

ผลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการเจริญเติบโตของผักสลัด ในโรงงานผลิตพืชโดยใช้แสงประดิษฐ์

The effect of carbon dioxide on the growth rate of lettuce in a plant
factory with artificial lighting

เสาวลักษณ์ กิตติธนาวัตร^{1,*}
Saovalak Kittithanawat^{1,*}

¹ สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ 10900

¹ Horticultural Research Institute, Department of Agriculture, Bangkok 109000

ทิวา บุปผาประเสริฐ¹
Thiva Bubpaprasert¹

*Corresponding author: S_Kittithanawat@outlook.com

วิศรุต สันมาเอ¹
Wisarute Sanmaerre¹

สัจจะ ประสงค์ทรัพย์¹
Satja Prasongsap¹

ประวัติบทความ

รับเรื่อง: 4 ธันวาคม 2567
ปรับแก้ไข: 8 กรกฎาคม 2568
รับตีพิมพ์: 10 กรกฎาคม 2568

คำสำคัญ

โรงงานผลิตพืชโดยใช้แสงประดิษฐ์
คาร์บอนไดออกไซด์
ผักสลัด

Article History

Received: 4 December 2024
Revised: 8 July 2025
Accepted: 10 July 2025

บทคัดย่อ

ความเป็นมาและวัตถุประสงค์: โรงงานผลิตพืชโดยใช้แสงประดิษฐ์ (Plant factory with artificial lighting; PFAL) เป็นระบบการผลิตพืชที่สามารถควบคุมปัจจัยที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช เป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการผลิตพืชในยุคปัจจุบันที่มีความเสี่ยงจากปัจจัยแวดล้อมภายนอกต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อคุณภาพและปริมาณของผลผลิต ในปัจจุบันข้อมูลปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมแก่ผักสลัดที่ปลูกในระบบ PFAL มีเพียงส่วนน้อย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการเจริญเติบโตของผักสลัด 10 ชนิด ได้แก่ กรีนโอ๊ค กรีนคอส บัตเตอร์เฮด เบบีคอส กรีนคอรัล เรดโอ๊ค เรดคอรัล เรดคอส แกรนแรพิด และเรดโบว์ที่ปลูกเลี้ยงในระบบ PFAL

วิธีดำเนินการวิจัย: วางแผนแบบบล็อกสมบูรณ์เชิงสุ่ม (RCBD) โดยให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ 4 ระดับความเข้มข้น ได้แก่ 400 (ชุดควบคุม), 800, 1,200 และ 1,600 ppm เป็นเวลา 4 สัปดาห์ จำนวน 4 ซ้ำ ซ้ำละ 12 ต้น ในผักสลัด 10 ชนิด บันทึกข้อมูลด้านการเจริญเติบโต ได้แก่ ความสูงของทรงพุ่ม ความกว้างของทรงพุ่ม น้ำหนักสดของผลผลิตเมื่อเก็บเกี่ยวและน้ำหนักแห้งของผลผลิต นำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัย: การได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1,200 ppm ส่งผลให้ผักสลัด 8 ชนิด ได้แก่ กรีนโอ๊ค กรีนคอส บัตเตอร์เฮด เบบีคอส กรีนคอรัล เรดโอ๊ค เรดคอรัล และเรดคอส มีความสูงและความกว้างของทรงพุ่มสูงที่สุด ขณะที่ ผัก 5 ชนิด ได้แก่ บัตเตอร์เฮด กรีนคอรัล เรดโอ๊ค เรดคอส และแกรนแรพิด มีน้ำหนักสดผลผลิตเมื่อเก็บเกี่ยวสูงที่สุด และผัก 6 ชนิด ได้แก่ บัตเตอร์เฮด เบบีคอส เรดโอ๊ค เรดคอรัล เรดคอส และแกรนแรพิด

Keywords

Plant factory with artificial lighting

Carbon dioxide

Lettuce

การอ้างอิง

เสาวลักษณ์ กิตติธนวัตร, ทิพา บุปผาประเสริฐ, วิศรุต สันมาแอ และ สัจจะ ประสงค์ทรัพย์. 2569. ผลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการเจริญเติบโตของผักสลัดในโรงงานผลิตพืชโดยใช้แสงประดิษฐ์. ว. วิทยา. นวัตกรรม. 57(2): 114–123.

How to cite

Kittithanawat, S., T. Bubprasert, W. Sanmaerre and S. Prasongsap. 2026. The effect of carbon dioxide on the growth rate of lettuce in a plant factory with artificial lighting. Agric. Sci. Innov. J. 57(2): 114–123.

มีน้ำหนักแห้งสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สรุป: ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1,200 ppm เป็นระดับที่ส่งผลให้ผักสลัดมีอัตราการเจริญเติบโตดีที่สุดเมื่อปลูกเลี้ยงในระบบ PFAL

Abstract

Background and Objective: A plant factory with artificial lighting (PFAL) is a closed plant production system in which the key factors affecting plant growth are controlled. PFAL is a suitable option for plant production today, which is increasingly affected by environmental changes that impact the quantities and qualities of plant production. Currently, there is limited data on the optimum carbon dioxide concentrations for lettuce in PFAL. This research aimed to determine the effect of carbon dioxide in PFAL on the growth of green oak lettuce, green cos lettuce, butterhead lettuce, baby cos lettuce, green coral lettuce, red oak lettuce, red coral lettuce, red cos lettuce, grand rapids lettuce, and red bowl lettuce.

Methodology: The experiment was conducted in a randomized complete block design (RCBD). The treatment consisted of four methods, involving the input of different concentrations of carbon dioxide at 400 (Control), 800, 1,200, and 1,600 ppm, for 4 weeks after transplanting in PFAL, with four replications and 12 plants in each replication. Growth parameters, including plant height, stem diameter, fresh weight of yield at harvest, and dry weight, were recorded. The data were statistically analyzed using Duncan's new multiple range test at a 95% confidence level.

Main Results: Carbon dioxide at 1,200 ppm significantly increased plant height and stem diameter in eight lettuce cultivars, namely green oak lettuce, green cos lettuce, butterhead lettuce, baby cos lettuce, green coral lettuce, red oak lettuce, red coral lettuce, and red cos lettuce. In addition, the highest fresh yield weight at harvest was observed in five cultivars, including butterhead lettuce, green coral lettuce, red oak lettuce, red cos lettuce, and grand rapids lettuce, while the highest dry weight was obtained in six cultivars, namely butterhead lettuce, baby cos lettuce, red oak lettuce, red coral lettuce, red cos lettuce, and grand rapids lettuce, compared with other carbon dioxide concentrations, with highly significant differences.

Conclusions: Carbon dioxide at 1,200 ppm is an effective method for inducing the growth rate of lettuce plants grown in a plant factory with artificial lighting.

บทนำ

การปลูกพืชในปัจจุบันมีความเสี่ยงต่อสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป ความแปรปรวนของฤดูกาล ความแห้งแล้ง การระบาดของศัตรูพืช และภัยพิบัติต่าง ๆ ที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ล้วนส่งผลต่อการผลิตพืช ก่อให้เกิดความเสียหาย รวมถึงการใช้สารเคมีที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค ประกอบกับพื้นที่ทำการเกษตรลดลงอันเนื่องมาจากการขยายตัวของประชากร จึงเป็นเหตุผลสำคัญในการพัฒนาระบบการผลิตพืชในโรงงานผลิตพืชด้วยแสงเทียม (Plant factory artificial light; PFAL) ที่สามารถปลูกพืชได้ทุกที่โดยไม่ขึ้นกับสภาพอากาศ เนื่องจาก PFAL เป็นการปลูกพืชระบบปิด สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมทุกอย่างให้เป็นไปตามที่กำหนด โดยเฉพาะปัจจัยที่มีความสำคัญในการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ แสง อุณหภูมิ ความชื้น ธาตุอาหาร และคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ได้ผลผลิตตามที่ต้องการได้ตลอดทั้งปี การผลิตพืชในระบบ PFAL ควบคุมสภาพแวดล้อมทุกอย่าง ส่งผลให้ผักที่ได้จากกระบวนการผลิตนี้ สะอาด ปลอดภัย ต่อผู้บริโภค และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่มีการปล่อยของเสียออกสู่ธรรมชาติ และด้วยระบบปิดสนิทจึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้สารเคมีสำหรับกำจัดแมลงและศัตรูพืช

การสร้าง PFAL ส่วนมากจะสร้างอยู่ในเมือง เนื่องจากต้องการลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ทำให้ผักที่ส่งถึงมือผู้บริโภคยังคงสดใหม่ และลดความเสียหายจากการขนส่ง ผักที่ได้จากกระบวนการผลิตนี้สามารถรับประทานได้เลยโดยไม่ต้องล้าง และสามารถเก็บได้นานกว่าปกติ เนื่องจากมีปริมาณแบคทีเรียน้อยกว่า 300 UFC/g มั่นใจได้ในความสะอาด เทคโนโลยีการผลิตพืชในระบบ PFAL เป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาและประยุกต์องค์ความรู้แขนงต่าง ๆ ทั้งด้านสรีรวิทยาการผลิตพืช การเกษตร วิศวกรรม รวมถึงการจัดการเทคโนโลยีการผลิตพืช ทำให้มีศักยภาพที่จะพัฒนาให้เป็นรูปแบบการทำฟาร์มในอนาคตของประเทศไทย (Future farm in Thailand) โดยการผลิตพืชในระบบนี้สามารถปลูกพืชแบบแนวตั้งได้มากกว่า 10 ชั้น จึงเป็นการใช้พื้นที่ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด สอดรับกับสภาพสังคมในปัจจุบันที่พื้นที่ทำการเกษตรลดลงอันเนื่องมาจากการขยายตัวของประชากร การเพิ่มสูงขึ้นของค่าใช้จ่ายด้านปัจจัยการผลิต การปลูกพืชในระบบ PFAL จึงเหมาะสำหรับผู้ที่มีพื้นที่จำกัด ดังนั้น การผลิตพืชใน PFAL จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการช่วยให้มีอาหารในยามขาดแคลน ลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติ ผลผลิตที่ได้แน่นอน และมีคุณภาพ สร้างมูลค่า เสริมรายได้ให้กับผู้เพาะปลูก (Kozai *et al.*, 2020)

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาและการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากเซลล์พืชต้องการพลังงานจำนวนหนึ่งเพื่อใช้ในการขนส่งน้ำและแร่ธาตุไปยังเนื้อเยื่อทั้งหมด รวมถึงใช้เพื่อสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ที่พืชต้องการสำหรับการเจริญเติบโตและการพัฒนาที่เหมาะสม ต้องอาศัยการทำงานของ ATP-adenosine triphosphate ซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่เก็บพลังงานไว้ในพันธะเคมี ATP ผลิตขึ้นระหว่างการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยจะเกิดขึ้นในส่วนที่มีสีเขียวของพืช ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์มีความสำคัญต่อกระบวนการนี้ กล่าวคือเซลล์พืชผลิตสารประกอบอินทรีย์จากคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำโดยใช้พลังงานจาก ATP ส่งผลให้พืชปล่อยออกซิเจนให้มนุษย์และสัตว์หายใจได้ สำหรับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่พบในสภาพบรรยากาศปกติจะอยู่ที่ 400 ppm (Chen *et al.*, 2021)

ในปัจจุบันมีการให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในการปลูกพืชระบบปิดเพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตโดยให้ความเข้มข้นตั้งแต่ 900–1,500 ppm โดยปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยส่งเสริมให้เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ดีขึ้น ส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้น เพิ่มขนาดของพื้นที่ใบ รวมถึงผลผลิตที่เพิ่มขึ้น (Li *et al.*, 2017) นอกจากนี้ ยังมีส่วนช่วยลดอัตราการหายใจ ลดการสูญเสียน้ำในพืช (Li *et al.*, 2020) การทดลองให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 1,600 ppm ช่วยกระตุ้นอัตราการเจริญเติบโต ปริมาณผลผลิต (ความสูงของทรงพุ่ม ความกว้างของทรงพุ่ม จำนวนใบ ความยาวราก ความกว้างของใบ และพื้นที่ของใบ) และประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงในผักกาดหอมที่ปลูกเลี้ยงในระบบ PFAL (Chen *et al.*, 2021) คาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 1,000 ppm กระตุ้นชีวมวลและกรดอะมิโนบางชนิดในผักกาดหอมห่อ (Miyagi *et al.*, 2017) อีกทั้งยังมีส่วนในการช่วยเพิ่มปริมาณผลผลิต และความเข้มข้นของปริมาณสารฟลาโวนอยด์ โกลโคไซด์ กรดคาเฟอิกและอนุพันธ์ ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลที่สังเคราะห์ได้ และสารประกอบฟีนอลในผักสลัดเรตไอค (Park *et al.*, 2012) ผักสลัดแกรนแรพิด (*Lactuca sativa* L. var. *crispa* cv. Grand Rapids) ที่ปลูกเลี้ยงในระบบ PFAL ที่ให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 1,000 และ 2,000 ppm พบว่า มีอัตราการสังเคราะห์แสงและอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นอื่น ๆ (Park and Lee, 2001) การให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 1,000 ppm นอกจากช่วยเพิ่มอัตราการสังเคราะห์แสงแล้วพบว่ามีผลช่วยเพิ่มปริมาณแอนโทไซยานินในผักกาดหอม

Lactuca sativa L. ‘Seonhong Jeokchukmyeon’ (Park *et al.*, 2012) ส่วนผักเคล (*Brassica oleracea* var. *alboglabra* Bailey) ที่ปลูกในระบบ PFAL ที่มีการเพิ่มระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีอัตราการเจริญเติบโตและปริมาณกลูโคซิโนเลตเพิ่มขึ้น (Chowdhury *et al.*, 2021)

คาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยการปลูกพืชในระบบ PFAL สามารถกำหนดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะให้แก่พืชได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ให้ข้อมูลเรื่องปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมแก่ผักสลัดแต่ละชนิดที่ปลูกในระบบ PFAL ยังไม่แพร่หลายมากนัก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการเจริญเติบโตของผักสลัด 10 ชนิดที่เป็นที่นิยมของผู้บริโภค ได้แก่ กรีนโอ๊ค กรีนคอส บัตเตอร์เฮด เบบีคอส กรีนคอรัล เรดโอ๊ค เรดคอรัล เรดคอส แกรนแรพิด และเรดโบว์ ที่ปลูกเลี้ยงในระบบ PFAL

อุปกรณ์และวิธีการ

สิ่งที่ใช้ในการทดลอง

พืชที่ทำการศึกษาคือ ผักสลัดจำนวน 10 ชนิด โดยใช้เมล็ดพันธุ์ผักสลัดจาก บริษัท ดัทช์ กรีนเนอรี่ จำกัด ได้แก่ กรีนโอ๊ค (*Lactuca scariola* var. *sativa* L.) กรีนคอส (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*) บัตเตอร์เฮด (*Lactuca sativa* L.) เบบีคอส (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*) กรีนคอรัล (*Lactuca sativa* var. *crispa*) เรดโอ๊ค (*Lactuca sativa*) เรดคอรัล (*Lactuca sativa* var. *crispa*) เรดคอส (*Lactuca sativa* var. *longifolia*) แกรนแรพิด (*Lactuca sativa* L. var. *crispa* cv. Grand Rapids) และเรดโบว์ (*Lactuca sativa* var. *crispa*)

แผนการทดลอง

วางแผนแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์เชิงสุ่ม (Randomized complete block design; RCBD) จำนวน 4 ทรีตเมนต์ ทรีตเมนต์ละ 4 ซ้ำ ซ้ำละ 12 ต้น ในผักสลัด จำนวน 10 ชนิด โดยให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนี้ ทรีตเมนต์ ที่ 1 ให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับบรรยากาศปกติ 400 ppm ทรีตเมนต์ ที่ 2, 3 และ 4 ให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 800, 1,200 และ 1,600 ppm ตามลำดับ

วิธีปฏิบัติการทดลอง

เพาะเมล็ดผักสลัดชนิดต่าง ๆ ในฟองน้ำที่ชุ่มด้วยน้ำ (แช่ฟองน้ำในน้ำเปล่าที่ไม่มีคลอรีนนาน 15 นาที) และวางใน

ถาดเพาะโดยปรับระดับน้ำในถาดเพาะให้ต่ำกว่าก้นฟองน้ำ ประมาณ 5 มิลลิเมตร เพาะเมล็ดผักสลัดเป็นเวลา 3 วัน โดยวางถาดเพาะในที่มืดแสงเพื่อป้องกันไม่ให้ต้นกล้ายืด จนกล้าผักสลัดมีใบอ่อน 2 ใบ จากนั้น ย้ายกล้าผักสลัดเข้าห้องทดลอง PFAL โดยให้แสงที่ 200–250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ที่อุณหภูมิ 22–25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55–60 เตรียมสารละลาย AB สำหรับการปลูกผักสลัด โดยผสมสารละลาย AB ลงในถังสารละลายให้มีค่า EC เท่ากับ 1.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ปลูกเลี้ยงผักสลัดในระบบ PFAL เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ (Figure 1) โดยดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีการผลิตพืช อาคารการผลิตพืชชั้นสูงด้วยแสงเทียม สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและสถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร ระหว่างเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2564 รวมระยะเวลาดำเนินงาน 2 เดือน

การบันทึกข้อมูล

บันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตของผักสลัดทั้ง 10 ชนิด โดยบันทึกข้อมูลของผักสลัดแต่ละทรีตเมนต์ทุกต้นที่ปลูกเลี้ยงในระบบ PFAL ทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ (Figure 2) ได้แก่ (1) ความสูงของทรงพุ่ม (เซนติเมตร) โดยวัดจากตำแหน่งใบเลี้ยงจนถึงจุดเจริญ (2) ความกว้างของทรงพุ่ม (เซนติเมตร) โดยวัดบริเวณที่กว้างที่สุดของทรงพุ่ม (3) น้ำหนักสดของผลผลิตเมื่อเก็บเกี่ยว (กรัม) โดยชั่งน้ำหนักสดผลผลิตด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล 1 ตำแหน่ง (น้ำหนักก่อนตัดแต่ง) และ (4) น้ำหนักแห้งของผลผลิต (กรัม) โดยนำตัวอย่างไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ประมาณ 1–3 วัน ให้แห้งสม่ำเสมอ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละทรีตเมนต์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการทดลองและวิจารณ์

ความสูงของทรงพุ่ม (เซนติเมตร)

จากการทดลองปลูกผักสลัด 10 ชนิด ในระบบ PFAL เป็นเวลา 4 สัปดาห์ ภายใต้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ พบว่า การให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1,200 ppm ส่งผลให้ผักสลัด 8 ชนิด จากทั้งหมด 10 ชนิด ได้แก่ กรีนโอ๊ค กรีนคอส บัตเตอร์เฮด เบบีคอส กรีนคอรัล เรดโอ๊ค เรดคอรัล และ



Figure 1 Development of lettuce in a plant factory with artificial lighting (PFAL) at 1 (A), 2 (B), 3 (C), and 4 (D) weeks after transplanting

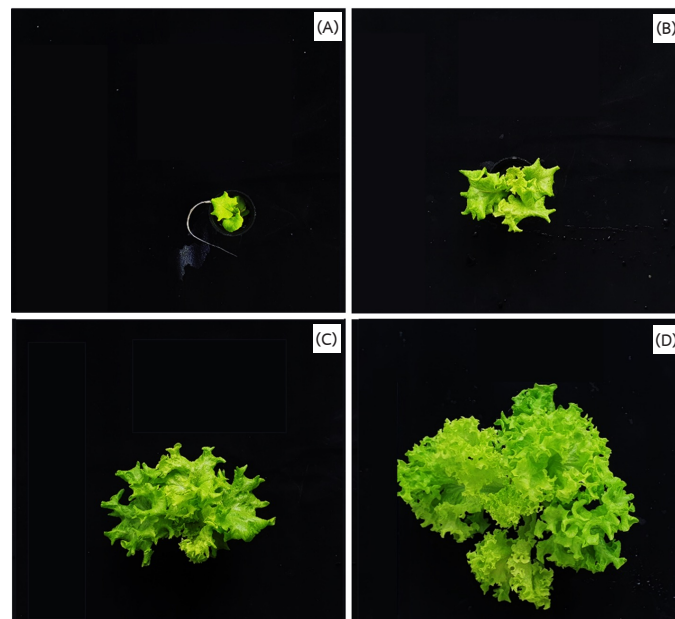


Figure 2 Morphological character of lettuce in a plant factory with artificial lighting (PFAL) at 1 (A), 2 (B), 3 (C), and 4 (D) weeks after transplanting

เรตคอส มีความสูงของทรงพุ่มสูงสุดและแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับอื่น ๆ ($P < 0.01$) ขณะที่ในแกรนแรพิดและเรตโบว์ คาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1,600 ppm มีความสูงของทรงพุ่มสูงที่สุด (Table 1) สอดคล้องกับการทดลองของ Chen *et al.* (2021) ที่พบว่าความสูงทรงพุ่มของผักกาดหอม (*Latuca sativa* L.) ที่ได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 1,600 ppm มีความสูงของทรงพุ่มมากกว่าผักกาดหอมที่ได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 800 และ 400 ppm ตามลำดับ งานวิจัยของ Drennan and

Nobel (2000) และ Prior *et al.* (2005) พบว่า การเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สามารถช่วยให้พืชมีการเจริญเติบโตได้ดีขึ้นเนื่องจากเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศทำให้ความเข้มข้นของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างเซลล์เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสงที่เพิ่มขึ้น (Thongbai *et al.*, 2010)

ความกว้างของทรงพุ่ม (เซนติเมตร)

ความกว้างของทรงพุ่มผักสลัด 10 ชนิด หลังได้รับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ระดับต่าง ๆ ที่ปลูกเลี้ยงในระบบ PFAL เป็น

เวลา 4 สัปดาห์ พบว่า การให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1,200 ppm ส่งผลให้ผักสลัด 8 ชนิด จากทั้งหมด 10 ชนิด ได้แก่ กรีนโอ๊ค กรีนคอส บัตเตอร์เฮด เบบีคอส กรีนคอรล์ เรดโอ๊ค เรดคอรล์ และเรดคอส มีความกว้างของทรงพุ่มมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับอื่น ๆ แต่สำหรับแกรนแรพิดและเรดโบว์ คาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1,600 ppm ส่งผลให้มีความกว้างของทรงพุ่มมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติเมื่อเทียบกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับอื่น ๆ (Table 2) สอดคล้องกับ Chen *et al.* (2021) ที่พบว่า ผักกาดหอม (*Lactuca sativa* L.) ที่ได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 1,600 ppm มีความกว้างของทรงพุ่มมากกว่า คาร์บอนไดออกไซด์ที่ 800 และ 400 ppm ตามลำดับ และการทดลองของ Park and Lee (2001) พบว่า การให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลให้ผักสลัดแกรนแรพิด (*Lactuca sativa* L. var. *crispa* cv. Grand Rapids) ที่ปลูกเลี้ยงในระบบ PFAL มีอัตราการสังเคราะห์แสงและอัตราการเจริญเติบโตมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผักสลัดแกรนแรพิดที่ได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับปกติ รวมถึงผักสลัด (*Lactuca sativa* L. 'Seonhong Jeokchukmyeon') ที่ได้รับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1,000 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ส่งผลให้ผักสลัดมีอัตราการสังเคราะห์แสงและอัตราการเจริญเติบโตมากขึ้นเช่นกัน (Park *et al.*, 2012)

น้ำหนักสดของผลผลิตเมื่อเก็บเกี่ยว (กรัม)

น้ำหนักสดผลผลิตเมื่อเก็บเกี่ยวของผักสลัด 10 ชนิด ที่ได้รับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ ปลูกเลี้ยงในระบบ PFAL เป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า ผักสลัด 5 ชนิด ได้แก่ บัตเตอร์เฮด กรีนคอรล์ เรดโอ๊ค เรดคอส และแกรนแรพิด ที่ได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1,200 ppm มีน้ำหนักสดเมื่อเก็บเกี่ยวสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับอื่น ๆ ขณะที่ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 800 ppm ส่งผลให้ผักสลัดจำนวน 2 ชนิด ได้แก่ กรีนคอส และเรดโบว์ มีน้ำหนักสดเมื่อเก็บเกี่ยวมากที่สุด สำหรับกรีนโอ๊คและเบบีคอส ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ส่งผลให้น้ำหนักสดเมื่อเก็บเกี่ยวสูงที่สุด คือ ที่ระดับ 400 และ 1,600 ppm ตามลำดับ (Table 3)

สำหรับผักสลัดเรดคอรล์ พบว่า ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับแตกต่างกันไม่มีผลต่อน้ำหนักสดผลผลิตผักสลัดเมื่อเก็บเกี่ยว สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Richard *et al.*, 2004) ที่ทดลองในผัก 3 ชนิด ได้แก่ แรดิช (*Raphanus sativus* L.)

ต้นหอม (*Allium fistulosum* L.) และผักกาดหอม (*Lactuca sativa* L.) ด้วยการให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1,200 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ พบว่า ระดับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผักทั้ง 3 ชนิด มีผลผลิตมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ซึ่งโดยทั่วไประดับของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ 700–1,000 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ จะมีผลในการเพิ่มผลผลิตของผักต่าง ๆ ได้ (Gruda and Tanny, 2015) ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 800–900 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ช่วยเพิ่มผลผลิตในผักกาดหอม แครอท และพาสเลย์ (Mortensen, 1994) สำหรับมะเขือเทศและพริกไทยการได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 900 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ สามารถช่วยเพิ่มผลผลิตได้เช่นกัน (Fierro *et al.*, 1994) การทดลองในผักกาดหอมที่ได้รับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับแตกต่างกัน ได้แก่ 400, 800, 1,200 และ 1,600 ppm พบว่า น้ำหนักสดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้รับเพิ่มขึ้นตามลำดับ (Holley *et al.*, 2022)

น้ำหนักแห้งของผลผลิต (กรัม)

น้ำหนักแห้งผักสลัด 10 ชนิด ที่ได้รับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับต่างๆ ที่ปลูกเลี้ยงในระบบ PFAL นาน 4 สัปดาห์หลังจากการเก็บเกี่ยวและอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่า ผักสลัดที่ได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1,200 ppm ส่งผลให้ผักสลัดมีน้ำหนักแห้งสูงที่สุด 6 ชนิด ได้แก่ บัตเตอร์เฮด เบบีคอส เรดโอ๊ค เรดคอรล์ เรดคอส และแกรนแรพิด ขณะที่ การได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 800 ppm ส่งผลให้ผัก 2 ชนิด ได้แก่ กรีนคอสและกรีนคอรล์ มีน้ำหนักแห้งสูงที่สุด สำหรับกรีนโอ๊คและเรดโบว์ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำให้มีน้ำหนักแห้งมากที่สุด คือ 400 และ 1,600 ppm ตามลำดับ (Table 4) งานวิจัยในซูการ์บีท พบว่า การได้รับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 600–700 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ส่งผลให้ซูการ์บีทมีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นจากการได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับปกติ (Demmers-Derks *et al.*, 1998) จากการทดลองของ Richards *et al.* (2004) พบว่า ผักกาดหอม (cv. Flandria) ต้นหอม (cv. Kinka) และดิช (cv. Cherry Bomb II) ที่ได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1,200 ppm มีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งมากกว่าผักกาดหอมที่ได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 400 ppm การทดลองในผักกาดหอมที่ได้รับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ คือ 400, 800, 1,200 และ 1,600 ppm พบว่า น้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้รับเพิ่มขึ้นตามลำดับ (Holley *et al.*, 2022)

Table 1 Plant height (cm) of 10 lettuces exposed to different carbon dioxide concentrations at week 4 after transplanting in PFAL

CO ₂ (ppm)	Green oak lettuce	Green cos lettuce	Butterhead lettuce	Baby cos lettuce	Green coral lettuce	Red oak lettuce	Red coral lettuce	Red cos lettuce	Grand rapids lettuce	Red bowl lettuce
400	18.18 ± 0.45 ^c	19.10 ± 0.61 ^c	13.58 ± 0.69 ^c	8.98 ± 0.58 ^b	11.45 ± 0.29 ^b	12.13 ± 1.44 ^b	11.30 ± 0.96 ^b	9.35 ± 0.87 ^b	8.53 ± 0.92 ^a	6.63 ± 1.47 ^a
800	9.38 ± 0.86 ^a	14.65 ± 1.22 ^a	7.10 ± 0.37 ^a	7.85 ± 0.61 ^a	8.63 ± 0.39 ^a	7.48 ± 0.86 ^a	7.40 ± 0.51 ^d	7.00 ± 0.14 ^a	16.10 ± 2.75 ^c	10.08 ± 1.45 ^c
1,200	22.58 ± 0.25 ^d	22.65 ± 1.03 ^d	13.85 ± 0.34 ^c	14.08 ± 0.37 ^c	16.58 ± 0.59 ^d	16.10 ± 0.54 ^c	13.75 ± 0.61 ^a	15.30 ± 0.39 ^c	12.28 ± 0.39 ^b	8.25 ± 1.14 ^b
1,600	14.70 ± 0.56 ^b	17.38 ± 0.99 ^b	10.30 ± 0.35 ^b	8.58 ± 0.41 ^b	9.80 ± 0.18 ^b	7.88 ± 0.46 ^a	7.70 ± 0.98 ^c	7.80 ± 0.51 ^a	16.73 ± 1.77 ^c	17.45 ± 6.43 ^d
CV (%)	3.40	4.30	4.10	4.50	3.70	8.90	6.50	4.00	9.20	7.00
P-value	0.00406	0.00730	0.00188	0.00276	0.00270	0.00709	0.00858	0.00402	0.00378	0.00167

Means within the same column followed by different superscript letters (a, b, c, d) are significantly different ($P < 0.05$). Values are presented as mean ± standard deviation. PFAL = plant factory with artificial lighting, CV = coefficient of variation.

Table 2 Stem diameter (cm) of 10 lettuces exposed to different carbon dioxide concentrations at week 4 after transplanting in PFAL

CO ₂ (ppm)	Green oak lettuce	Green cos lettuce	Butterhead lettuce	Baby cos lettuce	Green coral lettuce	Red oak lettuce	Red coral lettuce	Red cos lettuce	Grand rapids lettuce	Red bowl lettuce
400	21.70 ± 0.27 ^b	22.95 ± 1.80 ^a	19.18 ± 0.61 ^b	15.70 ± 0.42 ^b	17.80 ± 0.62 ^a	17.85 ± 1.29 ^b	16.95 ± 1.16 ^a	14.45 ± 0.47 ^a	14.93 ± 1.54 ^a	13.55 ± 2.29 ^a
800	17.93 ± 2.58 ^a	26.55 ± 0.48 ^b	13.13 ± 0.54 ^a	17.28 ± 0.94 ^c	17.35 ± 0.70 ^a	13.88 ± 1.28 ^a	16.13 ± 0.67 ^a	13.13 ± 0.33 ^a	21.93 ± 2.70 ^c	18.05 ± 2.67 ^b
1,200	29.05 ± 1.03 ^c	32.53 ± 0.93 ^c	20.98 ± 0.84 ^c	23.90 ± 0.26 ^d	21.95 ± 0.81 ^b	23.48 ± 0.22 ^c	21.98 ± 0.39 ^b	19.13 ± 0.87 ^c	18.73 ± 1.33 ^b	19.45 ± 3.58 ^b
1,600	22.75 ± 0.76 ^b	23.40 ± 1.28 ^a	20.65 ± 0.79 ^c	9.13 ± 0.21 ^a	16.48 ± 1.99 ^a	17.93 ± 2.05 ^b	17.00 ± 0.82 ^a	15.83 ± 1.89 ^b	22.25 ± 2.20 ^c	22.68 ± 2.07 ^c
CV (%)	7.20	4.90	3.90	3.00	7.10	8.50	4.90	5.30	5.90	6.30
P-value	0.00314	0.00468	0.0010	0.00590	0.00138	0.00260	0.00369	0.00386	0.00351	0.00425

Means within the same column followed by different superscript letters (a, b, c, d) are significantly different ($P < 0.05$). Values are presented as mean ± standard deviation. PFAL = plant factory with artificial lighting, CV = coefficient of variation.

Table 3 Fresh weight (g) of 10 lettuces exposed to different carbon dioxide concentrations at week 4 after transplanting in PFAL

CO ₂ (ppm)	Green oak lettuce	Green cos lettuce	Butterhead lettuce	Baby cos lettuce	Green coral lettuce	Red oak lettuce	Red coral lettuce	Red cos lettuce	Grand rapids lettuce	Red bowl lettuce
400	162.03 ± 11.69 ^d	116.63 ± 15.68 ^a	82.93 ± 2.72 ^c	59.57 ± 2.61 ^a	100.07 ± 10.10 ^b	86.10 ± 17.84 ^b	85.33 ± 6.39 ^b	68.97 ± 7.54 ^b	54.80 ± 9.66 ^a	44.97 ± 6.16 ^a
800	111.83 ± 3.78 ^b	170.37 ± 15.96 ^c	47.50 ± 5.24 ^a	82.30 ± 0.60 ^b	93.97 ± 8.06 ^b	55.07 ± 14.92 ^a	73.57 ± 5.89 ^{ab}	45.50 ± 0.98 ^a	90.17 ± 14.92 ^b	77.33 ± 17.16 ^b
1,200	90.97 ± 1.44 ^a	118.00 ± 10.23 ^a	111.67 ± 7.24 ^d	66.70 ± 4.42 ^a	111.30 ± 4.75 ^c	97.47 ± 3.88 ^b	71.50 ± 11.00 ^{ab}	96.33 ± 9.58 ^c	126.10 ± 9.44 ^c	45.20 ± 2.03 ^a
1,600	125.83 ± 3.31 ^c	148.33 ± 23.50 ^b	65.60 ± 13.75 ^b	87.83 ± 9.67 ^b	68.37 ± 2.65 ^a	97.27 ± 4.91 ^b	53.43 ± 16.36 ^a	53.67 ± 10.96 ^{ab}	43.10 ± 7.35 ^a	59.60 ± 18.29 ^a
CV (%)	5.50	7.40	10.90	7.40	5.20	12.50	17.50	13.10	9.40	15.50
P-value	0.00591	0.00195	0.00319	0.00174	0.00423	0.00108	0.04338	0.00199	0.00768	0.01915

Means within the same column followed by different superscript letters (a, b, c, d) are significantly different (P < 0.05). Values are presented as mean ± standard deviation. PFAL = plant factory with artificial lighting, CV = coefficient of variation.

Table 4 Dry weight (g) of 10 lettuces exposed to different carbon dioxide concentrations at week 4 after transplanting in PFAL

CO ₂ (ppm)	Green oak lettuce	Green cos lettuce	Butterhead lettuce	Baby cos lettuce	Green coral lettuce	Red oak lettuce	Red coral lettuce	Red cos lettuce	Grand rapids lettuce	Red bowl lettuce
400	4.83 ± 0.58 ^b	3.20 ± 0.20 ^a	2.90 ± 0.26 ^b	1.90 ± 0.26 ^b	2.63 ± 0.35 ^b	2.70 ± 0.52 ^b	2.37 ± 0.38 ^b	2.43 ± 0.21 ^b	1.40 ± 0.20 ^a	1.70 ± 0.20 ^a
800	2.53 ± 0.06 ^a	4.83 ± 0.70 ^b	1.73 ± 0.40 ^a	0.90 ± 0.10 ^a	3.63 ± 0.59 ^c	0.40 ± 0.10 ^a	2.17 ± 0.51 ^b	0.50 ± 0.10 ^a	3.20 ± 0.56 ^b	3.23 ± 0.51 ^{bc}
1,200	2.83 ± 0.11 ^a	3.10 ± 0.69 ^a	3.67 ± 0.25 ^b	2.83 ± 0.25 ^c	3.17 ± 0.55 ^{bc}	2.93 ± 0.35 ^b	2.63 ± 0.40 ^b	2.93 ± 0.32 ^c	3.70 ± 0.36 ^c	2.53 ± 0.15 ^b
1,600	2.30 ± 0.6 ^{da}	2.83 ± 0.23 ^a	1.27 ± 0.67 ^a	1.33 ± 0.64 ^{ab}	1.27 ± 0.15 ^a	2.27 ± 0.40 ^b	1.03 ± 0.38 ^a	0.93 ± 0.06 ^a	3.43 ± 0.25 ^{bc}	3.37 ± 0.70 ^c
CV (%)	13.00	12.00	20.60	23.90	10.70	18.60	23.10	13.50	5.70	13.10
P-value	0.00245	0.00141	0.00147	0.00125	0.00383	0.00266	0.01663	0.00778	0.00118	0.00139

Means within the same column followed by different superscript letters (a, b, c) are significantly different (P < 0.05). Values are presented as mean ± standard deviation. PFAL = plant factory with artificial lighting, CV = coefficient of variation.

สรุป

การให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1,200 ppm ส่งผลให้ผักสลัดมีความสูงของทรงพุ่ม ความกว้างของทรงพุ่ม มากที่สุด 8 ชนิดจากผักสลัดทั้งหมด 10 ชนิด ได้แก่ กรีนโอ๊ค กรีนคอส บัตเตอร์เฮด เบบี้คอส กรีนคอรัล เรดโอ๊ค เรดคอรัล และเรดคอส สำหรับน้ำหนักรสผลผลิตเมื่อเก็บเกี่ยวการให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1,200 ppm ส่งผลให้ผักสลัดมีน้ำหนักรสผลผลิตสูงสุด 5 ชนิด ได้แก่ บัตเตอร์เฮด กรีนคอรัล เรดโอ๊ค เรดคอสและแกรนแรพปิด การให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับ 1,200 ppm ส่งผลให้ผักสลัดมีน้ำหนักรสผลผลิตสูงสุด 6 ชนิด ได้แก่ บัตเตอร์เฮด เบบี้คอส เรดโอ๊ค เรดคอส เรดคอรัล และแกรนแรพปิด ดังนั้น ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์

ที่ระดับ 1,200 ppm จึงเป็นระดับปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ส่งผลให้ผักสลัดมีอัตราการเจริญเติบโตและคุณภาพที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นอื่น ๆ

กิตติกรรมประกาศ

การทดลองนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (Thailand Science Research and Innovation) แผนงานวิจัยและพัฒนาการผลิตพืชผักด้วยเทคโนโลยีเกษตรขั้นสูงเพื่อเพิ่มผลิตภาพ โครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพืชผักใน Plant factory artificial light: PFAL เพื่อพัฒนาเป็นการค้า รหัสโครงการ 4161520

เอกสารอ้างอิง

- Chen, D., Y. Mei, Q. Liu, Y. Wu and Z. Yang. 2021. Carbon dioxide enrichment promoted the growth, yield, and light-use efficiency of lettuce in a plant factory with artificial lighting. *Agron. J.* 113(6): 5196–5206. <https://doi.org/10.1002/agj2.20838>.
- Chowdhury, M., S. Kiraga, M.N. Islam, M. Ali, M.N. Reza, W.H. Lee and S.O. Chung. 2021. Effects of temperature, relative humidity, and carbon dioxide concentration on growth and glucosinolate content of kale grown in a plant factory. *Foods*. 10(7): 1524. <https://doi.org/10.3390/foods10071524>.
- Demmers-Derks, H., R.A.C. Mitchell, V.J. Mitchell and D.W. Lawlor. 1998. Response of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield and biochemical composition to elevated CO₂ and temperature at two nitrogen applications. *Plant Cell Environ.* 21(8): 829–836. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1998.00327.x>.
- Drennan, P.M. and P.S. Nobel. 2000. Responses of CAM species to increasing atmospheric CO₂ concentrations. *Plant Cell Environ.* 23(8): 767–781. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00588.x>.
- Fierro, A., A. Gosselin and N. Tremblay. 1994. Supplemental carbon dioxide and light improved tomato and pepper seedling growth and yield. *HortScience*. 29(3) 152–154. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.29.3.152>.
- Gruda, N. and J. Tanny. 2015. Protected crops – recent advances, innovative technologies and future challenges. *Acta Hortic.* 1107: 271–278. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1107.37>.
- Holley, J., N. Mattson, E. Ashenafi and M. Nyman. 2022. The impact of CO₂ enrichment on biomass, carotenoids, xanthophyll, and mineral content of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Horticulturae*. 8(9): 820. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8090820>.
- Kozai, T., G. Niu and M. Takagaki. 2020. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. 2nd edition. Academic Press, London, UK.
- Li, X., S. Kang, F. Li, X. Zhang, Z. Huo, R. Ding, L. Tong, T. Du and S. Li. 2017. Light supplement and carbon dioxide enrichment affect yield and quality of off-season pepper. *Agron. J.* 109(5): 2107–2118. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.01.0044>.
- Li, X., J. Zhao, M. Shang, H. Song, J. Zhang, X. Xu, S. Zheng, L. Hou, M. Li and G. Xing. 2020. Physiological and molecular basis of promoting leaf growth in strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.) by CO₂ enrichment. *Biotechnol. Biotechnol. Equip.* 34(1): 905–917. <https://doi.org/10.1080/13102818.2020.1811766>.

- Miyagi, A., H. Uchimiya and M. Kawai-Yamada. 2017. Synergistic effects of light quality, carbon dioxide and nutrients on metabolite compositions of head lettuce under artificial growth conditions mimicking a plant factory. *Food Chem.* 218: 561–568. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.102>.
- Mortensen, L.M. 1994. Effects of elevated CO₂ concentrations on growth and yield of eight vegetable species in a cool climate. *Sci. Hortic.* 58(3): 177–185. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(94\)90149-X](https://doi.org/10.1016/0304-4238(94)90149-X).
- Park, M.H. and Y.B. Lee. 2001. Effects of CO₂ concentration, light intensity and nutrient level on growth of leaf lettuce in a plant factory. *Acta Hortic.* 548(43): 377–384. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.548.43>.
- Park, Y.G., J.E. Park, S.J. Hwang and B.R. Jeong. 2012. Light source and CO₂ concentration affect growth and anthocyanin content of lettuce under controlled environment. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 53: 460–466. <https://doi.org/10.1007/s13580-012-0821-9>.
- Prior, S.A., G.B. Runion, H.H. Rogers, H.A. Torbert and D.W. Reeves. 2005. Elevated atmospheric CO₂ effects on biomass production and soil carbon in conventional and conservation cropping systems. *Glob. Chang. Biol.* 11(4): 657–665. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00935.x>.
- Richards, J.T., S.L. Edney, N.C. Yorio, G.W. Stutte, N. Cranston, R.M. Wheeler and G.D. Goins. 2004. Effects of lighting intensity and supplemental CO₂ on yield of potential salad crops for ISS. *In* Proc. the International Conference on Environmental Systems, July 19, 2004.
- Thongbai, P., T. Kozai and K. Ohyama. 2010. CO₂ and air circulation effects on photosynthesis and transpiration of tomato seedlings. *Sci. Hortic.* 126(3): 338–344. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.07.018>.