อิทธิพลของโคโรนาดิสชาร์จแบบมีฉนวนคั่นต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้ากะหล่ำปลีแดง

The impact of dielectric barrier corona discharges on growth of red cabbage sprout

เจนจิรา ทิวัฑฒานนท์, คุณาสิน ทองเสน, ธนธรณ์ วิจิตรกูล, อาทิตยา พ่วงเงิน,

ณภัทร จาตุพลัด, จุฑามณี ภูโนนทา และ คณิศร์ มาตรา*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ *khanit@g.swu.ac.th.

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของโคโรนาดิสชาร์จแบบมีฉนวนคั่นต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้ากะหล่ำปลีแดง เครื่องกำเนิดพลาสมาได้ถูกออกแบบมาเพื่อกระตุ้นเมล็ดกะหล่ำปลีแดงด้วยพลาสมาในระยะเวลาที่แตกต่างกัน (15, 30, 45 และ 60 วินาที) ที่ระดับแรงดันและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จค่ายอดคร่อมพลาสมาที่ 12 kV_{peak} และ 5-14 mA_{peak} ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเมล็ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมาแสดงความสามารถในการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นและลำต้นที่ยาวขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม โดยมีอัตราการงอกที่แตกต่างกันเล็กน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการบำบัดด้วยพลาสมา 15 วินาทีให้การตอบสนองการเจริญเติบโตที่ดีที่สุด ซึ่งมีความยาวลำต้นเฉลี่ย 4.35 เซนติเมตร และยาวกว่ากลุ่มควบคุม 1.12 เท่า และความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้น 1.36 เท่า

คำสำคัญ: โคโรนาดิสชาร์จ, ดิสชาร์จข้ามฉนวน, กะหล่ำปลีแดง

Abstract

This paper investigates the effects of dielectric barrier corona discharges on the growth of red cabbage sprouts. A custom plasma generator was designed to treat red cabbage seeds with plasma for different durations (15, 30, 45, and 60 seconds) at peak electrical discharge voltage and current across plasma at 12 kV_{peak} and 5-14 mA_{peak}, respectively. The experimental results revealed that plasma-treated seeds exhibited enhanced water absorption capacity and elongated stems compared to the control group, with minor variations in the germination rate. Notably, the 15-second plasma treatment produced the most remarkable growth response, leading to an average stem length of 4.35 cm – 1.12 times longer than the control group – and a 1.36 times higher water-holding capacity.

Keyword: corona discharge, dielectric barrier discharge, red cabbage

1. บทนำ

เทคโนโลยีพลาสมา (plasma technology) ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในด้านการเกษตร เช่น การปรับปรุงพื้นผิวเมล็ด และการเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของพืช [1]–[5] เป็นต้น เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีความปลอดภัยต่อการใช้งาน หลักการสร้างพลาสมาโคโรนาดิสชาร์จ (corona discharge) และดิสชาร์จข้ามฉนวนหรือดิสชาร์จแบบมีฉนวนคั่น (dielectric barrier discharge, DBD) ได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาสร้างพลาสมาในสภาวะบรรยากาศสำหรับประยุกต์เพื่อการปรับปรุงทางการเกษตร เนื่องจากโคโรนาดิสชาร์จนั้นสามารถเกิดได้ง่ายที่สภาวะบรรยากาศเนื่องจากขั้วอิเล็กโทรดปลายแหลมที่นิยมใช้ในการสร้างโคโรนาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากันนั้นจะเกิดความเครียดไฟฟ้าที่สูงกว่าอิเล็กโทรดแบบระนาบที่นิยมใช้กันในสมัยก่อน การนำเอาเทคนิคดิสชาร์จแบบมีฉนวนคั่นมาประยุกต์ใช้จะสามารถช่วยให้เกิดพลาสมาได้สม่ำเสมอและสร้างอนุมูลอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากการเกิดไมโครดิสชาร์จความถี่สูงขณะเกิดพลาสมา ทั้งนี้ชิ้นงานยังไม่สัมผัสกับอิเล็กโทรดตัวนำโดยตรงเนื่องจากมีฉนวนคั่นอยู่ ซึ่งสามารถช่วยลดโอกาสการเกิดสปาร์คดิสชาร์จไปจนถึงการเกิดอาร์คไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่ง [6-7]

ดังนั้นบทความนี้จึงสนใจศึกษาอิทธิพลของโคโรนาดิสชาร์จแบบมีฉนวนคั่นต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้ากะหล่ำปลีแดง โดยได้ทำการออกแบบเครื่องกำเนิดพลาสมาโดยเลือกใช้แผ่นระบายความร้อนฮีทซิงค์ (heat sink) ซึ่งมีครีบระบายความร้อนเป็นซี่ขนาดเล็กและมีการจัดวางเป็นอาเรย์อย่างสม่ำเสมอมาใช้เป็นแผ่นอิเล็กโทรดตัวนำ เพื่อช่วยลดปัญหาอันเนื่องจากขั้วอิเล็กโทรดแบบเข็มนั้นเกิดการสึกกร่อนได้ง่ายและการจัดเรียงให้มีความสม่ำเสมอทำได้ค่อนข้างยาก ในส่วนของชั้นฉนวนได้เลือกใช้แผ่นเทฟลอน และใช้หม้อแปลงป้ายนีออน (neon sign transformer) ซึ่งราคาไม่สูง และหาได้ง่ายในประเทศไทยนำมาใช้ในการสร้างโคโรนาดิสชาร์จแบบมีฉนวนคั่น จากนั้นจะได้เสนอการศึกษาลักษณะทางไฟฟ้าของแรงดันและกระแสดิสชาร์จ รวมถึงผลการศึกษาผลกระทบของพลาสมาต่อการเจริญของเมล็ดกะหล่ำปลีแดง ในส่วนของความสามารถในการดูดซึมน้ำ อัตราการงอก และความยาวลำต้นของต้นกล้ากะหล่ำปลีแดง

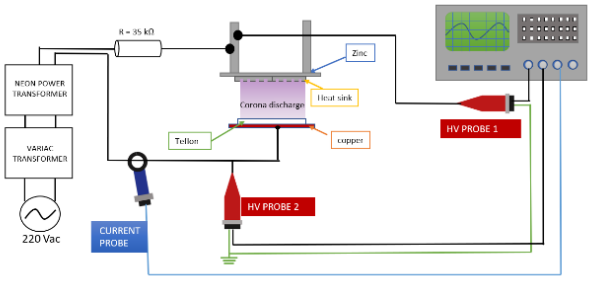
available online January 1, 2023.
*Corresponding author: คณิศร์ มาตรา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (E-mail: khanit@g.swu.ac.th)

2. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 อุปกรณ์และวิธีการ

รูปที่ 1 แสดงภาพวาดเครื่องกำเนิดพลาสมาโคโรนาดิสชาร์จแบบมีฉนวนคั่น ตัวโมเดลจะประกอบไปด้วย ขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว โดยขั้วหนึ่งคือ แผ่นฮิทชิงก์ขนาดกว้าง 90 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร สูง 15 มิลลิเมตรยึดติดกับน็อตทั้ง 4 มุม โดยน็อตจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางนำไฟฟ้าเข้าสู่แผ่นฮิทชิงค์ อีกขั้วหนึ่งคือแผ่นทองแดงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ยาวด้านละ 10 เซนติเมตร ที่ยึดติดอยู่ใต้แผ่นฉนวนเทฟลอนมีความหนา 1 มิลลิเมตร ทำหน้าที่เป็นที่วางเมล็ดกะหล่ำปลีแดง โดยระยะห่างระหว่างผิวบนของฉนวนเทฟลอนถึงปลายครีบแผ่นฮิทชิงค์มีระยะ 4 มิลลิเมตร เพื่อที่จะทำการสร้างพลาสมา ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงจากหม้อแปลงป้ายนีออน รุ่น NP-12000-30 ซึ่งให้แรงดันเอาท์พุทสูงถึง 15 กิโลโวลต์ โดยใช้หม้อแปลงปรับค่าได้ รุ่น SB-15 ขนาดกำลัง 3 กิโลโวลต์แอมป์ เพื่อใช้ในการปรับค่าแรงดันขาเข้าแก่หม้อแปลงป้ายนีออน โดยที่ขาออกด้านหนึ่งของหม้อแปลงป้ายนีออนจะต่ออนุกรมกับตัวต้านทานเพื่อใช้ในการจำกัดกระแสในระบบขนาด 35 กิโลโอห์ม 700 วัตต์ และเชื่อมต่อกับขั้วอิเล็กโทรดแผ่นฮิทชิงค์ ในขณะที่ขาออกอีกด้านต่ออยู่กับแผ่นอิเล็กโทรดทองแดง

เพื่อศึกษาลักษณะทางไฟฟ้าของพลาสมา ใช้ออสซิลโลสโคป Teledyne LeCroy, Wave Runner 8208HD โดยใช้หัววัดแรงดันสูง (High voltage probe) PINTEK HVP-9pro และ PINTEK HVP-28HF เพื่อวัดแรงดันคร่อมอิเล็กโทรด ในขณะที่แรงดันดิสชาร์จจะใช้หัววัดกระแส (Current Probe) Pearson Electronics Model 411C โดยวิเคราะห์องค์ประกอบของพลาสมาโดยเครื่อง ซีซีดี สเปกโตรมิเตอร์ (CCD spectrometer , Newport 71SI00087)



รูปที่ 1 เครื่องกำเนิดพลาสมาโคโรนาดิสชาร์จแบบมีฉนวนคั่น

2.2 กระบวนการปรับปรุงเมล็ดกะหล่ำปลีแดงด้วยการฉายพลาสมา

ทำการคัดเลือกเมล็ดกะหล่ำปลีแดงในสภาพสมบูรณ์ จำนวนกลุ่มการทดลองละ 30 เมล็ด และชั่งน้ำหนักผ่านเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อซาร์โทเรียส (Sartorius) รุ่น BSA Series Balances จากนั้นนำไปกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นระยะเวลา 0 (กลุ่มควบคุม) 15, 30, 45 และ 60 วินาที ที่ระดับแรงดันขาเข้าของหม้อแปลงนีออน 140 โวลต์ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักเมล็ดหลังถูกกระตุ้น ก่อนนำไปศึกษาต่อในหัวข้อ 2.3

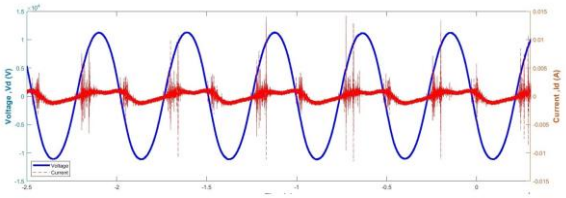
2.3 การศึกษาดูดซึมน้ำของเมล็ดพันธุ์กะหล่ำปลีแดงและวิธีการปลูก

นำเมล็ดกะหล่ำปลีแดงในข้อ 2.2 ไปแช่ในน้ำประปา เป็นระยะเวลาทั้งหมด 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการซับเมล็ดให้แห้งและทำการชั่งน้ำหนักด้วย เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ทำการเปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังเพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซึมของเมล็ด จากนั้นนำเมล็ดไปแช่น้ำประปาต่อเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำเมล็ดวางลงบนแผ่นกระดาษแช่น้ำในจานเพาะเชื้อ ทำการบ่มเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงในที่มืดมีฝาปิดครอบ ทำการรดน้ำเมล็ดกะหล่ำปลีแดงวันละ 2 ครั้ง ครั้งละ 10 มิลลิลิตร เป็นเวลา 9 วัน โดยในวันที่ 5 จะนำถาดเพาะเมล็ดออกมาไว้ที่สภาวะบรรยากาศ ทำการสังเกตและบันทึกผลจำนวนอัตราการงอก ความยาวของลำต้น ทั้งนี้การทดลองได้มีการทำซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อการคำนวณทางสถิติด้วยวิธี one-way ANOVA

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

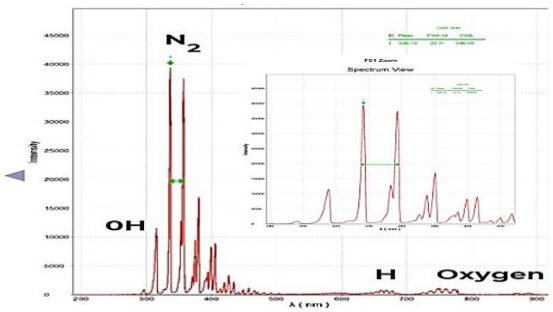
3.1 ลักษณะทางไฟฟ้าและทางแสงของพลาสมา

ลักษณะไฟฟ้าของพลาสมาโคโรนาดิสชาร์จแบบมีฉนวนคั่นในงานวิจัยนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2 ในขณะจ่ายแรงดันขาเข้า 140 V_{rms} ให้กับหม้อแปลงไฟฟ้านีออนซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทานจำกัดกระแสก่อนเข้า ทำให้ได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จค่ายอดตกคร่อมพลาสมาประมาณ 12 kV_{peak} และ 5-14 mA_{peak} ตามลำดับ ซึ่งมีความถี่ของแรงดันประมาณ 20 kHz จากรูปจะพบว่าที่ขาขึ้นและขาลงของแรงดันจะมีกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จพุ่งขึ้นเนื่องจากการเกิดไมโครดิสชาร์จนั่นเอง โดยที่ขนาดความกว้างพัลส์ของกระแสจะอยู่ในช่วง 0.1 ไมโครวินาที



รูปที่ 2 ลักษณะไฟฟ้าของพลาสมา

จากการวัดผลสเปกโทรสโกปีการปล่อยแสง (optical emission spectroscopy, OES) ในขณะสร้างพลาสมา จะพบพีคของสารอนุมูลอิสระที่มีประโยชน์ต่อการเกษตรหลายชนิด จากรูปที่ 3 จะแสดงพีคในกลุ่มของไนโตรเจน (N_2) คือ N_2 second positive system ที่ความยาวคลื่น 336–381 นาโนเมตร ในขณะที่ N_2 first positive system ที่ความยาวคลื่นในช่วง 398 – 401 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังพบพีคของอนุมูลอิสระในกลุ่มไฮดรอกซิลที่ 309.6 นาโนเมตร อะตอมที่ตื่นตัวของออกซิเจน (excited O) ที่ความยาวคลื่นในช่วง 629 – 811 นาโนเมตร และพบ Hα ที่ 656.28 นาโนเมตร โดยสารอนุมูลอิสระเหล่านี้จะมีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นเมล็ดพืชและสร้างสารสำคัญอื่น ๆ อีก เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ไนเตรต (NO_3^-) ไนไตรท์ (NO_2^-) โอโซน (O_3) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยสารเคมีสองชนิดหลังยังมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ที่เมล็ดอีกด้วย [1-5, 8]

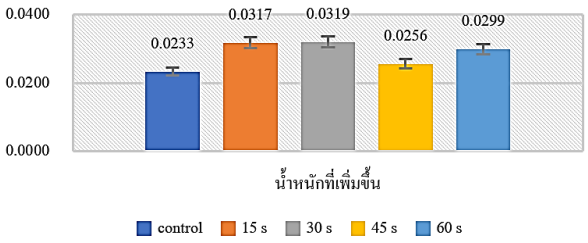


รูปที่ 3 สเปกโทรสโกปีการปล่อยแสง (The optical emission spectroscopy, OES) ของพลาสมาโคโรนาดิสชาร์จแบบมีฉนวนคั่น

3.2 อิทธิพลของพลาสมาต่อเมล็ดกะหล่ำปลีแดง

3.2.1 การดูดซึมน้ำของเมล็ดพันธุ์กะหล่ำปลีแดง

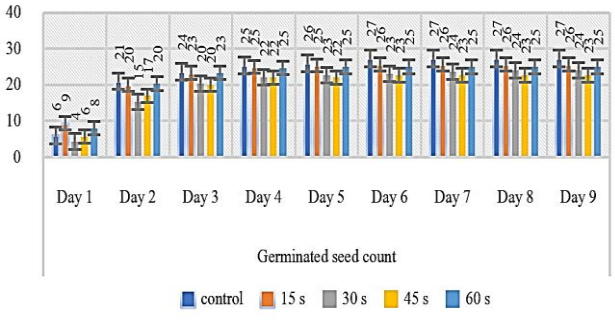
การเก็บผลการดูดซึมน้ำทำได้โดยการชั่งน้ำหนักของเมล็ดพันธุ์กะหล่ำปลีแดงก่อนที่นำไปแช่น้ำ และชั่งน้ำหนักอีกครั้งหลังจากแช่น้ำไปแล้ว 1 ชั่วโมง โดยผลของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจะแสดงดังรูปที่ 4 โดยพบว่าเมล็ดกะหล่ำปลีแดงที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมาจะมีความสามารถในการดูดซึมได้ดีกว่ากลุ่มควบคุมทุกกรณี ซึ่งกลุ่มที่ดีที่สุดพบในกลุ่มที่ทำการกระตุ้นเป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งสามารถดูดซึมได้มากว่ากลุ่มควบคุม 1.37 เท่า



รูปที่ 4 การดูดซึมน้ำของกลุ่มการทดลองเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม

3.2.2 อัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์กะหล่ำปลีแดง

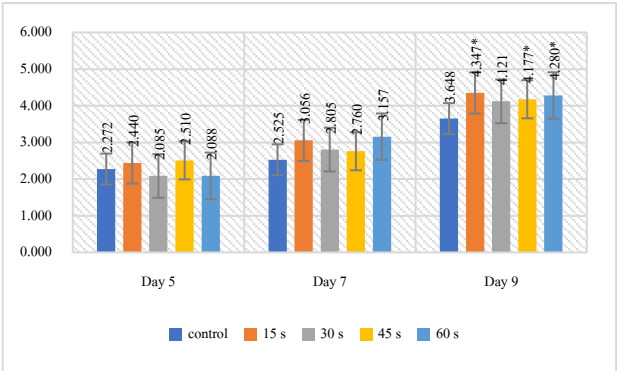
สำหรับวิธีการนับจำนวนการงอกของเมล็ดหลังปลูก จะนับโดยสังเกตจากต้นที่งอกขึ้นเหนือผิวกระดาษทิชชู่ ซึ่งอัตราการงอกของเมล็ดที่ผ่านการฉายพลาสมาเป็นระยะเวลา 9 วัน (216 ชั่วโมง) จะแสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งจะพบว่าอัตราการงอกในแต่ละกลุ่มนั้นไม่ค่อยแตกต่างกัน โดยที่กลุ่มควบคุมมีอัตราการงอกเฉลี่ยสูงสุดที่ 27 เมล็ด



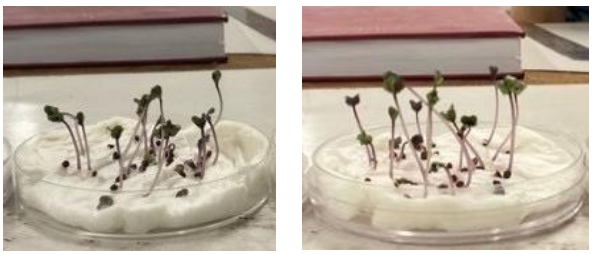
รูปที่ 5 อัตราการงอกของเมล็ดที่ผ่านการฉายพลาสมาเทียบกับกลุ่มควบคุม

3.3.3 ความยาวเฉลี่ยลำต้นของต้นกะหล่ำปลีแดง

ในส่วนของการวัดความยาวของลำต้นนั้นจะทำการวัดในวันที่ 5, 7 และ 9 หลังจากที่ทำการเพาะปลูก โดยจะทำการวัดจากผิวกระดาษทิชชู่ถึงโคนของใบ โดยข้อมูลส่วนสูงของต้นกะหล่ำปลีแดงจะแสดงดังรูปที่ 6 จากรูปจะเห็นได้ชัดว่าส่วนสูงของต้นอ่อนกะหล่ำปลีแดงที่เพาะจากเมล็ดที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาจะมีความยาวเฉลี่ยที่สูงกว่ากลุ่มควบคุม ซึ่งจากผลวิเคราะห์ทางสถิติที่ $p<0.05$ จะพบว่า เมล็ดกะหล่ำปลีแดงถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นเวลา 15, 45 และ 60 วินาที มีความยาวเฉลี่ยของต้นอ่อนที่สูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ โดยกลุ่มที่มีค่าความยาวเฉลี่ยลำต้นสูงสุดจะพบที่เมล็ดที่ถูกกระตุ้นเป็นเวลา 15 วินาที ซึ่งมีความยาวเฉลี่ยที่ 4.35 เซนติเมตร ซึ่งสูงกว่ากลุ่มควบคุม 1.12 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 ความยาวเฉลี่ยของลำต้นที่ผ่านการฉายพลาสมาเทียบกับกลุ่มควบคุม



AVG Height = 3.65 cm

ก)

AVG Height = 4.35 cm

ข)

รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างรูปต้นอ่อนกะหล่ำปลีแดงของ ก) กลุ่มควบคุม และ ข) กลุ่มที่กระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นเวลา 15 วินาที

จากผลการเจริญเติบโตของเมล็ดพืชกะหล่ำปลีแดงข้างต้น จะเห็นได้ว่ากลุ่มที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมามีอัตราการงอกที่ต่ำกว่ากลุ่มควบคุมเล็กน้อย เนื่องจากการฉายพลาสมานั้นอาจก่อให้เกิดความร้อนสูงขึ้นที่เมล็ด หากว่าเมล็ดมีขนาดใหญ่ หรือ สูงจากพื้นมากกว่าเมล็ดอื่น ๆ จะทำให้พลาสมาสัมผัสที่เมล็ดนั้น ๆ มากกว่าและต่อเนื่องกว่า ซึ่งจะก่อให้เกิดความร้อนสะสมได้ และนำไปสู่ความเสียหายของเมล็ดพืชหากมีความร้อนสะสมที่เมล็ดเป็นเวลานาน ๆ ดังจะสังเกตได้จากการที่อัตราการงอกของกลุ่มที่มีระยะเวลาในการถูกกระตุ้นที่นานขึ้นจะมีแนวโน้มอัตราการงอกที่น้อยกว่า แนวสมมติฐานนี้ มาจากข้อสังเกตอย่างชัดเจนบนเมล็ดที่

ไม่งอกเนื่องจากมีรอยดำคล้ายรอยไหม้อยู่ อย่างไรก็ตามการทดลองพบว่าการกระตุ้นเมล็ดพืชด้วยพลาสมาสามารถเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการสลายตัวของชั้นไขมันและเยื่อหุ้มเซลล์ที่อยู่รอบ ๆ ผิวเมล็ดขณะที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา ทำให้น้ำและสารอาหารซึมผ่านได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ พลาสมายังส่งผลกระทบต่อเส้นทางการส่งสัญญาณ (signaling) ที่ซับซ้อนในเมล็ดพืช ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของ DNA กิจกรรมของเอนไซม์ ความสมดุลของฮอร์โมน และความต้านทานต่อความเครียดภายในเมล็ดพืช ซึ่งการเปลี่ยนแปลงข้างต้นนี้ล้วนส่งผลต่อกลไกควบคุมการงอกและการเจริญเติบโตของเมล็ด [1-5, 8]

4. สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของโคโรนาดิสชาร์จแบบมีฉนวนคั่นต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้ากะหล่ำปลีแดงพบว่า ผลการเจริญเติบโตของต้นอ่อนกะหล่ำปลีแดงที่เพาะจากเมล็ดกะหล่ำปลีแดงที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมานั้นเติบโตได้ดีกว่ากลุ่มควบคุมในช่วงหลังการปลูกวันที่ ๑ อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามในส่วนอัตราการงอกของกลุ่มที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาจะต่ำกว่ากลุ่มควบคุมเล็กน้อยเนื่องจากความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นขณะถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าหากพลาสมามีการควบคุมในเงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสมจะสามารถช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของต้นกล้าที่เพาะจากเมล็ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เอกสารอ้างอิง

[1] T. Ohta, Cold Plasma in Food and Agriculture Chapter 8 - Plasma in Agriculture, 1st ed. Reading, pp. 205-221, 2016. [E-book] Available: ACADEMIC PRESS.

[2] J. S. Chang, P. A. Lawless, and T. Yamamoto, “Corona discharge processes,” IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 19, no. 6, pp. 1152-1166, 1991, doi: 10.1109/27.125038

[3] K. Matra, “Non-thermal Dielectric Barrier Discharge Generator,” in Procedia Computer Science, 2016, vol. 86, pp. 313–316, doi: 10.1016/j.procs.2016.05.085.

[4] S. Sumariyah, “Comparison between corona and dielectric barrier discharges plasma using of pin to single and dual ring electrodes configuration,” Materials Science and Engineering, 2018, vol. 434, pp. 012024, doi: 10.1088/1757-899X/434/1Process. Polym., vol. 16, no. 3, pp. 1–14, 2019, doi: 10.1002/ppap.201800131.

[5] K. Matra, “Non-thermal Plasma for Germination Enhancement of Radish Seeds,” in Procedia Computer Science, 2016, vol. 86, pp. 132–135, doi: 10.1016/j.procs.2016.05.033.

[6] K. Ollegott, P. Wirth, C. Oberste‐Beulmann, P. Awakowicz, and M. Muhler, “Fundamental Properties and Applications of Dielectric Barrier Discharges in Plasma‐Catalytic Processes at Atmospheric Pressure,” Chemie Ing. Tech., vol. 92, no. 10, pp. 1542–1558, Oct. 2020, doi: 10.1002/cite.202000075.

[7] D. P. Subedi, U. M. Joshi, and C. S. Wong, “Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasmas and Their Applications,” in Plasma Science and Technology for Emerging Economies, Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 693–737.

[8] A. Waskow, A. Howling, and I. Furno, “Mechanisms of Plasma-Seed Treatments as a Potential Seed Processing Technology,” Front. Phys., vol. 9, no. April, pp. 1–23, Apr. 2021, doi: 10.3389/fphy.2021.617345.