหลัก

การเจริญเติบโต

ผลการวิจัยครั้งนี้ พบว่าสเปกตรัมแสงมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตทางด้านความสูง น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งส่วนยอดของต้นอ่อน ปริมาณสารสำคัญทุกชนิดที่ศึกษาของต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำปลีทั้งสามชนิดอย่างมีนัยสำคัญ โดยสเปกตรัมแสงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตแต่ละด้าน และที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสารสำคัญแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันออกไป และสเปกตรัมแสงที่เหมาะสมสำหรับสารชนิดเดียวกันในต้นอ่อนแต่ละชนิดยังแตกต่างกันด้วย ในด้านความสูงของต้นอ่อนซึ่งหมายถึงความยาวของส่วนใต้ใบเลี้ยง (hypocotyl) ต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำทั้งสามชนิดที่ได้รับสเปกตรัมแสงสีแดงมีความสูงมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และความสูงลดลงเมื่อสัดส่วนแสงสีแดงลดลงตามลำดับจนต่ำสุดที่สัดส่วนแสงสีแดงเท่ากับสีน้ำเงิน ก่อนที่ความสูงกลับเพิ่มขึ้นอีกเมื่อสัดส่วนแสงสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงสีน้ำเงิน 100% อย่างไรก็ตามที่สเปกตรัมแสงน้ำเงิน ความสูงต้นอ่อนก็ยังน้อยกว่าของแสงสีแดง ยกเว้นในต้นอ่อนอะรุกล้า แสดงถึงว่าแสงสีแดง (monochrome) ทั้งแสงสีแดงและสีน้ำเงินมีอิทธิพลต่อความสูงของต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำทั้ง 3 ชนิด มากกว่าสเปกตรัมแสงผสมระหว่างทั้งสองสี (Figure 2 a-c) Brazaityté (2021) กล่าวว่า เมื่อพืชได้รับแสงสีแดงหรือสีน้ำเงิน โปรตีนรับแสงสีน้ำแดง/ฟาร์-เรด (red/far-red light-sensing phytochrome, phy) และโปรตีนรับแสงสีน้ำเงิน (blue light-sensing cryptochrome, cry) จะส่งสัญญาณที่มีบทบาทต่อการทำงานของยีน HY5 (LONGHYPOCOTYL 5) และ HYH (LONG HYPOCOTYL 5 HOMOLOG) ซึ่งส่งเสริม photomorphogenesis ทำให้เกิดการยืดของส่วนใต้ใบเลี้ยงของต้นอ่อน ส่วน Kong et al.(2020) ซึ่งพบอิทธิพลของแสงสีน้ำเงินต่อการยืดของลำต้นต้นอ่อนพืช 4 ชนิด เช่นเดียวกัน กล่าวว่าภายใต้แสงสีน้ำเงินมีสภาวะค่า phytochrome photoequilibrium ที่ต่ำ จึงมีกิจกรรมของ phytochrome น้อย ส่งผลให้ต้นอ่อนเกิดการยืดลำต้น เพื่อปรับตัวในทำนองเดียวกับสภาวะที่มีแสงน้อย (shading avoidance)

ในการทดลองครั้งนี้ยังพบว่าสเปกตรัมแสงมีอิทธิพลต่อน้ำหนักสดของต้นอ่อน โดยสเปกตรัมแสงสีแดงให้น้ำหนักสดต้นอ่อนทั้ง 3 ชนิดได้มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Figure 2 d-f) น่าจะเป็นเพราะสีแดงให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงได้ดีกว่าแสงสีอื่น ส่งผลให้เกิดการเพิ่มการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง (Wang et al., 2009) อย่างไรก็ตาม ในการทดลองนี้ยังพบความแตกต่างของอิทธิพลของแสงสีแดงที่มีต่อน้ำหนักสดต้นอ่อนแต่ละชนิดด้วย ต้นอ่อนกะหล่ำปมม่วงมีน้ำหนักสดไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อได้รับแสงสีแดง หรือสีผสมระหว่างแดงและน้ำเงินในสัดส่วน R2B1, R1B2 และ B ซึ่งน่าจะเป็นเพราะต้นอ่อนกะหล่ำปมม่วงเป็นพืชที่มีปริมาณคลอโรฟิลล์น้อย ดังจะเห็นว่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับต้นอ่อนชนิดอื่น (Figure 2 f) จึงน่าจะเป็นพืชที่มีอัตราการสังเคราะห์แสงที่ไม่สูงด้วยเช่นกัน แสงที่มีสเปกตรัมแตกต่างกันจึงมีอิทธิพลน้อยต่ออัตราการสังเคราะห์แสง ส่งผลให้ไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติในด้านการเจริญเติบโตระหว่างสเปกตรัมแสง สอดคล้องกับ Lobato et al. (2010) รายงานว่าเมื่อใบของต้นถั่วแขกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงอัตราการสังเคราะห์แสงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ปริมาณสารสำคัญ

ในการทดลองครั้งนี้พบว่าสเปกตรัมแสงมีอิทธิพลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ วิตามิน ซี สารต่อต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณฟีนอลิกรวม ในต้นอ่อนทั้ง 3 ชนิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสเปกตรัมแสงที่ทำให้เกิดการสังเคราะห์สารแต่ละชนิดได้ดีที่สุดมีความแตกต่างกันออกไปและยังแตกต่างกันออกไปในต้นอ่อนแต่ละชนิด

แสงสีขาวให้การสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ เอ บี และ เอ+บี ได้สูงที่สุดสำหรับต้นอ่อนทั้งสามชนิด เช่นเดียวกับสเปกตรัมแสงผสมระหว่างสีแดงและน้ำเงินบางสัดส่วนที่ต่างกันตามชนิดของต้นอ่อน สเปกตรัมแสง R2B1 สำหรับต้นอ่อนบร็อคโคลี่ สเปกตรัมแสง R1B1 สำหรับอะรุกล้าและกะหล่ำปมม่วง (Figure 3 a-c) ซึ่งสเปกตรัมแสงสีขาวเป็นแสงที่มีสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน ในสัดส่วน 43:24:33 ผลการทดลองจึงชี้ว่าเพื่อการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ที่ดี ต้นอ่อนทั้งสามชนิดต้องการแสงทั้งสีแดง เขียวและน้ำเงิน หรือต้องการแสงผสมระหว่างสีแดงและน้ำเงินในสัดส่วนที่เฉพาะเจาะจง ขึ้นกับชนิดของต้นอ่อน โดยมีแนวโน้มว่าสเปกตรัมแสงที่มีสัดส่วนสีแดงมากกว่าหรือเท่ากับสีน้ำเงิน (R2B1 และ R1B1) เท่านั้นที่จะส่งเสริมการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ได้ดี สอดคล้องกับรายงานของ Giuseppina et al.

(2019) ที่พบว่าสเปกตรัมแสงที่มีสัดส่วน R:B เท่ากับ 3:1 ให้การสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ และสารฟลาโวนอยด์ในผักกาดหอมสูงกว่าสเปกตรัมแสงสัดส่วนอื่นๆ

แคโรทีนอยด์ เป็นรงควัตถุเสริม (antenna pigment) ที่ช่วยรวบรวมพลังงานแสงเพื่อส่งต่อไปยังคลอโรฟิลล์ที่เป็นรงควัตถุหลัก (core pigment) นำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งในการปลูกพืชได้แสงเทียมมีรายงานว่า คุณภาพของแสงมีผลต่อการสังเคราะห์แคโรทีนอยด์ เช่นเดียวกัน Frede et al. (2019) เปรียบเทียบอิทธิพลของสเปกตรัมแสงต่อการสร้างแคโรทีนอยด์ในผักกาดหอม กวางตุ้ง กอ พบว่า แสงสีขาวส่งเสริมการสร้างแคโรทีนอยด์ได้ดีกว่าแสงสีแดง หรือแสงสีน้ำเงินสีเขียว สอดคล้องกับอิทธิพลของสเปกตรัมแสงต่อการสร้างแคโรทีนอยด์ในต้นอ่อนบร็อคโคลีและกะหล่ำปลีม่วงที่พบแสงสีขาวในการทดลองครั้งนี้ แต่ไม่สอดคล้องของต้นอ่อนอะรูกุลาที่พบว่าสเปกตรัมแสงสีแดง (R) และแสงผสมระหว่างสีแดงและน้ำเงินที่ R1B1 และ R2B1 ส่งเสริมการสร้างแคโรทีนอยด์ได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามในทุกชนิดของต้นอ่อน แสงสีน้ำเงิน (B) ให้การสังเคราะห์แคโรทีนอยด์ได้น้อยที่สุด (Figure 4 a-c)

ในการทดลองครั้งนี้พบว่า สเปกตรัมแสงมีอิทธิพลต่อการสร้างวิตามิน ซี (Figure 4 d-f) และสารต่อต้านอนุมูลอิสระ (Figure 5 a-c) ในต้นอ่อนทั้งสามชนิดในลักษณะเดียวกัน สเปกตรัมแสงที่มีสีแดงในสัดส่วนที่สูง ได้แก่ทั้งแสงสีขาว (W) และสีแดง (R) ไม่ส่งเสริมการสร้างวิตามิน ซี และสารต่อต้านอนุมูลอิสระ และเมื่อสัดส่วนแสงสีน้ำเงินในแสงผสมเพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณวิตามิน ซี และปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และจนถึงค่าสูงสุด เมื่อได้รับสเปกตรัมแสงสีน้ำเงิน 100% (B) ยกเว้นเพียงต้นอ่อนกะหล่ำปลีม่วงที่ปริมาณวิตามิน ซี สูงสุด พบในสเปกตรัมแสง R1B1 อิทธิพลของแสงสีน้ำเงินที่มีต่อการสร้างวิตามิน ซี และปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระที่พบในการทดลองนี้สอดคล้องกับ Khwankaew et al. (2018) ซึ่งพบว่า แสงสีน้ำเงินช่วยเพิ่มปริมาณวิตามิน ซี ในต้นผักปวยเล้ง และ Stutte and Edney (2009) ซึ่งรายงานการเพิ่มสารต่อต้านอนุมูลอิสระในผักกาดหอมใบแดงที่ได้รับแสงสีน้ำเงิน Kong et al. (2020) อธิบายว่าแสงสีน้ำเงินส่งเสริมการสร้างวิตามิน ซี ในผักกาดขาวปลีผ่านการกระตุ้นการแสดงออกของยีน BrPGL1, BrPMI1, BrPMM1, BrGMP1, BrGME1, BrGGP1 ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างวิตามิน ซี เมื่อพิจารณาปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระที่พบในต้นอ่อนแต่ละชนิดที่ได้รับอิทธิพลจากสเปกตรัมแสงต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง จะเห็นได้ว่าสอดคล้องกับปริมาณวิตามิน ซี จึงมีความเป็นไปได้ว่า ฤทธิ์การต่อต้านอนุมูลอิสระในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำนี้ได้มาจากวิตามิน ซี เป็นส่วนใหญ่สารฟีนอลิกเป็นสารที่พืชสร้างขึ้นใช้ทำหน้าที่เป็นสารต่อต้านอนุมูลอิสระในสภาวะที่พืชตกอยู่ในสภาวะเครียด เช่นเดียวกับสารแอนโทไซยานิน และฟลาโวนอยด์ (Larsen et al., 2022) ผลการศึกษาพบว่าสเปกตรัมแสงมีอิทธิพลต่อปริมาณสารฟีนอลิกในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำทั้งสามชนิดแตกต่างกันออกไป ในต้นอ่อนบร็อคโคลี สเปกตรัมแสงไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณสารฟีนอลิก ในต้นอ่อนอะรูกุลา แสงสีขาวและแสงผสมระหว่างสีแดงและน้ำเงินสัดส่วน R1B1 ให้ปริมาณฟีนอลิกสูงที่สุด และในต้นอ่อนกะหล่ำปลีม่วง สเปกตรัมแสงสีขาวให้ปริมาณฟีนอลิกสูงที่สุด ส่วนสเปกตรัมแสงสีแดงให้ปริมาณฟีนอลิกต่ำที่สุดในทั้ง 2 ชนิดต้นอ่อน แสดงให้เห็นว่าการสร้างสารฟีนอลิกในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำนี้อาจต้องการแสงสีน้ำเงินในสัดส่วนปานกลาง Son and Oh (2015) เปรียบเทียบอิทธิพลของสเปกตรัมแสงสีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) จำนวน 7 สัดส่วน ประกอบด้วยสัดส่วน R9B1 R9G1 R8B2 R8G1B1 R7B3 R7B1G2 และ control (Fluorescence and high pressure sodium) พบว่า สเปกตรัมแสงที่มีสัดส่วนสีแดงและสีน้ำเงิน 7:3 (R7B3) ให้การสังเคราะห์สารฟีนอลิก และสารต่อต้านอนุมูลอิสระในต้นผักกาดหอม 2 ชนิด สูงกว่าสเปกตรัมแสงสัดส่วนอื่น ๆ เมื่อพิจารณาปริมาณฟีนอลิกในต้นอ่อนทั้งสามชนิดที่ได้จากสเปกตรัมแสงต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ส่วนใหญ่ไม่สอดคล้องกับอิทธิพลของสเปกตรัมแสงต่อปริมาณสารต่อต้านอนุมูลอิสระ จึงน่าจะชี้ให้เห็นว่า ปฏิกิริยาต่อต้านอนุมูลอิสระในต้นอ่อนทั้ง 3 ชนิดไม่ควรมาจากฤทธิ์ของสารฟีนอลิกเป็นหลัก (Figure 5 f-h)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารสำคัญที่มีคุณค่าทางโภชนาการในต้นอ่อนชนิดต่าง ๆ ปลูกภายใต้แสงแอลอีดีที่พบในการทดลองครั้งนี้กับการปลูกในแปลงเปิดที่มีรายงานไว้ พบว่าการปลูกใต้แสงไฟแอลอีดีมีปริมาณสารสำคัญสูงกว่าในแปลงเปิดหลายเท่าตัว ตัวอย่างเช่น วิตามิน ซี Irakiya et al. (2020) รายงานว่าปริมาณวิตามิน ซี ในต้นอ่อนอะรูกุลาที่ปลูกภายใต้แสงธรรมชาติในโรงเรือนปลูกพืช มีค่าเท่ากับ 45 mg/100 g น้ำหนักสด แต่ในการทดลองนี้พบว่าการปลูกใต้แสงไฟแอลอีดีสเปกตรัมสีที่เหมาะสม ให้ปริมาณวิตามิน ซี สูงสุดถึง 82.55 mg/100 g น้ำหนักสด (Figure 4e) หรือมากกว่าของการปลูกในแปลงเปิด ร้อยละ 83 แสดงให้เห็นว่าการปลูกต้นอ่อนในสภาพที่ควบคุมสภาพแวดล้อมแสง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ สามารถกระตุ้นให้ต้นอ่อนสร้างสารสำคัญ เช่น วิตามิน ซี ให้สูงขึ้นได้

สรุป

เมื่อพิจารณาภาพรวมอิทธิพลของสเปกตรัมแสงที่มีต่อการเจริญเติบโตและปริมาณสารสำคัญต่างๆ ในต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำทั้ง 3 ชนิด พบว่าสเปกตรัมแสงที่มีสัดส่วนสีแดงสูง (R) ให้การส่งเสริมในด้านความสูงและน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง สเปกตรัมแสงสีขาว (W) และสเปกตรัมสีผสมที่มีสีแดงและน้ำเงินในสัดส่วนใกล้เคียงกับของแสงสีขาว (R2B1) ส่งเสริมการสร้างรงควัตถุคลอโรฟิลล์ สเปกตรัมแสงที่มีสีน้ำเงินในสัดส่วนที่สูง (B, R1B2, R1B1) ส่งเสริมการสร้างวิตามิน ซี และสารต่อต้านอนุมูลอิสระ และสเปกตรัมที่ส่งเสริมการสร้างแคโรทีนอยด์และสารฟีนอลิกสำหรับต้นอ่อนแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณนายชิงชัย คนธรรพสกุล ประธานผู้บริหารบริษัทซีวิค อโกรเทค ที่ให้การสนับสนุนหลอดไฟแอลอีดีและชุดควบคุมการเปิด-ปิดและควบคุมความเข้มแสง ใช้ในการทดลองครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- ภัทระ แสงไชยสุริยา, บังอร เทพเทียน, ปาริชาติ จันทร์จรัส, ภูษิต ประครองสาย, กุมาริ พัทณี และปิยะฉัตร ตระกูลวงษ์. 2563. รายงานโครงการทบทวนสถานการณ์และผลการดำเนินงานป้องกันควบคุมโรคไม่ติดต่อเรื้อรังในประเทศไทย พ.ศ. 2560–2562 เสนอต่อ กองโรคไม่ติดต่อ กรมควบคุมโรค. แหล่งข้อมูล:
<https://ddc.moph.go.th/uploads/publish/1036320200810073233.pdf>. ค้นเมื่อ 13 พฤษภาคม. 2566.
- ปิยาภรณ์ วรานุสันติกุล, สุชาดา โทพล, เจษฎา แพนาค, นิวัฒน์ กังวานรังสรรค์ และศรีสุดา หาญภาคภูมิ. 2559. การศึกษาการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบจากสาบเสือ. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยสวนดุสิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 9(2): 31–58.
- ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. 2560. แนวโน้มตลาดสินค้าอาหารสุขภาพ โอกาสและความท้าทายของผู้ประกอบการ SME. ธนาคารกสิกรไทย แหล่งข้อมูล:
<https://www.kasikornbank.com/th/business/sme/KSMEKnowledge/article/KSMEAnalysis/Documents/HealthyProduct.pdf>. ค้นเมื่อ 13 พฤษภาคม 2566.
- Bantis, F. 2021. Light spectrum differentially affects the yield and phytochemical content of microgreen vegetables in a plant factory. *Plants*. 10: 2182.
- Brazaitytė, A., J. Miliauskienė, V. Vaštakaitė-Kairienė, R. Sutulienė, K. Laužikė, P. Duchovskis, and S. Matek. 2021. Effect of different ratios of blue and red LED light on Brassicaceae microgreens under a controlled environment. *Plants*. 10(4): 801.
- Craver, J.K, J.R. Gerovac, R.G. Lopez, and D.A. Kopsell. 2017. Light intensity and light quality from sole-source light-emitting diodes impact phytochemical concentration within *Brassica* microgreens. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 142(1): 3–12.
- Dereje, B., J.C. Jacquier, C.E. Kingston, M. Harty, and N. Harbourne. 2023. Brassica microgreens: phytochemical compositions, influences of growing practices, post-harvest technology, health, and food application. *ACS Food Science and Technology*. 3(6): 981–998.
- Frede, K., M. Schreiner, and S. Baldermann. 2019. Light quality-induced changes of carotenoid composition in pak choi *Brassica rapa* ssp. *Chinensis*. *Journal of Phytochemistry and Photobiology, B: biology*. 193: 18–30.
- Giuseppina, P, F. Orsini, S. Blasioli, A. Cellini, A. Crepaldi, I. Braschi, F. Spinelli, S. Nicola, J.A. Fernandez, C. Stanghellini, G. Gianquinto, and L.F. M. Marcelis. 2019. Resource use efficiency of indoor lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red: blue ratio provided by LED lighting. *Scientific Reports*. 9: 14127.

- Holden, M. 1976. Chemistry and Biochemistry of Plant Pigments (Goodwin, T. W.), 2nd ed. Academic Press, New York, pp. 462–488.
- Ilakiya, T., E. Parameswari, V. Davamani, and E. Prakash. 2020. Microgreens-combating malnutrition problem. Research Today. 2(5): 110-112.
- Kong, Y., S. Katherine, and Y. Zheng. 2020. Maximum elongation growth promoted as a shade-avoidance response by blue light is related to deactivated phytochrome: a comparison with red light in four microgreen species. Canadian Journal of Plant Science. 100: 314–326.
- Kozai, T. 2013. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. Proceeding of Japan Academy, Ser. B 89 (2013).
- Kozai, T., G. Niu, and M. Takagaki. 2016. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. Academic Press., California, U.S.A.
- Khawkaew, J., D.T. Nguyen, N. Kagawa, M. Takagaki, G. Maharjan, and N. Lu. 2018. Growth and nutrient level of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forssk.) in response to LED light quality in a plant factory. Acta Horticulturae 1227: 653-660.
- Larsen, D.H., H. Li, S. Shrestha, J.C. Verdonk, C.C.S Nicole, L.F.M. Marcelis, and E.J. Woltering. 2022. Lack of blue light regulation of antioxidants and chilling tolerance in basil. Frontiers in Plant Science. 13: 852654.
- Lee, C.P., and G.C. Yen. 2006. Antioxidant activity and bioactive compounds of tea seed (*Camellia oleifera* Abel.) oil. Journal of Agricultural Food Chemistry. 54(3): 779-84.
- Lobato, A.K.S, M.C. Goncalves-Vidigal, P.S.V. Filho, C.A.B. Andrade, M.V. Kvitschal, and C.M. Bonato. 2010. Relationships between leaf pigments and photosynthesis in common bean plants infected by anthracnose. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science. 38(1): 29-37.
- Lobiuc, A., V. Vasilache, O. Pintili, T. Stoleru, M. Burducea, M. Oroian, and M.M. Zamfirache. 2017. Blue and red LED illumination improves growth and bioactive compound contents in acyanic and cyanic *Ocimum basilicum* L. microgreens. Molecules. 22(12): 2111.
- Meas, S., K. Leungwilai, and T. Thongket. 2020. Enhancing growth and phytochemicals of two amaranth by LEDs light irradiation. Scientia Horticulturae. 265: 1–10.
- Mosaleeyanon, K. 2021. Current situation, direction, policy support, and challenges of plant factories in Thailand. FFTC Agricultural Policy Platform. Available: <https://ap.fttc.org.tw/article/2745>. Accessed Jul. 20, 2023.
- Nelson, J.A., and B. Bugbee. 2014. Economic analysis of greenhouse lighting: light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. PLoS One. 9(6): e99010.
- Pattison, P. M., J. Y. Tsao, G. C. Brainard, and B. Bugbee. 2018. LEDs for photons, physiology, and food. Nature. 563: 493–500.
- Qinglu, Y., Y. Kong, and Y. Zheng. 2020. Growth and appearance quality of four microgreen species under light-emitting diode lights with different spectral combinations. HortScience. 55(9): 1399–1405.
- Roe, J.H., M.B. Mills, M.J. Oesterling, and C.M. Damron. 1948. The determination of diketo-L-gulonic acid, dehydro-L-ascorbic acid, and L-ascorbic acid in the same tissue extract by the 2,4-dinitrophenylhydrazine method. Journal of Biological Chemistry. 174: 201–208.

- Son, K.H., and M.M. Oh. 2015. Growth, photosynthetic and antioxidant parameters of two lettuce cultivars as affected by red, green, and blue light-emitting diodes. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. 56: 639-653.
- Stutte, G.W., and S. Edney. 2009. Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes. *HortScience*. 44: 79-82.
- Wang, H., M. Gu, J. Cui, K. Shi, Y. Zhou, and J. Yu. 2009. Effects of light quality on CO₂ assimilation, chlorophyll-fluorescence quenching, expression of Calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus*. *Journal of Phytochemistry and Photobiology. B, Biology*. 96: 30–37.
- Xiao, Z., G.E. Lester, Y. Luo, and Q. Wang. 2012. Assessment of vitamin and carotenoid concentrations of emerging food products: edible microgreens. *Journal of Agricultural Food Chemistry*. 60: 7644–7651.