บทความวิจัย

การใช้คุณสมบัติการสะท้อนแสงของใบในการประเมินสุขภาพของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำ

จุติภรณ์ ทัสสกุลพนิช[1*] ปาณิสรา นาคคล้าย[2] กนกวรรณ สุขกรม[2] และ วีรศิลป์ สอนจรูญ[2,3]

ได้รับบทความ: 15 มีนาคม 2562
ได้รับบทความแก้ไข: 10 มิถุนายน 2562
ยอมรับตีพิมพ์: 13 มิถุนายน 2562

บทคัดย่อ

แสงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักสลัดบริโภคใบ โดยผักที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำจะมีผลผลิตลดลง การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของผักเมื่อได้รับความเข้มแสงไม่เพียงพอจึงเป็นข้อมูลที่นำไปใช้ในการจัดการระบบปลูก ในการศึกษาครั้งนี้ใช้คุณสมบัติการสะท้อนของใบเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์ในสภาพความเข้มแสงปกติและในสภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติ ผลการทดลองพบว่าผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติมีความกว้างทรงพุ่มและน้ำหนักสดลดลง นอกจากนี้ความเข้มแสงต่ำยังส่งผลให้ปริมาณแอนโธไซยานินในใบของผักกาดหอมเรดโอ๊คลดลง เมื่อตรวจวัดค่าการสะท้อนแสงและนำมาคำนวณดัชนีสเปกตรัมพบว่า ดัชนี Green Normalized Difference Vegetable Index (GNDVI) และดัชนี Anthocyanin Reflectance Index (ARI1 และ ARI2) ของใบผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติมีค่าสูงกว่าผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติ และดัชนีสเปกตรัมทั้งสามนี้ยังมีสหสัมพันธ์กับปริมาณแอนโธไซยานินในใบ ความแตกต่างของค่าการสะท้อนแสงในใบผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสองสภาพความเข้มแสงนี้สามารถนำไปใช้ตรวจสอบสุขภาพพืชเพื่อใช้จัดการความเข้มแสงในโรงเรือนต่อไป

คำสำคัญ: คุณสมบัติของแสง ดัชนีสเปกตรัม แอนโธไซยานิน ผักกาดหอมเรดโอ๊ค ความเข้มแสงต่ำ

[1]ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
[2]ศูนย์ความร่วมมือทางวิชาการไทย-ฝรั่งเศส (DORAS Center) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
[3]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
[*]ผู้นิพนธ์ประสานงาน, email: jutiporn.thu@ku.th

Leaf Light Reflectance for Evaluating Red Oak Lettuce Cultivated under Low Light Intensity

Jutiporn Thussagunpanit[1,*], Panisra Nakklay[2], Kanokwan Sukkrom[2] and Weerasin Sonjaroon[2, 3]

Received: 15 March 2019
Revised: 10 June 2019
Accepted: 13 June 2019

ABSTRACT

Light is an important factor for the growth and development of leafy salad vegetables. Vegetables cultivated under low light intensity will produce a low yield. The monitoring of physiological changes in vegetables grown under inadequate light intensity is the information for planting system management. In this study, leaf light reflectance was investigated in order to compare the physiological changes of Red Oak lettuce that were hydroponically grown under normal light intensity and under lower light intensity than usual. The result showed that Red Oak lettuce grown under lower light intensity than usual had small canopy width and low fresh weight. Moreover, low light intensity could reduce the anthocyanin production in leaves of Red Oak lettuce. The leaf light reflectance was measured and then calculated to various spectral indices. Red Oak lettuce grown under normal light intensity exhibited higher Normalized Difference Vegetable Index (GNDVI) and Anthocyanin Reflectance Index (ARI1 and ARI2), which are kinds of spectral index, than that of Red Oak lettuce grown under lower light intensity than usual. Moreover, those three spectral indices had a correlation with the anthocyanin content in leaves. Differences of leaf light reflectance in Red Oak lettuce cultivated under two conditions of light intensity could be applied to monitor plant health for management of the light intensity in a plant nursery in the future.

Keywords: Light property, Spectral index, Anthocyanin, Red Oak lettuce, Low light intensity

[1]Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok
[2]Center of Thai-French Cooperation on Higher Education and Research (DORAS Center), Kasetsart University, Bangkok
[3]Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Bangkok
[*]Corresponding author, email: jutiporn.thu@ku.th

บทนำ

แสงเป็นปัจจัยพื้นฐานปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืช การปลูกพืชภายใต้สภาพความเข้มแสงสูงสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตของพืชที่ปลูกในโรงเรือน เช่น มะเขือเทศ [1] ผักกาดหอม [2] และผักสลัดรับประทานใบ [3] ในทางตรงกันข้าม การปลูกพืชในสภาพความเข้มแสงต่ำกว่าความเข้มแสงที่พืชต้องการจะทำให้ผลผลิตของผักสลัดลดลงทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยผักสลัดจะมีน้ำหนักสดลดลง และมีอัตราการห่อหัวต่ำลง [4] โดยความเข้มแสงที่ต่ำกว่า 200 $\mu mol \cdot m^{-2}s^{-1}$ จัดเป็นความเข้มแสงที่ต่ำกว่าระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอม [5] ในผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรพอนิกส์ในโรงเรือนพบว่า นอกจากความเข้มแสงที่ต่ำกว่าระดับปกติทำให้ปริมาณผลผลิตลดลง ยังส่งผลให้การสะสมของแอนโธไซยานินในใบลดลงอีกด้วย ด้วยเหตุนี้ผักกาดหอมเรดโอ๊คจึงมีสีสันไม่สวยงาม ไม่เป็นที่ต้องการของตลาด [6-7]

แนวทางการแก้ปัญหาความเข้มแสงต่ำในโรงเรือนอาจทำได้โดยการติดหลอดไฟ หรือหลอดไดโอดเปล่งแสง (Light-Emitting Diode, LED) เพื่อเพิ่มความเข้มแสงให้กับผักกาดหอม [8] อย่างไรก็ตาม แนวทางนี้เป็นการเพิ่มต้นทุนให้กับการผลิตผัก วิธีการหนึ่งที่จะลดต้นทุนจากการเปิดไฟเพื่อเพิ่มความเข้มแสงอาจทำโดยการเปิดไฟเมื่อพืชเริ่มแสดงอาการผิดปกติจากการปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำ การตรวจสอบความผิดปกติของพืชทำได้โดยการสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาหรือการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา จุดด้อยของการสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาคือ หากพืชแสดงความผิดปกติทางสัณฐานวิทยาแล้ว การฟื้นฟูให้พืชกลับมามีสภาพปกติอาจเป็นการจัดการพืชที่ไม่ทันเวลา เนื่องจากพืชเกิดการชะงักการเจริญเติบโตแล้ว [9-10] การตรวจสอบสุขภาพของพืชโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาจึงเป็นทางเลือกที่รวดเร็วกว่า

อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบความเครียดทางสรีรวิทยาด้วยการตรวจวัดการตอบสนองของพืช เช่น การวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุในใบ ยังเป็นวิธีการที่ต้องทำลายตัวอย่างพืชเพื่อใช้ในการสกัดรงควัตถุ จึงไม่เหมาะกับการนำมาตรวจสอบความเครียดทางสรีรวิทยาของผักกาดหอมเรดโอ๊ค เนื่องจากผลผลิตบางส่วนจะได้รับความเสียหาย ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ค่าการสะท้อนแสงของใบซึ่งเป็นการตรวจวัดที่ไม่ต้องทำลายตัวอย่างพืช มีความสะดวกรวดเร็ว แล้วจึงใช้ค่าการสะท้อนแสงของใบนี้คำนวณค่าดัชนีสเปกตรัมต่างๆ จากรายงานทางวิชาการพบว่า ค่าดัชนีสเปกตรัมแต่ละดัชนีมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืชที่แตกต่างกัน เช่น ดัชนี Normalized Difference Vegetable Index (NDVI) มีรายงานความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของชีวมวล [11] ดัชนี Normalized Difference Red-edge Index (NDRE) มีรายงานความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจนในใบ [12] และดัชนี Green Normalized Difference Vegetable Index (GNDVI) มีรายงานความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณรงควัตถุในใบ [13] เป็นต้น การวัดค่าการสะท้อนแสงของใบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความเครียดที่เกิดจากการปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงที่ต่ำกว่าระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมเรดโอ๊ค และจะใช้ข้อมูลนี้ในการจัดการระบบการผลิตผักกาดหอมเรดโอ๊คต่อไปในอนาคต

วิธีการทดลอง

1. การปลูกผักกาดหอมเรดโอ๊ค

ปลูกผักกาดหอมเรดโอ๊ค (*Lactuca sativa* L. var. *crispa*) ด้วยวิธีไฮโดรพอนิกส์ระบบ Nutrient Film Technique (NFT) [14] ที่โรงเรือนหลังอาคารสารนิเทศ 50 ปี ของภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในระหว่างวันที่ 6 ธันวาคม 2561 ถึง 18 มกราคม 2562 เพาะเมล็ดผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ค ในวัสดุปลูกคือเพอร์ไลท์ผสมเวอร์มิคูไลท์ในอัตราส่วน 1:1 ในถ้วยพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ให้ความชื้นด้วยน้ำประปาจนต้นกล้ามีใบแท้ 1 คู่ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 7 วัน จากนั้นเลี้ยงต้นกล้าด้วยสารละลายธาตุอาหารสูตร Enshi [15] ที่มีค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (Electrical Conductivity, EC) เท่ากับ 0.6 $mS{\cdot}cm^{-1}$ จนต้นกล้ามีใบแท้มากกว่า 3 คู่ ซึ่งใช้เวลาอีกประมาณ 10 วัน จากนั้นจึงย้ายต้นกล้าลงระบบปลูกโดยใช้สารละลายธาตุอาหารสูตร Enshi ที่มี EC เพิ่มขึ้นเป็น 1.2 $mS\text{-}cm^{-1}$

การทดลองถูกแบ่งเป็น 2 ทรีตเมนต์ คือ 1) สภาพความเข้มแสงปกติ ซึ่งทำการปลูกในโรงเรือนด้วยแสงธรรมชาติ และ 2) สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติซึ่งทำการปลูกในโรงเรือนด้วยแสงธรรมชาติและทำการพรางแสง 50 เปอร์เซ็นต์ แต่ละทรีตเมนต์ประกอบด้วยรางปลูกพลาสติกยาว 1 เมตร จำนวน 3 ราง แต่ละรางปลูกผักกาดหอมเรดโอ๊ค 7 ต้น รวม 21 ต้นต่อหนึ่งทรีตเมนต์ ปลูกผักกาดหอมเรดโอ๊คในระบบปลูก NFT จนอายุเก็บเกี่ยวที่ 43 วัน แล้วจึงทำการเก็บผลผลิตโดยการสุ่มตัวอย่างทรีตเมนต์ละ 15 ต้น บันทึกความกว้างของทรงพุ่ม และน้ำหนักสด บันทึกการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศภายในโรงเรือนประกอบด้วย อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และความเข้มแสงทั้งสองทรีตเมนต์ตลอดการทดลอง

2. การวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุในใบ

เก็บใบผักกาดหอมเรดโอ๊คที่อายุ 41 วันหลังจากเพาะเมล็ด ซึ่งเป็นช่วงอายุที่อยู่ในระยะเก็บเกี่ยว [16] โดยเลือกใบที่โตเต็มที่ลำดับที่ 2 และ 4 จากยอด ตัดตัวอย่างใบเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นสุ่มตัวอย่างใบปริมาณ 0.1-0.2 กรัม เพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ และแอนโธไซยานินในใบ ทำการทดลองทรีตเมนต์ละ 3 ซ้ำ

ปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ในใบวิเคราะห์ตามวิธีของ Hiscox and Israelstam [17] และ Chappelle and Kim [18] ทำการสกัดรงควัตถุในใบด้วยสารละลาย Dimethyl sulfoxide (DMSO) เก็บตัวอย่างในที่มืด 1 คืน จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance, A) ที่ความยาวคลื่น 470, 648 และ 664 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ปริมาณคลอโรฟิลล์และปริมาณแคโรทีนอยด์คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (Chl a) = $12.25A_{664}\text{-}2.79A_{648}$

ปริมาณคลอโรฟิลล์บี (Chl b) = $22.9A_{648}\text{-}4.68A_{664}$

ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม (Total Chl) = Chl a + Chl b

ปริมาณแคโรทีนอยด์รวม (Total Carotenoid) = $1000A_{470}\text{-}1.82$Chl a-85.02Chl b

ปริมาณแอนโธไซยานินในใบวิเคราะห์ตามวิธีของ Ito และคณะ [19] ทำการสกัดแอนโธไซ-

ยานินในใบด้วยสารละลายเมทานอล 99.6 เปอร์เซ็นต์ ในกรดไฮโดรคลอลิก 1 เปอร์เซ็นต์ เก็บตัวอย่างในที่มืด 1 คืน จากนั้นจึงสกัดแยกแอนโทไซยานินด้วยการเติมน้ำกลั่นและคลอโรฟอร์ม นำสารละลายในชั้นน้ำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ปริมาณแอนโธไซยานินคำนวณได้จาก A_{530}/น้ำหนักสดของตัวอย่าง (FW)

3. การวัดค่าการสะท้อนแสงของใบและการคำนวณดัชนีสเปกตรัม

วัดค่าการสะท้อนแสงของใบ (Leaf Reflectance, R) ด้วยเครื่องสเปกตรัมเชิงแสง (Spectroradiometer) รุ่น LI1800 (LiCor Inc., USA) ซึ่งมีการติดตั้ง Integrating sphere เป็นอุปกรณ์เสริม ทำการวัดค่าการสะท้อนแสงในใบผักกาดหอมเรดโอ๊คอายุ 41 วันหลังจากเพาะเมล็ด โดยใช้ใบที่โตเต็มที่ลำดับที่ 3 จากยอดในการตรวจวัด ใช้ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 950 นาโนเมตร โดยเพิ่มความยาวคลื่นขึ้นที่ละ 1 นาโนเมตร ทำการทดลองทรีตเมนต์ละ 3 ซ้ำ จากนั้นนำค่าการสะท้อนแสงที่ได้มาคำนวณดัชนีสเปกตรัมต่างๆ ดังที่แสดงในตารางที่ 1 เนื่องจากแต่ละดัชนีสเปกตรัมมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืชที่แตกต่างกัน [11-13]

4. การหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสเปกตรัมและปริมาณแอนโธไซยานินในใบ

วัดค่าการสะท้อนแสงของใบ ด้วยเครื่องสเปกตรัมเชิงแสง รุ่น LI1800 ซึ่งมีการติดตั้ง Integrating sphere เป็นอุปกรณ์เสริม ทำการวัดค่าการสะท้อนแสงในใบผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติ โดยใช้ต้นที่มีอายุ 41 วันหลังจากเพาะเมล็ด วัดค่าการสะท้อนแสงในใบที่โตเต็มที่ลำดับที่ 2, 3, 4 และ 5 นับจากยอด โดยใช้วิธีการเดียวกันกับข้อ 3. ทำการตรวจวัดตำแหน่งใบละ 2 ซ้ำ รวมการวัดค่าการสะท้อนแสงทั้งสิ้น 8 ค่า นำค่าการสะท้อนแสงที่ได้มาคำนวณดัชนีสเปกตรัมตามตารางที่ 1 จากนั้นนำตัวอย่างใบที่วัดค่าการสะท้อนแสงแล้วมาวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินในใบตามวิธีการเดียวกันกับข้อ 2. นำดัชนีสเปกตรัมและปริมาณแอนโธไซยานินในใบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์โดยให้ดัชนีสเปกตรัมเป็นแกน x และปริมาณแอนโธไซยานินเป็นแกน y

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ปริมาณผลผลิต ปริมาณรงควัตถุในใบ และดัชนีสเปกตรัมของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติและที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติถูกเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี student t-test ที่ *p-value* 0.05

ตารางที่ 1 แสดงดัชนีสเปกตรัมที่คำนวณได้จากค่าการสะท้อนแสงของใบที่ความยาวคลื่นต่างๆ

Abbreviation	Spectral index	Formula[1/]	Ref.
NDVI	Normalized Difference Vegetable Index	NDVI = (NIR-Red)/(NIR+Red)	[11]
NDRE	Normalized Difference Red-edge Index	NDRE = $(R_{790}-R_{720})/(R_{790}+R_{720})$	[12]
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetable Index	GNDVI = (NIR-Green)/(NIR+Green)	[13]
PSSR-a	Pigment Specific Simple Ratio for Chlorophyll a	PSSR-a = R_{800}/R_{860}	[20]
PSSR-b	Pigment Specific Simple Ratio for Chlorophyll b	PSSR-b = R_{800}/R_{635}	[20]
PSSR-c	Pigment Specific Simple Ratio for Carotenoids	PSSR-c = R_{800}/R_{500}	[20]
ARI1	Anthocyanin Reflectance Index 1	ARI1 = $(1/R_{550}) - (1/R_{700})$	[21]
ARI2	Anthocyanin Reflectance Index 2	ARI2 = $R_{800} \times [(1/R_{550}) - (1/R_{700})]$	[21]

1/ NIR = near-infrared reflectance (898-913 nm), Red = red reflectance (668-683 nm), Green = green reflectance (548-563 nm) and R_{xxx} = Reflectance at xxx nm [22]

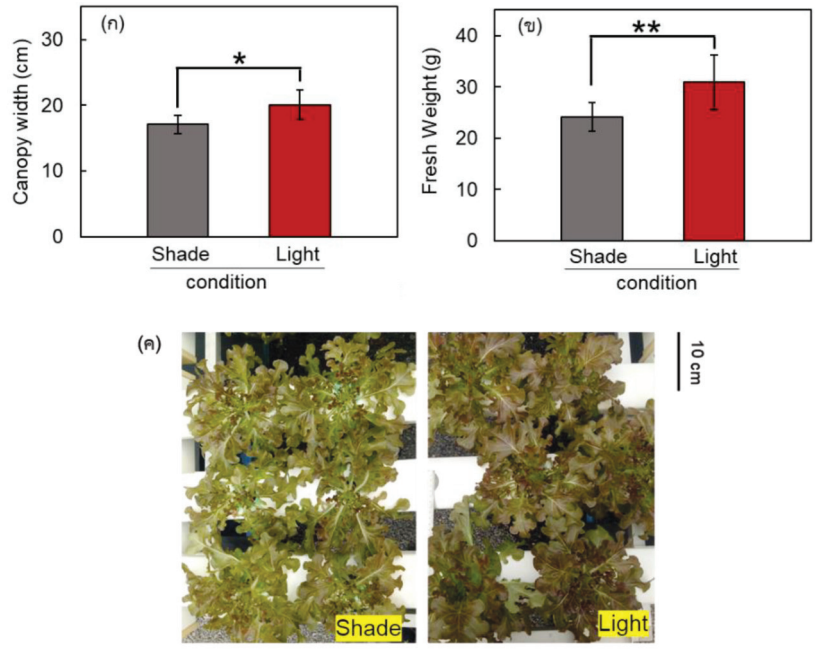
ผลการทดลอง

1. สภาพอากาศในโรงเรือน

ผักกาดหอมเรดโอ๊คถูกปลูกวิธีไฮโดรพอนิกส์ระบบ NFT โดยภายในโรงเรือนมีอุณหภูมิเฉลี่ยในเวลากลางวัน 31.67 องศาเซสเซียส อุณหภูมิเฉลี่ยในเวลากลางคืน 24.33 องศาเซสเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 65.51 เปอร์เซ็นต์ การปลูกผักกาดหอมเรดโอ๊คแบ่งเป็น 2 ทรีตเมนต์ตามความเข้มแสงโดยทำการปลูกในโรงเรือนเดียวกัน ผักกาดหอมเรดโอ๊คปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติมีความเข้มแสงเฉลี่ย 226.13 $\mu mol \cdot m^{-2}s^{-1}$ โดยมีความเข้มแสงสูงที่สุด และต่ำที่สุดเท่ากับ 435 $\mu mol \cdot m^{-2}s^{-1}$ และ 108 $\mu mol \cdot m^{-2}s^{-1}$ ตามลำดับ สำหรับผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติ มีความเข้มแสงเฉลี่ย 119.56 $\mu mol \cdot m^{-2}s^{-1}$ โดยมีความเข้มแสงสูงที่สุดและต่ำที่สุดเท่ากับ 220 $\mu mol \cdot m^{-2}s^{-1}$ และ 61 $\mu mol \cdot m^{-2}s^{-1}$ ตามลำดับ ตลอดการทดลองมีช่วงเวลากลางวันและกลางคืนเฉลี่ย 11.33 ชั่วโมง และ 12.67 ชั่วโมง ตามลำดับ

2. ผลผลิตของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติ

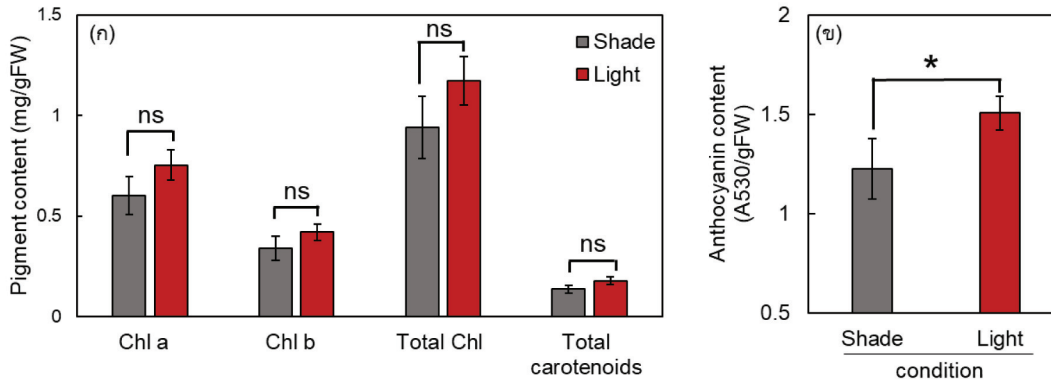
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติและที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติพบว่า ผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติมีความกว้างของทรงพุ่มต่ำกว่าผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (รูปที่ 1ก, ค) นอกจากนี้ผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติยังมีน้ำหนักสดเมื่อทำการเก็บผลผลิตลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (รูปที่ 1ข)



รูปที่ 1 ผลผลิตของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติ (Light) และที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติ (Shade) ความกว้างทรงพุ่ม (ก) น้ำหนักสด (ข) และลักษณะผักกาดหอมเรดโอ๊คก่อนทำการเก็บผลผลิต (ค) ผลการการทดลองถูกบันทึกเมื่อเก็บผลผลิตที่อายุ 43 วันหลังจากเพาะเมล็ด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) แสดงด้วย error bar ในแผนภูมิแท่ง ความแตกต่างทางสถิติถูกวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบระหว่าง 2 ทรีตเมนต์ด้วยวิธี student t-test, ** คือ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ $p \leq 0.01$ และ * คือ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

3. ปริมาณรงควัตถุในใบผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติ

ความเข้มแสงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการสะสมรงควัตถุในใบผักกาดหอมเรดโอ๊ค โดยปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ปริมาณคลอโรฟิลล์บี ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม และปริมาณแคโรทีนอยด์รวมในใบของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติมีแนวโน้มการลดลง (รูปที่ 2ก) นอกจากนี้สภาพความเข้มแสงต่ำยังส่งผลให้ปริมาณแอนโธไซยานินในใบผักกาดหอมเรดโอ๊คลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (รูปที่ 2ข)



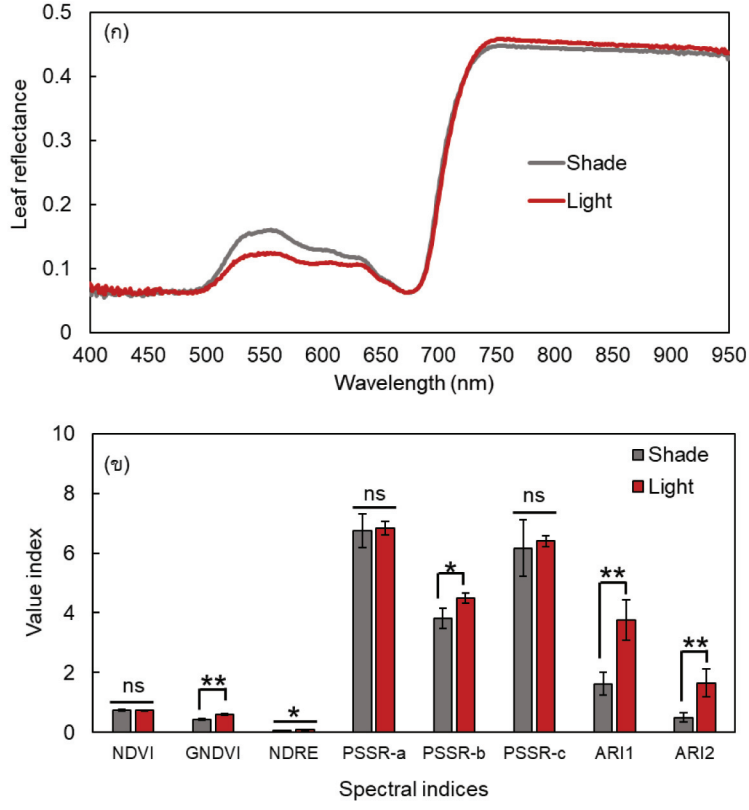
รูปที่ 2 ปริมาณรงควัตถุในใบของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติ (Light) และที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติ (Shade) ปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีรอยด์ (ก) และปริมาณแอนโธไซยานิน (ข) ปริมาณรงควัตถุในใบถูกวิเคราะห์เมื่อผักกาดหอมเรดโอ๊คอายุ 41 วันหลังจากเพาะเมล็ด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) แสดงด้วย error bar ในแผนภูมิแท่ง ความแตกต่างทางสถิติถูกวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบระหว่าง 2 ทรีตเมนต์ด้วยวิธี student t-test, ns คือ ไม่แตกต่างทางสถิติ และ * คือ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

4. ค่าการสะท้อนแสงและดัชนีสเปกตรัมของใบผักกาดหอมเรดโอ๊ค

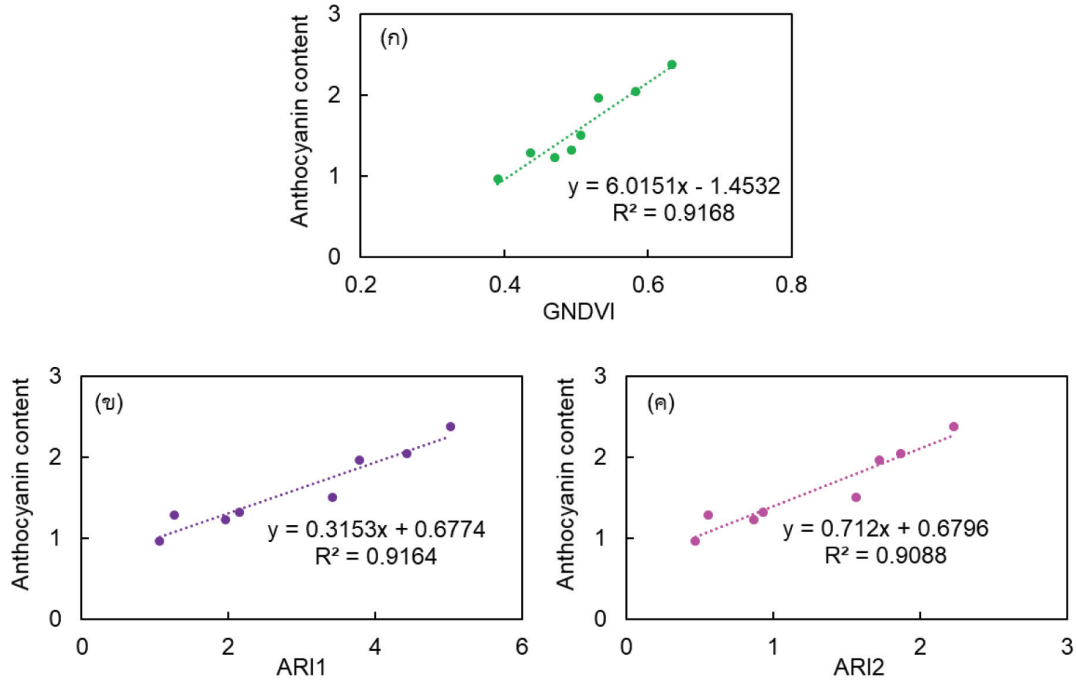
เมื่อตรวจวัดค่าการสะท้อนแสงของใบโดยเครื่องสเปกตรัมเชิงแสง (LI1800) โดยใช้ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 950 นาโนเมตรพบว่า ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 700 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible light) มีค่าการสะท้อนของใบต่ำ ส่วนที่ความยาวคลื่น 700 ถึง 950 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-infrared light, NIR) มีค่าการสะท้อนแสงของใบสูง (รูปที่ 3ก) นอกจากนี้ใบของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติมีค่าการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่น 510 ถึง 630 นาโนเมตร สูงกว่าใบของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติอย่างชัดเจน (รูปที่ 3ก) และที่ความยาวคลื่น 740 ถึง 950 นาโนเมตร ใบของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติมีค่าการสะท้อนแสงต่ำกว่าใบของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติเล็กน้อย (รูปที่ 3ก) เมื่อนำค่าการสะท้อนแสงของใบมาคำนวณดัชนีสเปกตรัม 8 ดัชนี ซึ่งมีสูตรการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าดัชนี GNDVI ดัชนี ARI1 และดัชนี ARI2 ที่ได้จากทรีตเมนต์ที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติมีค่าสูงกว่าทรีตเมนต์ที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ $p \leq 0.01$ (รูปที่ 3ข) จึงชี้ให้เห็นว่าดัชนีทั้งสามเหมาะสมในการนำไปใช้ตรวจสอบสุขภาพของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติได้ เนื่องจากดัชนีทั้งสามนี้มีความแตกต่างกันระหว่างกว่าทรีตเมนต์ที่ปลูกในสองสภาพความเข้มแสงอย่างชัดเจน

5. ความสัมพันธ์ของดัชนีสเปกตรัมกับปริมาณแอนโธไซยานินในใบผักกาดหอมเรดโอ๊ค

เมื่อนำดัชนี GNDVI ดัชนี ARI1 และดัชนี ARI2 ซึ่งเป็นค่าดัชนีสเปกตรัมที่สามารถใช้แยกความแตกต่างระหว่างผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงแสงปกติและสภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติ (รูปที่ 3ข) มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ร่วมกับปริมาณแอนโธไซยานินซึ่งเป็นปริมาณรงควัตถุเพียงชนิดเดียวที่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบระหว่างความเข้มแสงปกติและความเข้มแสงต่ำกว่าปกติ (รูปที่ 2ข) จากกราฟความสัมพันธ์พบว่า ดัชนี GNDVI ดัชนี ARI1 และดัชนี ARI2 มีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณแอนโธไซยานินในใบของผักกาดหอมเรดโอ๊ค โดยมีค่า r^2 เท่ากับ 0.9168, 0.9164 และ 0.9088 ตามลำดับ (รูปที่ 4)



รูปที่ 3 การสะท้อนแสงของใบผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติ (Light) และที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติ (Shade) ค่าการสะท้อนแสง (ก) และดัชนีสเปกตรัม (ข) การสะท้อนแสงของใบถูกตรวจวัดเมื่อผักกาดหอมเรดโอ๊คอายุ 41 วันหลังจากเพาะเมล็ด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) แสดงด้วย error bar ในแผนภูมิแท่ง ความแตกต่างทางสถิติถูกวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบระหว่าง 2 ทรีตเมนต์ด้วยวิธี student t-test, ns คือ ไม่แตกต่างทางสถิติ, **คือ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ $p \leq 0.01$ และ * คือ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี GNDVI (ก) ดัชนี ARI1 (ข) ดัชนี ARI2 (ค) กับปริมาณแอนโธไซยานินในใบผักกาดหอมเรดโอ๊ค

สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความเข้มแสงที่แนะนำสำหรับการปลูกผักกาดหอมในระบบไฮโดรพอนิกส์คือความเข้มแสงที่สูงกว่า 200 $\mu mol \cdot m^{-2}s^{-1}$ [5] ในการทดลองนี้ทำการปลูกผักกาดหอมเรดโอ๊คใน 2 ความเข้มแสง คือในสภาพแสงธรรมชาติซึ่งมีความเข้มแสงเฉลี่ย 226.13 $\mu mol \cdot m^{-2}s^{-1}$ แสดงว่าสภาพแสงธรรมชาติในโรงเรือนสามารถใช้เป็นตัวแทนของสภาพความเข้มแสงปกติ ในทางตรงกันข้ามทรีตเมนต์ที่ปลูกในสภาพพรางแสง 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความเข้มแสงเฉลี่ยเพียง 119.56 $\mu mol \cdot m^{-2}s^{-1}$ จึงเป็นการปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าระดับปกติ ซึ่งเป็นความเข้มแสงที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของผักกาดหอมเรดโอ๊ค แสงเป็นปัจจัยสำคัญที่พืชใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง พืชที่ปลูกในที่ร่มหรือในพื้นที่ที่มีความเข้มแสงต่ำจะมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ลดลง [23-24] ซึ่งสามารถส่งผลให้พืชมีผลผลิตลดลง ในการทดลองนี้พบว่าความเข้มแสงต่ำกว่าปกติส่งผลให้ความกว้างทรงพุ่มและน้ำหนักสดของผักกาดหอมเรดโอ๊คลดลง (รูปที่ 1) จากการศึกษาของ Shao และคณะ [23] รายงานว่า การลดลงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเนื่องจากความเข้มแสงต่ำไม่ได้เกิดจากการลดลงของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในใบ แต่เกิดจากการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ และการเกิดคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งข้อมูลนี้สอดคล้องกับปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์รวมของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงที่ต่ำกว่าระดับปกติที่มีแนวโน้มต่ำกว่าผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงแสงปกติ (รูปที่ 2ก) นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มแสงต่ำส่งผลให้ผักกาดหอมเรดโอ๊คมีปริมาณแอนโธไซยานินลดลง (รูปที่ 2ข) ผักกาดหอมเรดโอ๊คเป็นผักสลัดที่เป็นแหล่งแอนโธไซยานินที่สำคัญ [25] ความเข้มแสงที่ลดต่ำลงส่งผลโดยตรงกับ

การลดลงของการสังเคราะห์แอนโธไซยานินในใบ [26] ในผักกาดหอมเรดโอ๊คการลดลงของแอนโธไซยานินเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้ผลผลิตไม่เป็นที่ต้องการของตลาด [6-7]

เมื่อตรวจสอบค่าการสะท้อนแสงของใบพบว่า ค่าการสะท้อนแสงของใบผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติและที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติมีความแตกต่างกัน โดยใบของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกภายใต้สภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติมีค่าการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่น 510 ถึง 630 นาโนเมตร สูงกว่าใบของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติ (รูปที่ 3ก) ความแตกต่างของค่าการสะท้อนแสงของใบของพืชเกิดจาก 3 ปัจจัย คือ โครงสร้างและกายวิภาคของใบ รงควัตถุและสารชีวเคมี และลักษณะทางสรีรวิทยา ได้แก่ ปริมาณน้ำในใบ อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง และการเกิดคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น [27] เมื่อนำค่าการสะท้อนแสงมาคำนวณดัชนีสเปกตรัม พบว่า ดัชนี GNDVI ดัชนี ARI1 และดัชนี ARI2 ของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงปกติมีค่าดัชนีดังกล่าวสูงกว่าผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในสภาพความเข้มแสงต่ำกว่าปกติ (รูปที่ 3ข) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะท้อนแสงในใบ เนื่องจากดัชนี GNDVI เป็นดัชนีที่ใช้ตรวจสอบสุขภาพของพืชโดยใช้แสงสีเขียวซึ่งอยู่ในช่วง 548 ถึง 563 นาโนเมตร [13, 22] และความยาวคลื่นในช่วงแสงสีเขียวนี้ยังสามารถใช้หาปริมาณคลอโรฟิลล์และแอนโธไซยานินในพืชได้ [28] สำหรับดัชนี ARI1 และดัชนี ARI2 เป็นดัชนีที่ใช้ความยาวคลื่นในช่วง 550 นาโนเมตร ซึ่งความยาวคลื่นในช่วงนี้เป็นช่วงแสงสีเขียวที่คลอโรฟิลล์ถูกดูดกลืนได้น้อยที่สุด [29] และเป็นช่วงแสงที่มีการดูดกลืนแสงของแอนโธไซยานิน [21] จากผลการทดลองพบว่าดัชนี GNDVI ดัชนี ARI1 และดัชนี ARI2 มีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณแอนโธไซยานินในใบของผักกาดหอมเรดโอ๊ค (รูปที่ 4) แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ดัชนี GNDVI ดัชนี ARI1 และดัชนี ARI2 ในการประเมินหาปริมาณแอนโธไซยานินในใบผักกาดหอมเรดโอ๊คโดยไม่ต้องทำลายตัวอย่างพืช และดัชนีสเปกตรัมทั้งสามสามารถใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของผักกาดหอมเรดโอ๊คเมื่อได้รับความเข้มแสงไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต โดยข้อมูลนี้จะสามารถนำไปใช้ในการจัดการความเข้มแสงในโรงเรือนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ทีมผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.พูนพิภพ เกษมทรัพย์ ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดร.ดวงรัตน์ ศตคุณ และ ดร.ชมภูนุช ฉายาเวช ศูนย์ความร่วมมือทางวิชาการไทย-ฝรั่งเศส มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับคำแนะนำในการวัดการสะท้อนแสงของใบและการคำนวณดัชนีสเปกตรัม

เอกสารอ้างอิง

1. Dorais, M., Gosselin, A., & Trudel, M. J. (1990). Annual greenhouse tomato production under a sequential intercropping system using supplemental light. *Scientia Horticulturae, 45*(3-4), 225-234.

2. Knight, S. L., & Mitchell, C. A. (1988). Effects of CO_2 and photosynthetic photon flux on yield, gas exchange and growth rate of *Lactuca sativa* 'Waldmann's Green'. *Journal of Experimental Botany, 39*(3), 317-328.
3. Koontz, H. V., & Prince R. P. (1986). Effect of 16 and 24 hours daily radiation (light) on lettuce growth. *Horticultural Science, 21*(1), 123-124.
4. Gaudreau, L., Charbonneau, J., Vézina, L., & Gosselin, A. (1994). Photoperiod and photosynthetic photon flux influence growth and quality of greenhouse-grown lettuce. *Horticultural Science, 29*(11), 1285-1289.
5. Brechner, M., & Both, A. (1996). Hydroponic lettuce handbook. New York. Cornell Controlled Environment Agriculture. Cornell University. p. 10.
6. Yang, X., Zhang, J., Guo, D., Xiong, X., Chang, L., Niu, Q., & Huang, D. (2016). Measuring and evaluating anthocyanin in lettuce leaf based on color information. *IFAC-PapersOnLine, 49*(16), 96-99.
7. Mampholo, B. M., Maboko, M. M., Soundy, P., & Sivakumar, D. (2016). Phytochemicals and overall quality of leafy lettuce (*Lactuca sativa* L.) varieties grown in closed hydroponic system. *Journal of Food Quality, 39*(6), 805-815.
8. Kitaya, Y., Niu, G., Kozai, T., & Ohashi, M. (1998). Photosynthetic photon flux, photoperiod, and CO_2 concentration affect growth and morphology of lettuce plug transplants. *Horticultural Science, 33*(6), 988-991.
9. Bahadur, A., Chatterjee, A., Kumar, R., Singh, M., & Naik, P. S. (2011). Physiological and biochemical basis of drought tolerance in vegetables. *Vegetable Science, 38*(1), 1-16.
10. Johnson, K. M., Jordan, G. J., & Brodribb, Timothy J. (2018). Wheat leaves embolized by water stress do not recover function upon rewatering. *Plant, Cell and Environment, 41*(11), 2704-2714.
11. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351, p. 309-317.
12. Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., Thompson, T., Lascano, R. J., Li, H., & Moran, M. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. In Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
13. Gitelson, A. A., & Merzlyak, M. N. (1997). Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *International Journal of Remote Sensing, 18*(12), 2691-2697.
14. Mohammed, S. B., & Sookoo, R. (2016). Nutrient film technique for commercial production. *Agricultural Science Research Journal, 6*(11), 269-274.

15. Shinohara, Y., & Suzuki, Y. (1988). Quality improvement of hydroponically grown leaf vegetables. *Acta Horticulturae (Netherlands), 230,* 279-286.
16. Chung, H., Chang, M., Wu, C., & Fang, W. (2018). Quantitative evaluation of electric light recipes for red leaf lettuce cultivation in plant factories. *HortTechnology, 28*(6), 755-763.
17. Hiscox, J., & Israelstam, G. (1979). A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany, 57*(12), 1332-1334.
18. Chappelle, E. W., Kim, M. S., & McMurtrey III, J. E. (1992). Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll A, chlorophyll B, and carotenoids in soybean leaves. *Remote Sensing of Environment. 39*(3), 239-247.
19. Ito, S., Nozoye, T., Sasaki, E., Imai, M., Shiwa, Y., Shibata-Hatta, M., Ishige, T., Fukui, K., Ito, K., Nakanishi, H., Nishizawa, Naoko K., Yajima, S., & Asami T. (2015). Strigolactone regulates anthocyanin accumulation, acid phosphatases production and plant growth under low phosphate condition in Arabidopsis. *PLoS One, 10*(3), 1-17.
20. Blackburn, G. (1998). Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. *International Journal of Remote Sensing, 19*(4), 657-675.
21. Gitelson, A., Merzlyak, M., & Chivkunova, O. (2001). Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology, 71*(1), 38-45.
22. Reynolds, G. J., Windels, C. E., MacRae, Ian V., & Laguette, S. (2012). Remote sensing for assessing Rhizoctonia crown and root rot severity in sugar beet. *Plant Disease, 96*(4), 497-505.
23. Shao, Q., Wang, H., Guo, H., Zhou, A., Huang, Y., Sun, Y., & Li, M. (2014). Effects of shade treatments on photosynthetic characteristics, chloroplast ultrastructure, and physiology of *Anoectochilus roxburghii. PLoS One, 9*(2), e85996, 1-10.
24. Wang, J., Huang, H., Jia, S., Zhong, X., Li, F., Zhang, K., & Shi, Z. (2017). Photosynthesis and chlorophyll fluorescence reaction to difference shade stresses of weak light sensitive maize. *Pakistan Journal of Botany, 49*(5), 1681-1688.
25. Stutte, G. W., Edney, S., & Skerritt, T. (2009). Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes. *Horticultural Science, 44*(1), 79-82.
26. Mancinelli, A., Yang, Chia-Ping H., Lindquist, P., Anderson, O., & Rabino, I. (1975). Photocontrol of anthocyanin synthesis. *Plant Physiology, 55*(2), 251-257.
27. Mohammed, G. H., Noland, T. L., Irving, D., Sampson, P. H., Zarco-Tejada, P. J., & Miller, J. R. (2000). Natural and stress-induced effects on leaf spectral reflectance in Ontario species. *Forest Research Report, 156,* 1-34.

28. Viña, A., & Gitelson, A. A. (2011). Sensitivity to foliar anthocyanin content of vegetation indices using green reflectance. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 8*(3), 463-467.
29. Gausman, H., & Allen, W. (1973). Optical parameters of leaves of 30 plant species. *Plant Physiology, 52*(1), 57-62.