

**อิทธิพลของค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายธาตุอาหารต่อการเจริญเติบโต
และลักษณะทางสรีรวิทยาของพริก (*Capsicum frutescens* L.)
ภายใต้ระบบการปลูกแบบไฮโดรโปนิกส์**

**Effects of Electrical Conductivity of Nutrient Solution on Growth
and Physiology of Chili (*Capsicum frutescens* L.) in Hydroponics**

ณิยวรรณ ชุกลิ้น¹ , สุชาวดี โบช่วย¹ และอุไรวรรณ ทองแถมแก้ว^{1*}

Neeyawan Chooklin¹ , Suchawadee Bowchaay¹ and Uraiwan Tongkaemkaew^{1*}

¹ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง จังหวัดพัทลุง 93210

¹ Faculty of Agriculture, Thaksin University, Phatthalung Campus, Phatthalung Province , 93210

* Corresponding author: E-mail: uraiwan@tsu.ac.th, Tel : 074 - 609600 ต่อ 3000

Received: March 28, 2026;

Revised: April 22, 2026;

Accepted: April 23, 2026

อิทธิพลของค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายธาตุอาหารต่อการเจริญเติบโตและ ลักษณะทางสรีรวิทยาของพริก (*Capsicum frutescens* L.) ภายใต้ระบบการปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์

Effects of Electrical Conductivity of Nutrient Solution on Growth and Physiology of Chili (*Capsicum frutescens* L.) in Hydroponics

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของระดับค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC) ของสารละลายธาตุอาหารต่อการเจริญเติบโตและการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพริกขี้หนู (*Capsicum frutescens* L.) ภายใต้ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบน้ำนิ่ง (Deep Water Culture; DWC) โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ประกอบด้วย ค่า EC 4 ระดับ ได้แก่ 1.0, 2.0, 4.0 และ 6.0 mS/cm จำนวน 4 ซ้ำ เป็นระยะเวลา 7 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่า ระดับ EC มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช โดย EC 2.0 mS/cm ส่งผลให้จำนวนใบ พื้นที่ใบ และการสะสมชีวมวลสูงสุด ขณะที่ EC 1.0 mS/cm ให้การเจริญเติบโตในระดับปานกลาง ส่วน EC ที่สูง (4.0 และ 6.0 mS/cm) มีผลต่อการเจริญเติบโตลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ EC 6.0 mS/cm ซึ่งพืชตายภายในวันที่ 32 ในด้านสรีรวิทยา พบว่า EC 2.0 mS/cm ให้ค่าการสังเคราะห์แสง (P_n) การนำปากใบ (G_s) และอัตราการคายน้ำ (E) สูงที่สุด ขณะที่ EC 4.0 mS/cm มีค่าดัชนีคลอโรฟิลล์ (SPAD) สูงที่สุด แต่มีแนวโน้มจำกัดการใช้ CO_2 ภายในใบ (C_i) ซึ่งบ่งชี้ถึงข้อจำกัดเชิงเมแทบอลิซึมภายใต้ภาวะเครียด ส่วน EC 6.0 mS/cm มีแนวโน้มให้ค่าพารามิเตอร์ทางสรีรวิทยาลดลงอย่างชัดเจน รวมถึงปริมาณรงควัตถุสังเคราะห์แสง ทั้งนี้ระดับ EC ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตพริกขี้หนูในระบบไฮโดรโปนิคส์ ประมาณ 2.0 mS/cm โดยช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง การเจริญเติบโต และการสะสมชีวมวล ขณะที่ค่า EC ที่สูงเกินไปก่อให้เกิดความเครียดจากความเค็ม ส่งผลกระทบต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาและลดศักยภาพการผลิตของพืช

คำสำคัญ: พริกขี้หนู, การสังเคราะห์แสง, ไฮโดรโปนิคส์, สรีรวิทยาพืช

Abstract

This study aimed to evaluate the effects of nutrient solution electrical conductivity (EC) on the growth and physiological responses of Chai Buri White Chili (*Capsicum frutescens* L.) grown under a Deep Water Culture (DWC) hydroponic system. The experiment was arranged in a Completely Randomized Design with four EC levels (1.0, 2.0, 4.0, and 6.0 mS/cm), four replications, and conducted over a period of 7 weeks. The results showed that EC significantly influenced plant growth. The EC level of 2.0 mS/cm promoted the highest leaf number, leaf area, and biomass accumulation, while 1.0 mS/cm resulted in moderate growth. In contrast, higher EC levels (4.0 and 6.0 mS/cm) markedly reduced plant growth, with complete plant mortality observed at 6.0 mS/cm by day 32. In terms of physiological responses, plants grown at 2.0 mS/cm exhibited the highest net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), and transpiration rate (E). Meanwhile, plants at 4.0 mS/cm showed the highest SPAD chlorophyll index, along with an increase in intercellular CO₂ concentration (Ci), indicating metabolic limitations under stress. At 6.0 mS/cm, all physiological parameters, including photosynthetic pigments, were significantly reduced. In conclusion, the EC level of 2.0 mS/cm was the optimal value for hydroponic cultivation of Chai Buri White Chili, enhancing photosynthetic efficiency, plant growth, and biomass accumulation. In contrast, excessively high EC levels induced salinity stress, impairing physiological processes and reducing overall plant productivity.

Keywords: Chili, Photosynthesis, Hydroponics, Plant Physiology

บทนำ (Introduction)

การจัดการความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารเป็นปัจจัยสำคัญและท้าทายในการผลิตพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิกส์ (Ding et al., 2022) โดยค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC) ของสารละลายธาตุอาหารเป็นตัวบ่งชี้ความเข้มข้นของเกลือแร่และสถานะของธาตุอาหาร ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสัณฐานวิทยาของพืช บริเวณราก และส่งผลต่อการดูดซึมน้ำและธาตุอาหารของพืช ระดับ EC ที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยค่า EC ที่ต่ำเกินไป ($<2 \text{ dS m}^{-1}$) อาจก่อให้เกิดภาวะขาดธาตุอาหาร ในขณะที่ค่า EC ที่สูงเกินไป ($>3 \text{ dS m}^{-1}$) อาจลดความสามารถในการดูดซึมธาตุอาหาร เนื่องจากสัณฐานวิทยาของสารละลายลดลง (Hung et al., 2025) การศึกษาหลายงานรายงานว่าค่า EC มีอิทธิพลต่อทั้งพารามิเตอร์การเจริญเติบโตและกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืช โดยเฉพาะในพริก ซึ่งค่า EC ที่สูงเกินไปสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดภาวะเครียดจากเกลือ ส่งผลให้การสังเคราะห์แสงลดลง การทำงานของระบบรากด้อยประสิทธิภาพ และการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารลดลง (Bravo & Monge-Palma, 2023; Sulaiman et al., 2025) ขณะที่การควบคุมค่า EC ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมธาตุอาหาร และช่วยเพิ่มผลผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ (Lam et al., 2020) นอกจากนี้ การจัดการค่า EC อย่างเหมาะสมยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหาร และลดต้นทุนในระบบไฮโดรโปนิกส์ได้อีกด้วย (Frasetya et al., 2018)

ระบบไฮโดรโปนิกส์แบบน้ำลึก (Deep Water Culture; DWC) เป็นเทคนิคการเพาะปลูกที่มีประสิทธิภาพสูง โดยให้รากพืชแช่อยู่ในสารละลายธาตุอาหารโดยตรงและต่อเนื่อง (Hamza et al., 2022) ระบบดังกล่าวมีความโดดเด่นในด้านความสามารถในการรักษาระดับออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen; DO) ให้คงที่ผ่านกระบวนการเติมอากาศ ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการหายใจของรากและการดูดซึมธาตุอาหารแบบใช้พลังงาน (Active transport) (Fathidarehniyeh et al., 2023; Fitriyah et al., 2022) การใช้แผ่นวัสดุลอยน้ำในระบบ DWC ช่วยให้พืชสามารถเข้าถึงทั้งธาตุอาหารและออกซิเจนได้อย่างสม่ำเสมอ ส่งเสริมการพัฒนาของระบบรากและสัณฐานวิทยาของพืชให้มีความสมบูรณ์ (Nursyahid et al., 2021; Rajaseger, 2023) ด้วยลักษณะเด่นด้านการจัดการที่เรียบง่ายแต่ให้ผลผลิตสูง ระบบ DWC จึงเป็นโมเดลที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการศึกษาการตอบสนองของพืชต่อปัจจัยควบคุมต่างๆ โดยเฉพาะการวิเคราะห์ผลกระทบของความเข้มข้นธาตุอาหารต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาในเชิงลึก (Naseri et al., 2022)

พริกขี้หนูเป็นพริกพันธุ์ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในจังหวัดพัทลุง โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ชุ่มน้ำทะเลน้อย ซึ่งมีลักษณะเด่นด้านรสชาติเผ็ดร้อนและกลิ่นหอมเฉพาะตัว อย่างไรก็ตาม การผลิตพริกชนิดนี้มักเผชิญกับข้อจำกัดจากความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ เช่น น้ำท่วมขัง น้ำหนุ่น และการระบาดของโรคพืช ซึ่งส่งผลกระทบต่อทั้งปริมาณและคุณภาพผลผลิต การประยุกต์ใช้ระบบไฮโดรโปนิกส์ ซึ่งสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมและการจัดการธาตุอาหารได้อย่างแม่นยำ จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพริกขี้หนู แม้ว่าการศึกษาที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าระดับ EC ที่เหมาะสมสามารถส่งผลต่อผลผลิตและคุณภาพของพริกได้อย่างมีนัยสำคัญ (Aloui et al., 2017; Amalfitano et al., 2017) แต่ข้อมูลเกี่ยวกับการตอบสนองของพริกขี้หนูต่อระดับ EC ที่แตกต่างกันในระบบไฮโดรโปนิกส์ยังมีจำกัด โดยเฉพาะในด้านการตอบสนองทางสรีรวิทยาและการเจริญเติบโต นอกจากนี้ แม้ว่าค่า EC ที่สูงในบางระดับอาจช่วยกระตุ้นการสะสมสารประกอบทุติยภูมิ เช่น วิตามินซี สารฟีนอลิก ไกลโคปีน และแคปไซซินอยด์ ซึ่งมีความสำคัญต่อคุณภาพทางโภชนาการและคุณสมบัติทางเภสัชวิทยาของพริก (Preciado-Rangel et al., 2021) แต่ระดับ EC ที่สูงเกินไปอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษของธาตุอาหาร ลดอัตราการสังเคราะห์แสง และลดปริมาณน้ำในเนื้อเยื่อพืช ส่งผลให้ผลผลิตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Amalfitano et al., 2017) ดังนั้น การกำหนดช่วงค่า EC ที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มทั้งผลผลิตและคุณภาพของพริกภายใต้ระบบไฮโดรโปนิกส์ รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารและลดต้นทุนการผลิต การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของระดับค่าการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันต่อการตอบสนองทางสรีรวิทยาและการเจริญเติบโตของพริกขี้หนูเพื่อระบุระดับ EC ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตพริกขี้หนูในระบบไฮโดรโปนิกส์

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (Material and Methodology)

1. การวางแผนการทดลอง (Experimental Design)

การทดลองนี้วางแผนแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) โดยใช้พริกขี้หนูอายุ 21 วันหลังเพาะเมล็ดเป็นพืชทดลอง ทำการปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์แบบน้ำนิ่ง (Deep Water Culture; DWC) กำหนดสิ่งทดลองเป็นระดับค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC) ของสารละลายธาตุอาหารจำนวน 4 ระดับ โดยใช้สารละลายธาตุอาหารสูตรมาตรฐาน แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ สารละลายสูตร A ประกอบด้วย โมโนโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) และธาตุเหล็กในรูปคีเลต (Fe-EDTA) และสารละลายสูตร B ประกอบด้วย โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (KH_2PO_4) และธาตุอาหารรอง (micronutrients) ได้แก่ โบรอน (B) แมงกานีส (Mn) แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) และโมลิบดีนัม (Mo) และให้ค่า EC ต่างกัน คือ T1 (Control): EC 2.0 mS/cm, T2 (Low EC): EC 1.0 mS/cm, T3 (High EC): EC 4.0 mS/cm และ T4 (Very High EC): EC 6.0 mS/cm (เพื่อจำลองภาวะเครียดจากความเค็ม) แต่ละสิ่งทดลองมีจำนวน 4 ซ้ำ โดยกำหนดหน่วยทดลองเป็นภาชนะปลูก (กระถาง) จำนวน 1 ต้นต่อหน่วยทดลองรวมทั้งสิ้น 16 หน่วยทดลอง ให้ปุ๋ย A B ในสัปดาห์ที่ 3 หลังย้ายปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์แบบน้ำนิ่ง ควบคุมค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารให้อยู่ในช่วง 5.8–6.0 ตลอดการทดลอง โดยทำการตรวจสอบและปรับค่าทุกวัน พร้อมทั้งเติมสารละลายเพื่อรักษาระดับ EC ให้คงที่ตามที่กำหนดในแต่ละสิ่งทดลอง ระยะเวลาการทดลองดำเนินการเป็นเวลา 7 สัปดาห์

2. การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection)

2.1 ข้อมูลการเจริญเติบโต (Growth Parameters)

ทำการวัดทุก 7 วัน ได้แก่ ความสูงต้น (Plant height; cm) จำนวนใบ (Leaf number; ใบต่อต้น) พื้นที่ใบ (Leaf area; cm²) ด้วยเครื่อง Portable Leaf Area Meter รุ่น LI-3000 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองทำการบันทึกน้ำหนักสด (Fresh weight; g) และน้ำหนักแห้ง (Dry weight; g)

2.2 ข้อมูลทางสรีรวิทยา (Physiological Parameters)

ทำการวัดดัชนีคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll index) ด้วยเครื่อง SPAD-502Plus ในสัปดาห์ที่ 3-7 และวิธีการวัดความยาวคลื่น ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ในสัปดาห์ที่ 3 และ 7 และวัดการแลกเปลี่ยนก๊าซ (Gas exchange) ด้วยเครื่องวัดการสังเคราะห์แสง (รุ่น LI-COR portable photosynthesis system) โดยบันทึกค่าอัตราการสังเคราะห์แสงสุทธิ (Net photosynthetic rate; Pn) การนำของปากใบ (Stomatal conductance; gs) ความเข้มข้น CO_2 ภายในใบ (Intercellular concentration; Ci) และอัตราการคายน้ำ (Transpiration rate; E) ในสัปดาห์ที่ 3 และ 4

3. การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบ CRD และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสิ่งทดลองด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $p \leq 0.05$ โดยใช้โปรแกรม SAS Version 9 เพื่อวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลและอภิปราย (Results and Discussion)

1. การเจริญเติบโตของพริกขาวชัยบุรี

ความสูงของต้นพริกได้รับอิทธิพลจากระดับค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 1) ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 3 เป็นต้นไป ($p \leq 0.05$) ขณะที่ในช่วงก่อนการให้สิ่งทดลอง (สัปดาห์ที่ 1-2) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ns) ซึ่งสะท้อนว่าพืชมีสภาพเริ่มต้นใกล้เคียงกัน ภายหลังการให้สิ่งทดลองพบว่า พืชที่ได้รับค่า EC 1.0 mS/cm มีความสูงเพิ่มขึ้นมากที่สุดอย่างต่อเนื่อง โดยเพิ่มจาก 16.48 เซนติเมตรในสัปดาห์ที่ 3 เป็น 26.90 เซนติเมตรในสัปดาห์ที่ 7 ขณะที่พืชที่ได้รับ EC 2.0 mS/cm มีความสูงอยู่ในระดับปานกลางและเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในทางตรงกันข้าม ค่า EC ที่สูง (4.0 และ 6.0 mS/cm) ส่งผลให้ความสูงของต้นพริกลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ระดับ EC 6.0 mS/cm ซึ่งมีความสูงลดลงอย่างต่อเนื่องจนเหลือเพียง 5.56 เซนติเมตรในสัปดาห์ที่ 7

ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่า EC ที่สูงเกินไปก่อให้เกิดภาวะเครียดจากความเค็ม (salt stress) ซึ่งยับยั้งการยืดตัวของลำต้นและการเจริญเติบโตโดยรวมของพืช ในขณะที่ระดับ EC ที่เหมาะสมสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตด้านความสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ การลดลงของความสูงของต้นพริกภายใต้สภาวะ EC สูงสะท้อนถึงความเครียดทางสรีรวิทยาที่เกิดจากความเค็ม ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการขยายตัวและการแบ่งเซลล์ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตในแนวตั้ง (Furtado et al., 2017) นอกจากนี้ ความเข้มข้นของสารละลายที่สูงยังทำให้ศักย์ออสโมติกของสารละลายลดลง ส่งผลให้พืชไม่สามารถดูดน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เกิดภาวะขาดน้ำเชิงสรีรวิทยา (physiological drought) แม้มีน้ำเพียงพอในระบบ (Ding et al., 2022) ดังนั้น การควบคุมระดับ EC ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของพืชพริก โดยระดับ EC ที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมธาตุอาหารและลดความเสี่ยงจากภาวะเครียดจากความเค็ม ทั้งนี้ งานวิจัยก่อนหน้านี้ยังรายงานว่า ค่า EC ที่สูงกว่า 2.5 mS/cm อาจส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตและผลผลิตของพริก (Amalfitano et al., 2017)

Table 1. Effect of nutrient solution EC on plant height of Chai Buri White Chili (*C. frutescens* L.) grown in a hydroponic system over 7 weeks.

Treatment	Plant height (cm)						
	Before treatment		After treatment				
	Wk1	Wk2	Wk3	Wk4	Wk5	Wk6	Wk7
EC 1 mS/cm	16.48	16.48	16.48	20.69a	23.70a	25.59a	26.90a
EC 2 mS/cm	16.41	16.41	16.48	17.75b	16.41b	17.73b	17.81b
EC 4 mS/cm	16.3	16.3	16.4	16.69b	16.38b	13.88bc	13.88bc
EC 6 mS/cm	15.78	15.78	16.25	16.62b	11.69b	7.94c	5.56c
F-test	ns	ns	ns	**	**	**	**
CV (%)	12.43	12.43	12.13	11.35	32.83	39.01	38.49

Note: Values are presented as means of four replicates (n = 4). Means within the same column followed by different letters are significantly different at $p \leq 0.05$ according to the Least Significant Difference (LSD) test. ns = non-significant; ** indicates a significant difference at $p < 0.01$.

จำนวนใบของพริกได้รับอิทธิพลจากระดับค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 2) ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 3 เป็นต้นไป ($p \leq 0.05$) ขณะที่ในช่วงก่อนการให้สิ่งทดลอง (สัปดาห์ที่ 1-2) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ns) แสดงให้เห็นว่าพืชมีสภาพเริ่มต้นใกล้เคียงกัน ภายหลังการให้สิ่งทดลอง พบว่า พืชที่ได้รับค่า EC 2.0 mS/cm มีจำนวนใบสูงที่สุดอย่างต่อเนื่อง โดยเพิ่มขึ้นจาก 14.00 ใบในสัปดาห์ที่ 3 เป็น 26.63 ใบในสัปดาห์ที่ 7 ขณะที่พืชที่ได้รับ EC 1.0 mS/cm มีจำนวนใบอยู่ในระดับปานกลาง ในทางตรงกันข้าม ค่า EC ที่สูง (4.0 และ 6.0 mS/cm) ส่งผลให้จำนวนใบลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ EC 6.0 mS/cm ซึ่งจำนวนใบลดลงต่อเนื่องจนเหลือเพียง 2.00 ใบในสัปดาห์ที่ 7

ผลการทดลองสะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบเชิงลบของความเค็มต่อการสร้างใบใหม่และการพัฒนาทรงพุ่มของพืช ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ค่า EC ที่สูงเกินไปก่อให้เกิดภาวะเครียดจากความเค็ม (salinity stress) ซึ่งเป็นความเครียดแบบ abiotic ที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตโดยรวมของพืช รวมถึงการแตกใบและการพัฒนาทรงพุ่ม โดยความเค็มจะลดศักยภาพออสโมติกของสารละลาย ทำให้พืชดูดน้ำได้ยาก และส่งผลให้กระบวนการแบ่งเซลล์และการเจริญของเนื้อเยื่อใหม่ลดลง (Ding et al., 2022) นอกจากนี้ ระดับ EC ที่สูงยังสามารถยับยั้งการดูดซึมธาตุอาหารที่จำเป็น และก่อให้เกิดความไม่สมดุลของไอออนในพืช ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาหลายประการ (Hung et al., 2025) รวมทั้งอาจทำให้เกิดความเป็นพิษของไอออนในเนื้อเยื่อพืช ส่งผลให้การเจริญเติบโตชะลอลงและพัฒนาการโดยรวมถูกจำกัด (Kim et al., 2018) โดยเฉพาะค่า EC ในระดับสูง เช่น 4.0 และ 6.0 mS/cm มีผลลดการเจริญเติบโตของพืชพริกอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Rustikawati et al. (2023) ที่พบว่าพริกที่ปลูกภายใต้สภาวะความเค็มสูง (3000-6000 ppm NaCl) มีการเจริญเติบโตลดลงเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ดังนั้น ระดับ EC ที่เหมาะสม (ประมาณ 2.0 mS/cm) จึงมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการแตกใบและการพัฒนาทรงพุ่มของพืชพริก ขณะที่ค่า EC ที่สูงเกินไปส่งผลกระทบเชิงลบต่อการสร้างใบและการเจริญเติบโตโดยรวมของพืช

Table 2. Effect of nutrient solution EC on No. of leaf of Chai Buri White Chili (*C. frutescens* L.) grown in a hydroponic system over 7 weeks.

Treatment	No. of leaf (Leaf per tree)						
	Before treatment		After treatment				
	Wk1	Wk2	Wk3	Wk4	Wk5	Wk6	Wk7
EC 1 mS/cm	9.38	9.38	11.75b	12.63b	11.88b	14.00b	14.38b
EC 2 mS/cm	9.38	9.38	14.00a	18.63a	22.75a	25.25a	26.63a
EC 4 mS/cm	8.75	9.25	7.75c	7.63c	6.38c	4.75c	4.63c
EC 6 mS/cm	8.44	8.75	7.13c	7.25c	4.88c	3.13c	2.00c
F-test	ns	ns	**	**	**	**	**
CV (%)	20.56	14.81	16.28	23.97	31.46	34.83	36.87

Note: Values are presented as means of four replicates (n = 4). Means within the same column followed by different letters are significantly different at $p \leq 0.05$ according to the Least Significant Difference (LSD) test. ns = non-significant; ** indicates a significant difference at $p < 0.01$.

พื้นที่ใบของพริกมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามระดับค่า EC ของสารละลายธาตุอาหาร (Table 3) โดยในช่วงก่อนการให้สิ่งทดลอง (สัปดาห์ที่ 1-3) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ns) แสดงให้เห็นว่าพืชมีสภาพเริ่มต้นใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 4 เป็นต้นไป พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ภายหลังการให้สิ่งทดลอง พบว่า พืชที่ได้รับค่า EC 2.0 mS/cm มีพื้นที่ใบสูงที่สุดอย่างต่อเนื่อง โดยเพิ่มขึ้นจนถึง 50.86 cm² ในสัปดาห์ที่ 7 ขณะที่พืชที่ได้รับ EC 1.0 mS/cm มีพื้นที่ใบรองลงมา ในทางตรงกันข้าม ค่า EC ที่สูง (4.0 และ 6.0 mS/cm) ส่งผลให้พื้นที่ใบลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ EC 6.0 mS/cm ซึ่งมีพื้นที่ใบต่ำที่สุดเพียง 12.90 cm² ในสัปดาห์ที่ 7

ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า ค่า EC ที่สูงเกินไปมีผลยับยั้งการขยายตัวของใบ ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการลดลงของแรงดันเต่ง (turgor pressure) และข้อจำกัดในการขยายตัวของเซลล์ ขณะที่ค่า EC ในระดับที่เหมาะสมสามารถส่งเสริมการพัฒนาใบและเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการสังเคราะห์แสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไป ค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารสะท้อนถึงความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความพร้อมของธาตุอาหารในบริเวณราก (Lam et al., 2020) อย่างไรก็ตาม เมื่อค่า EC สูงเกินไป จะส่งผลให้ศักย์ออสโมติกของสารละลายลดลง ทำให้พืชดูดน้ำได้ยาก เกิดภาวะขาดน้ำเชิงสรีรวิทยา และจำกัดการดูดซึมธาตุอาหารที่จำเป็น (Kader et al., 2022) นอกจากนี้ การสะสมของไอออนในระดับสูงอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษในเนื้อเยื่อพืช ซึ่งรบกวนการทำงานของคลอโรพลาสต์และลดประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง (Kim et al., 2018) ส่งผลให้การเจริญเติบโตของใบลดลง ทั้งในด้านขนาดเซลล์และการขยายตัวของผิวใบ การลดลงของพื้นที่ใบจึงถือเป็นหนึ่งในการตอบสนองเบื้องต้นของพืชต่อความเครียดจากความเค็ม ซึ่งเกี่ยวข้องกับการลดลงของการแบ่งเซลล์และการยืดตัวของเซลล์ (Lopes et al., 2019) โดยสรุป ระดับ EC ที่เหมาะสม (ประมาณ 2.0 mS/cm) มีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการพัฒนาใบของพริก ขณะที่ค่า EC ที่สูงเกินไป ส่งผลกระทบเชิงลบต่อการขยายตัวของใบและศักยภาพในการสังเคราะห์แสงของพืช

Table 3. Effect of nutrient solution EC on leaf area of Chai Buri White Chili (*C. frutescens* L.) grown in a hydroponic system over 7 weeks.

Treatment	Leaf area (cm ²)						
	Before treatment		After treatment				
	Wk1	Wk2	Wk3	Wk4	Wk5	Wk6	Wk7
EC 1 mS/cm	23.86	24.61	23.82	25.05b	23.82b	24.32b	35.95b
EC 2 mS/cm	24.43	24.69	24.61	30.50a	48.80a	44.22a	50.86a
EC 4 mS/cm	23.04	23.59	23	24.72b	21.50b	21.53b	23.52bc
EC 6 mS/cm	23.02	21.81	21.7	22.45b	16.97b	12.48b	12.90c
F-test	ns	ns	ns	*	**	*	*
CV (%)	10.05	14.31	16.93	17.86	28.22	50.26	42.29

Note: Values are presented as means of four replicates (n = 4). Means within the same column followed by different letters are significantly different at $p \leq 0.05$ according to the Least Significant Difference (LSD) test. ns = non-significant; ** indicates a significant difference at $p < 0.01$.

นอกจากนั้นยังพบว่า ค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารมีอิทธิพลต่อการสะสมน้ำหนักรากและน้ำหนักแห้งของพริกอย่างชัดเจน (Table 4) โดยพืชที่ได้รับค่า EC 2.0 mS/cm ให้ค่าน้ำหนักรากและน้ำหนักแห้งสูงที่สุด เท่ากับ 462 และ 138.6 กรัม ตามลำดับ รองลงมาคือ EC 4.0 mS/cm ซึ่งมีน้ำหนักราก 443 กรัม และน้ำหนักแห้ง 132 กรัม ขณะที่ EC 1.0 mS/cm ให้ค่าน้ำหนักรากและน้ำหนักแห้งต่ำกว่า แสดงถึงข้อจำกัดด้านการได้รับธาตุอาหารที่ไม่เพียงพอ ในทางตรงกันข้าม พืชที่ได้รับ EC 6.0 mS/cm ไม่สามารถเจริญเติบโตจนเก็บเกี่ยวได้ โดยพบการตายของพืชตั้งแต่วันที่ 32 ของการทดลอง

ผลดังกล่าวสะท้อนถึงผลกระทบของความเค็มที่รุนแรงต่อการดำรงชีวิตและการสะสมชีวมวลของพืช โดยชี้ให้เห็นว่า ค่า EC ที่เหมาะสม (ประมาณ 2.0 mS/cm) ช่วยส่งเสริมการสะสมชีวมวลของพริกได้ดีที่สุด ทั้งในรูปของน้ำหนักรากและน้ำหนักแห้ง ซึ่งสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงและการใช้ประโยชน์ธาตุอาหาร ในขณะที่ค่า EC ที่ต่ำเกินไปจำกัดการเจริญเติบโตจากการขาดธาตุอาหาร และค่า EC ที่สูงเกินไปก่อให้เกิดความเครียดจากความเค็ม ส่งผลให้พืชไม่สามารถรักษาสมดุลน้ำและไอออนได้ ในเชิงสรีรวิทยา ความเค็มที่สูงส่งผลให้ศักย์ออสโมติกของสารละลายลดลง ทำให้พืชดูดน้ำได้ยาก เกิดภาวะขาดน้ำเชิงสรีรวิทยา (physiological drought) และลดการสะสมชีวมวล นอกจากนี้ การสะสมของไอออนในระดับสูงยังอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษและรบกวนกระบวนการเมแทบอลิซึม ส่งผลให้การเจริญเติบโตหยุดชะงักและนำไปสู่การตายในที่สุด ทั้งนี้ การควบคุมค่า EC ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเพิ่มผลผลิตและประสิทธิภาพการผลิตพริกในระบบไฮโดรโปนิคส์ โดยค่า EC ที่สูงเกินไปมีผลกระทบรุนแรงต่อการเจริญเติบโตจนถึงขั้นทำให้พืชตายในทางกลับกัน ค่า EC ที่ต่ำเกินไปก็สามารถส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตของพืชได้เช่นกัน เนื่องจากทำให้เกิดภาวะขาดธาตุอาหาร ซึ่งส่งผลให้ผลผลิตและคุณภาพลดลง (Lam et al., 2020) นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของค่า EC ในช่วงที่เหมาะสมสามารถส่งเสริมการสะสมของสารประกอบฟีนอลิกและสารต้านอนุมูลอิสระในพืชบางชนิดได้ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงกลไกการป้องกันตนเองของพืชต่อความเครียดจากสิ่งแวดล้อม และอาจเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ (Hung et al., 2025) การปรับระดับ EC จึงเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างสมดุลระหว่างการเจริญเติบโตของพืชกับการผลิตสารเมแทบอลิทุติยภูมิที่มีประโยชน์การศึกษาในพริกหวานยังพบว่าค่า EC ที่เหมาะสมสามารถส่งผลให้ความสูงของพืช เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น และน้ำหนักทั้งสดและแห้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Ding et al., 2022) ค่า EC ที่สูงหรือต่ำเกินไปล้วนส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโต เช่น ทำให้น้ำหนักรากและน้ำหนักแห้งลดลง พื้นที่ใบแคบลง และอัตราการสังเคราะห์แสงสุทธิลดลง (Sunaryo et al., 2021) สอดคล้องกับการศึกษาในพืชตระกูล Perilla ซึ่งชี้ให้เห็นว่า EC ที่สูงกว่า 3.0 dS/m สามารถส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของพืชได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ งานวิจัยบางส่วนยังชี้ให้เห็นว่าการจัดการค่า EC ที่แม่นยำสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมธาตุอาหารและลดการใช้ปุ๋ยเคมีได้อีกด้วย (Frasetya et al., 2018)

Table 4. Effect of nutrient solution EC on fresh, dry biomass and days to plant death of Chili (*C. frutescens* L.) grown in a hydroponic system at 7 weeks after transplanting.

Treatment	Fresh weight (g plant ⁻¹)	Dry weight (g plant ⁻¹)	Days to plant death
EC 1 mS/cm	330	99	-
EC 2 mS/cm	462	138.6	-
EC 4 mS/cm	443	132	-
EC 6 mS/cm	-	-	32

2. การตอบสนองทางสรีรวิทยาของพริกขาวชัยบุรี

2.1 อิทธิพลของระดับ EC ต่อการสะสมรงควัตถุในใบพริก

ปริมาณรงควัตถุสังเคราะห์แสงของพริกมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามระดับค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารอย่างชัดเจน (Figure 1) โดยพบว่า พืชที่ได้รับค่า EC 2.0 mS/cm มีปริมาณคลอโรฟิลล์ a คลอโรฟิลล์ b และแคโรทีนอยด์สูงที่สุดอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ EC 1.0 mS/cm ให้ค่ารงควัตถุในระดับปานกลาง สะท้อนถึงการได้รับธาตุอาหารที่ยังไม่เพียงพอต่อการสังเคราะห์รงควัตถุอย่างเต็มศักยภาพ ในทางตรงกันข้าม ค่า EC ที่สูง (4.0 และ 6.0 mS/cm) ส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ EC 6.0 mS/cm ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดในทุกชนิดของรงควัตถุ สะท้อนถึงผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายที่สูงเกินไปต่อระบบสังเคราะห์แสง

เมื่อพิจารณาเชิงรายละเอียด (Figure 1A และ 1C) พบว่า คลอโรฟิลล์ a และ b เพิ่มขึ้นจนถึงระดับ EC 2.0 mS/cm ก่อนจะลดลงเมื่อค่า EC สูงขึ้น ขณะที่แคโรทีนอยด์ (Figure 1D) มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยมีค่าสูงสุดที่ EC 2.0 mS/cm และลดลงอย่างชัดเจนที่ EC 6.0 mS/cm นอกจากนี้ อัตราส่วนคลอโรฟิลล์ a/b (Figure 1B) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ EC 4.0 mS/cm ซึ่งอาจสะท้อนถึงการปรับโครงสร้างของระบบสังเคราะห์แสงภายใต้ภาวะเครียด ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ค่า EC ที่สูงเกินไปก่อให้เกิดภาวะเครียดจากความเค็ม (salinity stress) ซึ่งส่งผลต่อความเสถียรของรงควัตถุและประสิทธิภาพของคลอโรพลาสต์ โดยความเครียดดังกล่าวสามารถกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา photooxidation และการสลายตัวของรงควัตถุสังเคราะห์แสง (Kentelky et al., 2022) รวมถึงกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ chlorophyllase ซึ่งเร่งการย่อยสลายคลอโรฟิลล์ ส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Veloso et al., 2021)

นอกจากนี้ ความเค็มยังส่งผลให้เกิดการสะสมของอนุมูลอิสระ (reactive oxygen species; ROS) ซึ่งทำลายโครงสร้างของคลอโรพลาสต์และโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสง ส่งผลให้พืชแสดงอาการใบเหลือง (chlorosis) และเนื้อเยื่อตาย (necrosis) (Abbas et al., 2025) โดยการลดลงของคลอโรฟิลล์ a และ b อาจเป็นกลไกการปรับตัวของพืชเพื่อลดความเสียหายจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Cho et al., 2018) ในด้านสรีรวิทยา ค่า EC ที่สูงยังลดศักยภาพออสโมติกของสารละลาย ส่งผลให้พืชดูดน้ำและธาตุอาหารได้ลดลง ซึ่งส่งผลทางอ้อมต่อการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์และการทำงานของระบบสังเคราะห์แสง (Kim et al., 2018) รวมถึงอาจลดอัตราการคายน้ำและการนำปากใบ ซึ่งเป็นกลไกที่พืชใช้เพื่อลดการสูญเสียน้ำภายใต้สภาวะเครียด (Pinheiro et al., 2019) การทดลองนี้จะเห็นได้ว่า ระดับ EC ที่เหมาะสม (ประมาณ 2.0 mS/cm) มีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการสะสมรงควัตถุสังเคราะห์แสงและประสิทธิภาพของระบบสังเคราะห์แสงในพืชพริก ขณะที่ค่า EC ที่สูงเกินไปส่งผลให้เกิดความเครียดจากความเค็ม ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสลายของรงควัตถุและลดศักยภาพการเจริญเติบโตของพืชในภาพรวม

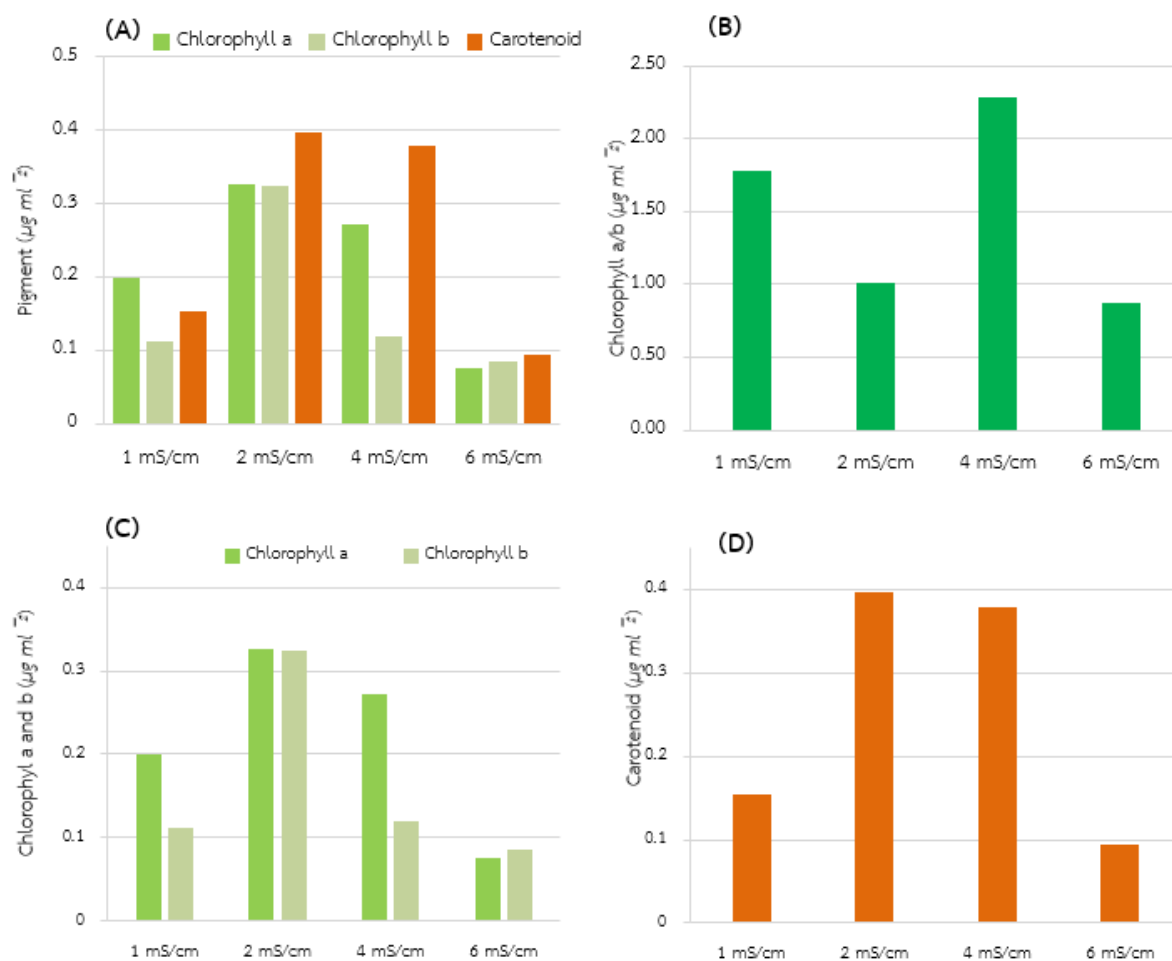


Figure 1. Effect of EC on photosynthetic pigments in Chai Buri White Chili (*C. frutescens* L.) leaves. (A) Pigment; (B) Chlorophyll a/b; (C) Chlorophyll a and b; and (D) Carotenoid.

ค่าดัชนีคลอโรฟิลล์ (SPAD value) ของใบพริกมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามระดับค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารและระยะเวลาการเจริญเติบโต (สัปดาห์ที่ 3-7) โดยพบว่า ค่า SPAD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุพืชในบางระดับ EC (Figure 2) พืชที่ได้รับค่า EC 4.0 mS/cm มีค่า SPAD สูงที่สุดอย่างต่อเนื่อง โดยเพิ่มจากประมาณ 46 ในสัปดาห์ที่ 3 เป็นประมาณ 69 ในสัปดาห์ที่ 7 รองลงมาคือ EC 2.0 mS/cm ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงสัปดาห์ที่ 5-7 สะท้อนถึงการสะสมคลอโรฟิลล์ที่เพิ่มขึ้นตามการพัฒนาใบ ในขณะที่ EC 1.0 mS/cm ให้ค่า SPAD อยู่ในระดับค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการทดลอง แสดงถึงข้อจำกัดในการสะสมคลอโรฟิลล์ ซึ่งอาจเกิดจากการได้รับธาตุอาหารไม่เพียงพอ ในทางตรงกันข้าม ค่า EC 6.0 mS/cm ส่งผลให้ค่า SPAD ต่ำที่สุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป สะท้อนถึงผลกระทบของความเครียดจากความเค็มที่ยับยั้งการสังเคราะห์และความเสถียรของคลอโรฟิลล์

ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า ระดับ EC ในช่วงที่เหมาะสมจนถึงค่อนข้างสูง (2.0–4.0 mS/cm) มีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการสะสมคลอโรฟิลล์ในใบพริกขาวชัยบุรี อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าแม้ที่ระดับ EC 4.0 mS/cm จะปรากฏค่า SPAD unit สูงที่สุด แต่ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนก๊าซและการเจริญเติบโตกลับมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับระดับ EC 2.0 mS/cm ปรากฏการณ์นี้สะท้อนให้เห็นว่าค่า SPAD ที่สูงขึ้นไม่ได้บ่งชี้ถึงศักยภาพในการสังเคราะห์แสงสุทธิ (Net photosynthesis) ที่ดีที่สุดเสมอไป แต่อาจเป็นผลจาก Chlorophyll Concentration Effect ในเชิงสรีรวิทยา เมื่อพืชได้รับสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นสูงเกินขีดจำกัด (EC 4.0 mS/cm) จะเกิดสภาวะเครียดออสโมติก (Osmotic stress) ที่ยับยั้งการขยายตัวของเซลล์ใบ (Cell expansion) ส่งผลให้ใบมีขนาดเล็กลงแต่มีความหนาของเนื้อเยื่อเพิ่มขึ้น (Leaf thickness) ความหนาแน่น

ของคลอโรฟิลล์ต่อหน่วยพื้นที่จึงเพิ่มสูงขึ้นในเชิงทัศนศาสตร์ ซึ่งสะท้อนออกมาเป็นค่า SPAD ที่สูง (Kentelky et al., 2022) ทว่าในขณะเดียวกัน สภาวะเครียดดังกล่าวกระตุ้นให้พืชปิดปากใบเพื่อรักษาความเต่ง และลดการสูญเสียน้ำ ส่งผลให้ค่าการนำก๊าซผ่านปากใบ (Stomatal conductance; g_s) ลดลง ซึ่งกลายเป็นปัจจัยจำกัด (Limiting factor) ที่ขัดขวางการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง แม้จะมีปริมาณโรงวัดสูงก็ตาม (Abbas et al., 2025; Kim et al., 2018)

สำหรับประเด็นด้านชีวมวล พบว่าน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง (Fresh and Dry weight) ของพริกที่ระดับ EC 4.0 mS/cm ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับระดับ EC 2.0 mS/cm แม้พารามิเตอร์ทางสรีรวิทยาบางส่วนจะเริ่มด้อยประสิทธิภาพลง ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยกลไก การปรับตัวทางออสโมติก (Osmotic Adjustment) โดยพืชที่เผชิญกับสภาวะความเค็มจาก EC ที่สูงจะมีการสะสมไอออนธาตุอาหาร (Inorganic ions) และสารอินทรีย์ที่ช่วยรักษาสมดุลออสโมติก (Compatible solutes) เช่น โปรลีน หรือน้ำตาล ไว้ในแวคิวโอล เพื่อรักษาแรงดันเต่ง (Turgor pressure) ให้เซลล์ยังคงขยายตัวได้ชั่วคราว (Bravo & Monge-Palma, 2023) การสะสมสารเหล่านี้ประกอบกับโครงสร้างเนื้อเยื่อที่หนาแน่นขึ้น (Increased tissue density) เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ชีวมวลโดยรวมยังไม่ลดลงอย่างเด่นชัดในระยะสั้น

อย่างไรก็ตาม การรักษาระดับชีวมวลภายใต้ EC สูงนี้มีต้นทุนทางเมแทบอลิซึม (Metabolic cost) ที่สูงกว่าปกติ เนื่องจากการที่พืชต้องแบ่งพลังงานจากการสังเคราะห์แสงไปใช้ในการปรับสมดุลออสโมติก และการกำจัดไอออนส่วนเกิน แทนที่จะนำไปใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อใหม่หรือการเจริญพันธุ์ (Jo et al., 2022; Sunaryo et al., 2021) ดังนั้น การควบคุมระดับ EC ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Optimal range) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อพริกขาวชัยบุรี เพื่อให้พืชสามารถรักษาคุณภาพระหว่างการสังเคราะห์แสงและการใช้พลังงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจะนำไปสู่เสถียรภาพของผลผลิตในระบบไฮโดรโปนิกส์อย่างยั่งยืน

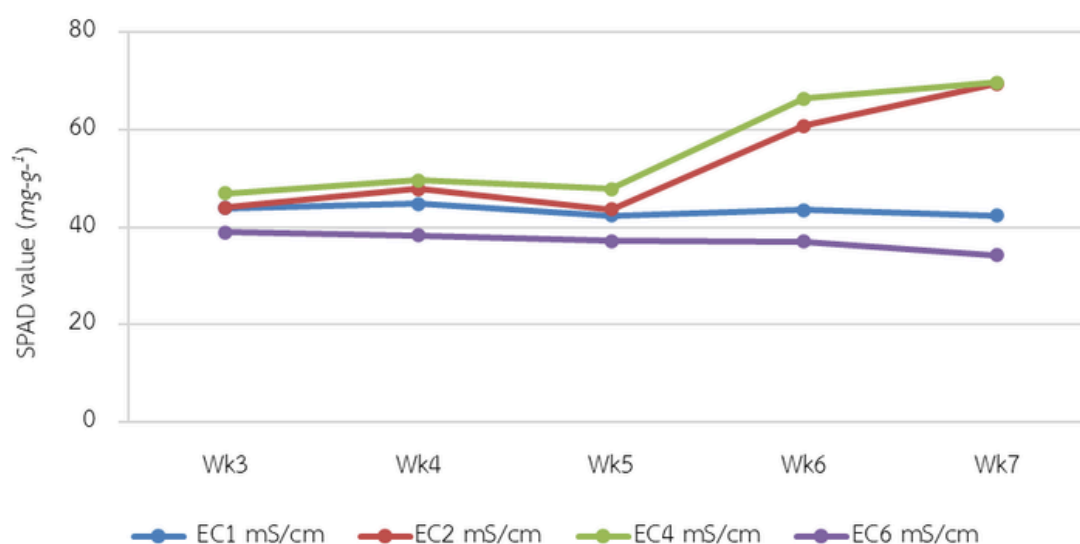


Figure 2. Effect of EC on SPAD chlorophyll index in Chai Buri White Chili (*C. frutescens* L.) leaves over time.

2.2 อิทธิพลของระดับ EC ต่อศักยภาพการสังเคราะห์แสงของพริกขาวชัยบุรี

ระดับค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อพารามิเตอร์การแลกเปลี่ยนก๊าซของพืชพริก ได้แก่ อัตราการสังเคราะห์แสง (P_n ; Figure 3A) ความเข้มข้นของ CO_2 ภายในใบ (C_i ; Figure 3B) การนำปากใบ (G_s ; Figure 3C) และอัตราการคายน้ำ (E ; Figure 3D) โดยเปรียบเทียบระหว่างสัปดาห์ที่ 3 และ 7 ผลการทดลองพบว่า พืชที่ได้รับค่า EC 2.0 mS/cm มีค่าอัตราการสังเคราะห์แสง (P_n) สูงที่สุดทั้งสองช่วงเวลา และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะการเจริญเติบโต ขณะที่ EC 1.0 และ 6.0 mS/cm ให้ค่า P_n ต่ำกว่าสะท้อนถึงสภาวะการได้รับธาตุอาหารที่ไม่เหมาะสม ในขณะที่ความเข้มข้น CO_2 ภายในใบ (C_i) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับ EC โดยเฉพาะที่ EC 4.0 mS/cm ซึ่งมีค่าสูงที่สุด บ่งชี้ถึงข้อจำกัดในการใช้ CO_2 ในกระบวนการสังเคราะห์แสง (non-stomatal limitation) ภายใต้ภาวะเครียด การนำปากใบ (G_s) และอัตราการคายน้ำ (E) มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่า P_n โดยพบว่าสูงสุดที่ EC 2.0 mS/cm และลดลงอย่างชัดเจนที่ EC 6.0 mS/cm โดยเฉพาะในสัปดาห์ที่ 7 ซึ่งสะท้อนถึงการปิดปากใบเพื่อลดการสูญเสียน้ำภายใต้ภาวะเครียดจากความเค็ม

ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ค่า EC ที่เหมาะสม (ประมาณ 2.0 mS/cm) ช่วยส่งเสริมทั้งการเปิดปากใบ การแลกเปลี่ยนก๊าซ และประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของพืชพริก ขณะที่ค่า EC ที่ต่ำหรือสูงเกินไปส่งผลกระทบบ้างต่อกระบวนการเหล่านี้ ในเชิงกลไก ค่า EC ที่สูงเกินไปเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ส่งผลให้ศักย์ออสโมติกลดลงและรบกวนการดูดซึมน้ำและธาตุอาหารของพืช (Kentelky et al., 2022) นำไปสู่ภาวะเครียดจากความเค็มทั้งในระดับออสโมติกและไอออนิก (Sawamura et al., 2021) ซึ่งกระตุ้นการปิดปากใบเพื่อลดการคายน้ำ (Bravo & Monge-Palma, 2023) นอกจากนี้ ภาวะดังกล่าวยังเกี่ยวข้องกับการส่งสัญญาณฮอร์โมน เช่น กรดแอบไซซิก (ABA) จากรากไปยังใบ ซึ่งกระตุ้นการปิดปากใบและลดการนำ CO_2 เข้าสู่ใบ ส่งผลให้การสังเคราะห์แสงลดลง (Kim et al., 2018) แม้ว่าการปิดปากใบจะช่วยรักษาสมดุลน้ำ แต่ก็จำกัดการตรึงคาร์บอนและลดประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงโดยรวม (Hung et al., 2025) การเพิ่มขึ้นของ C_i ภายใต้ EC สูงยังสะท้อนว่าข้อจำกัดไม่ได้เกิดจากการแพร่ CO_2 ผ่านปากใบเพียงอย่างเดียว แต่รวมถึงความเสียหายของระบบสังเคราะห์แสงภายในคลอโรพลาสต์ ซึ่งลดความสามารถในการใช้ CO_2 (Preciado-Rangel et al., 2021) โดยรวมแล้ว ค่า EC ที่สูงเกินไปยังมีรายงานว่าส่งผลกระทบบ้างต่อผลผลิตพืช เช่น การลดจำนวนและน้ำหนักผลในพริก (Amalfitano et al., 2017) รวมถึงรบกวนสมดุลของไอออนและการทำงานของระบบราก (Lam et al., 2020) ดังนั้น การควบคุมค่า EC ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาสมดุลของการแลกเปลี่ยนก๊าซและเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชพริก

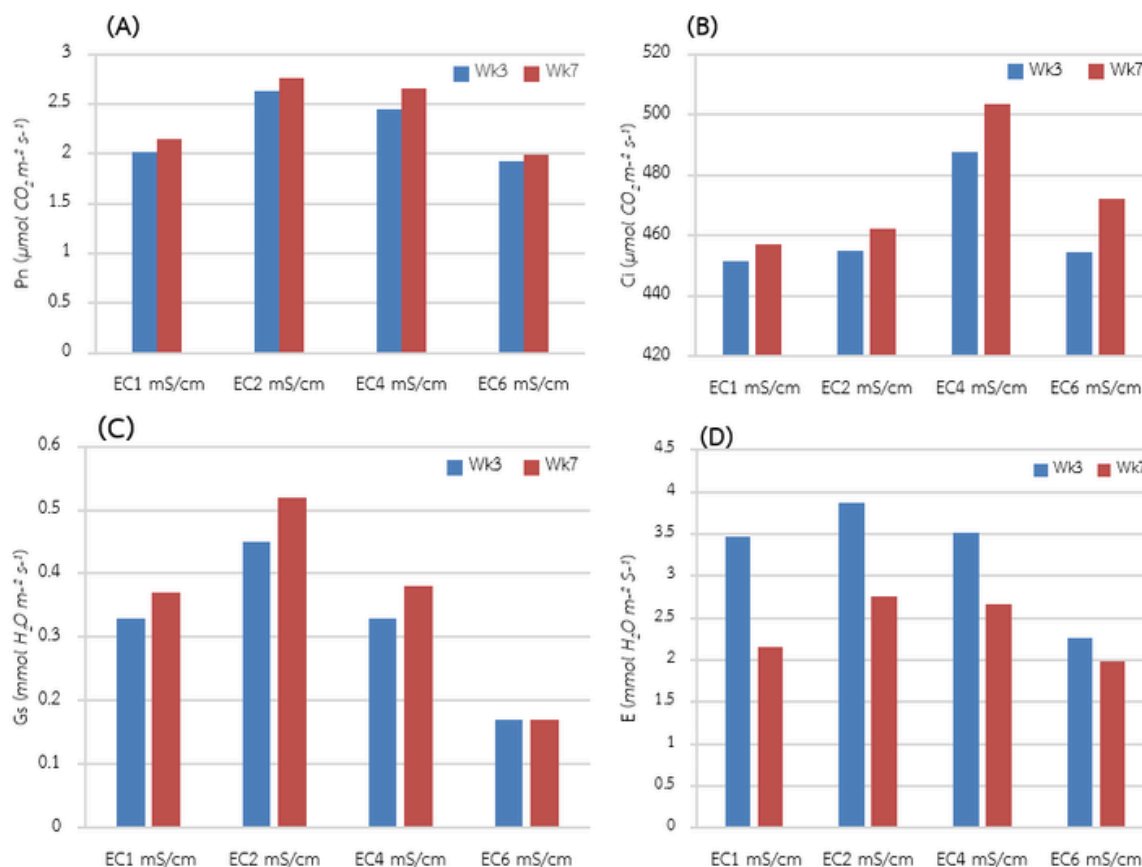


Figure 3. Effect of EC on gas exchange parameters in Chai Buri White Chili (*C. frutescens* L.) plants at different growth stages. (A) Net photosynthetic rate; Pn, (B) Intercellular concentration; Ci, (C) Stomatal conductance; gs, and (D) Transpiration rate; E.

สรุปผล (Conclusion)

ระดับค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดทั้งการเจริญเติบโตและการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพริกขาวชัยบุรีในระบบไฮโดรโปนิกส์ โดยค่า EC ที่เหมาะสม (ประมาณ 2.0 mS/cm) สามารถส่งเสริมการแตกใบ การขยายพื้นที่ใบ การสะสมชีวมวล รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงและการแลกเปลี่ยนก๊าซได้ดีที่สุด ในขณะที่ค่า EC ที่ต่ำเกินไปส่งผลให้พืชขาดธาตุอาหารและจำกัดการเจริญเติบโต ส่วนค่า EC ที่สูงเกินไปก่อให้เกิดความเครียดจากความเค็ม ส่งผลต่อสมดุลน้ำ การทำงานของปากใบ การสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ และประสิทธิภาพของระบบสังเคราะห์แสง จนนำไปสู่การลดลงของการเจริญเติบโตและการตายของพืชในที่สุด

ดังนั้น การจัดการค่า EC ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจึงเป็นกลยุทธ์สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพริกในระบบไฮโดรโปนิกส์ ทั้งในด้านผลผลิต คุณภาพ และการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นเป็นส่วนหนึ่งของโครงการยกระดับพริกขาวชัยบุรี: พืชคู่เคียงคนจน และได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านพัฒนาระดับพื้นที่ (บพท.) ประจำปีงบประมาณ 2568 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยงาน บพท. ที่สนับสนุนทุนวิจัย และผู้มีส่วนร่วมที่ให้การสนับสนุนและข้อมูลอันมีค่าในการดำเนินโครงการนี้

เอกสารอ้างอิง (Reference)

- Abbas, F., Khan, F. U., Al-Naemi, S., Al-Otoom, A., & Aljarrah, M. (2025). Assessing growth, physiological, and yield responses of eggplant (*Solanum melongena* L.) to salinity stress in controlled and field environments. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-19357-0>
- Aloui, H., Aymen, E. M., & Hannachi, C. (2017). Seed Priming to Improve Seedling Growth of Pepper Cultivars Exposed to Salt Concentrations. *International Journal of Vegetable Science*, 23(6), 489. <https://doi.org/10.1080/19315260.2017.1326996>
- Amalfitano, C., Vacchio, L. D., Somma, S., Cuciniello, A., & Caruso, G. (2017). Effects of cultural cycle and nutrient solution electrical conductivity on plant growth, yield and fruit quality of “Friariello” pepper grown in hydroponics. *Horticultural Science*, 44(2), 91. <https://doi.org/10.17221/172/2015-hortsci>
- Bravo, F. S., & Monge-Palma, J. I. (2023). Comportamiento morfofisiológico y productivo de chile dulce hidropónico en invernadero con diferentes estrategias de manejo del fertiriego. *Agronomía Costarricense*. <https://doi.org/10.15517/rac.v47i1.53948>
- Cho, Y.-Y., Cha, M.-K., Ku, Y. G., Kim, H. C., & Cho, J. H. B. (2018). Effect of different culture nutrient solution EC on carrot top growth and nutritional contents in a closed-type plant factory system. *Horticultural Science and Technology*, 36(1), 37. <https://doi.org/10.12972/kjhst.20180005>
- Ding, X., Zhang, H., Qian, T., He, L., Jin, H., Zhou, Q., & Yu, J. (2022). Nutrient concentrations induced abiotic stresses to sweet pepper seedlings in hydroponic culture. *Plants*, 11(8), 1098. <https://doi.org/10.3390/plants11081098>
- Fathidarehniyeh, E., Nadeem, M., Cheema, M., Thomas, R., Krishnapillai, M., & Galagedara, L. (2023). Current perspective on nutrient solution management strategies to improve the nutrient and water use efficiency in hydroponic systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 104(2), 88. <https://doi.org/10.1139/cjps-2023-0034>
- Fitriyah, H., Budi, A. S., Maulana, R., & Setiawan, E. (2022). Controlling the nutrition water level in the non-circulating hydroponics based on the top projected canopy area. *IJCCS (Indonesian Journal of Computing and Cybernetics Systems)*, 16(2), 181. <https://doi.org/10.22146/ijccs.70556>
- Frasetya, B., Taofik, A., & Firdaus, R. K. (2018). Evaluasi variasi nilai electrical conductivity terhadap pertumbuhan tanaman selada (*Lactuca sativa* L.) pada sistem hidroponik NFT. *Jurnal Agro*, 5(2), 95. <https://doi.org/10.15575/2966>
- Hamza, A., Abdelraouf, R. E., Helmy, Y., & El-Sawy, S. M. (2022). Using deep water culture as one of the important hydroponic systems for saving water, mineral fertilizers and improving the productivity of lettuce crop. *International Journal of Health Sciences*, 2311. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6ns9.12932>
- Hung, N. Q., Nga, N. T. T., & Lam, V. P. (2025). Effects of varying electrical conductivity levels on plant growth, yield, and photosynthetic parameters of Tochiotome strawberry (*Fragaria × ananassa* 'Tochiotome') in a greenhouse. *Australian Journal of Crop Science*, 19(4), 436. <https://doi.org/10.21475/ajcs.25.19.04.p322>
- Jo, N.-Y., Lee, J., Byeon, J.-E., Park, H., Ryoo, J.-W., & Hwang, S. (2022). Elevated CO₂ concentration induces changes in plant growth, transcriptome, and antioxidant activity in fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.). *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1067713>

- Kader, S., Spalević, V., & Dudić, B. (2022). Feasibility study for estimating optimal substrate parameters for sustainable green roof in Sri Lanka. *Environment Development and Sustainability*, 26(1), 2507. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02837-y>
- Kentelky, E., Székely-Varga, Z., Morar, I. M., & Cornea-Cipcigan, M. (2022). Morphological responses of viola accessions to nutrient solution application and electrical conductivity. *Plants*, 11(11), 1433. <https://doi.org/10.3390/plants11111433>
- Kim, S. J., Park, J. E., Bok, G. J., Kanth, B. K., Lam, V. P., & Park, J. S. (2018). High electrical conductivity of nutrient solution and application of methyl jasmonate promote phenylpropanoid production in hydroponically grown *Agastache rugosa*. *Horticultural Science and Technology*, 36(6), 841. <https://doi.org/10.12972/kjhst.20180082>
- Lam, V. P., Kim, S. J., & Park, J. S. (2020). Optimizing the electrical conductivity of a nutrient solution for plant growth and bioactive compounds of *Agastache rugosa* in a plant factory. *Agronomy*, 10(1), 76. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010076>
- Lopes, M. de F. de Q., Andrade, F. H. A. de, Silva, R. T. da, Lima, L. K. S., Bruno, R. de L. A., & Nogueira, A. L. S. P. da. (2019). Chilli tolerance (*Capsicum annuum* L.) submitted to different concentrations of NaCl- of irrigation water. *Idesia*, 37(3), 75. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292019000300075>
- Naseri, A., Alirezalu, A., Noruzi, P., & Alirezalu, K. (2022). The effect of different ammonium to nitrate ratios on antioxidant activity, morpho-physiological and phytochemical traits of Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica*). *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21338-6>
- Nursyahid, A., Setyawan, T. A., Sadiyah, K., Wardihani, E. D., Helmy, H., & Hasan, A. S. M. J. (2021). Analysis of Deep Water Culture (DWC) hydroponic nutrient solution level control systems. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 1108(1), 12032. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1108/1/012032>
- Pinheiro, F. W. A., Lima, G. S. de, Gheyi, H. R., Silva, S. S. da, Dias, A. S., Soares, L. A. dos A., Nobre, R. G., & Fernandes, P. D. (2019). NK combinations do not alleviate the effects of salt stress on gas exchange, photosynthetic pigments and growth of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Australian Journal of Crop Science*, 1353. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.08.p1774>
- Preciado-Rangel, P., Puente, E. O. R., Valdéz-Aguilar, L. A., Reyes-Pérez, J. J., Gallegos-Robles, M. Á., & Murillo-Amador, B. (2021). Electrical conductivity of nutrient solution and their effect on bioactive compounds and yield of bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(2). <https://doi.org/10.56369/tsaes.3375>
- Rajaseger, G. (2023). Hydroponics: current trends in sustainable crop production. *Bioinformation*, 19(9), 925. <https://doi.org/10.6026/97320630019925>
- Rustikawati, R., Herison, C., Sutrawati, M., & Umroh, D. (2023). Assessment of salinity tolerance on chili pepper genotypes. *E3S Web of Conferences*, 373, 3023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337303023>
- Sawamura, T., Kiriwa, Y., Miyako, T., Kano, A., & Suzuki, K. (2021). Effects of nutrient solution concentration, cultivars, and culture methods on leaf resistance of tomato plant. *Horticultural Research (Japan)*, 20(2), 179. <https://doi.org/10.2503/hrj.20.179>

- Sulaiman, H., Yusof, A. A., & Nor, M. K. M. (2025). Automated hydroponic nutrient dosing system: A scoping review of pH and electrical conductivity dosing frameworks. *AgriEngineering*, 7(2), 43. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7020043>
- Sunaryo, Y., Darini, M. T., Cahyani, V. R., & Purnomo, D. (2021). Potential liquid fertilizer made from goat feces to improve vegetable product. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99047>
- Veloso, L. L. de S. A., Lima, G. S. de, Silva, A. A. R. da, Souza, L. de P., Lacerda, C. N. de, Silva, I. J. da, Chaves, L. H. G., & Fernandes, P. D. (2021). Attenuation of salt stress on the physiology and production of bell peppers by treatment with salicylic acid. *Semina Ciências Agrárias*, 42(5), 2751. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n5p2751>