



การพัฒนาพลาสมาเจ็ตที่ความดันบรรยากาศแบบหลายรูสำหรับปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์

Development of multi-hole atmospheric pressure plasma jet for seed treatment

ชัตติยะ สระแก้ว¹ อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน^{2*} ปรมเมษฐ์ จันทร์เพ็ง² และ วราภรณ์ สุทธิสา³

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

³ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

Khattiya Srakaew¹ Arthit Chingsoongnern^{2*} Porameth Janpeng² and Waraporn Sutthisa³

¹Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai, Mahasarakham, 44150 Thailand.

²Plasma Technology Research Unit, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai, Mahasarakham, 44150 Thailand.

³Department of Biology, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai, Mahasarakham, 44150 Thailand.

*Corresponding Author E-mail: artit.c@msu.ac.th

Received: 30 May 2019 | Revised: 22 September 2019 | Accepted: 29 October 2019

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูสำหรับปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ที่ความดันบรรยากาศ เพื่อเพิ่มอัตราการงอกและอัตราการโตของต้นอ่อน ผลการออกแบบและจำลองการไหลของแก๊สพบว่าความเร็วแก๊สที่ไหลผ่านหัวฉีดมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทำให้พลาสมาติดได้ดีครบทุกรู ไม่เกิดการอาร์คขณะเคลื่อนที่ผ่านเมล็ดพันธุ์ โดยหัวพลาสมาถูกยึดติดกับเครื่องสแกน X-Y-Z เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแนวลำพลาสมาเจ็ตให้กวาดผ่านเมล็ดพันธุ์อย่างทั่วถึงมากขึ้น ลำพลาสมามีความยาวสูงสุดประมาณ 1 cm และเมื่อทดสอบที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่างกัน คือ 200 250 300 350 L/h พบว่าอัตราการไหลและกำลังไฟฟ้าที่ทำให้พลาสมาติดอย่างอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอมากที่สุด คือ 250 L/h ที่กำลังไฟฟ้า 893 W ความถี่ 52 kHz ผลการประยุกต์ใช้หัวกำเนิดพลาสมา ที่ออกแบบและสร้างขึ้นทรีตเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว พบว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมา มีอัตราการโตในช่วง 4 วันแรกสูงกว่าเมล็ดควบคุม 18 % ซึ่งน่าจะเป็นผลจากอนุมูลอิสระของไนโตรเจน ออกซิเจนและความชื้นในพลาสมาเข้าไปทำอันตรกิริยากับเปลือกหุ้มเมล็ด ทำให้เมล็ดชอบน้ำมากขึ้น จึงสามารถดูดซับแก๊สออกซิเจนและความชื้นจากสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการทรีต

ABSTRACT

The purpose of this research is to develop the multihole atmospheric pressure plasma jet (APPJ) for improving seed germination and growth. In this research, SolidWorks 2016 was used to design gas flow simulation inside the plasma source. The simulated results show that gas velocity at nozzle is uniform. As a result, there are the argon plasma beam come out every hole and no arcing. The APPJ was connected to the x-y-z scanner for controlling the plasma beam passing thoroughly with the seed. The length of the plasma beam is around 1 cm.

The argon flow rates of 200 250 300 350 L/h were used to evaluate the optimum condition for stable discharge. It founds that the AC power of 893 W and a frequency of 52 kHz with the argon flow rate of 250 L/h is the suitable condition. The mung bean seed was used to study the effect of plasma treatment. The experimental results show that the treated and untreated seed have different seed growth. The treated seed gives a higher growth rate than the control around 18%. This is due to the effect of oxygen nitrogen and humid radicals in plasma which can increase the surface free energy of seed coat. As a result, the treated seed can absorb higher oxygen and moisture from the environmental.

คำสำคัญ: หัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ การทรีตพลาสมา อัตราการโต

Keywords: Multihole atmospheric pressure plasma jet (APPJ), Plasma treatment, Growth rate

บทนำ

สถานะพลาสมา (Plasma state) จัดเป็นสถานะที่ 4 ที่เกิดจากการให้พลังงานมากพอกับแก๊สเพื่อให้แก๊สแตกตัว (Ionized) โดยพลังงานที่ให้อาจอยู่ในรูปความร้อน แสง หรือสนามไฟฟ้า สถานะพลาสมาประกอบไปด้วยอนุภาคหลายชนิด เช่น ไอออน อิเล็กตรอน โมเลกุล และเรดิคอล ซึ่งเป็นอะตอมหรือโมเลกุลที่ไม่เสถียรและมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา การประยุกต์ใช้พลาสมาเพื่อการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว (Plasma surface modification) สามารถทำได้หลายเทคนิคขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งาน (Klein et al., 2013, Liao et al., 2017) ไม่ว่าจะเป็นเพิ่มพลังงานเชิงผิว เพิ่มหมู่ฟังก์ชัน หรือเพื่อการเคลือบ ขณะที่ในกลุ่มของการกำจัด อะตอมที่พื้นผิวได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ 1. เพื่อการทำความสะอาด (Cleaning) 2. เพื่อการกัดเซาะ (Etching) 3. เพื่อการฆ่าเชื้อ (Sterilization) (Dobrin et al., 2015, Hertwig et al., 2018) โดยในงานวิจัยนี้พลาสมาที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ ทำให้เมล็ดพันธุ์สามารถดูดซับความชื้นและออกซิเจนได้ดีขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เมล็ดงอกได้ดีและโตเร็วทนต่อสภาพภูมิอากาศที่แห้งแล้งได้มากขึ้น

โดยงานวิจัยของ Adamovich และคณะ (2017) ได้คาดการณ์ไว้ว่าในช่วงปี ค.ศ. 2017-2060 การประยุกต์ใช้พลาสมาทางการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหารจะมีมากขึ้น ซึ่งจะส่งเสริมให้เกิดการทำเกษตรแบบยั่งยืน (Sustainable farming) และช่วยเพิ่มผลผลิต (Productivity) การประยุกต์ใช้พลาสมาเพื่อการปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์พืชต่าง ๆ เพื่อช่วยในการงอกและการเจริญเติบโต ถือว่าเป็นเรื่องใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจทั้งจากนักวิชาการเกษตรและนักพลาสมาเทคโนโลยี โดยใน

ปี ค.ศ. 2011 Zhou และคณะ (2011) ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น (Dielectric barrier discharge: DBD) ปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศ โดยศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมาต่ออัตราการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิต พบว่าเมล็ดพันธุ์ที่ถูกทรีตภายใต้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6,120 V มีอัตราการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตสูงสุด ซึ่งอธิบายว่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงเพียงพอจะทำให้การดิสชาร์จเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และรุนแรงพอที่จะทำให้อนุภาคว่องไวต่อปฏิกิริยา (Active air particles) และรังสีอัลตราไวโอเลต สามารถทะลุผ่านเยื่อหุ้มเมล็ด (Capsule of the seeds) กระตุ้นให้เกิดการส่งผ่านของเหลวที่หล่อเลี้ยงส่วนต่างๆ ของเซลล์ ทำให้เกิดการงอกของรากออกจากเมล็ดได้ดีขึ้น ในปี ค.ศ. 2013 Filatova และคณะ (2013) ได้ใช้แหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุ ทำการจุดพลาสมาจากแก๊สตั้งต้นที่เป็นอากาศภายใต้หัวไฟฟ้าแบบแผ่นคู่ขนานและแบบทรงกระบอก จากนั้นนำพลาสมามาทรีตเมล็ดข้าวโพด ข้าวสาลี และเมล็ดถั่วลันเตา โดยศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าและความดัน ซึ่งพบว่าที่ความดัน 500 mTorr และกำลังไฟฟ้า 0.2 W/cm² และใช้เวลาในการทรีต 5 นาที ผิวเปลือกหุ้มเมล็ดพันธุ์ถูกกัดกร่อนทั้งจากไอออนและเรดิคอลจากพลาสมา ซึ่งสังเกตได้จากภาพถ่าย SEM ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปในเมล็ดได้ดีขึ้น ส่งผลให้อัตราการงอกมีค่ามากขึ้น ต่อมา Sarinont และคณะ (2014) ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้นปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ถั่วงอก ใช้เวลาในการทรีต 3 นาที โดยศึกษาอัตราการเจริญเติบโตเมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน และ 7 วัน ซึ่งพบว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการทรีตพลาสมาโตเร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการทรีตถึง 3.7 เท่าในวันแรก และ 1.3 เท่า เมื่อผ่านไป 7 วัน นอกจากนั้นยัง

พบว่าอุณหภูมิของเมล็ดถั่วเขียวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ต่ำกว่า 60 °C) ในระหว่างการทรีต ซึ่งไม่ส่งผลต่ออัตราการงอกและการเจริญเติบโต นอกจากนี้ Ling และคณะ (2015) ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันต่ำทรีตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองเป็นเวลาสั้นๆ เพียง 15 วินาที โดยศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าในการจุพลาสมาในช่วง 60-120 W ผลการศึกษาพบว่าที่ กำลังไฟฟ้า 80 W เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองมีความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น 14% สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การงอกเพิ่มขึ้น 15% และเปอร์เซ็นต์ดัชนีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 63% ขณะที่ Tong และคณะ (2014) ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น เพื่อทำการปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์พืชหลายชนิด ผลการทดลองพบว่า แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการจุพลาสมา 5,950 V และเวลาการทรีต 10 วินาที สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การงอกได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ Ji และคณะ (2016) ได้ใช้แหล่งจ่ายไฟศักย์ไฟฟ้าสูงแบบพัลส์สร้างพลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น เพื่อทำการปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ฝักโคม เนื่องจากโดยปกติแล้ว เมล็ดพันธุ์ฝักโคมจะมีอัตราการงอกต่ำ แต่จากการศึกษาพบว่า เมื่อใช้อากาศเป็นแก๊สตั้งต้นในการจุพลาสมาแบบพัลส์ เมล็ดพันธุ์ฝักโคมที่ผ่านการทรีตมีเปอร์เซ็นต์การงอกเพิ่มขึ้น แต่ถ้าทรีตเมล็ดพันธุ์มากกว่า 10 ครั้งติดๆ กัน เปอร์เซ็นต์การงอกจะลดลง ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าช่วงเวลาการใช้พลาสมาทรีตเมล็ดพันธุ์จะต้องมีความเหมาะสมหรือจะต้องไม่นานเกินไป เนื่องจากเรติคูลจากออกซิเจนที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา และแสงยูวีจากพลาสมาอาจทะลุผ่านเยื่อหุ้มเมล็ดเข้าไปทำลายระบบเซลล์ (Cellular damage) ทำให้เมล็ดพันธุ์เสียหายได้ และในปีเดียวกันนี้ Zahoranova และคณะ (2016) ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศภายใต้ข้อไฟฟ้าแบบ Diffuse coplanar surface barrier discharge (DCSBD) ทำการทรีตเมล็ดพันธุ์ข้าวสาลี โดยระบบข้อไฟฟ้าชนิดนี้สามารถสร้างพลาสมาที่ กำลังไฟฟ้าสูงถึง 100 W/cm² ผลจากการศึกษาพบว่าเวลาการทรีตในช่วง 20-50 วินาที สามารถให้เปอร์เซ็นต์การงอกและดัชนีความแข็งแรงของเมล็ด (Vigor of seeding) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการซับน้ำ (Wettability) ที่มากขึ้น นอกจากนี้ผลจากการทดสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่เติมลงไป พบว่าการทรีตพลาสมาสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์บนผิวเมล็ดพันธุ์ได้ นอกจากนี้ Butscher และ

คณะ (Butscher et al., 2016) ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น และแหล่งจ่ายไฟความถี่ 10 kHz แรงดันไฟฟ้า 8 kV และความกว้างพัลส์ 500 ns ทรีตเมล็ดเรดิซ หัวหอม และเมล็ดธัญพืช เป็นเวลา 5 นาที เพื่อยับยั้งเชื้อ *E. coli* ผลการทดลองพบว่าพลาสมาสามารถทำให้เชื้อลดลงได้สูงสุดถึง 3.4 log CFU/g

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่ามียานงานวิจัยที่ใช้ระบบ DBD ในการสร้างพลาสมาเพื่อปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ แต่ด้วยธรรมชาติของข้อไฟฟ้าใน DBD ที่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟศักย์สูงในระดับหลายสิบกิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างขั้วกำลังและขั้วกราวด์ต้องอยู่ชิดมากในระดับ 1-2 mm จึงทำให้ไม่สะดวกในการทรีตเมล็ดพันธุ์ที่มีขนาดใหญ่ อีกทั้งเมื่อต้องการทรีตเมล็ดพันธุ์อย่างต่อเนื่องและปริมาณมากจะทำได้ยาก อีกทางเลือกหนึ่งคือ การสร้างพลาสมาที่ความดันต่ำทรีตเมล็ดพันธุ์ เช่นในงานวิจัยของ Oh และคณะ (Oh et al., 2017) ได้ใช้ไมโครเวฟสร้างพลาสมาเย็นที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สไนโตรเจนที่ความดันต่ำทำการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Salmonella typhimurium* ในต้นอ่อนเรดิซ ผลการทดลองพบว่าที่ กำลังไฟฟ้า 900 W และความดัน 667 Pa ใช้เวลาการทรีต 20 นาที พลาสมาสามารถทำให้เชื้อลดลงได้สูงสุดถึง 2.6 ± 0.4 log CFU/g แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าเวลาที่ใช้ในการทรีตค่อนข้างนาน และการใช้ความดันขณะทำงานที่ค่อนข้างต่ำจะทำให้ต้นอ่อน (Sprout) ที่ผ่านการทรีตเสียความชุ่มชื้นและเหี่ยวง่าย เนื่องจากการระเหยของน้ำในสภาวะสุญญากาศ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure plasma jet: APPJ) สำหรับปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ เนื่องจากระบบ APPJ ไม่ต้องใช้ปั๊มและแชนเบอร์สุญญากาศ จึงสามารถลดต้นทุนในการสร้างระบบไปได้อย่างมาก อีกทั้งการสร้างหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรู (Multi-hole) จะช่วยเพิ่มพื้นที่ในการทรีตทำให้การทรีตเมล็ดพันธุ์มีความรวดเร็วทั่วถึง และต่อเนื่องมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถทรีตเมล็ดพันธุ์ที่มีขนาดใหญ่ได้ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์เพื่อกระตุ้นการงอกและอัตราการโต ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อเกษตรกรในอนาคตต่อไป

วิธีการดำเนินการวิจัย

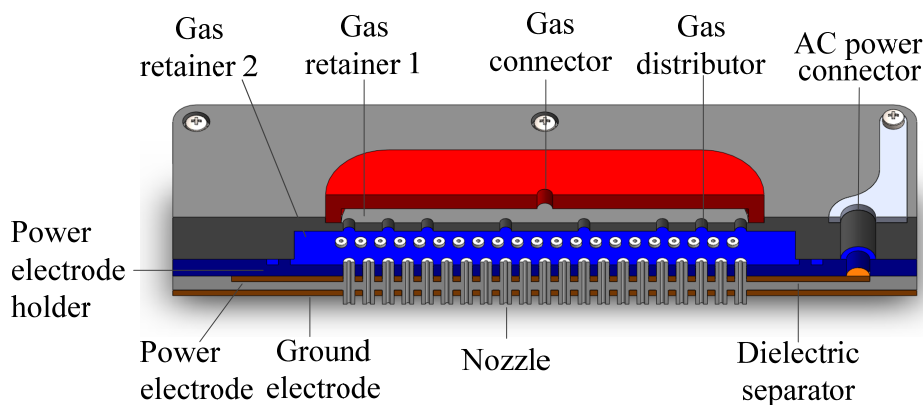
การสร้าง หัวกำเนิดพลาสมาแบบหลายรูที่ ความดันบรรยากาศ หรือเรียกสั้นๆ ว่า Multi-hole-APPJ มีขั้นตอนการทำงานหลักๆ คือ 1) ออกแบบหัวกำเนิดพลาสมาฯ โดยใช้โปรแกรม SolidWorks 2016 2) ทดสอบการไหลของแก๊สภายในหัวกำเนิดพลาสมาฯ โดยใช้ฟังก์ชัน Flow simulation 3) ตรวจสอบและปรับแก้แบบเพื่อให้แก๊สไหลผ่านรูอย่างสม่ำเสมอ 4) ขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้ Computer numerical control (CNC) 5) ประกอบและทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสมาฯ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบเพื่อสร้างภาพแบบจำลอง ของหัวกำเนิดพลาสมาฯ ซึ่งสามารถนำแบบที่ได้มาแก้ไขหรือปรับปรุงในภายหลังได้ โดยต้นแบบของชิ้นส่วนที่ถูกนำมาประกอบรวมเป็นหัวกำเนิดพลาสมาฯ ทางคณะผู้วิจัยได้ยื่นขอจดอนุสิทธิบัตรต่อหน่วยจัดการทรัพย์สินทางปัญญามหาวิทยาลัยมหาสารคาม เมื่อวันที่ 11 กันยายน พ.ศ. 2561 หมายเลขคำขอ 1803002042 ส่วนประกอบหัวกำเนิดพลาสมาฯ แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งอธิบายการทำงานของชิ้นส่วนต่าง ได้ดังนี้

1. Gas connector ชิ้นส่วนนี้ทำจากแผ่นอะคริลิก ทำหน้าที่เป็นข้อต่อแก๊สเข้าหัวกำเนิดพลาสมาฯ และเป็นห้องบรรจุแก๊สชั้นที่ 1 (Gas retainer 1)

2. Gas distributor คือ แผ่นกระจายแก๊ส ทำหน้าที่กระจายแก๊สจากห้องบรรจุแก๊สชั้นที่ 1 เข้าสู่ห้องบรรจุแก๊สชั้นที่ 2 (Gas retainer 2) ชิ้นส่วนนี้ทำจากแผ่นอะคริลิก และทางด้านข้างสามารถต่อเข้ากับข้อต่อ BNC.HT (AC power connector) เพื่อเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 50-500 kHz, 2 kW

3. Power electrode คือ ขั้วกำลัง ทำจากแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยที่ถูกเจาะรูให้สามารถสวมเข้ากับแผ่น Dielectric separator ได้พอดี ผิวหน้าของขั้วกำลังถูกปิดด้วยแผ่น Power electrode holder อีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอาร์คที่ผิวหน้าของขั้วกำลังขึ้นทางด้านบน

4. Dielectric separator คือ ชั้นแผ่นฉนวน ทำจากแผ่นเทฟลอน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ถูกเจาะรูและกัดขึ้นรูปเป็นท่อทั้งสองด้าน ท่อมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1 mm และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 3 mm ทำหน้าที่เป็นทั้งฉนวนไฟฟ้าคั่นระหว่างขั้วกำลังและขั้วกราวด์ (ground electrode) และเป็นท่อส่งผ่านแก๊สจากจากฝั่งขั้วกำลังไปยังปลายหัวฉีด (nozzle)



รูปที่ 1 ภาพจำลองสามมิติของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรู ตามอนุสิทธิบัตรหมายเลขคำขอ 1803002042

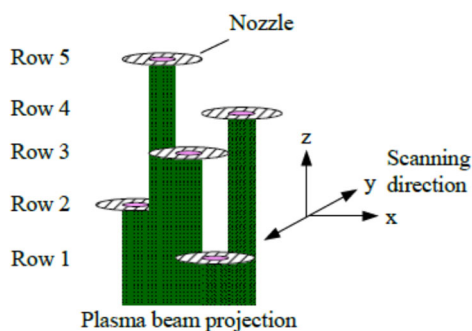
การออกแบบตำแหน่งท่อของ Dielectric separator ทำได้โดยอาศัยแนวคิดที่ว่าเมื่อทำการสแกนหัวกำเนิดพลาสมาฯ ในแนวแกน y ตามรูปที่ 2 แนวลำพลาสมาจะต้องเชื่อมต่อกันเพื่อให้เกิดการทรีตอย่างทั่วถึง สำหรับหัวกำเนิดพลาสมาฯ ต้นแบบนี้ ได้ออกแบบท่อทั้งหมด 5 แถว แต่ละแถวมีจำนวนรูทั้งหมด 21 รู รวมเป็นจำนวน 105 รู ดังนั้นเมื่อสแกนหัวกำเนิด

พลาสมาฯ ผ่านชิ้นงานแนวลำพลาสมาจะเชื่อมต่อกันเป็นลำที่มีความกว้างถึง 105 mm เป็นการเพิ่มพื้นที่การกวาดไปของแนวลำพลาสมาขณะทำการทรีตเมล็ดพันธุ์

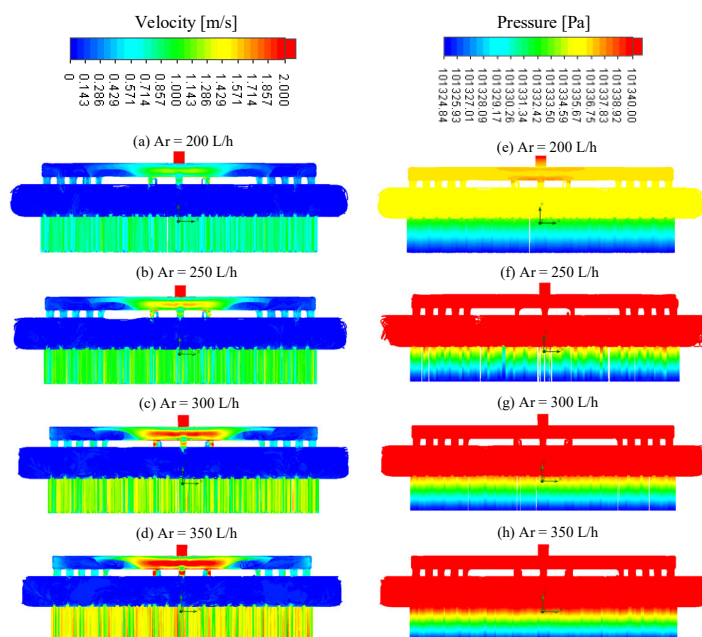
ในการออกแบบและสร้างชิ้นส่วนต่างๆ ของหัวกำเนิดพลาสมาฯ มีหลักการอยู่ 2 ข้อ คือ 1) ต้องสามารถทำให้แก๊สพุ่งออกมาจากหัวฉีดสม่ำเสมอด้วยความเร็วที่เท่าๆ กัน 2) แก๊สที่พุ่ง

ออกมาจากหัวฉีดต้องมีความเร็วมากพอที่จะทำให้พลาสมาเจ็ตติดได้ง่าย เนื่องจากอะตอมของแก๊สจะเกิดการชนกันเองด้วยความถี่ที่สูงขึ้นจึงจะทำให้แก๊สแตกตัวเป็นพลาสมาที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงได้ง่าย รูปที่ 3 (a), (b), (c), และ (d) แสดงผลการคำนวณความเร็วแก๊สอาร์กอนเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน เท่ากับ 200 250 300 และ 350 L/h ตามลำดับ และรูปที่ 3 (e), (f), (g), และ (h) เปรียบเทียบผลการคำนวณความดันแก๊สที่สอดคล้องกับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนข้างต้น ซึ่งจะพบว่า ณ ที่ตำแหน่งแก๊สชะลอตัวและมีความเร็วน้อย ความดันแก๊สจะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการของแบร์นูลลี ซึ่งกล่าวว่าผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ

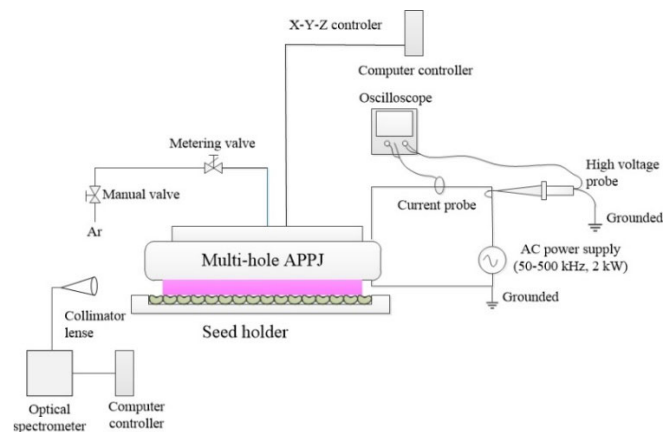
ภายในท่อที่ของไหลไหลผ่าน มีค่าคงตัว จากรูปจะพบว่าความเร็วแก๊สที่ไหลเข้าหัวกำเนิดพลาสมาฯ มีค่าประมาณ 2 m/s ซึ่งเป็นจุดที่ความดันแก๊สมีค่าต่ำสุด จากนั้นแก๊สจะไหลเข้าไปในแผ่นกระจายแก๊สซึ่งจะมีความเร็วลดลงอยู่ในช่วง 1.1-2.0 m/s จากนั้นแก๊สก็จะชะลอตัวมีความเร็วลดลงอยู่ในช่วง 0.2-0.7 m/s ก่อนไหลเข้าไปในห้องบรรจุแก๊สชั้นที่ 2 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แก๊สมีความดันสูงสุด เมื่อแก๊สไหลเข้าไปในห้องจะมีความเร็วมากขึ้นตามอัตราการไหลเข้าของแก๊สอาร์กอน นอกจากนั้นผลการออกแบบยังแสดงให้เห็นว่าไม่เกิดจุดสะท้อนหรือจุดที่แก๊สไม่ไหลผ่านภายในห้องบรรจุแก๊สชั้นที่ 2 จึงทำให้ความเร็วแก๊สที่ไหลผ่านท่อมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้ง 105 รู นั่นเอง



รูปที่ 2 ภาพร่างแสดงการเชื่อมต่อกันของแนวลำพลาสมาเจ็ตทั้ง 5 แถว เมื่อทำการสแกนในแนวแกน y



รูปที่ 3 เปรียบเทียบผลการคำนวณความเร็วแก๊สอาร์กอน (a), (b), (c), (d) และความดันแก๊ส (e), (f), (g), (h) ภายในหัวกำเนิดพลาสมาฯ ที่อัตราการไหลต่างๆ กัน



รูปที่ 4 ไดอะแกรมการทดสอบหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบหลายรู

รูปที่ 4 แสดงไดอะแกรมการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสมา เริ่มจากเชื่อมต่อแก๊สและระบบไฟเข้ากับหัวกำเนิดพลาสมา จากนั้นเปิดวาล์วแก๊สอาร์กอนแล้วทำการจ่ายกำลังไฟฟ้า แล้วทำการปรับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟพร้อมกับอัตราการไหลของแก๊สให้เหมาะสมเพื่อให้พลาสมาติดได้อย่างสม่ำเสมอ จากนั้นจึงทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าโดยใช้ออสซิลโลสโคปแบบ 2 ช่องสัญญาณ ยี่ห้อ Agilent technologies รุ่น DSO1002A ตอบสนองความถี่สูงสุดได้ 60 MHz ซึ่งได้ทำการต่อช่องสัญญาณที่ 1 ของออสซิลโลสโคปเข้ากับหัววัดแรงดันสูง (High voltage probe) ยี่ห้อ Keysight รุ่น N2771B ที่สามารถวัดแรงดันสูงสุด 30 kV และช่องสัญญาณที่ 2 ต่อเข้ากับหัววัดกระแสแบบคลัมป์มิเตอร์ (Clamp meter current) ยี่ห้อ Pearson รุ่น 4100 ที่สามารถวัดกระแสสูงสุดได้ 500 แอมแปร์ และวัดสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมาที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สอาร์กอน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมทางแสง (Optical emission spectrometer) หรือเรียกสั้นๆ ว่า OES รุ่น GetSpec-3648-Vis ซึ่งมีจำนวนพิกเซลของซีซีดี 3648 พิกเซล ตรวจวัดสเปกตรัมทางแสงมีความละเอียด (Resolution) 0.1 nm ในช่วงความยาวคลื่น 600 ถึง 800 nm โดยทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์ GetSpec7.0 ในการประมวลผล ใช้เวลาในการเก็บข้อมูล (Integration time) 30 ms เก็บข้อมูลจำนวน 3 รอบแล้วแสดงผลแบบเฉลี่ย จากนั้นตรวจวิเคราะห์พีค (Peak identification) เพื่อระบุชนิดของสปีชีส์ที่คายพลังงานออกมา

โดยการนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลออนไลน์ในเว็บไซต์ NIST (Kramida et al., 2019)

ในขั้นตอนการพริตเมล็ดพันธุ์ ได้ติดตั้งเครื่องควบคุมตำแหน่ง (X-Y-Z controller) เพื่อกำหนดระดับความสูงของปลายหัวฉีด ซึ่งจะอยู่ที่ประมาณ 5 mm เหนือเมล็ดพันธุ์ ถ้าปลายหัวฉีดอยู่ใกล้เมล็ดพันธุ์มากเกินไป ลำพลาสมาบางจุดอาจเกิดการอาร์คและทำให้หัวกำเนิดพลาสมาเสียหายได้

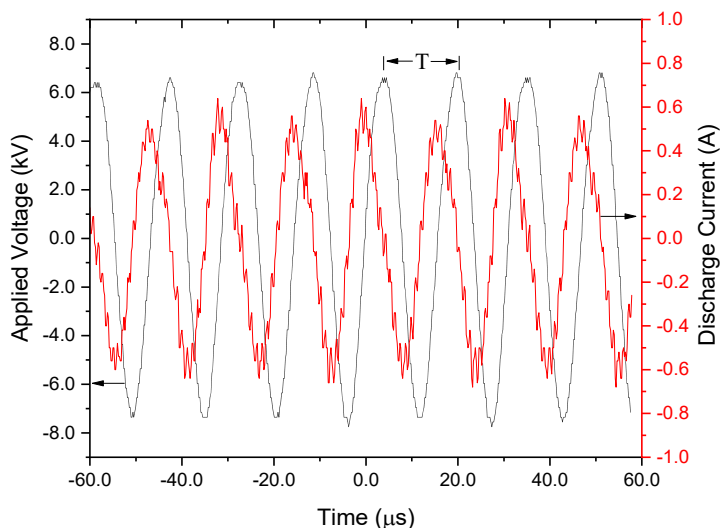
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมา

การหาช่วงกำลังไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมกับหัวกำเนิดพลาสมา ที่ได้ออกแบบไว้นั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากถ้าใช้กำลังไฟฟ้าต่ำเกินไป พลาสมาอาจจะไม่ติดหรือติดไม่เสถียร แต่ถ้าใช้กำลังไฟฟ้าสูงเกินไป หัวพลาสมาอาจจะร้อนและเสียหายได้ ค่ากำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส อัตราการไหลของแก๊ส ระยะห่างระหว่างหัวกำลังกับหัวกรวด ดังนั้นจึงได้ทำการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมา เพื่อศึกษาอัตราการไหลของแก๊สว่ามีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมาอย่างไร เมื่อทำการจุดพลาสมาและพลาสมาเจ็ตติดอย่างเสถียรจะมีลำพลาสมาพุ่งออกอย่างสม่ำเสมอครบทุกรู ลักษณะสัญญาณแรงดันไฟฟ้า $V(t)$ และกระแสไฟฟ้า $I(t)$ ของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ แสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งเป็นกราฟแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมีค่าประมาณ 7 kV และค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ($\bar{P}$) ที่ใช้ในการจุดพลาสมา สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) คือ

$$\bar{P} = \frac{1}{t} \int_0^t |V(t) \cdot I(t)| dt ; t > T \quad \dots(1)$$

โดยที่ T คือ คาบเวลา จากรูปที่ 5 คาบเวลามีค่าเท่ากับ $16 \mu s$ ซึ่งสอดคล้องกับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ 52 kHz



รูปที่ 5 สัญญาณแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของหัวกำเนิดพลาสมาแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศในช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 300 L/h

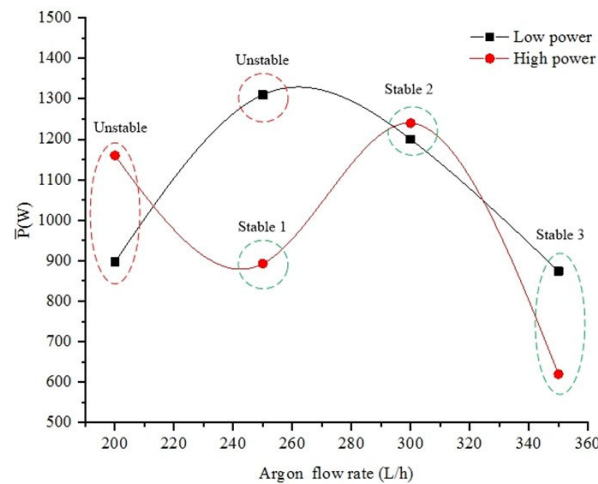
จากการวัดกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้สำหรับจุดพลาสมาที่เงื่อนไขอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ในช่วง 200 250 300 และ 350 L/h พบว่าความยาวของลำพลาสมามีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามค่าอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ดังนั้นในการทดลองจึงได้ทำการตั้งค่ากำลังไฟฟ้าเริ่มต้นออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ (Low power) ซึ่งหมายถึงการปรับระดับกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟภาคอินพุตเริ่มต้นไปที่ 50% ของกำลังไฟฟ้าสูงสุด และ ช่วงกำลังไฟฟ้าสูง (High power) ซึ่งหมายถึงการปรับระดับกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟภาคอินพุตเริ่มต้นไปที่ 80% ของกำลังไฟฟ้าสูงสุด ผลการวัดกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่หัวกำเนิดพลาสมา ใช้จริงที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่างๆ กัน แสดงได้ตามรูปที่ 6 พบว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในการจุดพลาสมาจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของแก๊สและความเสถียรของลำพลาสมา โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ตำแหน่ง Stable 1 หมายถึง เงื่อนไขที่ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำและใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่ำ แล้วทำให้ลำพลาสมาพุ่งออกมาอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ

2. ตำแหน่ง Stable 2 หมายถึง เงื่อนไขที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงและใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนปานกลาง แล้วทำให้ลำพลาสมาพุ่งออกมาอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ

3. ตำแหน่ง Stable 3 หมายถึง เงื่อนไขที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนสูง จึงจำเป็นต้องใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากในกรณีที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนสูง ถ้าใช้กำลังไฟฟ้าสูงเกินไป ลำพลาสมามีแนวโน้มเปลี่ยนจากสถานะ Abnormal glow ไปยัง Arc discharge ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นที่แผ่นเทฟลอนที่ทำหน้าที่เป็นชั้นฉนวนกั้นระหว่างหัวกำลังและหัวกราวด์ และทำให้หัวกำเนิดพลาสมาเสียหายได้ จึงต้องมีการปรับลดกำลังไฟฟ้าลงเพื่อให้ลำพลาสมามีความเสถียรมากขึ้นนั่นเอง

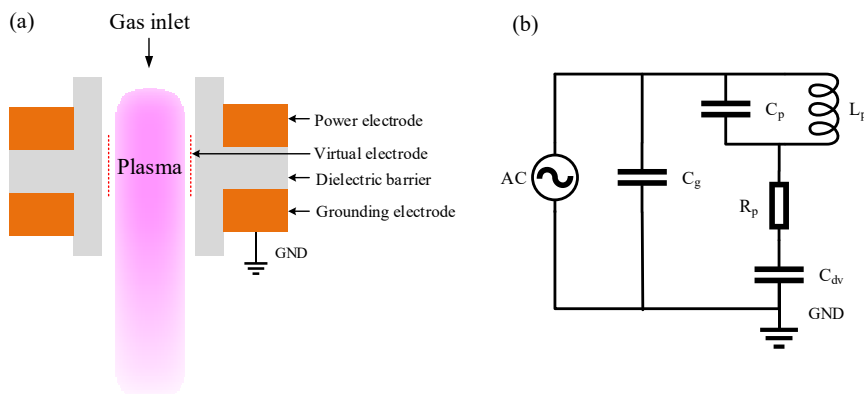
4. ตำแหน่ง Unstable หมายถึง ลำพลาสมาเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่อง หรือไม่มีลำพลาสมาพุ่งออกมา ซึ่งเกิดจากการใช้อัตราการไหลของแก๊สต่ำเกินไปหรือสูงเกินไป และ/หรือการใช้กำลังไฟฟ้าไม่เหมาะสมกับอัตราการไหลของแก๊ส



รูปที่ 6 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในการจุดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่างๆ กัน

ในแต่ละรูปของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูจะมีโครงสร้างของข้อไฟฟ้าแสดงได้ตามรูปที่ 7 (a) นั่นคือ จะมีชั้น Dielectric barrier ที่มีลักษณะเป็นท่อทั้งสองด้าน และถูกประกบด้วยขั้วกำลังและขั้วกราวด์ เมื่อแก๊สไหลผ่านขั้วกำลังและขั้วกราวด์ด้วยความเร็วสูง จะเปรียบเสมือนมีขั้ว Virtual electrode ทำหน้าที่จุดพลาสมาภายในท่อ ดังนั้นจึงสามารถเทียบได้กับวงจรสมมูลที่มีตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัว

ต้านทานในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าได้ตามรูปที่ 7 (b) โดยที่ C_g คือ ความจุไฟฟ้าของช่องว่างที่อยู่ระหว่างขั้วกำลังและขั้วกราวด์ก่อนจุดพลาสมา C_p , L_p คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าและตัวเหนี่ยวนำในขณะที่เกิดระหว่างข้อไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา C_{dv} คือ ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขั้วเสมือน และขั้วกราวด์ และ R_p คือ ความต้านทานไฟฟ้าของพลาสมา



รูปที่ 7 โครงสร้างของหัวกำเนิดพลาสมา (a) ภาพตัดขวาง เส้นประสีแดงหมายถึงขั้วเสมือนที่อยู่ระหว่างขั้วกำลังและขั้วกราวด์ที่ผิวด้านในของท่อแก๊ส (b) วงจรสมมูลของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบรูเดียว (Joh et al., 2014)

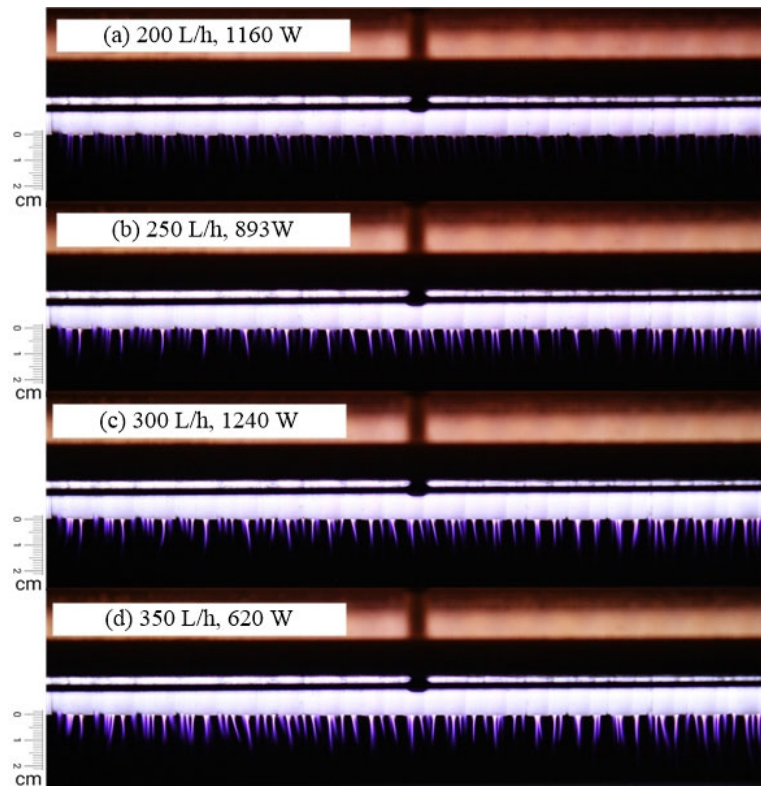
ผลการวัดสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมา

ในขั้นตอนต่อไปเป็นการทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสมา ที่กำลังไฟฟ้าและอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่างๆ กัน ตามรูปที่ 8 ภาพถ่ายแสดงลักษณะลำพลาสมาเจ็ตที่ช่วงกำลังไฟฟ้าสูง พบว่าเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊ส

อาร์กอน 200 L/h จะเห็นลำพลาสมาเจ็ตพุ่งออกมาจางๆ และไม่สม่ำเสมอ ยาวประมาณ 0.3-0.6 cm แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 250 300 และ 350 L/h จะสังเกตเห็นลำพลาสมาพุ่งออกมาเข้มและยาวขึ้นเป็น 0.7 0.8 และ 1.0 cm ตามลำดับ และเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สมากกว่า 350 L/h จะเกิดการอาร์คที่รูของ

หัวกำเนิดพลาสมาฯ บางรู และถ้าปล่อยให้เกิดการอาร์คนานเกินไปจะส่งผลให้ชั้นเพฟลอนเสียหายได้ จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่ทำให้ลำพลาสมาเจ็ทมีความเสถียรและดีอย่าง

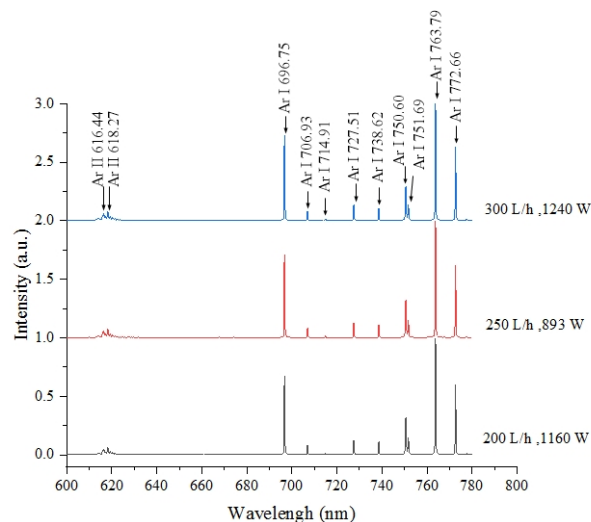
สม่ำเสมอเป็นเวลานาน คือ ใช้กำลังไฟฟ้า ประมาณ 893 W และใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 250 L/h



รูปที่ 8 ภาพถ่ายลักษณะลำพลาสมาเจ็ทที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่างกัน เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าสูงในการจุดพลาสมา

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดสเปกตรัมทางแสง (Optical emission spectroscopy) พบตำแหน่งพิกที่สอดคล้องกับสปีชีส์ที่คายพลังงานออกมาในช่วงความยาวคลื่น 600-800 nm แสดงได้ดังรูปที่ 9 เป็นกรณีที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สและกำลังไฟฟ้า 3 ค่า คือ 200 L/h, 1160 W 250 L/h, 893 W และ 300 L/h, 1240 W เส้นสเปกตรัมที่สังเกตเห็นได้เกือบทั้งหมดเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมอาร์กอน

ในขณะที่พิกที่มีความเข้มต่ำๆ ไม่สามารถจำแนกได้ว่าเป็นพิกของอะตอมหรือโมเลกุล เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้วความเข้มเส้นสเปกตรัมที่เกิดจากการคายพลังงานของอะตอมเดี่ยวมีความเข้มสูงมากเมื่อเทียบกับเส้นสเปกตรัมที่เกิดจากการคายพลังงานของโมเลกุล จึงทำให้เครื่องตรวจวัดไม่สามารถจำแนกได้ว่าเป็นสัญญาณรบกวน (Noise) หรือสัญญาณจากหมู่เรดิคอลไฮดรอกซิล (-OH) หรือ เอมีน (-N-)

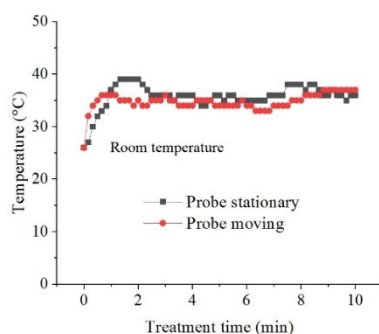


รูปที่ 9 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากหัวกำเนิดพลาสมา เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่างกัน

ผลการประยุกต์ใช้พลาสมาเจ็ตแบบหลายรูทรีตเมนต์

ในปัจจุบันพลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure cold plasma) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ทางการเกษตรอย่างแพร่หลาย โดยแบ่งการประยุกต์ใช้พลาสมาออกเป็น 4 กลุ่มหลักๆ คือ 1) เพื่อการทำฟาร์มแบบยั่งยืน (Sustainable farming) 2) เพื่อเพิ่มผลผลิต (Productivity) 3) เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ (Decontamination) และ 4) เพื่อทำให้ยีนเกิดการกลายพันธุ์ (Breeding) สำหรับงานวิจัยนี้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มที่ 2 คือ การประยุกต์ใช้พลาสมาเพื่อเพิ่มผลผลิต โดยการทรีตเมนต์พลาสมาเพื่อเพิ่มอัตราการงอกและอัตราการโต แต่อย่างไรก็ตามขอบเขตหลักของงานวิจัยนี้ คือการออกแบบและพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมา ให้มีความเสถียร ส่วนการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการทรีตเมนต์พลาสมาชนิดต่าง ๆ นั้น ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้เมล็ดถั่วเขียวและทำการทรีตเพียงบางเงื่อนไขเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้เท่านั้น

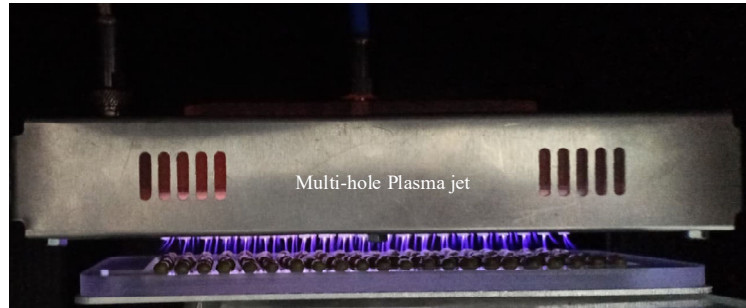
ก่อนที่จะนำหัวกำเนิดพลาสมา ไปใช้ทรีตเมนต์พลาสมา จะต้องมั่นใจว่าในระหว่างการทรีตของลำพลาสมาจะไม่สูงเกิน 55 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สามารถทำลายโครงสร้างภายในของเมล็ดพันธุ์ ดังนั้นจึงต้องทำการวัดอุณหภูมิของลำพลาสมาที่พุ่งออกจากปลายหัวฉีด โดยตำแหน่งที่ทำการวัดอยู่ห่างจากปลายหัวฉีด 0.5 cm ซึ่งเป็นระยะที่ใช้สำหรับทรีตเมล็ดพันธุ์ โดยได้ทำการวัดอุณหภูมิทั้งแบบที่หัวกำเนิดพลาสมา เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 10 cm/s และหัวกำเนิดพลาสมา หยุดนิ่ง พบว่าเมื่อทำการทรีตติดต่อกันนาน 10 นาที อุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 26 °C เป็น 35 °C ดังแสดงตามรูปที่ 10 ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ไม่ส่งผลให้เมล็ดพันธุ์เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนสะสมในกรณีของหัวพลาสมาที่มีการเคลื่อนที่ขณะทำการวัดจะช่วยให้ความร้อนสะสมลดลงประมาณ 1-3 °C ซึ่งค่าของอุณหภูมิจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาการทรีตผ่านไป 2 นาที โดยลักษณะของค่าอุณหภูมิของทั้ง 2 แบบ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายๆ กัน



รูปที่ 10 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ระยะห่างจากปลายหัวฉีด 0.5 cm ในกรณีที่หัวกำเนิดพลาสมาหยุดนิ่งและหัวเคลื่อนที่

รูปที่ 11 แสดงภาพถ่ายขณะใช้หัวกำเนิดพลาสมา ทรีตเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวจำนวน 300 เมล็ด โดยเลือกใช้ค่า กำลังไฟฟ้า 893 W และอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 250 L/h ซึ่งเป็นตำแหน่ง stable 1 ในรูปที่ 6 เป็นเงื่อนไขที่ใช้กำลังไฟฟ้า และอัตราการไหลของแก๊สค่าโดยที่หัวกำเนิดพลาสมาสามารถติด

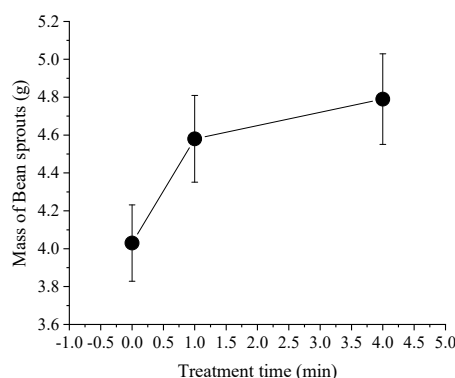
อย่างต่อเนื่อง ไม่เกิดการอาร์ค สอดคล้องกับความถี่แหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสสลับ 52 kHz และใช้เวลาการทรีต 1 และ 4 นาที ใส่ เมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวบนภาตเรียง 1 ชั้น เพื่อให้เมล็ดโดนทรีต พลาสมาอย่างทั่วถึง



รูปที่ 11 ภาพถ่ายหัวกำเนิดพลาสมา ขณะทรีตเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว

จากนั้นทำการสุ่มเมล็ดมาเพาะจำนวน 30 เมล็ด ทำ 3 ซ้ำ เมื่อได้ต้นถั่วอกที่เจริญเป็นเวลา 4 วัน จึงทำการวัดมวล และเปรียบเทียบกับมวลของต้นถั่วอกควบคุม ผลการทดลอง พบว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาที่เวลาการทรีต 1 และ 4 นาที เมื่อนำมาเพาะจะทำให้ได้ต้นถั่วอกที่มีมวลเพิ่มขึ้น เป็น 4.58 g และ 4.79 g ตามลำดับ ในขณะที่ต้นถั่วอกควบคุมมี มวล 4.03 g ดังแสดงในรูปที่ 12 นอกจากนั้นยังพบว่าเมล็ดถั่ว เขียวที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาเมื่อนำมาเพาะจะทำให้ได้ต้น ถั่วอกที่มีความยาวรากและลำต้นมากกว่าต้นถั่วอกควบคุม ดัง

แสดงตามรูปที่ 13 ซึ่งแสดงว่าการทรีตด้วยพลาสมามีผลต่อการ โตของเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว ด้วยกลไกของพลาสมาที่ความดัน บรรยากาศที่ ประกอบไปด้วยอนุภาคนิวตรอนอิสระของไนโตรเจน ออกซิเจนและความชื้น จึงสามารถสร้างหมู่เรดิคอลไฮดรอกซิล (-OH) และเอมีน (-N-) เกาะกับเปลือกหุ้มเมล็ด (Seed coat) ทำให้ผิวของเมล็ดมีความชอบน้ำมากขึ้น จึงทำให้น้ำและออกซิเจน จากภายนอกถูกดูดซับเข้าไปยังเอ็มบริโอ (Embryo) ได้ดีขึ้น ทำให้เมล็ดที่ถูกทรีตด้วยพลาสมาโตเร็วกว่าเมล็ดควบคุม



รูปที่ 12 ผลการชั่งมวลต้นถั่วอกในช่วง 4 วันแรก จากเมล็ดที่ผ่านการทรีตพลาสมาที่เวลาต่างๆ กัน



รูปที่ 13 เปรียบเทียบต้นถั่วงอกในช่วง 4 วันแรก ซึ่งถูกเพาะจากเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวที่ถูกพลาสมาที่เวลาต่างๆ กัน

สรุปผลการวิจัย

ผลการพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่มีความดันบรรยากาศ เพื่อใช้ในการพลาสมาเมล็ดพันธุ์ พบว่าความยาวของลำพลาสมาเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ที่อัตราการไหล 250 L/h และกำลังไฟฟ้า 893 W ทำให้เกิดลำพลาสมาที่มีความเสถียรและติดอย่างสม่ำเสมอ ผลการประยุกต์ใช้หัวกำเนิดพลาสมา พลาสมาเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว พบว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการพลาสมาที่มีอัตราการไหลสูงกว่าเมล็ดควบคุม ซึ่งสามารถยืนยันด้วยผลการวัดมวลที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเมื่อสุมนำต้นถั่วงอกในช่วง 4 วันแรก ซึ่งถูกเพาะจากเมล็ดถั่วเขียวที่ถูกพลาสมาที่เวลาต่าง ๆ กัน พบว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการพลาสมาที่มีความยาวรากและลำต้นมากกว่าเมล็ดควบคุม ดังนั้นหัวกำเนิดพลาสมา ที่ถูกพัฒนาขึ้นจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้พลาสมาเมล็ดพันธุ์เพื่อเพิ่มอัตราการโตในช่วงต้นอ่อนได้ เนื่องจากเป็นกรรมวิธีที่ไม่ใช้สารเคมี จึงน่าจะเป็นประโยชน์กับเกษตรกรในการเพิ่มมูลค่าให้กับผักกินต้นอ่อนชนิดอื่นๆ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2560

เอกสารอ้างอิง

- Adamovich, I., Baalrud, S.D., Bogaerts, A., Bruggeman P.J., Cappelli, M., Colombo, V., Czarnetzki, U., Ebert, U., Eden, J.G., Favia, P., Graves, D.B., Hamaguchi, S., Hieftje, G., Hori M, Kaganovich, I.D., Kortshagen, U., Kushner, M.J., Mason, N.J., Mazouffre, S., Mededovic Thagard, S., Metelmann, H-R., Mizuno, A., Moreau, E., Murphy, A.B., Niemira, B.A., Oehrlein, G.S., Petrovic, Z.Lj., Pitchford, L.C., Pu, Y-K, Rauf, S., Sakai, O., Samukawa, S., Starikovskaia, S., Tennyson, J., Terashima, K., Turner, M.M., van de Sanden, M.C. M. and Vardelle, A. (2017). The 2017 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology. *Journal of Physics D: Applied Physics* 50: 323001.
- Butscher, D., Van Loon, H., Waskow, A., Rudolf von Rohr, P. and Schuppler, M. (2016). Plasma inactivation of microorganisms on sprout seeds in a dielectric barrier discharge. *International Journal of Food Microbiology* 238: 222–232.
- Dobrin, D., Magureanu, M., Mandache N. B. and Ionita, M.-D. (2015). The effect of non-thermal plasma treatment on wheat germination and early growth. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 29: 255–260.
- Filatova, I., Azharonok, V., Lushkevich, V., Zhukovsky, A., Gadzhieva, G., Spasić, K., Živković, S., Puač, N., Lazović, S., Malović, G. and Petrović, L.Lj. (2013). Plasma seeds treatment as a promising technique for seed germination improvement. 14-19 July 2013. 31st International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Spain.
- Hertwig, C., Meneses, N. and Mathys, A. (2018). Cold atmospheric pressure plasma and low energy electron beam as alternative nonthermal decontamination technologies for dry food surfaces: A review. *Trends in Food Science and Technology* 77: 131–142.
- Ji, S.H., Choi, K.H., Pengkit, A., Im, J.S., Kim, J.S., Kim, Y.H. Park, Y., Hong, E.J., Jung, S.K., Choi, E.H. and Park, G. (2016). Effects of high voltage nanosecond pulsed plasma and micro DBD plasma on seed germination, growth development and physiological activities in spinach. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 605: 117–128.

- Joh, H.M., Kang, H.R., Chung, T.H., and Kim, S.J. (2014). Electrical and optical characterization of atmospheric-pressure helium plasma jets generated with a pin electrode: Effects of the electrode material, ground ring electrode, and nozzle shape. *IEEE Transactions on Plasma Sciences* 42(12): 3656-3667.
- Klein, A.N., Cardoso, R.P., Pavanati, H.C., Binder, C., Maliska, A.M., Hammes, G., Fusao, D., Seeber, A., Brunatto, S.F. and Muzart J.L.R. (2013). DC plasma technology applied to powder metallurgy: an overview. *Plasma Science and Technology* 15(1): 70–81.
- Kramida, A., Ralchenko, Y., Reader, J. and NIST ASD Team. (2018). NIST Atomic spectra database (ver. 5.6.1), Available form: <https://physics.nist.gov/asd>. Cited 2019 May 8.
- Liao, X., Donghong, L., Xiang, Q., Ahn, J., Chen, S., Ye, X. and Ding, T. (2017). Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review. *Food Control* 75: 83–91.
- Ling, L., Jiangang, L., Minchong, S., Chunlei, Z. and Yuanhua, D. (2015). Cold plasma treatment enhances oilseed rape seed germination under drought stress. *Scientific Reports* 5(1): 1–10.
- Ling, L., Jiafeng, J., Jiangang, L., Minchong, S., Xin, H., Hanliang, S. and Yuanhua, D. (2015). Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean. *Scientific Reports* 4(1): 5859.
- Oh, Y.J., Song, A.Y. and Min, S.C. (2017). Inhibition of *Salmonella typhimurium* on radish sprouts using nitrogen-cold plasma. *International Journal of Food Microbiology* 249: 66–71.
- Sarinont, T., Amano, T., Kitazaki, S., Koga, K., Uchida, G., Shiratani, M. and Hayashi, N. (2014). Growth enhancement effects of radish sprouts: Atmospheric pressure plasma irradiation vs. heat shock. *Journal of Physics: Conference Series* 518: 012017.
- Tong, J., He, R., Zhang, X., Zhan, R., Chen, W. and Yang, S. (2014). Effects of atmospheric pressure air plasma pretreatment on the seed germination and early growth of *Andropogon paniculata*. *Plasma Science and Technology* 16(3): 260–266.
- Zahoranova, A., Henselova, M., Hudecova, D., Kalinakova, B., Kovacik, D., Medvecká, V. and Cernak, M. (2016). Effect of cold atmospheric pressure plasma on the wheat seedlings vigor and on the inactivation of microorganisms on the seeds surface. *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 36(2): 397–414.
- Zhou, Z., Huang, Y., Yang, S. and Chen, W. (2011). Introduction of a new atmospheric pressure plasma device and application on tomato seeds. *Agricultural Sciences* 2(1): 23–27.

