# ผลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแบบอาร์คดิสชาร์จชนิดไหลผ่านต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพผลเมล่อนในระบบปลูกแบบไม่ใช้ดิน

# Effects of Plasma-Activated Water from a Flow-Through Arc Discharge System on the Growth and Fruit Quality of Melon under Controlled Soilless Cultivation

**รัตติเทพ เครืออินทร์[1] ธนกฤต เทพโพธา[1] อรพินธุ์ สฤษดิ์นำ[1] ปรางณภัส ศิลปเสริฐ[2] สิทธิเดศ ศรีน้อย[3] ระพีพรรณ ลือใจ[4] ณัฐสิทธิ์ เจียวก๊ก[5] กิตติคุณ พระกระจ่าง[5] กีรติญา จันทร์ผง[5] พัชรี กองภาค[5] และสุรีย์พร สราภิรมย์[5]***

Rattithep Kruein[1] Thanakrit Teppoota[1] Orapin Saritnum[1] Prangnapat Silapasert[2] Sittidet Srinoi[3] Rapeepan Luejai[4] Natthasit Chiaokok[5] Kittikhun Prakrajang[5] Keratiya Janpong[5] Patcharee Kongpark[5] and Sureeporn Sarapirom[5]*

[1]สาขาวิชาพืชสวน คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

[1]Program in Horticulture, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290

[2]ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

[2]Plasma and Beam Physics Research Facility, Faculty of Science, Chiang Mai University, Muang, Chiang Mai 50200

[3]กลุ่มวิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ อำเภอร้องกวาง จังหวัดแพร่ 54140

[3]Program in Division of Basic Science, Maejo University Phrae Campus, Rong Kwang, Phrae 54140

[4]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนาโน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

[4]Program in Nanoscience and Nanotechnology, Faculty of Science, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290

[5]สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

[5]Program in Applied Physics, Faculty of Science, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290

* Corresponding author: ssarapirom@gmail.com

(Received: 23 February 2026; Revised: 26 May 2026; Accepted: 17 June 2026)

## Abstract

Plasma-activated water has attracted attention as an alternative nitrogen source for modern agriculture. This study developed and evaluated a flow-through arc-discharge plasma-activated water production system for melon (*Cucumis melo* L.) cultivation, comparing it with calcium nitrate and AB-mix fertilizer under both root-feeding and foliar-spray applications. Spectroscopic diagnostics confirmed the formation of reactive oxygen and nitrogen species in the gas phase and their transfer into the liquid, resulting in increased concentrations of nitrate, nitrite, and hydrogen peroxide, increased electrical conductivity, and a reduction in pH. These changes reflect nitrogen oxidation processes and water dissociation. Seed screening was conducted to reduce seedling variability at the early stage. X-ray imaging was used to non-destructively assess embryo integrity and internal structure, resulting in more uniform germination rates. After transplanting, irrigation was applied every two days, and mist spraying was performed twice a week, in accordance with the specified conditions. Morphological and physiological growth data were collected for 6 weeks, and yield was monitored for an additional 8 weeks.

The experimental results showed that combining calcium nitrate and AB-mix fertilizer with foliar spraying of plasma-activated water produced the best performance. However, even though plasma-activated water contained five times less nitrate than chemical fertilizer, it still moderately promoted growth and yield. Foliar application enhanced plant growth and yield across all treatments. These findings indicate that plasma-activated water cannot yet replace primary nutrient sources, but it plays a role in improving macronutrient efficiency when used as a foliar spray in combination with chemical fertilizers.

**Keywords**: Melon, arc discharge plasma, x-ray imaging, plasma-activated water

**บทคัดย่อ**

น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาได้รับความสนใจในฐานะแหล่งไนโตรเจนทางเลือกสำหรับเกษตรสมัยใหม่ การศึกษานี้พัฒนาและประเมินระบบผลิตน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแบบอาร์คดิสชาร์จชนิดไหลผ่าน สำหรับการปลูกเมล่อน (*Cucumis melo* L.) โดยเปรียบเทียบกับแคลเซียมไนเตรตและปุ๋ยสูตร AB ภายใต้การให้ธาตุอาหารทางรากและการพ่นทางใบ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปียืนยันการเกิดอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจนในสภาวะก๊าซและการถ่ายโอนสู่ของเหลว ส่งผลให้ความเข้มข้นของไนเตรต ไนไตรต์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง สะท้อนกระบวนการออกซิเดชันของไนโตรเจนและการแตกตัวของน้ำ การคัดกรองเมล็ดพันธุ์เพื่อลดความแปรปรวนของต้นกล้าในระยะเริ่มต้น ใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของเอ็มบริโอและโครงสร้างภายในแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ทำให้อัตราการงอกมีความสม่ำเสมอ หลังย้ายปลูกทำการให้น้ำทุก 2 วัน และพ่นละอองไอน้ำสัปดาห์ละ 2 ครั้ง ตามเงื่อนไขที่กำหนด เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตด้านสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาเป็นเวลา 6 สัปดาห์ และติดตามผลผลิตต่อเนื่องอีก 8 สัปดาห์ ผลการทดลอง พบว่า การใช้แคลเซียมไนเตรตและปุ๋ยสูตร AB ร่วมกับการพ่นน้ำทางใบด้วยน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมานั้นให้ผลดีที่สุด อย่างไรก็ตามน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแม้มีปริมาณไนเตรตน้อยกว่าปุ๋ยเคมีถึง 5 เท่า ยังสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตและผลผลิตได้ในระดับปานกลาง การพ่นทางใบช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตให้ต้นและผลผลิตในทุกเงื่อนไข แสดงให้เห็นว่าน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมายังไม่สามารถทดแทนแหล่งธาตุอาหารหลักได้ แต่มีบทบาทในการส่งเสริมประสิทธิภาพของธาตุอาหารหลักเมื่อใช้พ่นทางใบร่วมกับปุ๋ยเคมี

**คำสำคัญ**: เมล่อน พลาสมาอาร์คดิสชาร์จ ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา

**คำนำ**

เมล่อน (*Cucumis melo* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีบทบาทสำคัญในระบบเกษตรสมัยใหม่ โดยเฉพาะการผลิตในโรงเรือนแบบไม่ใช้ดิน ซึ่งต้องอาศัยการจัดการสารละลายธาตุอาหารในทุกระยะการเจริญเติบโต ธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลักที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ การแบ่งเซลล์ และการสะสมชีวมวลของพืช การจัดการไนโตรเจนที่เหมาะสมส่งผลโดยตรงต่อผลผลิตและคุณภาพผลเมล่อน อย่างไรก็ตามการใช้ปุ๋ยเคมีนั้น ทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น และก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการสะสมไนเตรตและการชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ (Savvas and Gruda, 2018) การพัฒนาแหล่งไนโตรเจนทางเลือก จึงเป็นประเด็นสำคัญในระบบการผลิตพืชแบบควบคุม เทคโนโลยีพลาสมาความดันบรรยากาศ ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในฐานะแนวทางทางเลือกสำหรับการผลิตปุ๋ยน้ำไนโตรเจน โดยเฉพาะระบบอาร์คดิสชาร์จ (Arc discharge) ซึ่งสามารถเปลี่ยนอากาศและน้ำให้เกิดอนุมูลว่องปฏิกิริยา

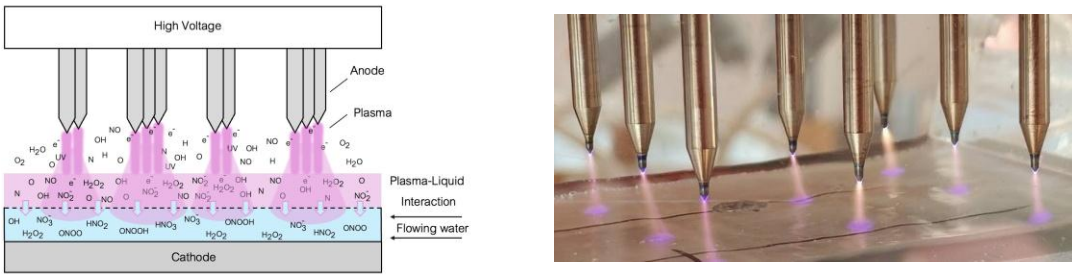
ออกซิเจนและไนโตรเจน (RONS; Reactive Oxygen Nitrogen Species) และนำไปสู่การเกิดไนเตรต ($NO_3^-$) และไนไตรต์ ($NO_2^-$) ในน้ำในรูปที่พืชสามารถใช้ได้โดยตรง (Wong *et al*., 2023; Javed *et al*., 2025; Cai and Sera, 2026) มีรายงานว่า น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (PAW; Plasma Activated Water) หรือสารละลายไนโตรเจนจากพลาสมาสามารถเพิ่มอัตราการงอกความยาวราก ปริมาณคลอโรฟิลล์ และชีวมวลของพืชหลายชนิด เช่น ผักสลัด ข้าวสาลี มะเขือเทศ และพริกหวาน (Ferreyra *et al*., 2025; Priatama *et al*., 2025; Savi *et al*., 2025; Cai and Sera, 2026) นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนทดแทนบางส่วนในระบบไฮโดรโปนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Rathore and Nema, 2025) กลไกที่เกี่ยวข้องกับผลส่งเสริมการเจริญเติบโตดังกล่าว มีความเชื่อมโยงกับบทบาทของอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจน ซึ่งทำหน้าที่ทั้งเป็นแหล่งไนโตรเจนและโมเลกุลสัญญาณที่กระตุ้นกระบวนการเมแทบอลิซึมและการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืช (Jirešová *et al*., 2022; Wong *et al*., 2023) แม้ว่าการประยุกต์ใช้พลาสมาในพืชหลายชนิดจะได้รับการรายงานอย่างกว้างขวาง แต่ข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพของปุ๋ยไนโตรเจนจากระบบอาร์คดิสชาร์จต่อการเจริญเติบโตของเมล่อนในระบบปลูกแบบไม่ใช้ดินยังมีจำกัด โดยเฉพาะการประเมินผลร่วมกับปุ๋ยสูตรมาตรฐานและรูปแบบการให้ปุ๋ยที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของปุ๋ยน้ำไนโตรเจนจากพลาสมาต่อการเจริญเติบโตของเมล่อน เปรียบเทียบกับปุ๋ยไนโตรเจนเชิงพาณิชย์และปุ๋ยสูตร AB มาตรฐาน รวมถึงศึกษาผลของการใช้ร่วมกันและวิธีการให้ปุ๋ยทั้งทางระบบรากและการพ่นทางใบเพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารของพืช

นอกจากนี้ ความแปรปรวนของเมล็ดพันธุ์ส่งผลต่อความแม่นยำของผลการทดลอง เทคนิคการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ (X-ray imaging) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการคัดกรองคุณภาพเมล็ด ซึ่งเป็นวิธีแบบไม่ทำลาย (non-destructive) สามารถตรวจสอบโครงสร้างภายในความหนาแน่น และความเสียหายของเอ็มบริโอได้ และมีความสัมพันธ์กับศักยภาพการงอกและความแข็งแรงของต้นกล้า (Medeiros *et al*., 2020) นอกจากนี้ การวิเคราะห์ภาพดิจิทัลและเทคนิค X-ray micro-computed tomography ยังช่วยเพิ่มความละเอียดเชิงโครงสร้างและความสามารถในการคัดกรองเมล็ดคุณภาพสูงได้ (França-Silva *et al*., 2023) ซึ่งช่วยลดความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่าง เพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล และทำให้สามารถวิเคราะห์ผลของปุ๋ยไนโตรเจนจากพลาสมาได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

## อุปกรณ์และวิธีการ

### ลักษณะของเครื่องพลาสมา

เครื่องผลิตน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแบบไหลผ่าน (Figure 1) ประกอบด้วยแอโนดทังสเตนจำนวน 20 ขั้ว วางเหนือผิวน้ำ และใช้แคโทดอะลูมิเนียมร่วมวางทับบนรางน้ำ เพื่อลดความต้านทานไฟฟ้าและเพิ่มเสถียรภาพของการปล่อยประจุ อิเล็กโทรดทั้งหมดเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ความยาวของลำพลาสมา (plasma column length) จากปลายแอโนดถึงผิวน้ำมีค่าประมาณ 1 เซนติเมตร อัตราการไหลคงที่ 1.2 ลิตรต่อนาที โดยบีบให้น้ำไหลแผ่เป็นชั้นบาง 5 มิลลิเมตร เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส และลดปริมาตรน้ำขณะทำปฏิกิริยากับพลาสมา




(a) (b)

**Figure 1** The flow-through plasma-activated water generator with 20 electrodes: (a) Schematic and (b) photo

เมื่อสนามไฟฟ้าถูกจ่ายเข้าสู่ระบบ จะเกิดการปล่อยประจุแบบอาร์คในอากาศเหนือผิวน้ำ ทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลในอากาศ นำไปสู่การสร้างอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจน และถ่ายโอนจากสภาวะก๊าซลงสู่สภาวะของเหลวผ่านกระบวนการละลาย การแพร่ และอันตรกิริยาที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ส่งผลให้เกิดการสะสมของไนเตรต และไนไตรต์ ภายในน้ำ

**องค์ประกอบของพลาสมาและคุณสมบัติน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา**

การตรวจสอบสมบัติของพลาสมาเป็นขั้นตอนสำคัญก่อนนำไปผลิตน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา เนื่องจากแหล่งกำเนิดและเงื่อนไขการทำงานที่แตกต่างกันส่งผลต่อชนิดและปริมาณของอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจนที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์อนุภาคในสถานะกระตุ้น (O* N* OH* และ NO*) ดำเนินการด้วยเทคนิค Optical Emission Spectroscopy (OES) (QM-800, HORIBA, Japan) องค์ประกอบก๊าซโมเลกุล ($NO_x$ $O_3$) วิเคราะห์ด้วยชุดวัดตัวอย่างก๊าซ (gas cell) ร่วมกับเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) (VERTEX 80V, Bruker, Germany) ในช่วงเลขคลื่น 4000 - 400 ต่อเซนติเมตร ($cm^{-1}$) ความละเอียดเชิงสเปกตรัม 4 ต่อเซนติเมตร และทำการเฉลี่ยสัญญาณจำนวน 32 สแกน ต่อหนึ่งตัวอย่าง สำหรับน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง การนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งละลายรวม และปริมาณเกลือ โดยใช้เครื่อง Multi-parameter Tester (PCSTestr 35 Series, Singapore) การตรวจสอบเบื้องต้นของไนเตรต ไนไตรต์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ วัดการด้วยชุดทดสอบสำเร็จรูป (Nitrate test strips (MQuant® Nitrate Test 1.10020, Merck), Nitrite test strips (MQuant® Nitrite Test 1.10022, Merck), Hydrogen Peroxide Test Strip (MQuant® Peroxide Test Strips 110011, Merck)) และทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณอย่างละเอียดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Evolution 220, USA) ความยาวคลื่นในช่วง 320 - 1100 นาโนเมตร

**การวัดการเจริญเติบโตและผลผลิตการเตรียมกล้า**

เพื่อควบคุมความแปรปรวนของต้นกล้าจากความไม่สม่ำเสมอของเมล็ดพันธุ์ จึงประยุกต์ใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ในการคัดกรองคุณภาพเมล็ดก่อนการทดลอง เมล็ดพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกด้วยการพิจารณาลักษณะภายนอก ถูกจัดเรียงชุดละ 15 เมล็ด ถ่ายภาพด้วยเครื่องถ่ายภาพรังสีเอกซ์ XR 4.0 Mobile X-ray Lab (XR 4.0 X-ray Expert Unit, Germany) (ทังสเตน; 35 กิโลโวลต์ 1 มิลลิแอมแปร์) ประเมินโครงสร้างภายในของเมล็ด จากความสมบูรณ์ของเอ็มบริโอ ความหนาแน่นสี และความต่อเนื่องของเนื้อเยื่อสะสมอาหาร เมล็ดที่มีลักษณะโครงสร้างภายในสม่ำเสมอและไม่พบความผิดปกติถูกคัดเลือกเพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป เมล็ดที่ผ่านการคัดเลือก

ถูกนำไปเพาะในถาดเพาะที่บรรจุพีทมอสเป็นวัสดุเพาะเป็นระยะเวลา 10 วัน ภายใต้สภาวะควบคุมปริมาณความชื้น อุณหภูมิ แสง เพื่อประเมินอัตราการงอกและความสม่ำเสมอของต้นกล้า ต้นกล้าที่มีการเจริญเติบโตสม่ำเสมอและแข็งแรงถูกคัดเลือกเพื่อย้ายปลูกลงถุงเพาะ วัสดุปลูกในถุงเพาะประกอบด้วยขุยมะพร้าว ทราย และแกลบดำ ในอัตราส่วน 2:1:1 โดยปริมาตร หลังย้ายปลูก ดูแลรักษาเป็นระยะเวลา 4 วัน จากนั้นดำเนินการปลูกในระยะถัดไป

**เงื่อนไขการทดลอง**

การทดลองเป็นแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design; RCBD) ประกอบด้วย 15 กรรมวิธี โดยกำหนดเงื่อนไขการให้สารละลาย 2 รูปแบบ ได้แก่ การให้สารละลายทางราก (root applied) และการพ่นละอองทางใบ (foliar misting) กรรมวิธีที่ 1 - 5 เป็นการให้สารละลายทางรากเพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการพ่นละอองทางใบ กรรมวิธีที่ 6 - 10 เป็นการให้สารละลายทางรากร่วมกับการพ่นละอองทางใบด้วยน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส (RO; Reverse Osmosis) และกรรมวิธีที่ 11 - 15 เป็นการให้สารละลายทางรากร่วมกับการพ่นละอองทางใบด้วยน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (PAW) โดยแต่ละกรรมวิธีมีจำนวน 4 ต้น และใช้แต่ละต้นเป็นหนึ่งซ้ำ รวมทั้งหมด 60 ต้น ดำเนินการให้สารละลายทางราก (root applied) ทุก 2 วัน และการพ่นละอองทางใบ (foliar misting) สัปดาห์ละ 2 ครั้ง ตามเงื่อนไขที่กำหนด รายละเอียดเงื่อนไขการทดลองแสดงใน Table 1

**Table 1** The experimental conditions for nutrients applied via root irrigation and foliar misting

| Experimental conditions | |
|---|---|
| Root applied | Foliar misting |
| Control (RO) | NO |
| $(Ca(NO_3)_2$ | NO |
| PAW | NO |
| AB | NO |
| AB+PAW | NO |
| Control (RO) | RO |
| $(Ca(NO_3)_2$ | RO |
| PAW | RO |
| AB | RO |
| AB+PAW | RO |
| Control (RO) | PAW |
| $(Ca(NO_3)_2$ | PAW |
| PAW | PAW |
| AB | PAW |
| AB+PAW | PAW |

**Remarks:** The symbols used in the table are defined as follows: Control (RO) (RO water only; no fertilizer application); $(Ca(NO_3)_2$ (calcium nitrate fertilizer); PAW (plasma-activated water); AB (complete AB nutrient solution for soilless cultivation, dissolved in RO water); AB + PAW (AB fertilizer dissolved in plasma-activated water)

**การเตรียมสารละลาย**

การเตรียมสารละลายสำหรับการทดลองนี้ออกแบบให้ครอบคลุมทั้งแหล่งธาตุอาหารจากสารเคมีและจากน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการให้ไนโตรเจนและธาตุอาหารพืชภายใต้สภาวะที่ควบคุมได้ โดยใช้น้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส (RO) เป็นตัวทำละลายพื้นฐานในทุกกลุ่มทดลอง เพื่อลดผลกระทบจากไอออนหรือสิ่งเจือปนเริ่มต้น และทำให้สามารถวิเคราะห์ผลของตัวแปรแต่ละชนิดได้อย่างชัดเจน

กลุ่มสารละลายที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ (1) กลุ่มควบคุม (Control; RO) ซึ่งใช้น้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสเพียงอย่างเดียว เพื่อเปรียบเทียบ (2) กลุ่มปุ๋ยแคลเซียมไนเตรต ($Ca(NO_3)_2$) ซึ่งเตรียมโดยละลายปุ๋ยแคลเซียมไนเตรตสูตร 15-0-0 (Haifa) ในอัตรา 0.67 กรัมต่อลิตร ในน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส เพื่อใช้เป็นตัวแทนแหล่งไนโตรเจนในรูปไนเตรตจากปุ๋ยเคมี (3) กลุ่มน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (PAW) ซึ่งเตรียมโดยนำน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสไปผ่านระบบผลิตน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแบบไหลผ่าน ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด เพื่อให้เกิดอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจนที่ละลายในน้ำเป็นแหล่งไนโตรเจนทางเลือก

สำหรับการประเมินผลของธาตุอาหารครบสูตร ได้กำหนด (4) กลุ่มปุ๋ยสูตร AB (AB) ซึ่งเตรียมโดยละลายธาตุอาหาร ส่วน A และส่วน B (Chemrich) ในน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสในอัตรา 3.33 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้ได้องค์ประกอบธาตุอาหารหลักและรองที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช องค์ประกอบธาตุอาหารโดยประมาณจากการผสมดังกล่าวแสดงใน Table 2 และ (5) กลุ่มปุ๋ยสูตร AB ร่วมกับน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (AB+PAW) ซึ่งเตรียมโดยใช้สัดส่วนปุ๋ยเท่ากับกลุ่มปุ๋ยสูตร AB แต่เปลี่ยนตัวทำละลายจากน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสเป็นน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา เพื่อศึกษาผลเสริมกัน (synergistic effect) ระหว่างธาตุอาหารจากปุ๋ยและอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจนที่ละลายในน้ำพลาสมา

**Table 2** Nutrient composition of the AB fertilizer solution

| Major/Secondary nutrients | Concentration (%w/w) | Approximate amount supplied (mg/L: ppm) |
|---|---|---|
| Nitrogen (N) | A: 2% + B: 2% | ≈ 100 |
| Calcium (CaO) | B: 3% | ≈ 50 |
| Potassium ($K_2O$) | A: 2% | ≈ 33 |
| Phosphorus ($P_2O_5$) | A: 2% | ≈ 33 |
| Magnesium (Mg) | A: 2% | ≈ 33 |
| Sulfur (S) | A: 2% | ≈ 33 |
| Iron (Fe) | B: 0.05% | ≈ 1.7 |
| Zinc (Zn), Cu, Mn, Mo | A: 0.007–0.001% | < 1 |

**การวัดค่าการเจริญเติบโตและผลผลิต**

การประเมินการเจริญเติบโตของพืชครอบคลุมทั้งด้านสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยา ได้แก่ ความสูงต้น เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น จำนวนใบ ความยาวและความกว้างใบ ด้วยเครื่องดิจิตอลเวอร์เนียคาลิปเปอร์ (500-150-30, Japan) จำนวนข้อ และปริมาคลอโรฟิลล์ วัดปริมาณคลอโรฟิลล์ด้วยเครื่อง SPAD มิเตอร์ (SPAD-502, Japan) โดยทำการวัดทุก 7 วัน หลังจากต้นกล้ามีอายุ 14 วัน เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ และประเมินคุณภาพผลผลิตเมล่อนจากน้ำหนักผล ขนาดผล ด้วยเครื่องดิจิตอลเวอร์เนียคาลิปเปอร์ วัดค่าความหวานด้วยเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ (MASTER-80H, Japan) และวัดค่าความแน่นเนื้อด้วยเครื่องวัดความแน่นเนื้อ (FT-011, Italy) โดยเริ่มติดตามตั้งแต่วันติดผลเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ทุกเงื่อนไขดำเนินการจำนวน 4 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ความแปรปรวนแบบสองปัจจัย (two-way ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

**ผลการวิจัยและวิจารณ์**

**องค์ประกอบของพลาสมาและคุณสมบัติน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา**

**องค์ประกอบของพลาสมา**

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมการปลดปล่อยแสงของพลาสมา (Figure 2) ตรวจพบแถบสเปกตรัมที่สองของโมเลกุลไนโตรเจน (SPS; Second Positive System) ของ $N_2$ (295 - 449 นาโนเมตร) และสเปกตรัมลบที่หนึ่งของไอออนไนโตรเจนโมเลกุล (FNS; First Negative System) ของ $N_2^+$ (355 - 471 นาโนเมตร) สะท้อนการกระตุ้นและไอออไนเซชันของไนโตรเจน พร้อมสัญญาณ OH (306 และ 312 นาโนเมตร) เส้น $H_\alpha$ (656 นาโนเมตร) และ O (777 นาโนเมตร) (Ungwiwatkul *et al*., 2025) แสดงการแตกตัวระดับอะตอม กระบวนการเหล่านี้เป็นแหล่งกำเนิดอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจนที่เปลี่ยนรูปเป็น $NO_3^-$ $NO_2^-$ และ $H_2O_2$ ในน้ำ ผลสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (FTIR) แสดงให้เห็นการดูดกลืนของ O-H $NO_x$ และ $O_3$ สะท้อนการแตกตัวของ $H_2O$ และ $O_2$ ภายใต้พลาสมา พบ OH* $O_3$ NO $NO_2$ $HNO_2$ และ $NO_3^-$ ผ่านกลไกการกระตุ้นหรือการแตกตัวเป็นไอออนโดยการชนของอิเล็กตรอน (electron impact) และปฏิกิริยาลูกโซ่ของการออกซิเดชัน (oxidation chain) (Tomeková *et al*., 2020; Trunec *et al*., 2022; Olenik *et al*., 2023; Korzec *et al*., 2025) ซึ่งเป็นเส้นทางสำคัญสู่การสร้าง ไนไตรต์และไนเตรต ในระบบน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา ดังแสดงใน Figure 3

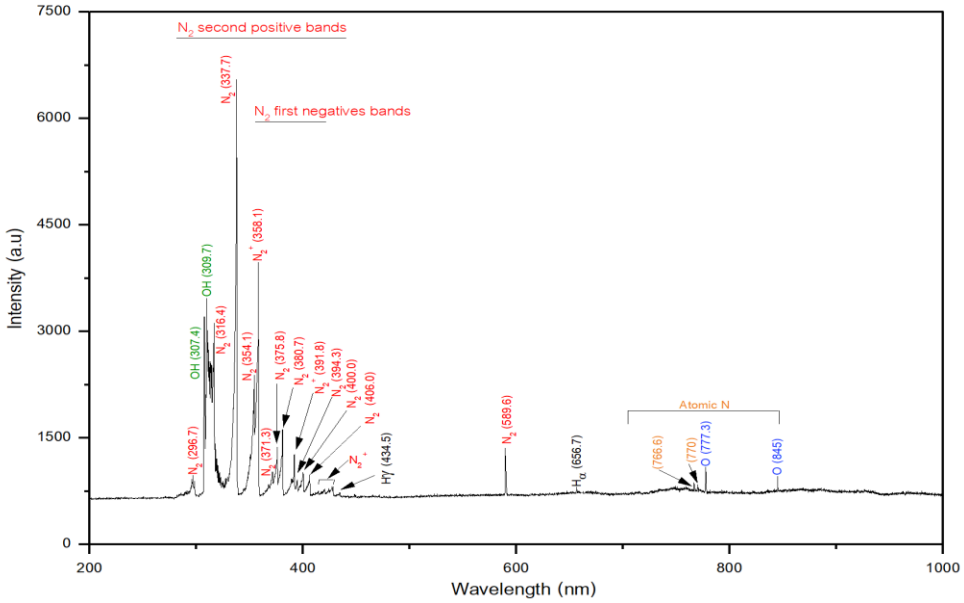



**Figure 2** Optical emission spectrum (OES) of the plasma generated inside the reactor of the flow-through plasma activated water generator, showing characteristic emission lines and bands of reactive species, particularly reactive oxygen and nitrogen species (RONS)

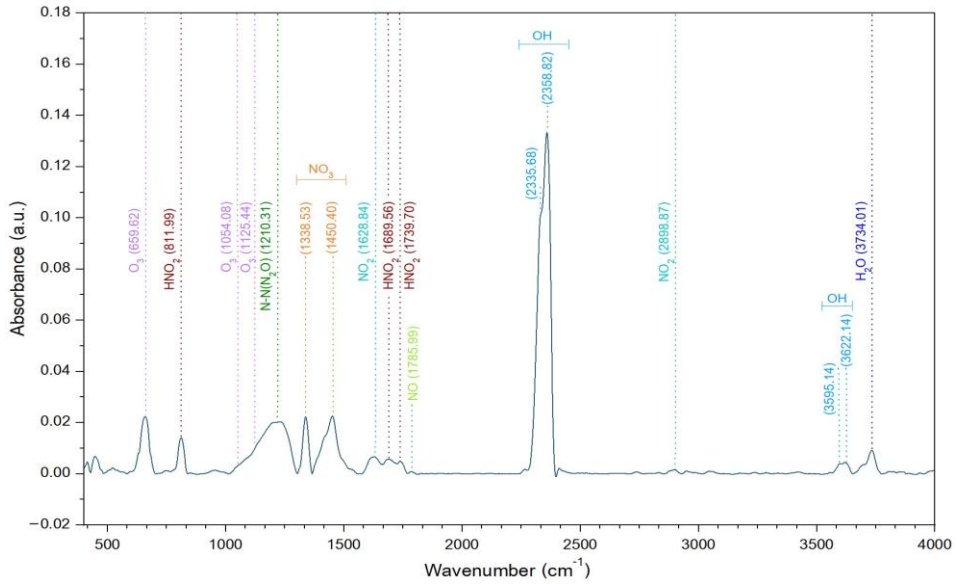



**Figure 3** Fourier Transform Infrared (FTIR) absorption spectrum of gaseous species generated in the plasma system, measured using a gas cell configuration, showing characteristic absorption bands of $NO_x$ $O_3$ and OH

**คุณสมบัติน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา**

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (Table 3) ค่าการนำไฟฟ้า ค่าเกลือ และปริมาณของแข็งละลายรวม พบว่า กลุ่มที่มีองค์ประกอบปุ๋ยเคมีกลุ่มปุ๋ยแคลเซียมไนเตรต ($Ca(NO_3)_2$ กลุ่มปุ๋ยสูตร AB และ กลุ่มปุ๋ยสูตร AB+PAW มีไอออนของสารละลายธาตุอาหารทำให้มีค่าการนำไฟฟ้า ค่าเกลือ และปริมาณของแข็งละลายรวมมีค่าเพิ่มขึ้นจากตัวควบคุม โดยมีค่าการนำไฟฟ้าเป็น 854.70 ± 42.74 1006.30 ± 50.32 และ 1037.00 ± 51.85 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (µS/cm)ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่มีค่าเพียง 270.00 ± 13.50 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร

**Table 3** Physicochemical properties and concentrations of ionic and reactive species in different water treatments (Control (RO) $Ca(NO_3)_2$ PAW AB and AB+PAW)

| Parameter | EC (µS)/cm | TDS (µS)/cm | Salt (ppm) | pH | $NO_3$ (ppm) | $NO_2$ (ppm) | $H_2O_2$ (ppm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Control (RO) | 270.00 ± 13.50c | 151.30 ± 7.57d | 151.30 ± 7.57d | 7.60 ± 0.38a | 10.90 ± 0.55b | 0.00 | 0.00 |
| $Ca(NO_3)_2$ | 854.70 ± 42.74c | 424.30 ± 21.22c | 426.30 ± 21.32c | 7.70 ± 0.39a | 383.90 ± 19.20a | 0.00 | 0.00 |
| PAW | 303.00 ± 15.15b | 149.70 ± 7.49d | 150.30 ± 7.52d | 7.40 ± 0.37a | 75.00 ± 3.75b | 0.10 ± 0.01 | 3.50 ± 0.18 |
| AB | 1006.30 ± 50.32a | 492.00 ± 24.60b | 482.30 ± 24.12b | 7.20 ± 0.36a | 350.00 ± 17.50a | 0.00 | 0.00 |
| AB+PAW | 1037.00 ± 51.85a | 533.70 ± 26.69a | 536.00 ± 26.80a | 7.00 ± 0.35a | 372.10 ± 18.61a | 0.10 ± 0.01 | 5.00 ± 0.25 |
| F-test | * | * | * | * | * | - | - |
| CV (%) | 5.56 | 5.53 | 5.53 | 5.02 | 41.90 | - | - |

ซึ่งสอดคล้องกับค่าเกลือ (426.30 ± 21.32 482.30 ± 24.12 และ 536.00 ± 26.80 ส่วนในล้านส่วน (ppm)) และค่าปริมาณของแข็งละลายรวม (424.30 ± 21.22 492.00 ± 24.60 และ 533.70 ± 26.69 ส่วนในล้านส่วน) ที่เพิ่มสูงขึ้นจากการมีไอออนของธาตุอาหารใสารละลาย ขณะที่น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (303.00 ± 15.15 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของชนิดประจุในสารละลาย (Wong *et al*., 2023) ส่วนค่าเกลือและค่าปริมาณของแข็งละลายรวมไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากกลุ่มควบคุม ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของสารละลายมีลักษณะเป็นด่างเล็กน้อย (pH 7.6 ในกลุ่มควบคุม) เมื่อผ่านกระบวนการพลาสมา ค่าความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มลดลง (PAW 7.40 ± 0.37 และ AB+PAW 7.00 ± 0.35) แสดงถึงการเพิ่มความเป็นกรดของระบบ ทั้งนี้เป็นผลมาจากกระบวนการออกซิเดชันของไนโตรเจนในสถานะก๊าซและการละลายลงสู่ของเหลว ทำให้เกิดกรดไนตริก ($HNO_3$) และกรดไนตรัส ($HNO_2$) รวมถึงการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนไอออน ($H^+$) ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง (Wong *et al*., 2023; Rathore and Nema, 2025) ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนเตรต ไนไตรต์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า ไนเตรตในกลุ่มควบคุมมีค่า 10.90 ± 0.55

ส่วนในล้านส่วน และเพิ่มขึ้นในกลุ่มน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็น 75.00 ± 3.75 ส่วนในล้านส่วน อย่างไรก็ตาม ค่านี้ยังต่ำกว่ากลุ่มที่มีการเติมปุ๋ยเคมี กลุ่มปุ๋ยแคลเซียมไนเตรต ($Ca(NO_3)_2$ กลุ่มปุ๋ยสูตร AB และ กลุ่มปุ๋ยสูตร AB+PAW ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 350 - 380 ppm อย่างชัดเจน ขณะที่ไนไตรต์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตรวจพบเฉพาะในกลุ่มที่มีน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (PAW และ AB+PAW) โดยมีค่าประมาณ 0.10 ± 0.01 ส่วนในล้านส่วน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประมาณ 3.50 - 5.00 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งไม่พบในกลุ่มควบคุมและกลุ่มปุ๋ยเคมีทั่วไป ผลดังกล่าวยืนยันว่าในระบบมีการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจากพลาสมา (Wong *et al*., 2023) และสนับสนุนกลไกการเกิดอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจนในน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา

**การวัดการเจริญเติบโตและผลผลิต**

**การเตรียมกล้า**

ในขั้นต้นได้ดำเนินการคัดเลือกเมล็ดด้วยการสังเกตลักษณะภายนอกด้วยตาเปล่าให้มีความสม่ำเสมอ แล้วทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ พบว่า เมล็ดที่มีลักษณะภายนอกใกล้เคียงกันยังคงมีความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างภายใน รวมถึงความไม่สมบูรณ์ของเอ็มบริโอและความหนาแน่นของเนื้อเยื่อภายในบางส่วน (Figure 4a)



(a) (b) (c)

**Figure 4** Growth of melon: (a) X-ray images of melon seeds showing internal structural variability and seed defects not observable by visual inspection. (b) Germination performance of randomly selected seeds without X-ray screening, exhibiting non-uniform growth and low germination rate. (c) Good germination performance of X-ray-screened seeds

ในการทดลองนี้จึงคัดเลือกเฉพาะเมล็ดที่มีโครงสร้างภายในสมบูรณ์จากการตรวจด้วยรังสีเอกซ์ไว้ใช้ในการเพาะปลูกต่อไป และเพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการคัดเลือก ได้ทำการเปรียบเทียบกับกลุ่มเมล็ดที่สุ่มเลือกโดยไม่ผ่านการคัดกรองด้วยรังสีเอกซ์ ผลการเพาะปลูก พบว่า กลุ่มเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการคัดเลือกมีอัตราการงอก 67.8 เปอร์เซ็นต์ และมีการเจริญเติบโตของต้นกล้าไม่สม่ำเสมอดัง Figure 4b ส่วนเมล็ดที่ผ่านการคัดกรองด้วยรังสีเอกซ์แสดงอัตราการงอก 100 เปอร์เซ็นต์ และต้นกล้ามีความสม่ำเสมอดัง Figure 4c แสดงให้เห็นว่า การใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์สามารถลดความแปรปรวนเริ่มต้นของเมล็ดพันธุ์ได้

**การเจริญเติบโตและผลผลิต**

การประเมินการเจริญเติบโตของเมล่อนในด้านสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยา (Table 4) รวมถึงคุณภาพผลผลิตเมล่อน (Table 5) แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของปริมาณธาตุไนโตรเจนที่พืชได้รับ

**Table 4** Mean morphological and physiological growth parameters of melon plants under different irrigation and foliar misting treatments at week 8

| Root Applied | Foliar Misting | Height (cm) | Canopy Diameter (cm) | Number of Leaves | Leaf Length (cm) | Leaf Width (cm) | Number of Internodes (cm) | Chlorophyll (SPAD Unit) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Control (RO) | NO | 79.33h | 19.35f | 15.75e | 7.17c | 8.50c | 15.75e | 20.18b |
| $Ca(NO_3)_2$ | NO | 177.10c | 36.98a | 25.75b | 10.47a | 14.80a | 22.25c | 25.07a |
| PAW | NO | 119.28e | 24.33d | 21.25d | 8.65b | 10.43c | 22.25c | 16.02b |
| AB | NO | 179.65b | 23.15d | 24.00c | 7.10c | 8.90c | 24.00c | 22.42a |
| AB+PAW | NO | 171.88c | 24.43d | 27.50b | 6.53d | 9.45c | 27.50b | 18.18b |
| Control (RO) | RO | 90.33g | 11.72g | 14.75e | 6.58d | 9.20c | 14.75f | 17.68b |
| $Ca(NO_3)_2$ | RO | 186.30b | 33.10b | 26.50b | 9.77b | 14.32a | 27.00b | 25.25a |
| PAW | RO | 115.30e | 24.70d | 20.67d | 8.87b | 10.13c | 21.33d | 17.50b |
| AB | RO | 181.07b | 22.12e | 28.25b | 7.97c | 9.10c | 28.25b | 25.40a |
| AB+PAW | RO | 177.62b | 23.38d | 28.50b | 8.60c | 10.47c | 28.50b | 27.40a |
| Control (RO) | PAW | 101.78f | 19.40f | 17.25e | 7.90c | 9.57c | 17.75e | 14.10b |
| $Ca(NO_3)_2$ | PAW | 210.47a | 33.23b | 31.00a | 11.90a | 15.48a | 31.00a | 29.75a |
| PAW | PAW | 138.35d | 25.35c | 25.00c | 8.93b | 11.70b | 25.00c | 23.70a |
| AB | PAW | 182.57b | 26.90c | 29.75a | 9.30b | 10.45c | 29.75a | 30.80a |
| AB+PAW | PAW | 186.72b | 25.50c | 31.75a | 10.22b | 12.88b | 31.75a | 28.82a |
| F-test | | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| CV (%) | | 2.39 | 2.80 | 4.92 | 7.18 | 7.41 | 4.58 | 15.42 |

**Remarks:** ns = not significant; * = significant at the 0.05 probability level; ** = highly significant at the 0.01 probability level. Means followed by the same letter within a column are not significantly different according to DMRT at the 0.05 probability level

จากข้อมูลที่ได้ พบว่า ปุ๋ยกลุ่มเคมี (แคลเซียมไนเตรตและปุ๋ยสูตร AB) ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเมล่อนมากที่สุด โดยเฉพาะค่าความสูงต้น จำนวนใบ ขนาดใบ และจำนวนข้อ ซึ่งเป็นลักษณะที่สะท้อนการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเฉพาะการให้สารละลายทางระบบราก พบว่า ความสูงของต้นในกลุ่มปุ๋ยเคมีมีค่าสูงที่สุด ($Ca(NO_3)_2$ 177.10 เซนติเมตร) และ AB 179.65 เซนติเมตร) ขณะที่น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (PAW) แม้มีค่าต่ำกว่ากลุ่มปุ๋ยเคมี แต่ยังมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด (PAW 119.28 เซนติเมตร และ Control 79.33 เซนติเมตร) เมื่อเชื่อมโยงกับข้อมูลคุณสมบัติของสารละลาย (Table 3) พบว่า น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (PAW) มีปริมาณไนเตรตต่ำกว่ากลุ่มปุ๋ยเคมีค่อนข้างมาก (PAW 75.00 ส่วนในล้านส่วน เทียบกับ $Ca(NO_3)_2$ และ AB (383.90 350.00 ส่วนในล้านส่วน) แต่ยังสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของเมล่อนได้ในบางลักษณะเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม โดยเฉพาะความสูงต้น (เพิ่มขึ้น ~40 - 50 เปอร์เซ็นต์) จำนวนใบ (21.25 ใบ เทียบกับชุดควบคุม 15.75 ใบ) ขนาดใบ (กว้าง 10.43 เซนติเมตร ยาว 8.65

เซนติเมตร ชุดควบคุม กว้าง 8.50 เซนติเมตร ยาว 7.17 เซนติเมตร) และจำนวนข้อ (24.00 ข้อ เทียบกับชุดควบคุม 15.75 ข้อ) อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพโดยรวมของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (PAW) ยังต่ำกว่ากลุ่มที่ได้รับปุ๋ยเคมี โดยเฉพาะแคลเซียมไนเตรตและปุ๋ยสูตร AB

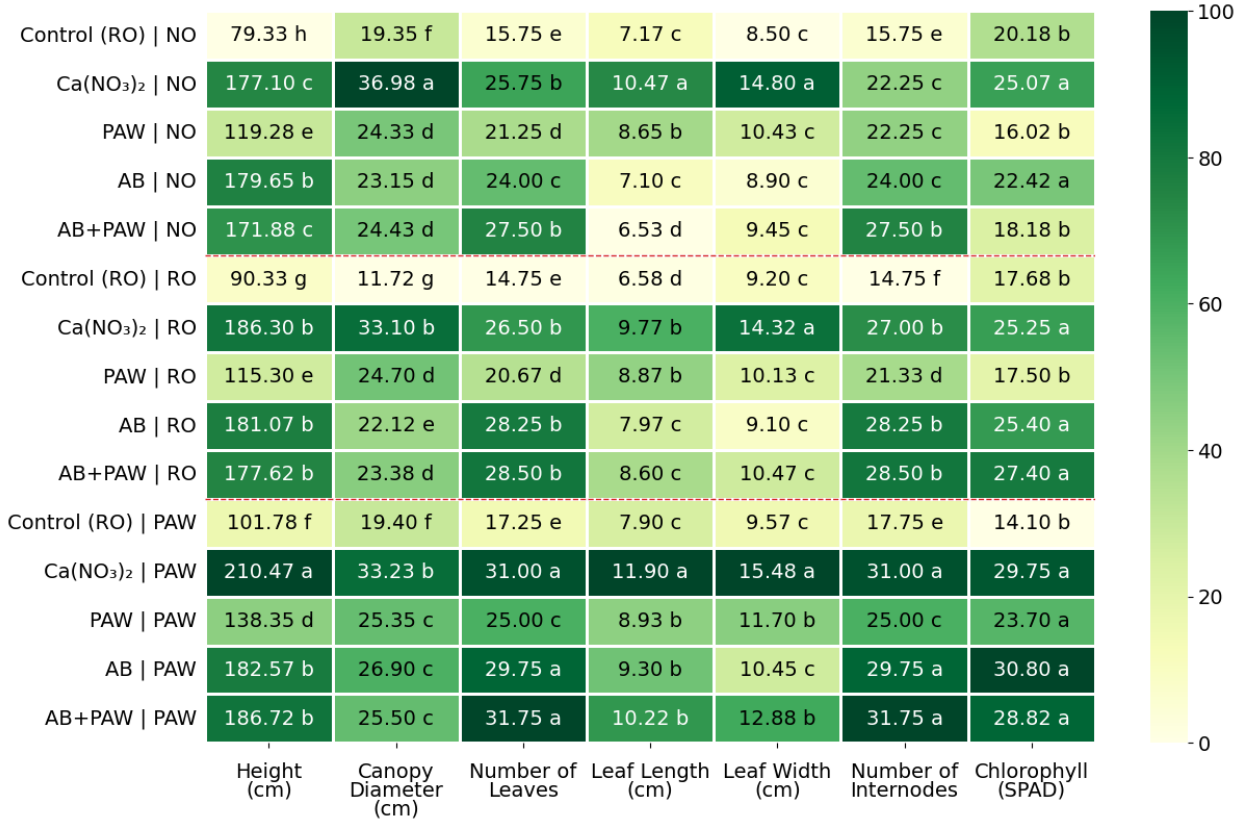



**Figure 5** Heatmap showing the morphological and physiological growth responses of melon plants under different nutrient solutions and foliar misting treatments at week 8. The evaluated parameters included plant height, canopy diameter, number of leaves, leaf length, leaf width, number of internodes, and chlorophyll content. The values shown in each cell represent the mean values followed by DMRT grouping letters, while the color intensity indicates the normalized relative performance of each parameter on a scale of 0 - 100. Red dashed lines separate the treatment groups by foliar misting conditions: no misting (NO), RO misting, and PAW misting

เมื่อพิจารณาการใช้งานน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาในแง่ของตัวทำละลายกับปุ๋ยเคมี โดยคาดหวังว่าอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจน ในลักษณะเชิงไอออนจะช่วยเพิ่มการแตกตัวและประสิทธิภาพของธาตุอาหาร ในกลุ่มปุ๋ยสูตร AB เมื่อเปรียบเทียบ AB กับ AB+PAW พบว่า ไม่สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตได้อย่างชัดเจน เช่น ขนาดลำต้น ขนาดใบ อีกทั้งความสูงต้น (AB 179.65 เซนติเมตร เทียบกับ AB+PAW 171.88 เซนติเมตร) และปริมาณปริมาณคลอโรฟิลล์ (AB 22.4 2SPAD AB+PAW 18.18 SPAD) มีแนวโน้มลดลง แต่มีแนวโน้มทางด้านการเพิ่มจำนวนใบ (AB 24.00 ใบ AB+PAW 27.50 ใบ) และจำนวนข้อ (AB 24.00 ข้อ AB+PAW 27.50 ข้อ)

ภายใต้เงื่อนไขการให้น้ำทางใบ พบว่า การให้น้ำทางใบด้วยน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาส่งเสริมการเจริญเติบโตและผลผลิตได้ดีกว่า การไม่ให้น้ำทางใบและการให้น้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส โดยในรูปแบบการพ่นทางใบร่วมกับปุ๋ยเคมี พบว่า มีแนวโน้มช่วยเสริมการเจริญเติบโตด้านชัดเจนในด้านความสูงต้น (กลุ่ม $Ca(NO_3)_2$-PAW ให้ค่าความสูงต้นสูงสุดถึง 210.47 เซนติเมตร กลุ่ม AB-PAW 182.57 เซนติเมตร และกลุ่ม AB+PAW-PAW 186.72 เซนติเมตร) จำนวนใบ ($Ca(NO_3)_2$-PAW 31.00 ใบ AB-PAW 29.75 ใบ และ AB+PAW-PAW 31.75 ใบ) และจำนวนข้อ ($Ca(NO_3)_2$-PAW 31.00 ข้อ AB-PAW 29.75 ข้อ และ AB+PAW-PAW 31.75 ข้อ) ส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์และขนาดใบไม่เห็นผลอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา ในรูปแบบการใช้ทางรากการผสมกับปุ๋ยเคมีที่ใช้ทางราก และการใช้ในรูปแบบการพ่นทางใบ จะเห็นได้ว่าการใช้น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาเดี่ยวให้ผลที่ดีในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับชุดควบคุม แต่ยังไม่อาจจะสรุปผลได้อย่างแน่ชัดในการทดลองนี้จากผลของปริมาณไนเตรตที่มีปริมาณไม่เท่ากันในชุดการทดลอง ด้านการใช้น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นตัวทำละลายปุ๋ยเคมี พบว่า ไม่เพิ่มประสิทธิภาพของธาตุอาหารอย่างมีนัยสำคัญ และอาจส่งผลลบในบางกรณี ในขณะที่การใช้น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาในรูปแบบการพ่นทางใบ โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับปุ๋ยเคมีทางราก ให้ผลดีที่สุดในการส่งเสริมการเจริญเติบโตและแนวโน้มของผลผลิต ภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้

**Table 5** Yield and fruit quality of melon under different irrigation and foliar misting treatments

| Treatments | Spray | Weight (g) | Vertical Circumference (cm) | Horizontal Circumference (cm) | Flesh firmness (kgf) | Total Soluble Solids (%Brix) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Control (RO) | NO | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| $Ca(NO_3)_2$ | NO | 255.60 ± 0.00 | 26.40 ± 0.00 | 25.30 ± 0.00 | 8.10 ± 0.00 | 4.90 ± 0.00 |
| PAW | NO | 75.60 ± 0.00 | 17.30 ± 0.00 | 16.20 ± 0.00 | 4.20 ± 0.00 | 5.00 ± 0.00 |
| AB | NO | 186.83 ± 137.01 | 22.83 ± 5.43 | 21.65 ± 4.52 | 4.03 ± 0.90 | 5.95 ± 1.75 |
| AB+PAW | NO | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| Control (RO) | RO | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| $Ca(NO_3)_2$ | RO | 280.10 ± 148.54 | 27.63 ± 3.40 | 24.27 ± 3.72 | 4.27 ± 0.64 | 5.33 ± 2.51 |
| PAW | RO | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| AB | RO | 258.80 ± 0.00 | 26.20 ± 0.00 | 24.10 ± 0.00 | 3.00 ± 0.00 | 5.10 ± 0.00 |
| AB+PAW | RO | 59.20 ± 0.00 | 15.40 ± 0.00 | 15.30 ± 0.00 | 4.60 ± 0.00 | 4.20 ± 0.00 |
| Control (RO) | PAW | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| $Ca(NO_3)_2$ | PAW | 540.70 ± 0.00 | 34.90 ± 0.00 | 33.60 ± 0.00 | 7.10 ± 0.00 | 6.50 ± 0.00 |
| PAW | PAW | 177.45 ± 63.00 | 23.35 ± 4.17 | 21.30 ± 2.12 | 6.20 ± 1.41 | 4.75 ± 0.64 |
| AB | PAW | 226.15 ± 214.04 | 23.40 ± 9.90 | 22.50 ± 8.06 | 6.50 ± 0.28 | 4.20 ± 0.42 |
| AB+PAW | PAW | 320.20 ± 0.00 | 28.70 ± 0.00 | 25.30 ± 0.00 | 4.80 ± 0.00 | 6.20 ± 0.00 |

จาก Figure 5 ซึ่งเป็นแผนภาพแสดงค่าความเข้มแบบสี (heatmap) แสดงการตอบสนองด้านการเจริญเติบโตเชิงสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาของพืชเมล่อนภายใต้สภาวะสารละลายธาตุอาหารและการพ่นทางใบที่แตกต่างกัน (NO RO และ PAW) พบว่า ค่าความเข้มสีที่มากขึ้น (สีเขียวเข้ม) สะท้อนถึงประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ที่สูงขึ้นในแต่ละตัวแปร ในภาพรวม กลุ่มที่ใช้สารละลายธาตุอาหารร่วมกับน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (AB+PAW) และกลุ่ม $Ca(NO_3)_2$ ภายใต้การพ่นด้วยน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา แสดงค่าการเจริญเติบโตสูงสุดในหลายพารามิเตอร์ เช่น ความสูงต้น จำนวนใบ ความยาวใบ และจำนวนข้อ ซึ่งปรากฏเป็นสีเขียวเข้มอย่างเด่นชัด แสดงถึงผลเชิงบวกของทั้งธาตุอาหารและอนุมูลอ่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจนต่อการเจริญเติบโตของพืช ในทางตรงกันข้ามกลุ่มควบคุม (Control; RO) โดยเฉพาะในสภาวะไม่พ่นทางใบ (NO) ให้ค่าพารามิเตอร์ต่ำสุดเกือบทุกเงื่อนไข เช่น ความสูงต้น ขนาดลำต้น จำนวนใบ และจำนวนข้อ ซึ่งแสดงเป็นสีอ่อนในแผนภาพแสดงค่าความเข้มแบบสีสะท้อนถึงการขาดแหล่งธาตุอาหารที่เพียงพอ

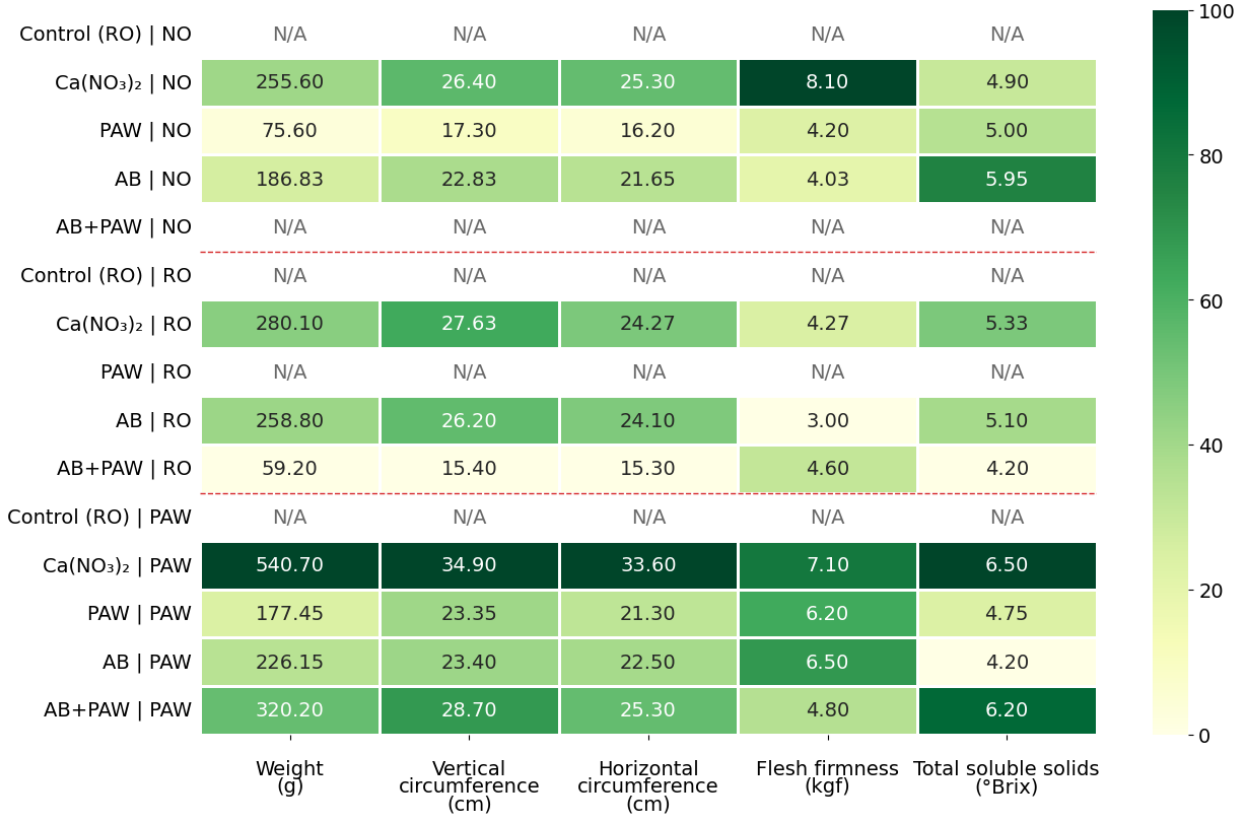



**Figure 6** Heatmap showing the yield and fruit quality performance of melon under different irrigation and foliar spraying treatments. The measured parameters included fruit weight, vertical circumference, horizontal circumference, flesh firmness, and total soluble solids (%Brix). The color scale represents the normalized score within each parameter, while the values displayed in each cell correspond to the mean value for each treatment. Cells labeled N/A indicate treatments with no available fruit or measurement data. Red dashed lines indicate the grouping of foliar spraying treatments for comparison

โดยทั่วไปเมล่อนเป็นพืชที่เหมาะสมต่อการปลูกในช่วงฤดูหนาวถึงต้นฤดูร้อน อากาศแห้ง ความชื้นต่ำ ซึ่งเอื้อต่อการเจริญเติบโต การออกดอก และการพัฒนาผล อย่างไรก็ตามการทดลองนี้เริ่มปลูกในเดือนเมษายน ซึ่งมีอุณหภูมิสูง และระยะติดผลอยู่ในช่วงฤดูฝน ส่งผลให้สภาพแวดล้อมไม่เหมาะสม จึงส่งผลต่อการเจริญเติบโต การออกดอก การติดผล และการพัฒนาผล จาก Table 5 พบว่า ขนาดผลมีขนาดเล็กกว่าปกติ มีความแปรปรวนสูง และมีการเข้าทำลายของโรคและแมลงศัตรูพืช ทำให้บางเงื่อนไขไม่สามารถเก็บข้อมูลผลผลิตได้ครบถ้วน จึงไม่มีรายงานผลในบางชุดการทดลอง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลผลิตภายใต้การให้น้ำทางระบบราก พบว่า ปุ๋ยกลุ่มเคมีได้ผลดีที่สุดทั้งน้ำหนักผล ($Ca(NO_3)_2$ 255.60 กรัม AB 186.83 กรัม) ความแน่นเนื้อ ($Ca(NO_3)_2$ 8.10 กิโลกรัม - แรง (kgf)) และความหวาน (AB 5.95 เปอร์เซ็นต์บริกซ์ (%Brix)) อย่างไรก็ตามกลุ่มน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (PAW) ถึงแม้ว่าผลจะมีขนาดเล็ก ค่าความแน่นเนื้อและความหวานก็อยู่ในเกณฑ์ที่ดี (ความแน่นเนื้อ 4.20 กิโลกรัม - แรง ความหวาน 5.00 เปอร์เซ็นต์บริกซ์)

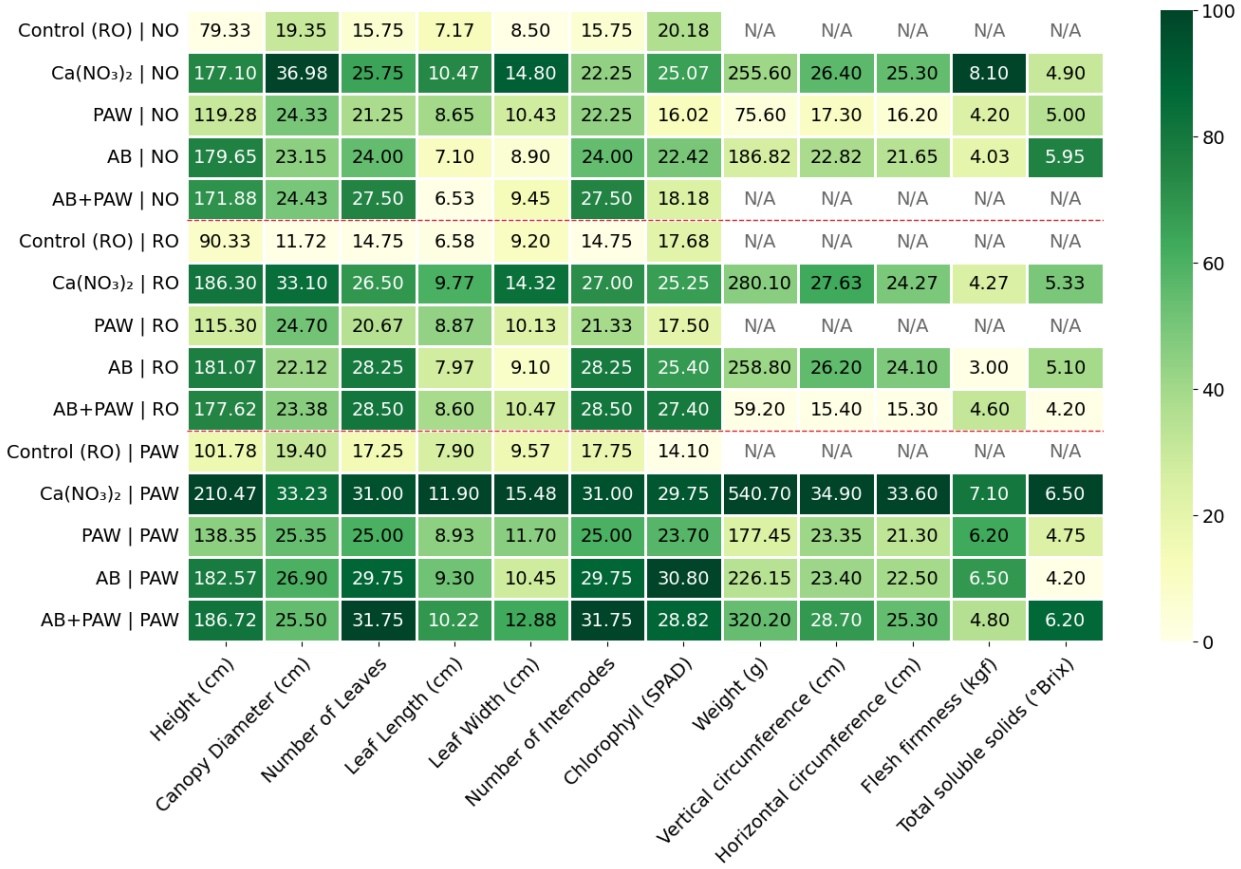



**Figure 7** Two-dimensional hierarchical clustering heatmap showing the standardized variation of fruit quality and vegetative growth parameters across different treatment groups. Rows represent treatment types, while columns represent measured variables including flesh firmness, weight, total soluble solids (% Brix), vertical and horizontal circumference, canopy diameter, leaf length and width, chlorophyll content, plant height, number of leaves, and number of internodes. Color intensity indicates the relative magnitude of each parameter (z-score), and dendrograms illustrate the similarity patterns among treatments and variables

เมื่อพิจารณาการพ่นทางใบด้วยน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส พบว่า ปริมาณน้ำ และความชื้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อ น้ำหนัก ขนาดผล และความหวานของกลุ่ม $Ca(NO_3)_2$ และ กลุ่มปุ๋ย AB ทั้งนี้ปรากฏชัดเจนเมื่อใช้น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาพ่นทางใบในกลุ่ม $Ca(NO_3)_2$ พบว่า น้ำหนักผล ขนาด ความหวานมีค่าสูงที่สุด ในกลุ่ม ปุ๋ย AB และ AB+PAW ก็มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกด้าน ส่วนกลุ่มน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (PAW) ก็พบว่า เห็นผลชัดเจนเมื่อได้รับการพ่นทางใบเสริมด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามเมื่อติดตามผลของเงื่อนไขควบคุม พบว่า เมล่อนที่ไม่ได้รับสารอาหารอื่นเพิ่มเติมจากวัสดุปลูกเดิมนั้น มีการเจริญเติบโตไม่ดีอีกทั้งยังไม่สามารถติดผลได้ การเสริมด้วยการพ่นทางใบด้วยน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมานั้นไม่สามารถกระตุ้นหรือส่งเสริมให้เกิดการติดผลได้เช่นกัน เมื่อพิจารณาร่วมกับ Figure 6 ซึ่งเป็นแผนภาพแสดงค่าความเข้มแบบสี พบว่า กลุ่มปุ๋ยเคมี ($Ca(NO_3)_2$ AB) แสดงค่าความเข้มสีสูงที่สุด เมื่อมองในภาพรวมจะพบว่า การพ่นทางใบด้วยน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมานั้นสามารถส่งเสริมคุณภาพของผลผลิตได้ในทุกด้าน เมื่อพิจารณาด้านความแน่นเนื้อพบจุดที่น่าสนใจ คือ การพ่นด้วยน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมานั้นสามารถส่งเสริมความแน่นเนื้อในภาพรวมของทุกเงื่อนไขได้

เมื่อวิเคราะห์ภาพรวมของ Figure 7 ซึ่งเป็นแผนภาพการจัดกลุ่มแบบลำดับชั้นสองมิติ (2D hierarchical clustering heatmap) พบว่า กลุ่มที่ใช้ปุ๋ยเคมี ได้แก่ กลุ่ม AB และ $Ca(NO_3)_2$ รวมถึงกลุ่มที่ใช้ร่วมกับการพ่นน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา ($Ca(NO_3)_2$-PAW และ AB-PAW) ถูกจัดอยู่ในคลัสเตอร์เดียวกัน โดยมีค่าเชิงบวกในตัวแปรส่วนใหญ่ เช่น ความสูงต้น จำนวนใบ ปริมาณคลอโรฟิลล์ และน้ำหนักผล แสดงถึงการส่งเสริมการเจริญเติบโตและผลผลิตอย่างเด่นชัด ในทางตรงกันข้าม กลุ่ม Control ทุกเงื่อนไข และกลุ่ม PAW จัดอยู่ในคลัสเตอร์ที่มีค่าเชิงลบในหลายตัวแปร เช่น ความสูงต้นต่ำ จำนวนใบต่ำ และผลผลิตต่ำหรือไม่มีข้อมูล สะท้อนถึงการเจริญเติบโตที่จำกัด ผลการทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ชนิดของสารละลายธาตุอาหารที่ให้พืชทางรากเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดการเจริญเติบโตและผลผลิตของเมล่อน ขณะที่น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (PAW) มีบทบาทเป็นปัจจัยเสริมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของธาตุอาหาร โดยเฉพาะเมื่อใช้พ่นทางใบร่วมกับปุ๋ยเคมีทางราก แต่ยังไม่สามารถทดแทนแหล่งธาตุอาหารหลักได้ภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ ซึ่งน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาที่ใช้มีปริมาณความเข้มข้นของไนเตรตน้อยกว่าปุ๋ยกลุ่มอื่น ทำให้ผลทดลองอาจจะยังไม่ชัดเจนในด้านการเปรียบเทียบผลการให้ทางราก

**สรุปผลการวิจัย**

ผลการศึกษาศักยภาพของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาจากระบบอาร์คดิสชาร์จแบบไหลผ่านในการเป็นแหล่งไนโตรเจนทางเลือกสำหรับเมล่อนปลูกแบบไม่ใช้ดิน เปรียบเทียบกับแคลเซียมไนเตรตและปุ๋ยสูตร AB ภายใต้การให้ธาตุอาหารทางรากและการพ่นทางใบ พบว่า ผลของสเปกโทรสโกปียืนยันการเกิดอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจน การถ่ายโอนสู่ของเหลวส่งผลให้น้ำมีไนเตรต และไนไตรต์เพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นเล็กน้อย และค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง แสดงถึงกระบวนการออกซิเดชันของไนโตรเจนและการแตกตัวของน้ำ ด้านการเจริญเติบโตและด้านผลผลิตและคุณภาพผล พบว่า การใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา ($Ca(NO_3)_2$-PAW และ AB-PAW) ให้ผลดีที่สุด แสดงให้เห็นว่าน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมายังไม่สามารถทดแทนแหล่งธาตุอาหารหลักได้ แต่มีบทบาทในการส่งเสริมประสิทธิภาพของธาตุอาหารหลักเมื่อใช้พ่นทางใบร่วมกับปุ๋ยเคมี

**กิตติกรรมประกาศ**

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น PBP-CMU ภายใต้ศูนย์วิจัยฟิสิกส์พลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานดังกล่าวสำหรับการสนับสนุนด้านบุคลากรและเครื่องมือ

**เอกสารอ้างอิง**

Cai, X. and B. Sera. 2026. Multifaceted impacts of plasma-activated water on seed germination and plant development with implications for ecological innovations in agriculture. Plasma Chemistry and Plasma Processing 46(3): 32. Available: https://doi.org/10.1007/s11090-025-10609-5.

Ferreyra, M. G., M. M. Caffaro, B. Santamaría, C. Zilli, A. Hernández, B. L. Fina, A. S. Vélez, K. B. Balestrasse and L. Prevosto. 2025. Plasma-activated water produced by a moderately high energy-efficient 1-liter reactor: Effects on germination and growth of tomato and bell pepper plants. Plants 14(5): 722.

França-Silva, F., F. G. Gomes-Junior, C. H. Q. Rego, A. G. Marassi and A. Tannús. 2023. Advances in imaging technologies for soybean seed analysis. Journal of Seed Science 45: e202345022.

Javed, R., S. Mumtaz, K. Amsalu and E. H. Choi. 2025. Plasma treated water with metal ions enhances Pak Choi growth, salinity tolerance and accumulation of primary metabolites. Fundamental Research 5(3): 1011-1024. Available: https://doi.org/10.1016/j.fmre.2024.06.010.

Jirešová, J., V. Scholtz, J. Julák and B. Sera. 2022. Comparison of the effect of plasma-activated water and artificially prepared plasma-activated water on wheat grain properties. Plants 11(11): 1471. Available: https://doi.org/10.3390/plants11111471.

Korzec, D., F. Freund, C. Bäuml, P. Penzkofer, O. Beier, A. Pfuch, K. Vogelsang, F. Froehlich and S. Nettesheim. 2025. Hybrid dielectric barrier discharge reactor: Production of reactive oxygen-nitrogen species in humid air. Plasma 8(3): 27.

Medeiros, A. D. D., M. S. Martins, L. J. D. Silva, M. D. Pereira, M. J. Zavala-León and D. C. F. S. Dias. 2020. X-ray imaging and digital processing application in non-destructive assessing of melon seed quality. Journal of Seed Science 42: e202042005. Available: https://doi.org/10.1590/2317-1545v42229761.

Olenik, J., V. Shvalya, M. Modic, J. Ekar, J. Kovač, U. Cvelbar and J. L. Walsh. 2023. Plasma-induced interfacial processes in metal halides FTIR gas cell windows. Journal of Analysis and Testing 7(4): 392-404.

Priatama, R. A., H. K. Beak, S. Park, I. Song, S. J. Park, S. B. Kim and Y. K. Lee. 2025. Tomato yield enhancement with plasma-activated water as an alternative nitrogen source. BMC Plant Biology 25: 668. Available: https://doi.org/10.1186/s12870-025-06701-9.

Rathore, V. and S. K. Nema. 2025. A nitrogen alternative: Use of plasma-activated water as nitrogen source in hydroponic solution for radish growth. Plasma Chemistry and Plasma Processing 45: 1103-1123.

Savi, P. J., S. Robertson, A. Mantri, B. A. M. Carciofi, G. A. Annor and C. Nansen. 2025. Plasma-activated water irrigation increases mortality of immature spider mites (*Tetranychus urticae*) on tomato plants. Scientific Reports 15: 22118. Available: https://doi.org/10.1038/s41598-025-05629-2.

Savvas, D. and N. S. Gruda. 2018. Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry: A review. European Journal of Horticultural Science 83(5): 280-293.

Tomeková, J., S. Kyzek, V. Medvecká, E. Gálová and A. Zahoranová. 2020. Influence of cold atmospheric pressure plasma on pea seeds: DNA damage of seedlings and optical diagnostics of plasma. Plasma Chemistry and Plasma Processing 40(6): 1571-1584.

Trunec, D., Z. Navrátil, J. Tomeková, V. Mazánková, S. Ďurčányová and A. Zahoranová. 2022. Chemical composition of gaseous products generated by coplanar barrier discharge in air and $N_2/O_2$ mixtures. Plasma Sources Science and Technology 31(11): 115011.

Ungwiwatkul, S., M. Jaikua, K. Prasertboonyai, P. Thana, A. Tamman and K. Matra. 2025. Plasma-activated municipal wastewater (PAMW): Revolutionizing municipal wastewater into high-value liquid fertilizer for duckweed cultivation through air plasma treatment. Applied Science and Engineering Progress 18(3): 7791.

Wong, K. S., N. S. L. Chew, M. Low and M. K. Tan. 2023. Plasma-activated water: Physicochemical properties, generation techniques, and applications. Processes 11(7): 2213.