

อิทธิพลของความเค็มต่อการเติบโตและการตอบสนองทางชีวเคมีบางชนิดในไมโครกรีนผักชีหูด

เครือวัลย์ ทองเล่ม*, ปุชนีย์ กอบแก้ว และ จารุณี จุงกลาง

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

*อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: kreuawan.t@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

สิ่งแวดล้อมในการเพาะปลูกพืชมีผลต่อการเจริญและการสร้างสารพิษเคมีในพืช การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเค็มจากโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ต่อการเติบโตของไมโครกรีนผักชีหูด (*Raphanus sativus* var. *caudatus* Alef) และวิเคราะห์การตอบสนองทางชีวเคมีในไมโครกรีนผักชีหูดภายใต้ภาวะเครียดเค็มจาก NaCl โดยเพาะเมล็ดผักชีหูดบนสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 0, 10, 20 และ 50 มิลลิโมลาร์ ควบคุมปริมาณแสง และอุณหภูมิในแต่ละการทดลองให้ได้รับปริมาณเท่ากันเป็นเวลา 7 วัน ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ซ้ำละ 200 เมล็ด เปรียบเทียบการเติบโต โดยวัดความยาวลำต้น หาน้ำหนักสด หาน้ำหนักแห้ง ทำการสกัดตัวอย่างแห้งเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (TFC) ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และวิเคราะห์หาสารประกอบฟีนอลิกด้วย HPLC แล้ววิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วย one way ANOVA และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey HSD Post-hoc Test ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของ NaCl มีอิทธิพลต่อการเติบโตของต้นอ่อนผักชีหูดอย่างมีนัยสำคัญ โดยต้นอ่อนที่ได้รับ NaCl 10 มิลลิโมลาร์ มีความยาวลำต้นเฉลี่ย (9.62 ± 1.46 เซนติเมตร) และน้ำหนักสด (14.67 ± 0.62 กรัม) สูงที่สุด ในขณะที่ต้นอ่อนที่ได้รับ NaCl 50 มิลลิโมลาร์ มีการเติบโตต่ำที่สุด โดยที่มีน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกันระหว่างกลุ่มการทดลอง แสดงว่าความเค็มมีผลต่อปริมาณน้ำในเนื้อเยื่อมากกว่าการยับยั้งการสะสมมวลชีวภาพ สำหรับการวิเคราะห์สารชีวเคมีพบว่าต้นอ่อนที่ได้รับ NaCl 10 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณ TFC (9.00 ± 0.52 mg QE/g DW) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (63.33 ± 2.44 เปอร์เซ็นต์) สูงที่สุด ในขณะที่ TPC ของกลุ่ม 0 และ 10 มิลลิโมลาร์ ไม่แตกต่างกันและสูงกว่ากลุ่ม 50 มิลลิโมลาร์ การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกด้วย HPLC เปรียบเทียบกับสารมาตรฐานสารประกอบฟีนอลิกที่พบในพืชจำนวน 5 ชนิดคือ Chlorogenic acid, Caffeic acid, p-coumaric acid, Ferulic acid และ Quercetin พบว่า p-Coumaric acid มีปริมาณสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในกลุ่ม NaCl 50 มิลลิโมลาร์ (0.62 mg/g DW) สูงกว่าชุดควบคุมถึง 8.8 เท่า ในขณะที่ Caffeic acid มีปริมาณสูงสุดที่กลุ่ม NaCl 10 มิลลิโมลาร์ และ Quercetin ไม่ตอบสนองต่อความเค็ม ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นรูปแบบการตอบสนองแบบ Hormesis ซึ่งความเค็มระดับต่ำกระตุ้นการเติบโตและการสะสมสารต้านอนุมูลอิสระ ในขณะที่ความเค็มระดับสูงยับยั้งกระบวนการเหล่านี้ ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่า การใช้ NaCl ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ อาจเป็นแนวทางการเพาะปลูกที่มีประสิทธิภาพสำหรับการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและปริมาณสารพิษเคมีที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพในไมโครกรีนผักชีหูดได้

คำสำคัญ: ผักชีหูด, ไมโครกรีน, ภาวะเครียดจากความเค็ม, Hormesis, สารต้านอนุมูลอิสระ

Influence of Salinity Stress on Growth and Biochemical Responses in Thai Rat-tailed Radish Microgreens

Kreuawan Thonglem*, Puchanee Kobkaew and Jarunee Jungklang

Department of Biology, Faculty of Science, Chiang Mai University, Mueang, Chiang Mai 50200, Thailand

*Corresponding author's e-mail: kreuawan.t@cmu.ac.th

Abstract

Cultivation environment significantly influences plant growth and phytochemical biosynthesis. This study aimed to investigate the effects of sodium chloride (NaCl)-induced salinity on the growth of Thai rat-tailed radish (*Raphanus sativus* var. *caudatus* Alef.) microgreens and to evaluate their biochemical responses under salt stress. Seeds were germinated and cultivated on NaCl solutions at concentrations of 0, 10, 20, and 50 mM for 7 days under controlled environmental conditions, with identical light intensity and temperature maintained throughout the experiment. The experiment was conducted using three biological replicates, each consisting of 200 seeds. Growth performance was evaluated by measuring stem length, fresh weight, and dry weight. Dried samples were extracted to determine total phenolic content (TPC), total flavonoid content (TFC), and antioxidant activity using the DPPH radical scavenging assay. Individual phenolic compounds were identified and quantified by high-performance liquid chromatography (HPLC). Statistical differences among treatments were analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA), followed by Tukey's honestly significant difference (HSD) post hoc test.

The results demonstrated that NaCl concentration significantly affected the growth of Thai rat-tailed radish microgreens. Plants treated with 10 mM NaCl exhibited the greatest stem length (9.62 ± 1.46 cm) and fresh weight (14.67 ± 0.62 g), whereas those exposed to 50 mM NaCl showed the poorest growth performance. In contrast, no significant differences in dry weight were observed among treatments, indicating that salinity primarily influenced tissue water content rather than biomass accumulation. Biochemical analyses revealed that microgreens treated with 10 mM NaCl had the highest total flavonoid content (9.00 ± 0.52 mg QE g⁻¹ DW) and DPPH radical scavenging activity ($63.33 \pm 2.44\%$). Total phenolic content did not differ significantly between the 0 and 10 mM treatments but was significantly higher than that observed in the 50 mM treatment. HPLC analysis of five reference phenolic compounds, namely chlorogenic acid, caffeic acid, *p*-coumaric acid, ferulic acid, and quercetin, showed that *p*-coumaric acid accumulated significantly under 50 mM NaCl, reaching 0.62 mg g⁻¹ DW, representing an 8.8-fold increase compared with the control. In contrast, caffeic acid reached its highest concentration in the 10 mM NaCl treatment, whereas quercetin was not significantly affected by salinity. These findings demonstrate a hormetic response in Thai rat-tailed radish microgreens, in which mild salinity (10 mM NaCl) stimulates plant growth and enhances the accumulation of antioxidant metabolites, whereas severe salinity (50 mM NaCl) suppresses these physiological and biochemical processes. The results suggest that moderate NaCl treatment may represent an effective cultivation strategy for improving the nutritional quality and functional phytochemical content of rat-tailed radish microgreens.

Keywords: Thai Rat-tailed Radish, Microgreens, Salinity Stress, Hormesis, Antioxidant

บทนำ

ปัจจุบันความนิยมในการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ “ไมโครกรีน” (Microgreens) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในฐานะอาหารฟังก์ชัน (Functional food) ไมโครกรีน คือต้นกล้าขนาดเล็ก หรือต้นอ่อนที่เพาะจากเมล็ด ผัก สมุนไพรและเมล็ดพืชอื่นๆ ที่ได้รับการเก็บเกี่ยวหลังงอกภายในระยะเวลา 7 ถึง 21 วัน มีขนาดความสูงของลำต้นประมาณ 1 - 3 นิ้ว ประกอบด้วยลำต้นใบเลี้ยงและใบจริง 1 - 2 ใบ นิยมรับประทานส่วนที่อยู่เหนือดิน ต้นกล้าเหล่านี้มีคุณค่าทางอาหารสูงเป็นแหล่งของแร่ธาตุวิตามินและสารต้านอนุมูลอิสระเมื่อเปรียบเทียบกับผักชนิดเดียวกันที่มีการเจริญเติบโตเต็มที่ เมล็ดพันธุ์ที่นิยมนำมาผลิตเป็นไมโครกรีนส่วนใหญ่เป็นเมล็ดพันธุ์จากต่างประเทศ เช่น บร็อคโคลี่ กะหล่ำดอก กะหล่ำปลี แรดิช มิซูน่าและ โรโคล่า เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยที่เล็งเห็นศักยภาพของผักพื้นเมืองและสมุนไพรของไทย จำนวนมากที่มีคุณค่าทางอาหาร และสรรพคุณทางยา อีกทั้งมีรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะสามารถนำมาผลิตไมโครกรีนได้ เช่น ผักโขม โหระพา แมงลัก กระเพราและ ผักชีหูด เป็นต้น (พรชัย หาระโคตร และคณะ, 2563)

ผักชีหูด (*Raphanus sativus* var. *caudatus* Alef) เป็นผักพื้นบ้านของไทย ซึ่งเป็นผักพื้นเมืองทางภาคเหนือที่มีอัตราการเจริญเติบโตเร็วและมีรสชาติเผ็ดเฉพาะตัว มีงานวิจัยมากมายที่แสดงว่าผักชีหูดมีสารพฤกษเคมีที่มีความสำคัญและมีคุณประโยชน์ต่อสุขภาพ ตัวอย่างงานวิจัยของ Chularojmontri et al. (2022) ได้ทำการตรวจสอบฤทธิ์ของสารสกัดผักชีหูดต่อภาวะธำรงดุล (Homeostasis) ของไขมันและกลูโคสที่ผิดปกติในหนูไม่ซีที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดโรคอ้วนและภาวะดื้อต่ออินซูลินด้วยอาหารที่มีไขมันสูง ผลการศึกษาพบว่า ภาวะน้ำตาลในเลือดสูง (Hyperglycemia) ภาวะเลปตินในเลือดสูง (Hyperleptinemia) ภาวะอินซูลินในเลือดสูง (Hyperinsulinemia) และภาวะไขมันในเลือดสูง (Hyperlipidemia) มีปริมาณลดลงหลังจากได้รับสารสกัดผักชีหูด นอกจากนี้ การได้รับสารสกัดผักชีหูดยังช่วยพัฒนาความไวต่ออินซูลิน (Insulin sensitivity) และเพิ่มระดับแอดิพอนЕКติน (Adiponectin) ในซีรัม ขณะเดียวกันระดับคอเลสเตอรอลรวมและไตรกลีเซอไรด์ในตับก็ลดลงจากการได้รับสารสกัด และ Pocasap et al. (2023) ได้รายงานผลการศึกษาในหนูแรทที่มีภาวะมะเร็งตับในระยะเริ่มต้น พบว่าสารสกัด ผักชีหูด สามารถลดการแสดงออกที่มากเกินไปของกลุ่มเซลล์ ตับ ที่ขยายพันธุ์ผิดปกติและให้ผลบวกต่อโปรตีน GST-P (GST-P positive foci) รวมถึงลดเซลล์ที่เกิดการตายแบบอะพอพโทซิส (Apoptotic cells) ในหนูแรทที่ถูกฉีดสารก่อมะเร็ง ได้อย่างมีประสิทธิภาพในระหว่างการพัฒนา มะเร็งระยะเริ่มต้น ด้วยเหตุนี้ผักชีหูด จึงจัดเป็นพืชที่มีศักยภาพสูงในการนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ไมโครกรีนทางเลือกใหม่ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพ

ปัจจัยสิ่งแวดล้อม อาจเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดปริมาณสารพฤกษเคมีเหล่านี้ ดังเช่นมีรายงานการศึกษา “สภาวะเครียดเค็ม” (Salinity stress) จากเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สภาวะเครียดเค็มนี้ ส่งผลกระทบโดยตรงต่อพืช ทั้งในด้านการเกิดความเครียดออสโมติก (Osmotic stress) (Taiz et al., 2015) และการสะสมไอออนที่เป็นพิษ (Na^+ และ Cl^-) ภายในเซลล์ ซึ่งนำไปสู่การยับยั้งการเจริญเติบโตและการลดลงของประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสง ผ่านการสลายตัวของรงควัตถุหลัก เช่น คลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll a) คลอโรฟิลล์ บี (Chlorophyll b) และแคโรทีนอยด์ (Carotenoids) ในทางตรงกันข้าม กลไกการตอบสนองและปรับตัวของพืชต่อความเครียดจากความเค็มในระดับที่เหมาะสม มักจะกระตุ้นให้พืชสร้างและสะสมสารชีวเคมีบางชนิดเพิ่มขึ้นเพื่อเอาตัวรอด สารชีวเคมีเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants) เพื่อกำจัดอนุมูลอิสระออกซิเจนที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Reactive Oxygen Species: ROS) ที่เกิดขึ้นในเซลล์ การใช้ความเค็มในระดับที่เหมาะสมจึงเป็นการชักนำความเครียดที่มีการควบคุม (Elicitation) เพื่อกระตุ้นให้ไมโครกรีนผลิตสารชีวเคมีและสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงขึ้น อินทรีรา ขูดแก้ว และ เบญจมาศ พุ่มเกษม (2562) ทำการศึกษามูลของวิธีการให้สารและความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อการเติบโตและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในต้นอ่อนทานตะวัน พบว่าการแช่เมล็ดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 50 และ 100 มิลลิโมลาร์ ในระยะเวลาต่าง ๆ ทำให้น้ำหนักสดมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่กลับทำให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การฉีดพ่นสารละลายกลับมีศักยภาพเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้ จากงานวิจัยของ Islam et al. (2019) ทำการปลูกไมโครกรีนข้าวสาลีเป็นเวลา 8 วัน ในวัสดุปลูกอินทรีย์ โดยให้โซเดียมจากโซเดียมคลอไรด์ 5 ระดับ: 0 (ควบคุม), 12.5, 25, 50 และ 100 มิลลิโมลาร์ และควบคุมสภาพแวดล้อมในตู้ปลูกอย่างเข้มงวด คืออุณหภูมิ 20/15 °C (กลางวัน/กลางคืน), ช่วงแสง 14/10 ชั่วโมง (สว่าง/มืด) ความเข้มข้นแสง 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ จากหลอด LED แบบควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความเข้มข้น 12.5 มิลลิโมลาร์ เป็นระดับที่กระตุ้นสารสำคัญได้สูงสุดหลายชนิด ได้แก่ เบต้าแคโรทีน กรดฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และวิตามินซี รวมถึงฤทธิ์ยับยั้งไนไตรต์ ที่ความเข้มข้น 25 มิลลิโมลาร์ กลับเป็นระดับที่กระตุ้นแอนโทไซยานินและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระแบบ ABTS และ DPPH ได้สูงสุด แสดงว่าความเครียดเค็มระดับต่ำถึงปานกลาง (12.5 - 25 มิลลิโมลาร์) เป็น eustress ที่กระตุ้นให้พืชสร้างสารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น โดยไม่กระทบการเจริญเติบโตมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในพืชตระกูล Brassica ของ Plocek et al. (2023) แม้ว่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความเค็มในไมโครกรีนในพืชอื่นมาบ้างแล้ว แต่ข้อมูลเกี่ยวกับอิทธิพลของความเค็มต่อการตอบสนองทางชีวเคมีในไมโครกรีนของพืชพื้นบ้านไทย

อย่างผักชีหูดยังคงมีอยู่จำกัด ด้วยเหตุนี้ คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับต่างๆ ต่อการเติบโต และการตอบสนองทางชีวเคมีที่สำคัญในไมโครกรีนผักชีหูด องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะไม่เพียงแต่ช่วยให้เข้าใจกลไกทางสรีรวิทยาและการปรับตัวของไมโครกรีนผักชีหูดต่อความเค็มเท่านั้น แต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการจัดการสภาวะการเพาะปลูก เพื่อเพิ่มมูลค่าและยกระดับคุณค่าทางโภชนาการของไมโครกรีนผักชีหูดสู่การเป็นอาหารฟังก์ชันในเชิงพาณิชย์ต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ระดับต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของไมโครกรีนผักชีหูด
2. เพื่อวิเคราะห์การตอบสนองทางชีวเคมี ในไมโครกรีนผักชีหูดภายใต้ภาวะเครียดเค็มจาก NaCl

ระเบียบวิธีวิจัย

วางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ปักจัยในการศึกษาคือความเข้มข้นของ NaCl เตรียมโดยชั่ง NaCl ละลายในน้ำกลั่นเตรียมความเข้มข้น 4 ระดับคือ 0, 10, 20, และ 50 มิลลิโมลาร์ โดยแต่ละการทดลองทำ 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำใช้เมล็ดผักชีหูดจำนวน 200 เมล็ด

การเพาะต้นอ่อนผักชีหูด

นำเมล็ดผักชีหูด (บริษัทเจียไต๋) แช่น้ำกลั่น นาน 20 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเพาะ ในกล่องเพาะที่มีขนาด 16.7x10.5x5.5 เซนติเมตร โดยนำเมล็ดวางบนตะแกรงที่มีกระตาช่องรับ แล้ววางในกล่องเพาะที่บรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ จากนั้นนำถาดเพาะไปวางในชั้นที่ได้รับแสง ควบคุมความเข้มของแสง และอุณหภูมิให้ได้รับเท่ากันทุกหน่วยการทดลอง ให้แสงสว่างเป็นเวลา 12 ชั่วโมงต่อวัน ทำการเปลี่ยนสารละลายทุก 2 วัน

การวัดการเติบโต

เมื่อต้นอ่อนมีอายุ 7 วัน สุ่มต้นอ่อนจำนวน 20 ต้นจากแต่ละซ้ำ (3 ซ้ำ) ของแต่ละการทดลอง นำมาวัดขนาดความยาวลำต้น ($n = 60$) สุ่มต้นอ่อนจำนวน 50 ต้นชั่งน้ำหนักสด ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ Precisa รุ่น XT 120A ประเทศสวิตเซอร์แลนด์) แล้วนำไปอบเพื่อหาน้ำหนักแห้ง และเก็บต้นอ่อนทั้งหมดไปทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง จากนั้นเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20°C สำหรับการวิเคราะห์ทางชีวเคมีต่อไป

การสกัดตัวอย่าง

นำตัวอย่างแห้งที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20°C ไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นแล้วชั่งตัวอย่างแห้ง แช่ในตัวทำละลายสำหรับงานวิจัยนี้ซึ่งตัวทำละลาย 2 ชนิดคือ เมทานอล 100 เปอร์เซ็นต์ และ เอทานอล 80 เปอร์เซ็นต์ ในอัตราส่วนตัวอย่างต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1 ต่อ 10 นำไปเขย่า นาน 24 ชั่วโมง แล้วนำไป sonicate นาน 15 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง ที่ควบคุมความเย็น จากนั้นดูดสารละลายใสส่วนบนใส่หลอดทดลองเก็บไว้ ส่วนกากนำไปสกัดซ้ำอีก 1 รอบนำสารสกัดที่ได้มารวมกัน ปรับปริมาตร แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C

การวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content)

หาปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดโดยดัดแปลงจากวิธีการของ Singleton and Rossi (1965) ปีเปตสารสกัดที่สกัดด้วยเอทานอล 80 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ใส่ลงในหลุม 96 well plate เติมสารละลาย Folin-Coicalteu reagent เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ลงไป 100 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันทิ้งไว้ 8 นาที จากนั้นเติมโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 7.5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 80 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันอีกครั้ง แล้วจึงเก็บไว้ในที่มืด อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 765 นาโนเมตร ด้วย microplate reader (MRX A2000 ยี่ห้อ KLAB ประเทศเกาหลีใต้) โดยทำการวิเคราะห์สารสกัดแต่ละการทดลอง 3 ซ้ำ ($n = 3$) แล้วหาปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดโดยใช้กรดแกลลิกเป็นมาตรฐาน โดยความสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) ของกราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 0.9994 และรายงานในรูปมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (mg GAE/g DW)

การวิเคราะห์ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (Total Flavonoid content)

วิเคราะห์ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดอ้างอิงจาก Leakaya et al. (2018) ผสมสารละลายที่สกัดตัวอย่างด้วยเมทานอล 100 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร กับสารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์เข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร แล้วเก็บไว้ในที่มืด อุณหภูมิห้องนาน 10 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 415 นาโนเมตร ด้วย microplate reader (MRX A2000 ยี่ห้อ KLAB ประเทศเกาหลีใต้) โดยทำการวิเคราะห์สารสกัดแต่ละการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วหาปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดโดยใช้ Quercetin เป็นมาตรฐาน โดยความสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) ของกราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 0.9993 และรายงานในรูป มิลลิกรัมสมมูลของ Quercetin ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (mgQE/gDW)

การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)

การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ดัดแปลงจากวิธีของ Mun'im et al. (2003) โดยมีขั้นตอนดังนี้ นำสารสกัดที่มีความเข้มข้น 4.46 mg DW/ml ทำเจือจางสารสกัด โดยใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย ทำการวิเคราะห์หา DPPH radical scavenging activity โดยผสมอะซิเตทบัฟเฟอร์ 0.3 โมลาร์ pH 5.5 ปริมาตร 40 ไมโครลิตร สารสกัดปริมาตร 10 ไมโครลิตร และ DPPH เข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในเมทานอล เข้าด้วยกัน วางไว้ในที่มืด ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร ด้วย microplate reader (MRX A2000 ยี่ห้อ KLAB ประเทศเกาหลีใต้) โดยใช้น้ำกลั่นเป็นมาตรฐานทำปฏิกิริยาแทนสารสกัดทำการวิเคราะห์สารสกัดแต่ละการทดลอง 3 ซ้ำ

DPPH radical scavenging activity (เปอร์เซ็นต์) = $[(A_{std} - A_{sample})/A_{std}] \times 100$

เมื่อ A_{std} คือ ค่าดูดกลืนแสงที่วัดได้ของปฏิกิริยาของสารมาตรฐาน

A_{sample} คือ ค่าดูดกลืนแสงที่วัดได้ของปฏิกิริยาของสารสกัด

การวิเคราะห์หาสารประกอบฟีนอลิกด้วย HPLC

วิเคราะห์หาสารฟีนอลิกในสารสกัดด้วย Reverse phase High performance liquid chromatography (HPLC) ใช้เครื่อง HPLC Agilent 1260 infinity ii ร่วมกับตัวตรวจวัดแบบ Diode array detector รุ่น Agilent 1260 (แคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา) วิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร ด้วยคอลัมน์ Reverse phase ZORBAX SB C18 (ขนาด 4.6×150 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 ไมโครเมตร) โดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานฟีนอลิกที่มักพบในต้นอ่อนพืชจำนวน 5 ชนิดคือ Chlorogenic acid, Caffeic acid, p-coumaric acid, Ferulic acid และ Quercetin เฟสเคลื่อนที่ประกอบด้วยน้ำบริสุทธิ์ผสมกรดอะซิติก 1 เปอร์เซ็นต์ (ตัวทำละลาย A) และอะซิโตนไนโตรส (ตัวทำละลาย B) ที่อัตราการไหล 0.8 มิลลิตร/นาที โดยการใช้การชะแบบ Gradient elution ดังนี้ นาทีแรกตัวละลาย B ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ จนกระทั่งถึงนาทีที่ 5 ตัวละลาย B มีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ นาทีที่ 10 มีความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ นาทีที่ 20 มีเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ นาทีที่ 30 เข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ นาทีที่ 35 เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ นาทีที่ 38 เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ และนาทีที่ 40 ตัวทำละลาย B มีความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ โดยความสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) ของกราฟมาตรฐาน Chlorogenic acid และ p-coumaric acid เท่ากับ 0.9997 Caffeic acid และ Ferulic acid มีความสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) เท่ากับ 0.9998 และ Quercetin มีความสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) เท่ากับ 0.9961

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลทางสถิติ ด้วย one way ANOVA และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey HSD Post-hoc Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำเร็จรูป

ผลการวิจัย

ผลของความเค็มที่มีต่อการเติบโตของต้นอ่อนผักชีหูด

การเพาะเมล็ดผักชีหูดบนสารละลาย NaCl ที่มีความเข้มข้น 4 ระดับคือ 0, 10, 20, และ 50 มิลลิโมลาร์ นาน 7 วัน เมื่อนำไมโครกรีนผักชีหูดมาวัดการเติบโตพบว่าความเข้มข้นของ NaCl มีผลต่อความยาวของลำต้นและน้ำหนักสดของต้นอ่อนที่สอดคล้องกัน คือ กลุ่มที่ได้รับ NaCl 10 มิลลิโมลาร์ มีความยาวเฉลี่ย และน้ำหนักสดสูงที่สุด รองลงมาคือ 20 มิลลิโมลาร์, 0 มิลลิโมลาร์ และที่ NaCl

50 มิลลิโมลาร์ มีการเติบโตต่ำสุด ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในส่วนของน้ำหนักแห้ง พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มทดลอง (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ผลของ NaCl ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่มีต่อการเติบโตในต้นอ่อนผักชีหูด

ความเข้มข้น NaCl (มิลลิโมลาร์)	ความยาวลำต้น (เซนติเมตร)	น.น.สด/ต้นอ่อน 50 ต้น (กรัม)	น.น.แห้ง/ต้นอ่อน 50 ต้น (กรัม)
0	7.20 ± 1.14 ^c	10.11 ± 0.38 ^c	0.89 ± 0.07 ^a
10	9.62 ± 1.46 ^a	14.67 ± 0.62 ^a	0.82 ± 0.03 ^a
20	8.28 ± 1.31 ^b	13.17 ± 0.35 ^b	0.83 ± 0.01 ^a
50	2.89 ± 0.79 ^d	6.88 ^d ± 0.17 ^d	0.85 ± 0.06 ^a

หมายเหตุ: ข้อมูลที่แสดง มาจากค่าเฉลี่ยจาก 3 ซ้ำ ± SD วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น $p < 0.05$ และตัวอักษรที่กำกับแตกต่างกันในพารามิเตอร์เดียวกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey HSD Post-hoc Test

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH

ผลการวิเคราะห์ทางด้านชีวเคมีพบว่าความเข้มข้นของ NaCl มีผลต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) ของไมโครกรีนผักชีหูดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey's HSD พบว่า กลุ่ม NaCl 0 มิลลิโมลาร์ ไม่แตกต่างจากกลุ่ม 10 มิลลิโมลาร์ แต่มีค่า TPC สูงกว่ากลุ่ม 20 และ 50 มิลลิโมลาร์ อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ กลุ่ม NaCl 10 มิลลิโมลาร์ ไม่แตกต่างจากกลุ่ม 20 มิลลิโมลาร์ แต่มีค่า TPC สูงกว่ากลุ่ม 50 มิลลิโมลาร์ โดยกลุ่ม NaCl 50 มิลลิโมลาร์ มีค่า TPC ต่ำที่สุด (10.12 ± 0.40 mg GAE/g DW)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิก ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ

ความเข้มข้น NaCl (mM)	ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) mg GAE/g DW	ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (TFC) (mg QE/g DW)	DPPH radical scavenging activity (%)
0	14.34 ± 0.72 ^a	5.86 ± 0.43 ^b	55.13 ± 1.47 ^b
10	13.77 ± 0.30 ^{ab}	9.00 ± 0.52 ^a	63.33 ± 2.44 ^a
20	12.72 ± 0.17 ^b	6.27 ± 0.40 ^b	45.37 ± 3.25 ^c
50	10.12 ± 0.40 ^c	1.68 ± 0.26 ^c	35.49 ± 3.13 ^d

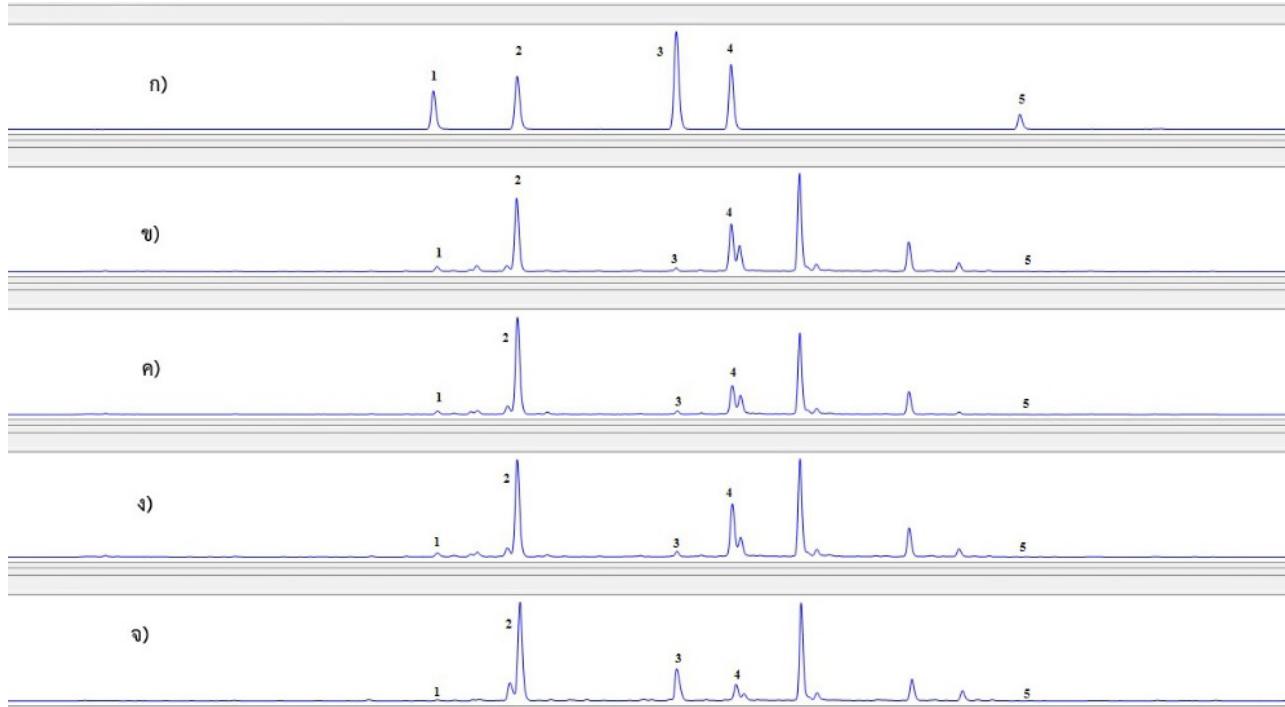
หมายเหตุ: ข้อมูลที่แสดง มาจากค่าเฉลี่ยจาก 3 ซ้ำ ± SD วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น $p < 0.05$ และตัวอักษรที่กำกับแตกต่างกันในพารามิเตอร์เดียวกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey HSD Post-hoc Test

สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดพบว่าไมโครกรีนผักชีหูดที่ได้รับ NaCl 10 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดสูงที่สุด แตกต่างจากทุกกลุ่ม ส่วนไมโครกรีนที่ได้รับ NaCl 20 มิลลิโมลาร์ และ 0 มิลลิโมลาร์ ไม่แตกต่างกัน โดยกลุ่ม NaCl 50 มิลลิโมลาร์ มี ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ต่ำสุด ในส่วนของความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH พบว่าแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกัน โดยไมโครกรีนผักชีหูดที่ได้รับ NaCl 10 มิลลิโมลาร์ ยังมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด รองลงมาคือ 0 มิลลิโมลาร์ (ชุดควบคุม) และ 20 มิลลิโมลาร์ โดย NaCl 50 มิลลิโมลาร์ มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระต่ำที่สุด (ตารางที่ 2)

ผลการวิเคราะห์หาสารประกอบฟีนอลิกด้วย HPLC

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สารสกัดจากไมโครกรีนผักชีหูดที่ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นระดับต่างๆกับสารมาตรฐานสารประกอบฟีนอลิกที่พบในต้นอ่อนพืชทั่วไปจำนวน 5 ชนิดคือ Chlorogenic acid, Caffeic acid, p-Coumaric acid, Ferulic acid และ Quercetin แสดงในภาพที่ 1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบสารฟีนอลิกจากสารสกัดไมโครกรีนผักชีหูด พบว่า Chlorogenic acid ในชุดควบคุมมีค่าสูงสุด มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเค็ม โดยกลุ่ม NaCl 50 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณ Chlorogenic

acid ต่ำสุด ในขณะที่ Caffeic acid มีปริมาณสูงสุดที่ความเข้มข้นของ NaCl 10 มิลลิโมลาร์ แล้วลดลงเมื่อ NaCl เพิ่มสูงขึ้น ส่วน p-Coumaric acid ในชุดควบคุมมีปริมาณต่ำสุด และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ NaCl พบว่าที่ NaCl 50 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณ p-Coumaric acid สูงสุด



ภาพที่ 1 แสดงโครมาโตแกรมจากการวิเคราะห์ด้วย HPLC ก) โครมาโตแกรมของสารมาตรฐาน 5 ชนิด คือ (1) Chlorogenic acid (2) Caffeic acid (3) p-coumaric acid (4) Ferulic acid และ (5) Quercetin ข) โครมาโตแกรมของสารสกัดจากต้นอ่อนผักชีหูดที่ได้รับ NaCl 0 มิลลิโมลาร์ ค) โครมาโตแกรมของสารสกัดจากต้นอ่อนที่ได้รับ NaCl 10 มิลลิโมลาร์ ง) โครมาโตแกรมของสารสกัดจากต้นอ่อนที่ได้รับ NaCl 20 มิลลิโมลาร์ จ) โครมาโตแกรมของสารสกัดจากต้นอ่อนที่ได้รับ NaCl 50 มิลลิโมลาร์

ผลการวิเคราะห์ Ferulic acid มีค่าคงที่ ที่ความเข้มข้น NaCl 0 และ 20 มิลลิโมลาร์ และลดลงเมื่อ NaCl 50 มิลลิโมลาร์ และพบว่าปริมาณของ Quercetin ที่วิเคราะห์ได้ไม่แตกต่างกันเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของ NaCl (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบสารฟีนอลิกในสารสกัดจากต้นอ่อนผักชีหูดที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น NaCl (mM)	Chlorogenic acid mg /g DW	Caffeic acid mg /g DW	p-coumaric acid mg /g DW	Ferulic acid mg /g DW	Quercetin mg /g DW
0	0.34 ± 0.03 ^a	2.56 ± 0.11 ^c	0.07 ± 0.007 ^c	1.39 ± 0.01 ^a	0.10 ± 0.001 ^a
10	0.23 ± 0.0 ^b	3.48 ± 0.07 ^a	0.08 ± 0.006 ^c	0.93 ± 0.009 ^b	0.08 ± 0.017 ^a
20	0.24 ± 0.01 ^b	2.93 ± 0.06 ^b	0.10 ± 0.003 ^b	1.39 ± 0.032 ^a	0.09 ± 0.001 ^a
50	0.11 ± 0.01 ^c	3.06 ± 0.02 ^b	0.62 ± 0.009 ^a	0.44 ± 0.002 ^c	0.08 ± 0.013 ^a

หมายเหตุ: ข้อมูลที่แสดง มาจากค่าเฉลี่ยจาก 3 ซ้ำ ± SD วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น $p < 0.05$ และตัวอักษรที่กำกับแตกต่างกันในพารามิเตอร์เดียวกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey HSD Post-hoc Test

อภิปรายผลการวิจัย

อิทธิพลของความเค็มต่อการเติบโต

ผลการทดลองพบว่า NaCl ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ส่งเสริมการเจริญเติบโตของไมโครกรีนผักชีหูดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงรูปแบบการตอบสนองแบบ Hormesis กล่าวคือความเค็มในระดับต่ำทำหน้าที่เป็น eustress กระตุ้นกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืช ปรากฏการณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Plocek et al. (2023) และงานวิจัยในพืชตระกูล Brassica พบว่าความเค็มระดับต่ำกระตุ้นให้เพิ่มการดูดน้ำเข้าสู่เซลล์และการแบ่งเซลล์ ส่งผลให้ลำต้นยืดยาวขึ้น การที่น้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกันระหว่างกลุ่มทดลองทั้งที่น้ำหนักสดและความยาวลำต้นแตกต่างกันอย่างชัดเจน บ่งชี้ว่าความเค็มมีผลหลัก ต่อสมดุลน้ำในเซลล์ (osmotic adjustment) มากกว่าการยับยั้งการสังเคราะห์สารอินทรีย์ กล่าวคือ NaCl สูงทำให้เซลล์สูญเสียน้ำ จากกลไก osmotic stress ทำให้ต้นอ่อนมีน้ำหนักสดลดลงแต่มวลแห้งยังคงเดิม ซึ่งสอดคล้องกับกลไกที่ Na^+ และ Cl^- สะสม ในเซลล์และรบกวนสมดุลออสโมติก (Taiz, 2015) ขณะที่การสังเคราะห์สารอินทรีย์ผ่านกระบวนการ carbon assimilation ยังคงดำเนินไปในระดับปกติ ในทางกลับกัน NaCl 50 มิลลิโมลาร์ ยับยั้งการเจริญเติบโตอย่างรุนแรงเนื่องจากการสะสมไอออนโซเดียม ในปริมาณสูงรบกวนการทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ ทำให้การสังเคราะห์แสงและการแบ่งเซลล์ลดลง ส่งผลให้ลำต้นสั้นและ น้ำหนักสดต่ำที่สุด

อิทธิพลของความเค็มต่อสารชีวเคมี

รูปแบบการตอบสนองของ TFC และ DPPH มีค่าสูงสุดในกลุ่ม NaCl 10 มิลลิโมลาร์ แล้วลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับแนวคิด Hormesis และการตอบสนองของ Phenylpropanoid pathway ต่อความเครียดในระดับต่ำในสภาวะที่มีความเค็มระดับต่ำ พืชกระตุ้นการสังเคราะห์ flavonoids ผ่านการกระตุ้นเอนไซม์ PAL (Phenylalanine Ammonia-Lyase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ควบคุมหลักของ Phenylpropanoid pathway (Dong & Lin, 2021, Sharma et al., 2019) สารเหล่านี้ ทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidants) กำจัด ROS ที่เกิดจากความเค็ม การที่ TPC ของกลุ่ม NaCl 0 และ 10 มิลลิโมลาร์ ไม่แตกต่างกัน แต่ TFC ของกลุ่ม NaCl 10 มิลลิโมลาร์ สูงกว่าชัดเจน แสดงว่า NaCl 10 มิลลิโมลาร์ กระตุ้นการสังเคราะห์ฟลาโวนอยด์เป็นหลัก โดยไม่ได้เพิ่มฟีนอลิกทุกชนิด ซึ่งสอดคล้องกับผล HPLC ที่พบว่า Caffeic acid เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญถึง 8.8 เท่า ในกลุ่มที่ได้รับ NaCl 50 มิลลิโมลาร์ โดย p-Coumaric acid เป็น intermediate สำคัญในเส้นทาง Phenylpropanoid pathway ที่เชื่อมต่อไปสู่การสังเคราะห์ Lignin ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของ Cell Wall Reinforcement กลไกนี้อาจเป็นการตอบสนองของพืชเพื่อเสริมความแข็งแรง ของผนังเซลล์และลดการซึมผ่านของ Na^+ เข้าสู่เซลล์ในสภาวะที่มีความเค็มสูง การที่ Quercetin ไม่แสดงความแตกต่างระหว่าง กลุ่มทดลองอาจเนื่องจากพืชเป็นระยะต้นอ่อน (microgreen) ซึ่งอยู่ในระยะการพัฒนาริเริ่มต้น การสะสม Quercetin อาจเกิดขึ้น ในระยะที่พืชเจริญเติบโตเต็มที่มากกว่า ซึ่งเป็นประเด็นที่ควรศึกษาต่อไป สำหรับต้นอ่อนในกลุ่ม NaCl 50 มิลลิโมลาร์ ที่มีค่า TPC และ TFC ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อาจสะท้อนถึงความเสียหายของเซลล์ในระดับรุนแรงทำให้กลไกการสังเคราะห์ secondary metabolites ถูกยับยั้ง ในขณะที่ p-Coumaric acid ยังคงเพิ่มขึ้นแสดงว่าพืชยังคงพยายามกระตุ้น cell wall reinforcement แม้ในสภาวะที่ได้รับ stress รุนแรง

สรุปผลการวิจัย

NaCl 10 มิลลิโมลาร์ ส่งเสริมการเติบโตของต้นอ่อนผักชีหูด โดยมีความยาวลำต้นเฉลี่ย 9.62 ± 1.46 เซนติเมตร และน้ำหนักสด 14.67 ± 0.62 กรัม ส่วน NaCl 50 มิลลิโมลาร์ ยับยั้งการเติบโตเมื่อเทียบกับชุดควบคุม โดยมีความยาวลำต้นเฉลี่ยเพียง 2.89 ± 0.79 เซนติเมตร และน้ำหนักสด 6.88 ± 0.17 กรัม ต่ำที่สุดในทุกกลุ่ม ส่วนน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกันระหว่างทุกกลุ่มทดลอง

ไมโครกรีนผักชีหูดชุดควบคุม มีปริมาณ TPC สูงสุดซึ่งไม่ต่างกับ กลุ่ม NaCl 10 มิลลิโมลาร์ และ TFC ในกลุ่มนี้สูงที่สุด (9.00 ± 0.52 mg QE/g DW) สอดคล้องกับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ที่มีค่าการยับยั้งสูงสุดที่ 63.33 ± 2.44 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณ Chlorogenic acid ลดลงเมื่อความเข้มข้นของ NaCl เพิ่มขึ้น ปริมาณ Caffeic acid สูงสุดในกลุ่มที่ได้รับ NaCl 10 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ p-Coumaric acid เพิ่มขึ้นเมื่อ NaCl สูงขึ้น กลุ่มที่ได้รับ NaCl 50 มิลลิโมลาร์ จึงมีปริมาณ p-Coumaric สูงกว่ากลุ่มอื่น ส่วน Ferulic acid มีปริมาณคงที่ ที่กลุ่ม 0 และ 20 มิลลิโมลาร์ แล้วลดลงในกลุ่มที่ได้รับ NaCl 50 มิลลิโมลาร์ ในขณะที่ Quercetin ตรวจพบในปริมาณน้อยและไม่แสดงความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มการทดลอง

ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้เป็นสามารถเป็นแนวทางในการผลิตเชิงพาณิชย์โดยใช้ NaCl ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ในการเพาะไมโครกรีนผักขี้หูด ช่วยเพิ่มปริมาณสารฟลาโวนอยด์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยยังคงให้ผลผลิตด้านน้ำหนักสดสูงกว่าชุดควบคุม ทั้งนี้ยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับช่วงความเข้มข้น NaCl ในช่วง 5 - 15 มิลลิโมลาร์ เพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด ในการกระตุ้น การสะสมสารชีวเคมีที่มีประโยชน์ และศึกษาระยะเวลาการเพาะที่เหมาะสม (7,10,14 วัน) เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสารชีวเคมีที่เกิดขึ้น ตลอดจนวัสดุปลูก และแสงที่ใช้ตลอดการเพาะเพื่อนำไปสู่การผลิตไมโครกรีนที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่มอบทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรรณิกา บุญพาธรรม, และ ดนุพล เกษไชย. (2560). การประเมินผลผลิตและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในผักไมโครกรีน 13 ชนิด. *วารสารแก่นเกษตร*, 45(ฉบับพิเศษ 1), 368-373.
- พรชัย หาระโคตร, ลลิตา เจริญทรัพย์, ภาณุมาศ ฤทธิ์ไชย, และ สมพงษ์ ทะบันหาร. (2563). ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาเก็บรักษาต่อคุณภาพ ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ และความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระในไมโครกรีนผักขี้หูด (*Raphanus sativus* var. *caudatus* Alef). *วารสารแก่นเกษตร*, 48(1), 201-210.
- อินทรา ชูดแก้ว, และ เบญจมาศ พุ่งเกษม. (2562). ผลของวิธีการให้สารและความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อการเติบโตและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในต้นอ่อนทานตะวัน. *วารสารแก่นเกษตร*, 4(2), 379-386.
- Chularojmontri, L., Nanna, U., Tingpej, P., Hansakul, P., Jansom, C., Wattanapitayakul, S., & Naowaboot, J. (2022). *Raphanus sativus* L. var. *caudatus* extract alleviates impairment of lipid and glucose homeostasis in liver of high-fat diet-induced obesity and insulin resistance in mice. *Preventive Nutrition and Food Science*, 27(4), 399-406.
- Dong, N. Q., & Lin, H. X. (2021). Contribution of phenylpropanoid metabolism to plant development and plant-environment interactions. *Journal of Integrative Plant Biology*, 63(1), 180-209.
- Islam, M. Z., Park, B. J., & Lee, Y. T. (2019). Effect of salinity stress on bioactive compounds and antioxidant activity of wheat microgreen extract under organic cultivation conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140, 631-636.
- Leakaya, N., Sato, V. H., & Chewchida, S. (2018). Antioxidant activity, total phenolic, total flavonoid content and HPTLC analysis of morin in *Maclura cochinchinensis* heartwood extract. *Thai Journal of Pharmaceutical Sciences*, 42(Supplement Issue), 27-31.
- Mun'im, A., Negishi, O., & Osawa, T. (2003). Antioxidant compound from *Crotalaria sessiliflora*. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 67, 410-414.
- Plocek, G., Kathi., S., & Simpson, C. (2023). Effects of eustress induced by low concentrations of salinity on broccoli (*Brassica oleracea*) and purslane (*Portulaca oleracea*) microgreens. *Technology in Horticulture*, 3(1), 1-7.
- Pocasap, P., Weerapreeyakul, N., & Wongpoomchai, R. (2023). Thai rat-tailed radish prevents hepatocarcinogenesis in rats by blocking mutagenicity, inducing hepatic phase II enzyme, and decreasing hepatic pro-inflammatory cytokine gene expression. *Cancers*, 15, 1906.
- Sharma, A., Shahzad, B., Rehman, A., Bhardwaj, R., Landi, M., & Zheng, M. (2019). Response of phenylpropanoid pathway and the role of polyphenols in plants under abiotic stress. *Molecules*, 24(13), 2452.
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158.
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Massachusetts: Sinauer Associates.