

ผลของการฉายแบบลำดับร่วมระหว่างพลาสมาเย็นความดันบรรยากาศและรังสีแกมมาต่อความแปรปรวนของลักษณะปรากฏในเมล่อน (*Cucumis melo* L.)

Effect of Sequential Treatment with Cold Atmospheric Plasma and Gamma Irradiation on Phenotypic Variability in Melon (*Cucumis melo* L.)

สุรีย์พร สราภิรมย์¹ ณัฐสิทธิ์ เจียวกัก¹ ภูวนาท ประดิษฐ์วงษ์¹ ภิญโญ จันทร์เขียว¹ กิรติญา จันทร์ผง¹ พัชรี กองภาค¹ ระพีพรรณ ลือใจ² ปรางณภัส ศิลปเสริฐ³ กสิณา เพียรบำรุงไพร⁴ ธนกฤต เทพโพธา⁴ อรพินธุ์ สฤษดิ์น้ำ⁴ สิทธิเดช ศรีน้อย⁵ และกิตติคุณ พระกระจ่าง^{1*}

Sureeporn Sarapirom¹ Natthasit Chiaokok¹ Phuwanart Pradittawong¹ Pinyo Jankhiao¹ Keratiya Janpong¹ Patcharee Kongpark¹ Rapeepan Luejai² Prangnapat Silapaser³ Kasina Phianbamrungphai⁴ Thankrit Teppota⁴ Orapin Saritnum⁴ Sittidet Srinoi⁵ and Kittikhun Prakrajang^{1*}

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

¹Program in Applied Physics, Faculty of Science, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนาโน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

²Program in Nanoscience and Nanotechnology, Faculty of Science, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290

³ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

³Plasma and Beam Physics Research Facility, Faculty of Science, Chiang Mai University, Muang, Chiang Mai 50200

⁴สาขาวิชาพืชสวน คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

⁴Program in Horticulture, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290

⁵กลุ่มวิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ อำเภอร้องกวาง จังหวัดแพร่ 54140

⁵Program in Division of Basic Science, Maejo University Phrae Campus, Rong Kwang, Phrae 54140

*Corresponding author: k.prakrajang@gmail.com

(Received: 17 February 2026; Revised: 25 May 2026; Accepted: 16 June 2026)

Abstract

This study examined the effects of sequential treatment using cold atmospheric plasma (CAP) and gamma irradiation on phenotypic variability in melon (*Cucumis melo* L.). Gamma irradiation was delivered from a Co-60 source at 200 Gy, while CAP was generated by a gliding arc plasma system (15 W, air, 4 L/min, 2 min). Treatments included single exposures and two sequences: plasma followed by gamma (PG) and gamma followed by plasma (GP). Seed germination was monitored using continuous X-ray imaging for 38 h, and morphological and physiological traits were evaluated at 7, 13, and 16 days after planting. Spectroscopic characterization of the plasma confirmed the generation of reactive oxygen and nitrogen species (RONS) in the gas phase, which were associated with oxidative processes and cellular responses in plant seeds. X-ray imaging during germination for 38 h, along with assessments of seedling morphology and physiology, showed that single treatments (P and G) and gamma irradiation followed by plasma (GP) generally promoted plant growth. Conversely, sequential treatments, particularly plasma followed by gamma irradiation (PG), resulted in

the greatest phenotypic variability. Increased data variability was observed in plant height, stem diameter, leaf length, and leaf width across these treatments, while physiological parameters remained unaffected. These results suggest that plasma-generated reactive oxygen and nitrogen species may enhance oxidative and cellular responses before gamma irradiation, leading to synergistic genetic damage mechanisms between the two methods. The sequential combined treatment, particularly plasma treatment followed by gamma irradiation (PG), is therefore a promising approach for increasing variability in plant height and stem diameter, thereby enhancing the opportunity to obtain diverse traits for plant breeding. In contrast, single treatments or gamma irradiation followed by plasma treatment (GP) were more suitable for promoting plant growth during the early seedling stage.

Keywords: Sequential treatment, cold atmospheric plasma, gamma irradiation, phenotypic variability

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของการฉายแบบลำดับร่วมระหว่างพลาสมาเย็นความดันบรรยากาศและรังสีแกมมาต่อความแปรปรวนของลักษณะปรากฏในเมล่อน (*Cucumis melo* L.) โดยฉายรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดโคบอลต์-60 อัตราปริมาณรังสี 200 เกรย์ต่อชั่วโมง และฉายพลาสมาภายใต้อาร์ค (15 วินาที, อากาศ 4 ลิตร ต่อนาที, 2 นาที) การทดลองประกอบด้วยการฉายแบบเดี่ยว และการฉายแบบลำดับร่วมสองลำดับ ได้แก่ พลาสมาก่อนรังสีแกมมา (PG) และรังสีแกมมาก่อนพลาสมา (GP) ติดตามการงอกของเมล็ดพันธุ์ด้วยการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง 38 ชั่วโมง และประเมินลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาของต้นกล้าที่ระยะ 7 13 และ 16 วันหลังปลูก ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของพลาสมาด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปียืนยันการเกิดอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจนในสภาวะก๊าซ ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการออกซิเดชันและการตอบสนองระดับเซลล์ของเมล็ดพืช ผลการติดตามการงอกของเมล็ดพันธุ์ด้วยการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง 38 ชั่วโมง และผลการประเมินลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาของต้นกล้าที่ระยะ 7 13 และ 16 วันหลังปลูก ผลการทดลองพบว่า การฉายเดี่ยว (P และ G) และการฉายแบบรังสีแกมมาก่อนพลาสมา (GP) มีแนวโน้มส่งเสริมการเจริญเติบโตได้ดี ขณะที่การฉายแบบลำดับร่วมโดยเฉพาะลำดับพลาสมาก่อนรังสีแกมมา (PG) ส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของลักษณะที่ปรากฏในระดับสูงที่สุด โดยพบการกระจายตัวของข้อมูลด้านความสูงต้น เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น ความยาวใบ และความกว้างใบสูงกว่าทุกกลุ่มทดลอง ส่วนผลทางสรีรวิทยาไม่แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ผลดังกล่าวสะท้อนถึงบทบาทของอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจนที่เกิดจากพลาสมา ซึ่งอาจกระตุ้นกระบวนการออกซิเดชันและการตอบสนองระดับเซลล์ ก่อนการได้รับรังสีแกมมา ส่งผลให้เกิดกลไกการเหนี่ยวนำความเสียหายทางพันธุกรรมที่เสริมกันระหว่างสองเทคโนโลยี การฉายแบบลำดับร่วมโดยเฉพาะพลาสมาก่อนรังสีแกมมา (PG) จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการเพิ่มความแปรปรวนของลักษณะความสูง และความกว้างลำต้นเพื่อเพิ่มโอกาสในการพบลักษณะที่หลากหลายในการปรับปรุงพันธุ์พืช ขณะที่การฉายเดี่ยวหรือแบบรังสีแกมมาก่อนพลาสมา (GP) เหมาะสำหรับการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในระยะของต้นระยะแรก

คำสำคัญ: การฉายแบบลำดับร่วม พลาสมาเย็นความดันบรรยากาศ รังสีแกมมา ความแปรปรวนของลักษณะปรากฏ

คำนำ

เมล่อน (*Cucumis melo* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีมูลค่าสูงและมีศักยภาพในการพัฒนาพันธุ์เชิงพาณิชย์ทั้งด้านคุณภาพผลผลิต ความหวาน ความต้านทานโรค และความทนทานต่อสภาพแวดล้อม การปรับปรุงพันธุ์เมล่อนในปัจจุบันดำเนินการผ่านการผสมพันธุ์แบบดั้งเดิม การคัดเลือกสายพันธุ์ และการใช้เครื่องหมายโมเลกุล ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงเพียงลักษณะเฉพาะบางประการในพันธุ์เดิม หรือเมื่อแหล่งยีนลักษณะที่ต้องการไม่พบในธรรมชาติ เทคนิคการชักนำการกลายพันธุ์ถือเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความแปรปรวนทางพันธุกรรม (Spencer-Lopes *et al.*, 2018; Vanmathi *et al.*, 2021; Álvarez-Holguín *et al.*, 2022; Saibari *et al.*, 2023)

การชักนำการกลายพันธุ์ด้วยรังสีแกมมาเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากรังสีแกมมามีพลังงานสูง สามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อสายดีเอ็นเอโดยตรง (direct effect) ผ่านการแตกหักของสายเดี่ยวและสายคู่ และโดยอ้อม (indirect effect) จากการเกิดอนุมูลว่องปฏิกิริยา (reactive species) ภายในเซลล์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม (Kim *et al.*, 2004; Spencer-Lopes *et al.*, 2018) กลไกดังกล่าวเกี่ยวข้องกับการเกิดความเครียดออกซิเดชัน (Oxidative stress) (Dobrynin *et al.*, 2009) และสัญญาณควบคุมภายในเซลล์พืช ซึ่งมีรายงานว่าอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจน (Reactive Oxygen Species; ROS) มีบทบาททั้งในกระบวนการทำลายและการส่งสัญญาณระดับเซลล์ (Dietz *et al.*, 2016) แม้ว่ารังสีแกมมาจะเพิ่มโอกาสในการเกิดพันธุ์กลายได้สูง แต่ในหลายกรณีพบความแปรปรวนน้อย หรือเกิดความเสียหายรุนแรงต่อความมีชีวิตของเมล็ดพันธุ์ ซึ่งส่งผลต่ออัตราการงอกและการรอด (lethal dose 50%) ต่ำ พลาสมาเย็นความดันบรรยากาศเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการเกษตร เนื่องจากสามารถ

สร้างอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจน (Reactive Oxygen Nitrogen Species; RONS) ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับโมเลกุลและกระบวนการทางชีวภาพภายในเซลล์ (Randeniya and de Groot, 2015; Zhou *et al.*, 2020) โดยเฉพาะในระดับโมเลกุล พลาสมาสามารถเหนี่ยวนำการเปลี่ยนแปลงของเยื่อหุ้มเซลล์ การแสดงออกของยีน และระบบเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการงอกและการเจริญเติบโตของพืช (Priatama *et al.*, 2022) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า ปฏิกริยาระหว่างพลาสมา กับพื้นผิวเมล็ดสามารถก่อให้เกิดการปรับเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและกายภาพ เช่น ความสามารถในการดูดน้ำ และการเพิ่มพลังงานพื้นผิว ซึ่งส่งผลต่อการกระตุ้นการงอก (Waskow *et al.*, 2021) กลไกของพลาสมาต่อเมล็ดพืชเกี่ยวข้องกับการเหนี่ยวนำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวเมล็ด การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ และการกระตุ้นสัญญาณชีวเคมีภายในเซลล์ รวมถึงการควบคุมสมดุลของอนุมูลว่องปฏิกิริยา ซึ่งมีบทบาททั้งในด้านการส่งสัญญาณและการก่อความเสียหาย (Zhou *et al.*, 2020; Waskow *et al.*, 2021; Karimi *et al.*, 2024) อย่างไรก็ตามเมื่อประยุกต์ใช้ในพืชซึ่งมีผนังเซลล์หนาและโครงสร้างซับซ้อน พลังงานของพลาสมาเย็นความดันบรรยากาศอาจไม่เพียงพอในการก่อให้เกิดความเสียหายเชิงลึก เว้นแต่จะเพิ่มปริมาณอนุมูลว่องปฏิกิริยาให้สูงขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณอนุมูลว่องปฏิกิริยามากเกินไปอาจก่อให้เกิดความเสียหายจากการสะสมพลังงาน ความร้อน และนำไปสู่การลดความมีชีวิตของเมล็ด (Tomeková *et al.*, 2020) ในทางกลับกันการใช้พลาสมาในระดับปริมาณอนุมูลว่องปฏิกิริยาต่ำ พบว่า สามารถส่งเสริมการงอกของเมล็ดพันธุ์ และเพิ่มระดับอนุมูลว่องปฏิกิริยาภายในเซลล์ ซึ่งอาจเพิ่มโอกาสในการเกิดความแปรปรวนระดับเซลล์และโมเลกุลโดยไม่ทำลายความมีชีวิตของตัวอย่าง (Zhou *et al.*, 2020; Dietz *et al.*, 2016; Shelar *et al.*, 2022)

ด้วยเหตุนี้การผสมผสานเทคนิคพลาสติกมาเข้ากับการฉายรังสีแกมมา โดยพิจารณาปริมาณและลำดับการฉายอย่างเหมาะสม อาจเป็นแนวทางที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างความแปรปรวนทางพันธุกรรมในพืชได้

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคพลาสติกมาเชื่อมร่วมกับรังสีแกมมา ในการเพิ่มความแปรปรวนทางพันธุกรรมของเมล็ดอ่อน โดยเน้นการศึกษาผลของลำดับการฉายพลังงานที่แตกต่างกันต่อการตอบสนองของเมล็ดพันธุ์ ทั้งนี้มีสมมติฐานว่า การกระตุ้นด้วยพลังงานสองรูปแบบที่แตกต่างกันในลำดับที่ต่างกันสามารถก่อให้เกิดกลไกการทำลายระดับโมเลกุลแบบเสริมกัน ส่งผลให้เกิดการกลายพันธุ์ในอัตราที่สูงขึ้นในลำดับถัดไป (Dobrynin *et al.*, 2009; Priatama *et al.*, 2022; Tomeková *et al.*, 2020) โดยมีสมมติฐานเชิงกลไกว่า แม้การฉายรังสีแกมมาจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของเซลล์และทำให้การออกลำง้าอันเนื่องมาจากการทำลายดีเอ็นเอและการรบกวนกระบวนการทางสรีรวิทยา (Kim *et al.*, 2004; Saibari *et al.*, 2023) พลาสติกอาจมีบทบาทเป็นตัวปรับสถานะ (modulator) ที่ช่วยฟื้นฟูหรือกระตุ้นกระบวนการงอกผ่านอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจน ซึ่งมีบทบาทสำคัญในกระบวนการส่งสัญญาณระดับเซลล์ การควบคุมเอนไซม์ และการปรับสภาพพื้นผิวเมล็ด (Dietz *et al.*, 2016; Waskow *et al.*, 2021; Karimi *et al.*, 2024)

ในเชิงลำดับของการให้พลังงาน หากฉายพลาสติกก่อนการฉายรังสีแกมมาคาดว่าจะทำให้เกิดการเตรียมสภาวะภายในเมล็ดพันธุ์ผ่านการสร้างหรือสะสมอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจน ส่งผลให้ระบบชีวภาพมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการออกฤทธิ์ทางอ้อมของรังสี (indirect effect) ที่อาศัยอนุมูลเป็นตัวกลาง (Spencer-Lopes *et al.*, 2018) ดังนั้น การมีอนุมูลอยู่ก่อนอาจเพิ่มโอกาสของการเกิดความเสียหายต่อ

ชีวโมเลกุลโดยตรง (direct effect) โดยเฉพาะต่อดีเอ็นเอ อันนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในการเหนี่ยวนำการกลายพันธุ์ (Dobrynin *et al.*, 2009; Tomeková *et al.*, 2020) ในทางกลับกันหากฉายพลาสติกภายหลังการฉายรังสีแกมมา พลาสติกอาจมีบทบาทในการส่งเสริมการฟื้นตัวของเมล็ดพันธุ์ โดยช่วยเร่งกระบวนการงอกและลดอัตราการตายที่สัมพันธ์กับค่ากึ่งทำให้ตาย (lethal dose 50; LD₅₀) ของรังสี เนื่องจากเมล็ดพันธุ์ที่ได้รับความเสียหายอย่างรุนแรงจากรังสีอาจตายก่อนที่จะแสดงลักษณะการกลายพันธุ์ การให้พลาสติกภายหลังจึงอาจช่วยคงสภาพการมีชีวิตของเมล็ดที่ยังมีศักยภาพ ทำให้สามารถงอกและพัฒนาเป็นต้นกล้าได้ ซึ่งเพิ่มโอกาสในการตรวจพบลักษณะกลายพันธุ์ที่มีคุณค่า (Randeniya and de Groot, 2015; Kavka *et al.*, 2025) การเปรียบเทียบผลของลำดับการให้พลังงานทั้งสองรูปแบบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ทั้งในด้านอัตราการงอก การอยู่รอดของต้นกล้า และประสิทธิภาพในการเหนี่ยวนำการกลายพันธุ์ ซึ่งเป็นองค์ความรู้พื้นฐานสำหรับการพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงพันธุ์พืชแบบผสมผสานให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น (Priatama *et al.*, 2022; Biruntha *et al.*, 2025)

การประเมินทั้งอัตราการงอกและการอยู่รอดของเมล็ดพันธุ์ ภายใต้ผลของการให้พลาสติกและรังสีแกมมา พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลของลำดับการให้พลังงานต่อพลวัตของการงอก (germination dynamics) ในระยะเริ่มต้นได้นำเทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray imaging) มาใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเมล็ดแบบไม่ทำลายตัวอย่าง และดำเนินการบันทึกภาพอย่างต่อเนื่องในช่วง 2 วันแรกหลังการให้พลังงาน ภาพที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยการคำนวณพื้นที่ของเมล็ดและบริเวณเอ็มบริโอจากภาพถ่าย เพื่อใช้เป็นตัวแทนของการงอกตัวของเนื้อเยื่อและความก้าวหน้าของการงอกในระยะเริ่มต้น เพื่อระบุชนิดและบทบาทของสปีชีส์

กัมมันต์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ ได้มีการวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสมาด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการปลดปล่อยแสง (Optical Emission Spectroscopy; OES) และสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) จากนั้นประเมินสภาพทางสรีรวิทยาของต้นกล้าภายหลังการปลูก เพื่อยืนยันการเกิดความแปรปรวนของลักษณะที่ปรากฏ (phenotype) และศักยภาพการกลายพันธุ์ที่เหนี่ยวนำจากการใช้เทคนิคร่วม

อุปกรณ์และวิธีการ

การฉายรังสีแกมมาและพลาสมา

การทดลองนี้ใช้เทคนิคการชักนำการกลายพันธุ์ด้วยรังสีแกมมาและพลาสมาทั้งแบบฉายเดี่ยวและแบบผสมผสาน การฉายรังสีแกมมาดำเนินการด้วยเครื่องฉายรังสีแกมมา (Co-60; Gammacell-200) ที่อัตราปริมาณรังสี 200 เกรย์ต่อชั่วโมง (Gy/hr) (Vanmathi *et al.*, 2021) ส่วนการฉายพลาสมาใช้พลาสมาเย็นความดันบรรยากาศแบบกึ่งอาร์ค (Gliding arc) ที่กำลังไฟฟ้า 15 วัตต์ โดยใช้อากาศเป็นก๊าซทำงานที่อัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที ระยะห่างระหว่างหัวปล่อยพลาสมากับผิวเมล็ด 1 มิลลิเมตร และกำหนดเวลาฉาย 2 นาที

ในการศึกษานี้ได้กำหนดชุดการทดลองเป็น 5 เงื่อนไข เพื่อศึกษาผลของลำดับการให้พลังงานที่แตกต่างกันต่อการเหนี่ยวนำความแปรปรวนทางชีวภาพของเมล็ดพันธุ์ ได้แก่ (1) กลุ่มควบคุม (C: control) (2) การฉายรังสีแบบเดี่ยว (2.1) กลุ่มฉายพลาสมา (P: plasma treatment) (2.2) กลุ่มฉายรังสีแกมมา (G: gamma irradiation) (3) การฉายแบบลำดับร่วม (sequential treatment) (3.1) กลุ่มฉายพลาสมาก่อนแล้วตามด้วยรังสีแกมมา (PG: plasma followed by gamma) และ (3.2) กลุ่มฉายรังสีแกมมาก่อนแล้วตามด้วยพลาสมา (GP: gamma followed by plasma)

คุณสมบัติพลาสมา

งานวิจัยนี้ใช้พลาสมาแบบกึ่งอาร์คที่พัฒนาขึ้นเอง (homemade plasma) จึงจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติของพลาสมา เพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบและพฤติกรรมของพลาสมา ซึ่งมีความสำคัญต่อการอธิบายกลไกอันตรกิริยาระหว่างพลาสมากับเมล็ดพันธุ์ โดยเฉพาะการเกิดและบทบาทของอนุมูลออกซิเจนและไนโตรเจน (RONS: Reactive Oxygen Nitrogen Species) และสปีชีส์กัมมันต์ (active species) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับชีวโมเลกุล ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีการปลดปล่อยแสง (QM-800, Japan) เพื่อวิเคราะห์ชนิดของสปีชีส์ในสถานะกระตุ้น (excited species) จากลักษณะสเปกตรัมการปลดปล่อยแสง และใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (VERTEX 80V, Germany) เพื่อยืนยันและระบุชนิดของสารประกอบทางเคมีและหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาในพลาสมา

การคัดเมล็ดพันธุ์

เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากความไม่สม่ำเสมอของเมล็ดพันธุ์ ได้นำเทคนิคการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ (XR 4.0 Mobile X-ray Lab, PHYWE; ทั้งสแตนด์; 35 กิโลโวลต์, 1 มิลลิแอมแปร์) มาช่วยในการคัดเลือกเมล็ดพันธุ์ก่อนเริ่มการทดลอง และประเมินความสมบูรณ์ของเอ็มบริโอ (Figure 1) โดยเมล็ดพันธุ์ที่มีความผิดปกติภายใน เช่น บริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำหรือมีรอยแตกร้าว (เมล็ดพันธุ์ในวงกลมสีแดง) จะถูกคัดออกจากการทดลอง เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีคุณภาพและสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังใช้การประมวลผลภาพเอกซเรย์แบบสีเทียม (Figure 1b) เพื่อเน้นความแตกต่างของความหนาแน่นภายในเมล็ด ทำให้สามารถตรวจพบความผิดปกติของโครงสร้างที่ไม่สามารถสังเกตได้จากภายนอกได้อย่างชัดเจน ซึ่งช่วยลดความแปรปรวนที่ไม่ได้เกิดจากการทดลอง และเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการศึกษาที่ได้



Figure 1 (a) X-ray images of melon seeds used for pre-selection. Circled seeds were excluded due to internal defects, including low-density tissue (upper) and internal cracking (lower). (b) false-color X-ray images highlighting density variations, enabling clear visualization of internal structural abnormalities not detectable externally

การวัดการเจริญเติบโต

ระยะที่ 1 ในการติดตามการงอกระยะเริ่มต้น เมล็ดพันธุ์ถูกวางในอุปกรณ์การเพาะความงอกที่ออกแบบให้สามารถบันทึกภาพได้โดยไม่รบกวนสภาพแวดล้อม และคงความชื้นประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ (XR 4.0 Mobile X-ray Lab, PHYWE; ทังสเดน; 35 กิโลโวลต์, 1 มิลลิแอมแปร์) ทุก 2 ชั่วโมง ต่อเนื่องเป็นเวลา 38 ชั่วโมง เพื่อสังเกต

การพองตัวของเนื้อเยื่อ การเจริญของเอ็มบริโอ และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ภาพที่ได้จากการถ่ายจะนำมาคำนวณพื้นที่โดยใช้โปรแกรมภาษาไพทอน (Python) ร่วมกับไลบรารี Pandas, Matplotlib, Seaborn และ OpenCV จากนั้นนำไปประมวลผลเป็นแผนภาพกล่อง เพื่อดูอัตราการงอกในระยะเริ่มต้น

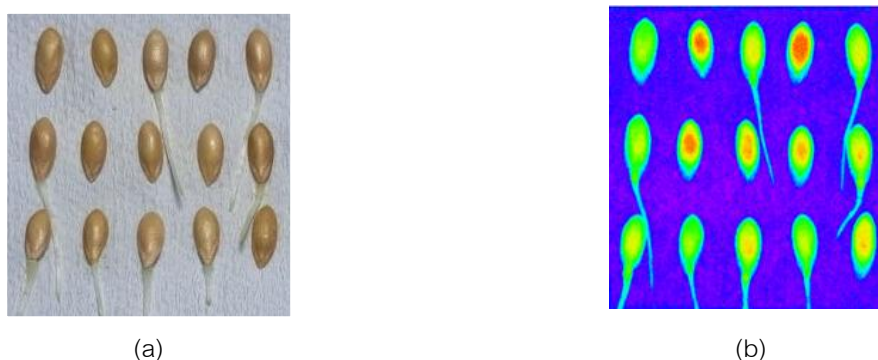


Figure 2 (a) X-ray images of melon seeds (b) false-color X-ray images clearly illustrating differences in area, followed by image area analysis for quantitative evaluation

ระยะที่ 2 หลังจากสิ้นสุดการติดตามการงอก ด้วยภาพถ่ายรังสีเอกซ์ เมล็ดพันธุ์ถูกย้ายลงถาดเพาะ และปลูกภายใต้สภาวะควบคุม เป็นเวลา 16 วันหลังปลูก โดยเริ่มบันทึกข้อมูลเมื่อปรากฏใบจริงใบแรก ซึ่งพบว่า ในวันที่ 7 หลังปลูก ต้นกล้ามีการพัฒนาใบจริงอย่างชัดเจน (Figure 3b) จากนั้นจึงดำเนินการเก็บข้อมูลต่อเนื่อง

ในวันที่ 13 และ 16 หลังปลูก บันทึกลักษณะที่ปรากฏ ทั้งด้านสัณฐานวิทยา ได้แก่ ความสูงต้น เส้นผ่านศูนย์กลาง ลำต้น ความยาวและความกว้างใบ (ดิจิตอลเวอร์เนียร์ คาลิเปอร์, Mitutoyo) และด้านสรีรวิทยา ได้แก่ ค่าสีใบ (L^* a^* b^*) (CR-400, Konica Minolta) และค่าปริมาณ คลอโรฟิลล์ในใบ (SPAD) (SPAD-502, Konica Minolta)



Figure 3 (a) Day 0, seeds after 38 h of imbibition and germination monitoring; (b) Day 7th, seedlings at the first true leaf stage; (c) Day 13th; and (d) Day 16th after transplanting, showing progressive vegetative development and variation in growth

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เพื่อนำข้อมูลไปประเมินระดับความแปรปรวน ที่เกิดจากการชักนำการกลายพันธุ์ และวิเคราะห์ผลการทดลองในภาพรวม การทดลองวางแผนแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ประกอบด้วย 5 ชุดการทดลอง ได้แก่ กลุ่มควบคุม (C) กลุ่มฉาย พลาสมา (P) กลุ่มฉายรังสีแกมมา (G) กลุ่มฉาย พลาสมา ก่อนแล้วตามด้วยรังสีแกมมา (PG) และ กลุ่มฉายรังสีแกมมา ก่อนแล้วตามด้วยพลาสมา (GP) โดยแต่ละชุดการทดลองดำเนินการจำนวน 3 ซ้ำ และใช้ เมล็ดพันธุ์จำนวน 5 เมล็ดต่อซ้ำ ข้อมูลที่ได้ถูกนำมา วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองปัจจัย (two-way ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ ทางสถิติ 0.05

ผลการวิจัยและวิจารณ์

องค์ประกอบของพลาสมา

จาก Figure 4 แสดงผังโครงสร้างของเครื่อง พลาสมาภายใต้การที่พัฒนาขึ้นเอง โดยประกอบด้วย แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ช่องจ่ายก๊าซ และชุดอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับสร้างพลาสมา ซึ่งก่อให้เกิดการคายประจุใน รูปแบบพลาสมาขั้นพลาสมา (transitional plasma) ภายใต้ สภาวะความดันบรรยากาศ ภายในกระบวนการดังกล่าว จะเกิดอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจน (RONS) เช่น อะตอมออกซิเจน (O) อนุมูลไฮดรอกซิล (OH) ไนตริกออกไซด์ (NO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) ซึ่งมีสมบัติออกซิเดชันสูง อนุมูลเหล่านี้สามารถ แพร่กระจายลงสู่พื้นผิวของเมล็ดพืชและเกิดอันตรกิริยากับโครงสร้างชีวโมเลกุล ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ และชีวภาพของเมล็ด เช่น การเปลี่ยนแปลงความชอบน้ำ ของผิวเมล็ด และการกระตุ้นกระบวนการงอกในระยะ เริ่มต้นของเมล็ดพืชได้อย่างมีนัยสำคัญ

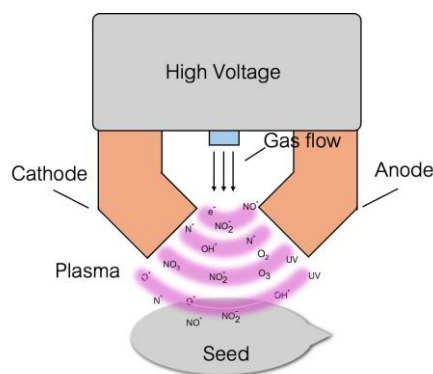


Figure 4 Schematic diagram of the gliding arc plasma system used for seed treatment, illustrating the plasma generation region, and the formation of reactive oxygen and nitrogen species (RONS) interacting with the seed coat

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมการปลดปล่อยแสงของพลาสมา (Figure 5a) ตรวจพบแถบสเปกตรัมที่สองของโมเลกุลไนโตรเจน (SPS: Second Positive System) ของไนโตรเจน (N_2 , 295 - 449 นาโนเมตร) และสเปกตรัมลบที่หนึ่งของไอออนไนโตรเจนโมเลกุล (FNS: First Negative System) ของไอออนไนโตรเจนโมเลกุลบวก (N_2^+ , 355 - 471 นาโนเมตร) สะท้อนการกระตุ้นและไอออไนเซชันของไนโตรเจน แถบไนตริกออกไซด์ (NO) บ่งชี้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างไนโตรเจน (N_2) กับออกซิเจน (O_2) รวมทั้งแถบอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^* , 306 - 312 นาโนเมตร) และเส้นสเปกตรัมของอะตอมออกซิเจนที่ (O , 777 นาโนเมตร) แม้มีความเข้มในระดับต่ำ (Ungwiwatkul *et al.*, 2025) แต่สะท้อนการแตกตัวของออกซิเจน (O_2) และ น้ำ (H_2O) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพลาสมาความดันบรรยากาศที่ก่อให้เกิดสปีชีส์กัมมันต์ได้หลายชนิด (Trunec *et al.*, 2022; Rajan *et al.*,

2023; Dhakal *et al.*, 2023) การตรวจดังกล่าวแสดงถึงการก่อตัวของอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจน อันเป็นตัวกลางสำคัญในการกระตุ้นกระบวนการออกซิเดชันระดับโมเลกุล เมื่อสัมผัสผิวเมล็ด อนุมูลดังกล่าวสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดความเครียดออกซิเดชัน (Oxidative stress) แบบควบคุม ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นผ่านของเปลือกเมล็ด การกระตุ้นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการงอก และอาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับสารเคมีโดยรวมภายในเมล็ดพันธุ์ รวมถึงเอนโดสเปิร์มและเอ็มบริโอ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่ระบุว่าพลาสมาสามารถกระตุ้นการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและสรีรวิทยาของเมล็ดผ่านกลไกของอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจน และการส่งสัญญาณระดับเซลล์ (Zhou *et al.*, 2020; Waskow *et al.*, 2021; Priatama *et al.*, 2022; Karimi *et al.*, 2024; Kavka *et al.*, 2025)

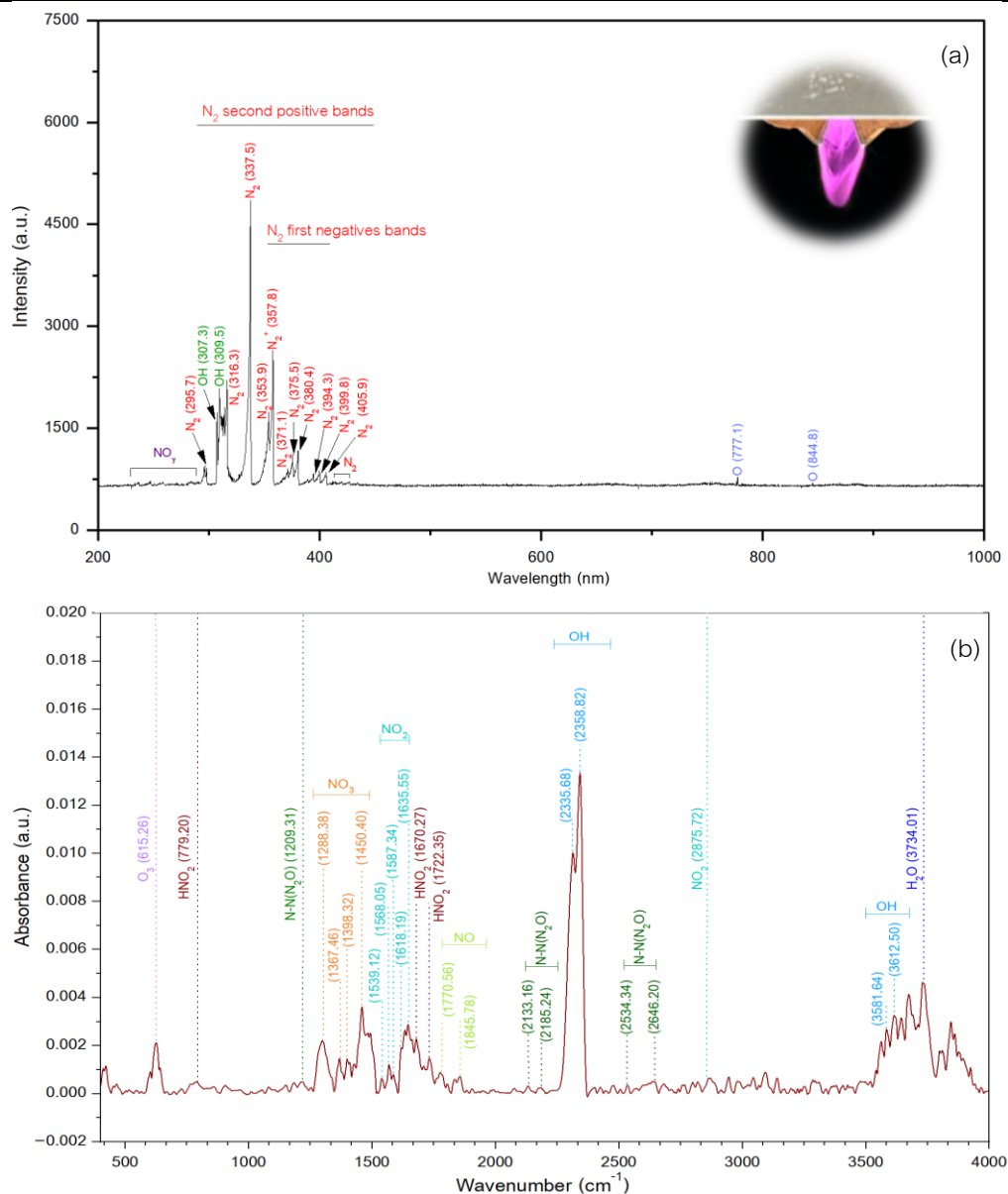


Figure 5 The plasma section (a) the optical emission spectrum of the plasma produced inside the reactor of the flow-through plasma activated water generator; (b) FTIR absorption spectrum of gaseous species generated in the plasma system, showing characteristic absorption bands of NO_x , O_3 , and OH measured using a gas cell configuration

นอกจากนี้ การเกิดไนตริกออกไซด์ (NO) และไฮดรอกซิลไนโตรเจนโมเลกุลบวก (N_2^+) ยังเกี่ยวข้องกับกระบวนการตรึงไนโตรเจนเชิงพลาสมา (plasma-assisted nitrogen fixation) ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรต์ (NO_2^-) บนพื้นผิวเมล็ดและแพร่สู่

สารละลายภายในเมล็ดพันธุ์ จะทำหน้าที่เป็นสัญญาณไนโตรเจนที่ส่งเสริมกระบวนการเมแทบอลิซึมและเร่งการงอก (Rongsangchaicharean *et al.*, 2022; Shelar *et al.*, 2022; Biruntha *et al.*, 2025; Mukherjee *et al.*, 2025)

ผลการวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Figure 5b) แสดงแถบการดูดกลืนที่สัมพันธ์กับหมู่พันธะออกซิเจน-ไฮโดรเจน (O-H) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และโอโซน (O_3) สะท้อนการแตกตัวของ น้ำ (H_2O) และ ออกซิเจน (O_2) ภายใต้พลาสมาพ้องกับประกอบสำคัญ ได้แก่ อนุมูลไฮดรอกซิล (OH^*) โอโซน (O_3) ไนตริกออกไซด์ (NO) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) กรดไนตริก (HNO_2) และไนเตรต (NO_3^-) ผ่านกลไกการกระตุ้นหรือการแตกตัวเป็นไอออนโดยการชนของอิเล็กตรอน (electron impact) และปฏิกิริยาลูกโซ่ของการออกซิเดชัน (oxidation chain)

(Tomeková *et al.*, 2020; Trunec *et al.*, 2022; Rajan *et al.*, 2023; Dhakal *et al.*, 2023; Olenik *et al.*, 2023; Korzec *et al.*, 2025)

การติดตามการงอก

ศึกษาอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ (emerging speed) จากภาพถ่ายรังสีเอกซ์ต่อเนื่องทุก 2 ชั่วโมงจากเวลาเริ่มต้น การงอกเริ่มที่ชั่วโมงที่ 28 จนถึงเวลาก่อนลงปลูกที่ชั่วโมงที่ 38 ผลการติดตามแสดงให้เห็นความแตกต่างของอัตราการงอกและการเพิ่มพื้นที่เมล็ดพันธุ์ระหว่างกลุ่มทดลอง

Table 1 Seed emergence speed based on X-ray image analysis under different irradiation treatments (C = Control; P = Plasma; G = Gamma irradiation; PG = Plasma followed by Gamma; GP = Gamma followed by Plasma)

Treatments	Emerging speed (Pixel/hours)
Control (C)	38.70 ± 20.18b
Plasma (P)	36.66 ± 19.04b
Gamma irradiation	50.53 ± 12.59a
Plasma followed by Gamma (PG)	19.77 ± 11.46c
Gamma followed by Plasma (GP)	35.15 ± 14.78b
F-test	*
CV(%)	44.20

Remarks: The symbols used in the table are defined as follows: (C = Control; P = Plasma; G = Gamma irradiation; PG = Plasma followed by Gamma; GP = Gamma followed by Plasma)

ns = not significantly different

* = significantly different at the 95% confidence level ($p \leq 0.05$)

Mean values followed by the same letter within the same column are not significantly different according to Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at the 95% confidence level

จาก Table 1 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วในการงอกของเมล็ด ทั้งนี้ตัวอักษรภาษาอังกฤษ (a b c) ที่กำกับท้ายตัวเลขและเครื่องหมายดอกจัน (*) ในการทดสอบ F-test บ่งชี้ถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ

$p \leq 0.05$ แสดงให้เห็นว่า กลุ่มฉายรังสีแกมมา (G) มีอัตราการเพิ่มพื้นที่ของเมล็ดที่สูงที่สุด ขณะที่เงื่อนไขจากการฉายด้วยพลาสมาตามด้วยแกมมา (PG) มีค่าต่ำสุด ในขณะที่กลุ่มควบคุม (C) การฉายด้วยพลาสมา (P) และการฉายรังสีแกมมาตามด้วยพลาสมา (GP)

มีอัตราการเพิ่มพื้นที่เมล็ดในระดับกลางและไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่า ชนิดและลำดับของการฉายมีผลต่อการตอบสนองของเมล็ดพันธุ์ในระยะแรกของการงอก อย่างไรก็ตามจาก Figure 6 แสดงให้เห็นถึงขอบเขตของข้อมูล และลักษณะการ

กระจายตัวของข้อมูล พบว่า เมื่อฉายรังสีในทุกเงื่อนไขทำให้เกิดรูปแบบการงอกและแนวโน้มการงอกที่เป็นกลุ่มชัดเจนมากขึ้น บ่งบอกถึงผลที่เกิดขึ้นจากรูปแบบของพลังงานที่ได้รับภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน

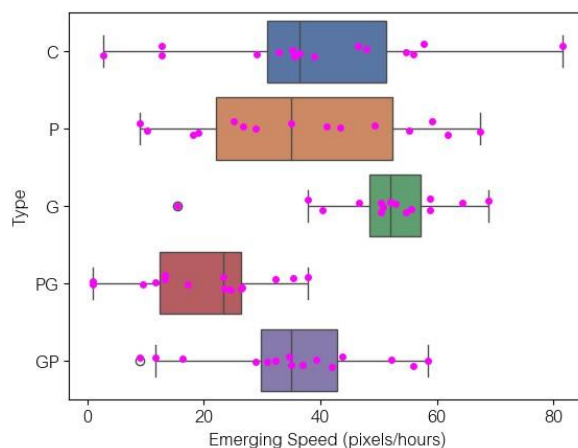


Figure 6 Boxplot of emerging speed (pixels/hour) under different treatments (control (C), plasma treatment (P), gamma irradiation (G), plasma followed by gamma irradiation (PG), and gamma irradiation followed by plasma treatment (GP)). Magenta dots indicate individual seed measurements, showing higher median values in G and the lowest in GP

การเจริญเติบโต ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และ สรีรวิทยา

ภายหลังการติดตามการงอกของเมล็ดพันธุ์ ต้นกล้าถูกย้ายลงปลูกในถาดเพาะภายใต้สภาวะควบคุมเพื่อประเมินผลของเงื่อนไขการฉายรังสีที่แตกต่างกันต่อการเจริญเติบโตในระยะต้น โดยติดตามผลในวันที่ 7 13 และ 16 หลังปลูก ผลการเจริญเติบโตทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาแสดงดัง Table 2 และ Table 3 และเพื่อวิเคราะห์ระดับความหลากหลายและความแปรปรวนของข้อมูล ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของกระบวนการฉายแบบลำดับร่วมในการกระตุ้นความแปรปรวนของลักษณะปรากฏทางชีวภาพ จึงได้นำค่าความแปรปรวนของแต่ละเงื่อนไขมาวิเคราะห์เพิ่มเติมดังแสดงใน Table 4 ทั้งในด้านการกระจายตัวของข้อมูลและความแตกต่างระหว่าง

กลุ่มทดลอง การวิเคราะห์ดังกล่าวช่วยให้เห็นแนวโน้มของการตอบสนองต่อพลังงานที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

จากข้อมูลใน Table 2 พบว่า ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางสัณฐานวิทยามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกเงื่อนไข แสดงให้เห็นว่า พืชสามารถเจริญเติบโตได้อย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการทดลองภายใต้ทุกเงื่อนไขการทดลอง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างแต่ละเงื่อนไข พบว่า กลุ่มฉายรังสีแกมมา (G) มีค่าการเจริญเติบโตสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ขนาดลำต้น 8.29 เซนติเมตร ขนาดใบกว้าง 5.67 เซนติเมตร ยาว 6.59 เซนติเมตร) ส่วนกลุ่มฉายพลาสมา (P) ไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญกับกลุ่มฉายรังสีแกมมา (G) แต่มีค่าความสูง

ต้นสูงสุด (7.36 เซนติเมตร) กลุ่มฉายพลาสมาก่อนแล้วตามด้วยรังสีแกมมา (PG) มีค่าความสูงและความกว้างใบต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และกลุ่มฉายรังสีแกมมาก่อนแล้วตามด้วยพลาสมา (GP) มีค่าความยาวใบต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

กลุ่มฉายพลาสมาตามด้วยรังสีแกมมา (PG) มีค่าการเจริญเติบโตโดยรวมต่ำสุดซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์อัตราการเพิ่มพื้นที่เมล็ดระยะเริ่มต้นที่ต่ำที่สุด ดังแสดงใน

Table 1

Table 2 Mean values of growth, morphological, and physiological parameters of plants under different irradiation treatments at each growth stage (C = Control; P = Plasma; G = Gamma irradiation; PG = Plasma followed by Gamma; GP = Gamma followed by Plasma)

Day	Height (cm)			Bush Diameter (cm)			Leaf Length (cm)			Leaf Width (cm)		
	7	13	16	7	13	16	7	13	16	7	13	16
C	5.18 ± 1.89ab	5.75 ± 1.96ab	6.45 ± 1.96a	6.75 ± 1.44	7.46 ± 1.17	8.19 ± 1.02	2.37 ± 0.39	4.31 ± 0.82	5.32 ± 0.88ab	2.60 ± 0.54	5.07 ± 0.83a	6.19 ± 1.23ab
P	5.81 ± 1.21a	6.41 ± 1.21a	7.36 ± 1.23a	6.74 ± 1.26	7.68 ± 0.93	8.08 ± 0.95	2.23 ± 0.35	4.02 ± 0.77	5.54 ± 0.59ab	2.36 ± 0.42	4.38 ± 0.80ab	6.04 ± 0.70ab
G	5.64 ± 1.62a	6.24 ± 1.29a	6.78 ± 1.02a	6.83 ± 1.63	7.79 ± 1.53	8.29 ± 1.37	2.17 ± 0.42	4.28 ± 0.74	5.67 ± 0.78a	2.42 ± 0.51	5.01 ± 0.93a	6.59 ± 1.01a
PG	3.99 ± 1.62b	4.55 ± 1.76b	5.17 ± 2.08b	5.97 ± 1.83	6.93 ± 1.80	7.31 ± 1.84	1.97 ± 0.95	3.51 ± 1.06	4.88 ± 1.38ab	2.33 ± 0.59	3.73 ± 1.31b	4.99 ± 1.38c
GP	5.22 ± 1.19ab	6.08 ± 1.06a	6.97 ± 1.01a	6.57 ± 1.28	7.39 ± 0.89	7.62 ± 0.90	1.98 ± 0.26	3.56 ± 1.13	4.76 ± 1.03b	2.00 ± 0.44	3.94 ± 1.31b	5.49 ± 1.32bc
F-test	*	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*	*
CV (%)	29.80	25.64	22.99	22.91	17.71	16.01	19.78	23.17	18.28	20.94	23.88	19.63

Remarks: The symbols used in the table are defined as follows: (C = Control; P = Plasma; G = Gamma irradiation; PG = Plasma followed by Gamma; GP = Gamma followed by Plasma)

ns = not significantly different

* = significantly different at the 95% confidence level ($p \leq 0.05$)

Mean values followed by the same letter within the same column are not significantly different according to Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at the 95% confidence level

Table 3 แสดงค่าพารามิเตอร์สีใบในระบบ CIELAB ได้แก่ L* (ความสว่าง), a* (แกนสีเขียว-แดง), b* (แกนสีน้ำเงิน-เหลือง) และค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบภายใต้สภาวะการฉายต่าง ๆ (C P G PG และ GP) พบว่า ค่าที่วัดได้ในทุกช่วงเวลา (วันที่ 7 13 และ 16) ค่า L* ของกลุ่มที่ฉายพลาสมาก่อนแล้วตามด้วยรังสี

แกมมา (PG) ในวันที่ 16 มีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ค่า b* ของกลุ่มที่ฉายพลาสมาก่อนแล้วตามด้วยรังสีแกมมา (PG) ในวันที่ 13 มีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มการทดลองอื่น ๆ ผลดังกล่าวมีแนวโน้มสอดคล้องกับตารางที่ 2 ซึ่งพบว่า กลุ่มที่ฉายพลาสมาก่อนแล้ว

ตามด้วยรังสีแกมมา (PG) มีค่าการเจริญเติบโตต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่า การให้พลาสมาตามด้วยรังสีแกมมาอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสรีรวิทยาและการเจริญเติบโตของพืช

จากข้อมูลใน Table 4 เป็นการนำค่าความแปรปรวนของข้อมูลด้านการเจริญเติบโต สัณฐานวิทยา ค่าสีใบ และค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบที่ได้จากการวัดในแต่ละครั้งมาวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อประเมินว่าเงื่อนไขใดส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของลักษณะพืชสูงที่สุด เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ ความยาวใบ ความกว้างใบ ค่าสีใบ และค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์พหุคูณด้านการเจริญเติบโต และสัณฐานวิทยา พบว่า กลุ่มที่ได้รับการฉายแบบลำดับร่วม

โดยเฉพาะกลุ่มที่ฉายพลาสมาก่อนแล้วตามด้วยรังสีแกมมา (PG) มีค่าความแปรปรวนสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ความสูงต้น เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เงื่อนไข การฉายพลาสมา ก่อนแล้วตามด้วยรังสีแกมมา (PG) ส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของลักษณะการเจริญเติบโตในระดับประชากรมากที่สุด ในขณะที่กลุ่มที่ได้รับการฉายพลาสมาเพียงอย่างเดียว (P) กลุ่มที่ได้รับรังสีแกมมาเพียงอย่างเดียว (G) และกลุ่มที่ฉายรังสีแกมมาก่อนแล้วตามด้วยพลาสมา (GP) มีค่าความแปรปรวนอยู่ในระดับปานกลาง ส่วนกลุ่มควบคุม (C) มีค่าความแปรปรวนโดยรวมค่อนข้างต่ำ แม้ว่าความสูงต้นจะมีค่าความแปรปรวนสูงก็ตาม

Table 3 Leaf color values (L^* a^* b^*) and SPAD under different irradiation treatments (C = Control; P = Plasma; G = Gamma irradiation; PG = Plasma followed by Gamma; GP = Gamma followed by Plasma)

	L^*			a^*			b^*			SPAD		
Treatments	Day 7	Day 13	Day 16	Day 7	Day 13	Day 16	Day 7	Day 13	Day 16	Day 7	Day 13	Day 16
C	34.63 ± 3.81	35.48 ± 2.39	35.88 ± 2.63ab	-5.19 ± 0.82	-5.54 ± 0.73	-5.48 ± 0.66	21.50 ± 5.67	24.80 ± 2.39ab	23.48 ± 2.60	28.16 ± 2.05	26.78 ± 2.37	27.03 ± 2.23
P	35.14 ± 3.29	36.53 ± 1.57	34.52 ± 4.35b	-4.94 ± 0.56	-5.15 ± 0.95	-5.51 ± 0.52	19.11 ± 2.98	23.74 ± 3.41b	23.95 ± 1.59	28.54 ± 1.99	27.31 ± 2.22	25.64 ± 2.40
G	34.83 ± 3.12	35.96 ± 3.13	36.51 ± 2.07ab	-4.73 ± 0.72	-5.63 ± 0.46	-5.46 ± 0.36	20.27 ± 3.35	23.84 ± 2.37b	22.81 ± 1.78	29.88 ± 2.27	28.51 ± 2.88	27.91 ± 3.05
PG	35.10 ± 2.83	36.87 ± 1.96	37.15 ± 2.43a	-5.05 ± 0.07	-5.77 ± 0.71	-5.63 ± 0.57	20.80 ± 1.84	26.52 ± 3.49a	23.90 ± 2.26	30.95 ± 0.64	27.32 ± 3.25	27.36 ± 3.30
GP	33.39 ± 2.89	36.60 ± 3.39	36.48 ± 1.22ab	-4.65 ± 0.99	-5.32 ± 0.52	-5.64 ± 0.29	20.99 ± 3.74	25.36 ± 2.63ab	22.99 ± 1.93	29.16 ± 1.98	27.20 ± 1.58	27.03 ± 2.77
F-test	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
CV (%)	9.49	7.42	7.28	15.94	12.21	8.75	19.60	11.43	8.76	7.13	9.06	10.32

Remarks: The symbols used in the table are defined as follows: (C = Control; P = Plasma; G = Gamma irradiation; PG = Plasma followed by Gamma; GP = Gamma followed by Plasma)

ns = not significantly different

* = significantly different at the 95% confidence level ($p \leq 0.05$)

Mean values followed by the same letter within the same column are not significantly different according to Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at the 95% confidence level

ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า การฉายรังสีแบบ ลำดับร่วม โดยเฉพาะการฉายพลาสมาก่อนแล้วตาม ด้วยรังสีแกมมา (PG) ส่งผลให้มีศักยภาพสูงในการ เพิ่มความแปรปรวนของลักษณะที่ปรากฏ (phenotypic variability) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มโอกาส ในการคัดเลือกสายพันธุ์ใหม่ได้มากกว่า ผลดังกล่าว อาจจะสามารถอธิบายได้เชิงกลไกว่า การฉายพลาสมา บนเมล็ดก่อนให้เกิดการสะสมของอนุมูลว่องปฏิกิริยา ออกซิเจนและไนโตรเจน (Abeysingha *et al.*, 2024) เมื่อนำไปฉายรังสีแกมมาต่อ จึงเพิ่มโอกาสการเกิด อันตรกิริยาระหว่างอนุมูลเหล่านี้กับดีเอ็นเอหรือ

องค์ประกอบชีวโมเลกุลภายในเมล็ดมากขึ้น หากเป็น กลุ่มที่ฉายรังสีแกมมาก่อนแล้วตามด้วยพลาสมา (GP) การเปลี่ยนแปลงของดีเอ็นเอหรือสารชีวโมเลกุล (Le *et al.*, 2022; Sayahi *et al.*, 2024) อาจเกิดขึ้นไปแล้วบางส่วน เมื่อได้รับการฉายพลาสมาต่อ อนุมูลว่องปฏิกิริยา ออกซิเจนและไนโตรเจน ที่เกิดขึ้นซึ่งส่วนใหญ่เป็น ชนิดที่เกี่ยวข้องกับการตรึงไนโตรเจนในบรรยากาศ (Abeysingha *et al.*, 2024) อาจมีบทบาทส่งเสริมการ งอกและการเจริญเติบโตมากกว่าการเพิ่มความ แปรปรวนของลักษณะที่ปรากฏ

Table 4 Statistical analysis of variance in growth and morphological parameters under different irradiation treatments

Treatments	Height (cm)	Bush Diameter (cm)	Leaf Length (cm)	Leaf Width (cm)	L*	a*	b*	SPAD
C	1.94a	1.21bc	0.70	0.87	2.94	0.74	3.55	2.21
P	1.22b	1.05c	0.57	0.64	3.07	0.67	2.66	2.20
G	1.31b	1.51b	0.65	0.82	2.77	0.51	2.50	2.73
PG	1.82a	1.82a	1.13	1.10	2.40	0.45	2.53	2.39
GP	1.09b	1.02c	0.81	1.02	2.50	0.60	2.76	2.11
F-test	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	11.94	12.87	38.08	41.38	34.25	43.80	40.61	32.77

Remarks: The symbols used in the table are defined as follows: (C = Control; P = Plasma; G = Gamma irradiation; PG = Plasma followed by Gamma; GP = Gamma followed by Plasma)

ns = not significantly different

* = significantly different at the 95% confidence level ($p \leq 0.05$)

Mean values followed by the same letter within the same column are not significantly different according to Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at the 95% confidence level

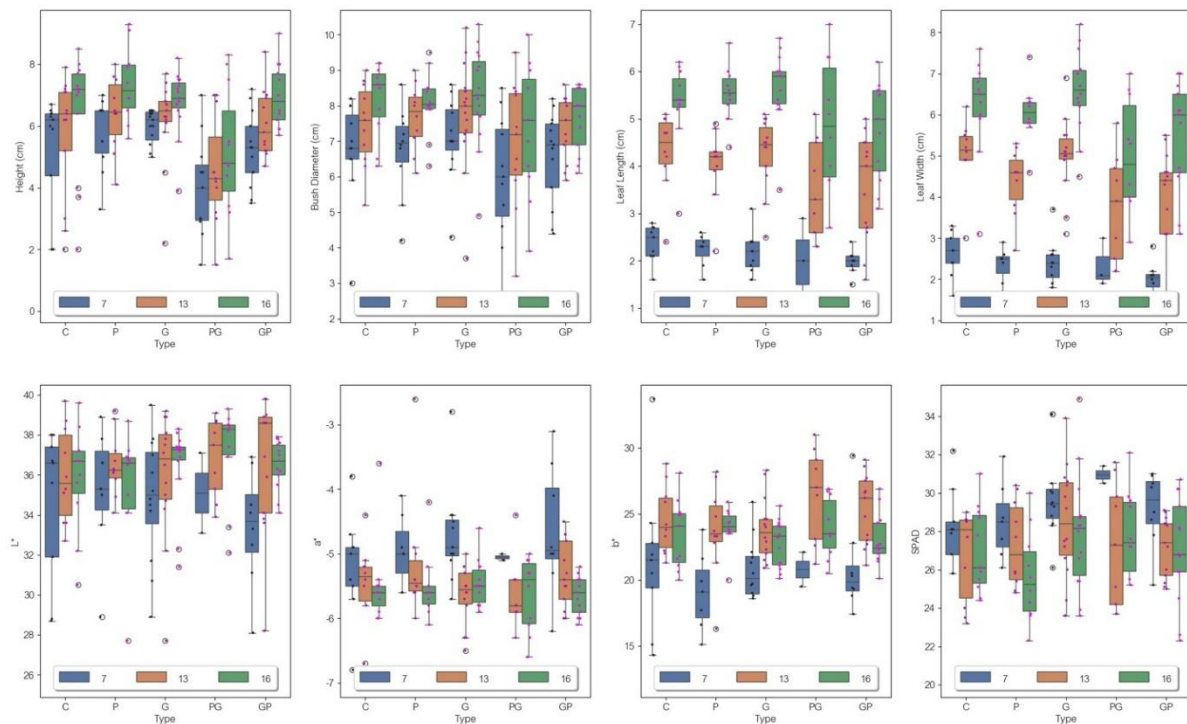


Figure 7 Boxplot representation of morphological and physiological parameters measured at 7 13 and 16 days after transplanting under different treatments (C P G PG and GP). Morphological traits include plant height, bush diameter, leaf length, and leaf width. Physiological parameters include leaf color values (L^* a^* b^*) and chlorophyll content (SPAD). The plots illustrate the distribution, median, and variability of each parameter over time, highlighting differences in growth response and data dispersion among treatments

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษพบว่า การใช้พลาสมาและรังสีแกมมาสามารถเพิ่มความแปรปรวนของลักษณะที่ปรากฏได้ โดยมีอนุมูลว่องปฏิกิริยาออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการงอกและเมแทบอลิซึม กลุ่มฉายเดี่ยว (P และ G) มีการเกาะกลุ่มของข้อมูล ขณะที่การฉายแบบลำดับร่วม โดยเฉพาะพลาสมาตามด้วยรังสีแกมมา (PG) ให้ค่าความแปรปรวนของลักษณะที่ปรากฏสูงที่สุด ในขณะที่การฉายรังสีแกมมาก่อนแล้วตามด้วยพลาสมา (GP) มีค่าการกระจายตัวน้อยกว่า ผลดังกล่าวสะท้อนถึงอิทธิพลของกลไกเชิงกายภาพและเคมีที่แตกต่างกัน

ตามลำดับการกระตุ้น โดยการฉายแบบลำดับร่วมมีศักยภาพในการเพิ่มความแปรปรวน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มโอกาสในการคัดเลือกสายพันธุ์ใหม่และการปรับปรุงพันธุ์พืช อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวในพืชชนิดอื่น รวมถึงการปรับระดับปริมาณรังสีและพารามิเตอร์ของพลาสมาอย่างเป็นระบบ จะช่วยกำหนดสภาวะที่เหมาะสมและเพิ่มความแม่นยำในการประยุกต์ใช้เชิงปฏิบัติในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- Abeyasingha, D. N., H. K. Dhaliwal, L. Du, C. De Silva, K. Szczyglowski, M. S. Roopesh and M. S. Thilakarathna. 2024. The potential of cold plasma-based seed treatments in legume-rhizobia symbiotic nitrogen fixation: A review. *Crops* 4(1): 95-114.
- Álvarez-Holguín, A., C. R. Morales-Nieto, C. H. Avendaño-Arrazate, R. Corrales-Lerma, F. Villarreal-Guerrero and K. D. C. Gil-Vega. 2022. Phenotypic and genetic variability induced by gamma irradiation in Wilman lovegrass *Eragrostis superba* (Peyr.). *Revista Fitotecnia Mexicana* 45(1): 55-64.
- Biruntha, M., C. Menaka, A. Yuvaraja, C. Vanitha and R. Ramjegathesh. 2025. Advancing seed quality through cold plasma technology: A sustainable approach for agricultural enhancement. *Plant Science Today* 12(sp1): 1-11.
- Dhakal, O. B., R. Dahal, T. R. Acharya, P. Lamichhane, S. Gautam, B. Lama, R. Khanal, N. K. Kaushik, E. H. Choi and R. Chalise. 2023. Effects of spark dielectric barrier discharge plasma on water sterilization and seed germination. *Current Applied Physics* 54: 49-58.
- Dietz, K. J., R. Mittler and G. Noctor. 2016. Recent progress in understanding the role of reactive oxygen species in plant cell signaling. *Plant Physiology* 171(3): 1535-1539.
- Dobrynin, D., G. Fridman, G. Friedman and A. Fridman. 2009. Physical and biological mechanisms of direct plasma interaction with living tissue. *New Journal of Physics* 11: 115020.
- Karimi, J., S. A. Bansal, V. Kumar, H. Pasalari, A. A. Badr and Z. J. Nejad. 2024. Effect of cold plasma on plant physiological and biochemical processes: A review. *Biologia* 79(7): 3475-3487.
- Kavka, M., H. Brust, C. Brandt, T. M. C. Nishime, E. Willner, N. Wannicke and K. J. Dehmer. 2025. Influence of cold atmospheric pressure plasma treatment on germination and plant biomass of *Trifolium pratense* L.. *Plos One* 20(9): e0332166.
- Kim, J. H., M. H. Baek, B. Y. Chung, S. G. Wi and J. S. Kim. 2004. Alterations in the photosynthetic pigments and antioxidant machineries of red pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings from gamma-irradiated seeds. *Journal of Plant Biology* 47(4): 314-321.
- 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.
- Le, T. Q. X., L. N. Nguyen, T. T. Nguyen, E. H. Choi, Q. L. Nguyen, N. K. Kaushik and N. T. Dao. 2022. Effects of cold plasma treatment on physical modification and endogenous hormone regulation in enhancing seed germination and radicle growth of mung bean. *Applied Sciences* 12(20): 10308.

- Mukherjee, M., S. P. Dutta, U. Balaji, S. Pandey, K. J. Sankaran and D. Lenka. 2025. Dielectric barrier discharge (DBD) plasma treatment for microbial disinfection and enhanced germination in paddy seeds. *Applied Food Research* 5(1): 100854.
- Olenik, J., V. Shvalya, M. Modic, J. Ekar, J. Kovac, U. Cvelbar and J. L. Walsh. 2023. Plasma-induced interfacial processes in metal halides FTIR gas cell windows. *Journal of Analysis and Testing* 7(21): 392-404.
- Priatama, R. A., A. N. Pervitasari, S. Park, S. J. Park and Y. K. Lee. 2022. Current advancements in the molecular mechanism of plasma treatment for seed germination and plant growth. *International Journal of Molecular Sciences* 23(9): 4609.
- Rajan, A., B. Boopathy, M. Radhakrishnan, L. Rao, O. K. Schlüter and B. K. Tiwari. 2023. Plasma processing: A sustainable technology in agri-food processing. *Sustainable Food Technology* 1(1): 9-49.
- Randeniya, L. K. and G. J. J. B. De Groot. 2015. Non-thermal plasma treatment of agricultural seeds for stimulation of germination, removal of surface contamination and other benefits: A review. *Plasma Processes and Polymers* 12(7): 608-623.
- Rongsangchaicharean, T., S. Srisonphan and D. Onwimol. 2022. Responses of rice seed quality to large-scale atmospheric nonthermal plasmas. *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 42: 1127-1141.
- Saibari, I., S. Barrijal, M. Mouhib, N. Belkadi and A. Hamim. 2023. Gamma irradiation-induced genetic variability and its effects on the phenotypic and agronomic traits of groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *Frontiers in Genetics* 14: 1124632.
- Sayahi, K., A. H. Sari, A. Hamidi, B. Nowruzi and F. Hassani. 2024. Evaluating the impact of cold plasma on seedling growth properties, seed germination, and soybean antioxidant enzyme activity. *BMC Biotechnology* 24: 93.
- Shelar, A., A. V. Singh, P. Dietrich, R. S. Maharjan, A. Thissen, P. N. Didwal, M. Shinde, P. Laux, A. Loch, V. Mathe, T. Jahnke, M. Chaskar and R. Patil. 2022. Emerging cold plasma treatment and machine learning prospects for seed priming: A step towards sustainable food production. *RSC Advances* 12(17): 10467-10488.
- Spencer-Lopes, M. M., B. P. Forster and L. Jankuloski. 2018. *Manual on Mutation Breeding*. 3rd Edition. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Atomic Energy Agency. ISBN 978-92-5-130526-3. Available: <https://www.fao.org/3/I9285EN/i9285en.pdf>
- 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. Durcányová and A. Zahoranová. 2022. Chemical composition of gaseous products generated by coplanar barrier discharge in air and N₂/O₂ 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. [in Thai]
- Vanmathi, S., D. Arulbalachandran and V. Soundarya. 2021. Effects of gamma radiation on quantitative traits and genetic variation of three successive generations of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). Plant Science Today 8(3): 578-589.
- Waskow, A., A. Howling and I. Furno. 2021. Mechanisms of plasma-seed treatments as a potential seed processing technology. Frontiers in Physics 9: 617345.
- Zhou, R., R. Zhou, P. Wang, Y. Xian, A. Mai-Prochnow, X. Lu, P. J. Cullen, K. Ostrikov and K. Bazaka. 2020. Plasma activated water (PAW): Generation, origin of reactive species, and biological applications. Journal of Physics D: Applied Physics 53(30): 303001.