



การพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูสำหรับปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ที่ความดันบรรยากาศ

วิทยานิพนธ์
ของ
ชัตติยะ สระแก้ว

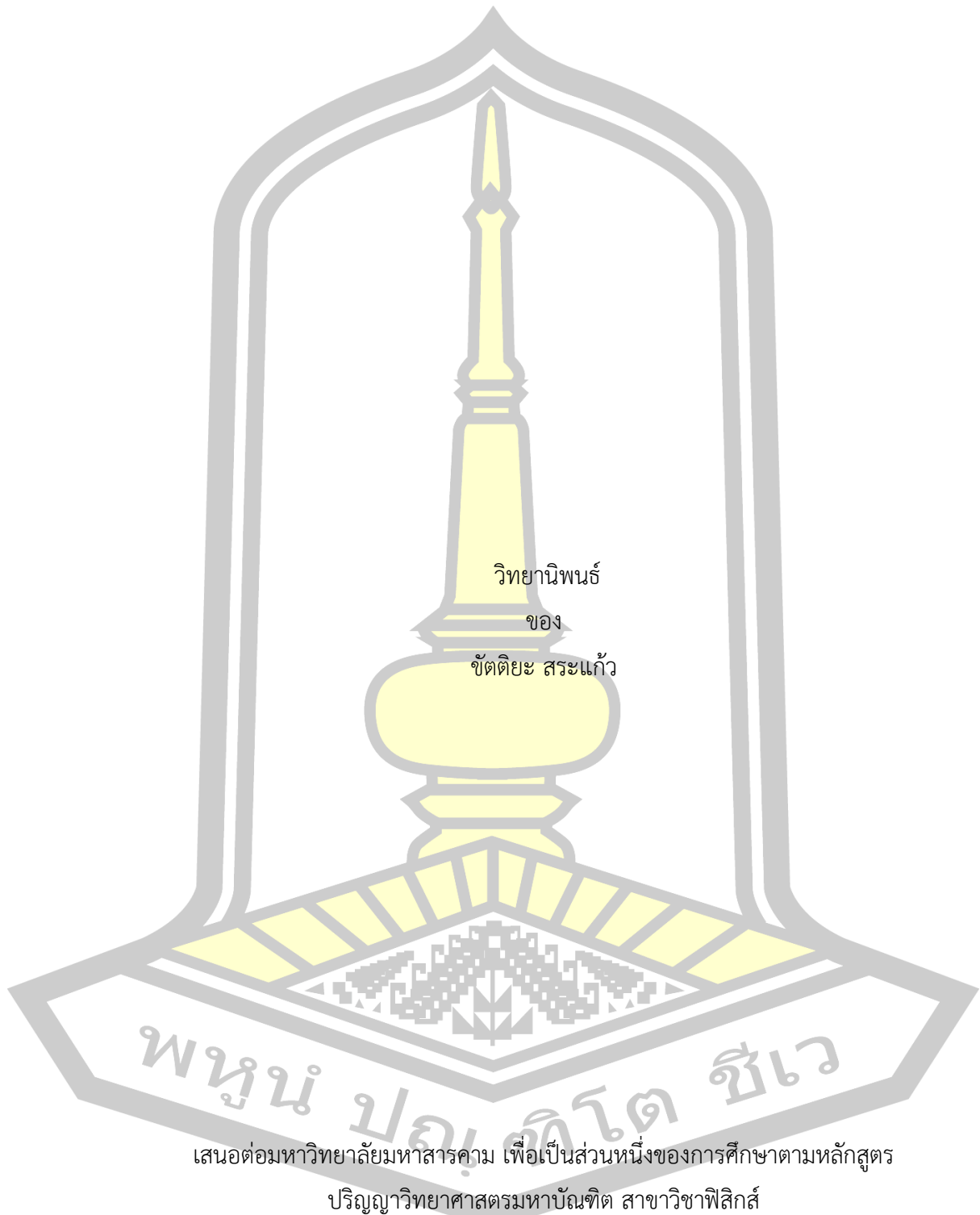
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มิถุนายน 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูสำหรับปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ที่ความดันบรรยากาศ



พหุบัณฑิต โศ โศ ชีวะ

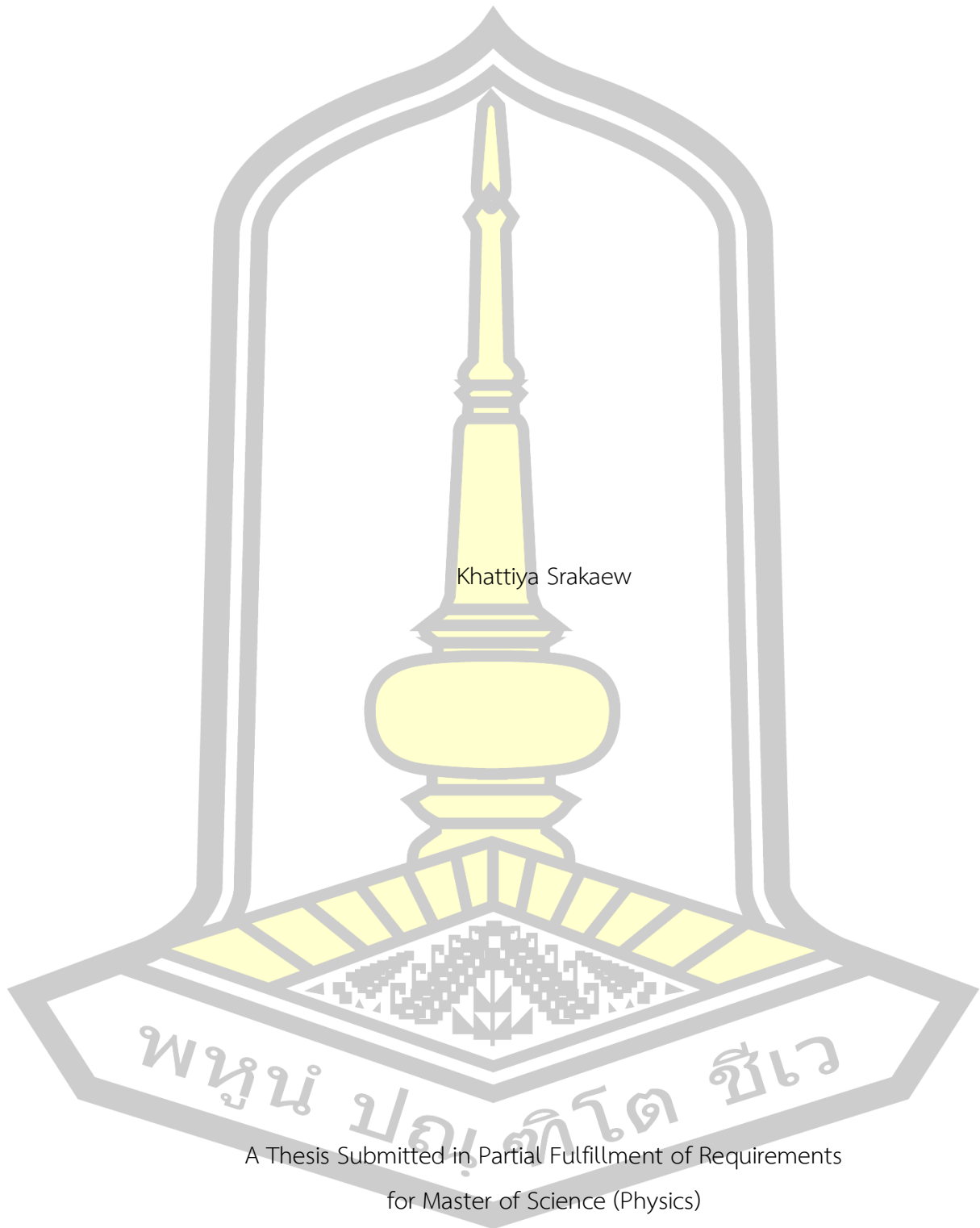
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มิถุนายน 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development of Multi-Hole Atmospheric Pressure Plasma Jet for Seed Treatment



Khattiya Srakaew

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (Physics)

June 2019

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายชัตติยะ สระแก้ว แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชา ฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(อ. ดร. วิรัตน์ เจริญบุญ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผศ. ดร. ประเมษฐ์ จันทร์เพ็ง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผศ. ดร. วราภรณ์ สุทธิสา)

กรรมการ

(ผศ. ดร. พิษณุ พูลเจริญศิลป์)

กรรมการ

(ผศ. ดร. สิริยาภรณ์ แสงอรุณ)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(ศ. ดร. ไพบรจน์ ประมวล)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

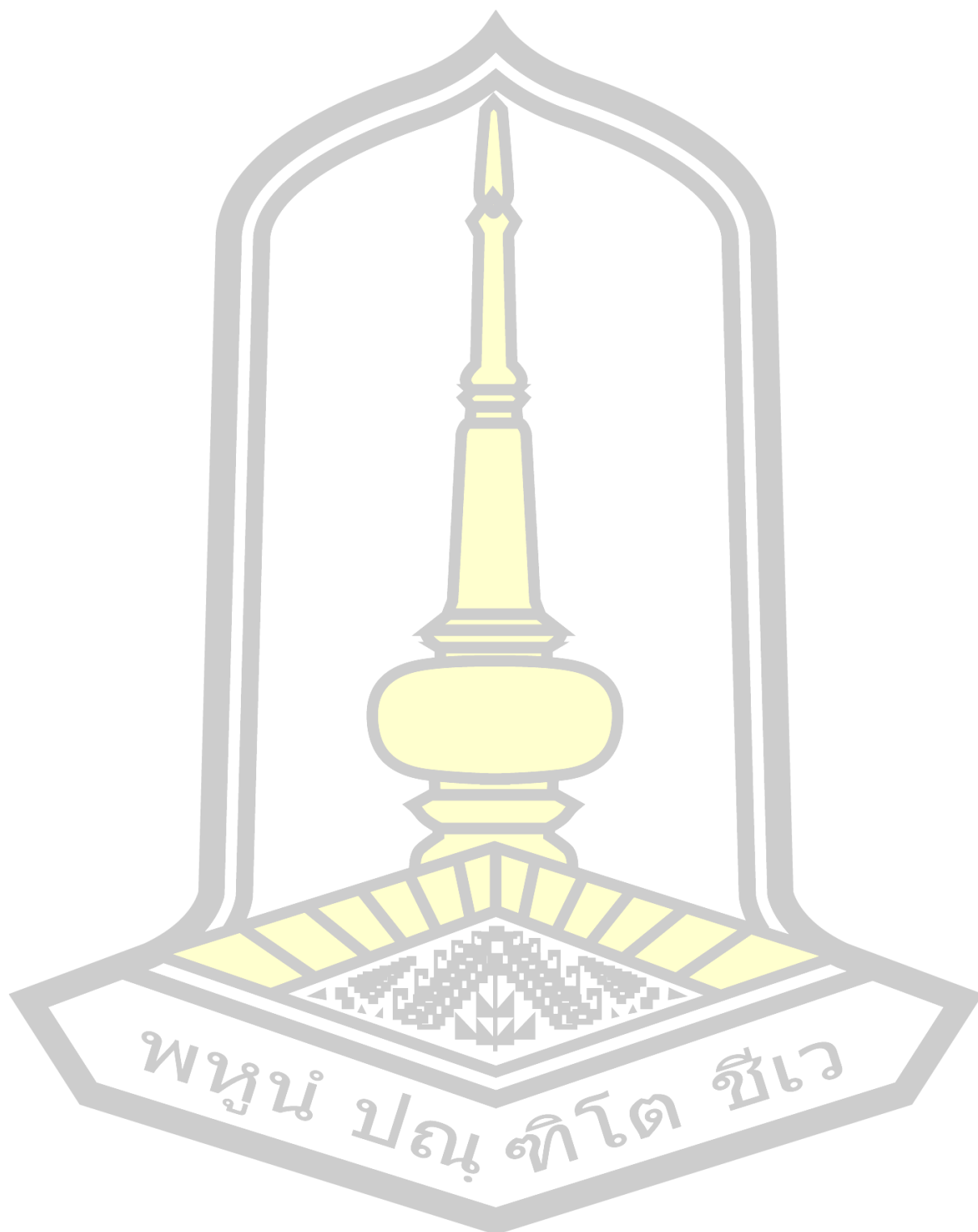
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูสำหรับปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ที่ความดันบรรยากาศ		
ผู้วิจัย	ชัตติยะ สระแก้ว		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปรมะขันธ์ จันทร์เพ็ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ สุทธิสา		
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	ฟิสิกส์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2562

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูสำหรับปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ที่ความดันบรรยากาศ เพื่อเพิ่มอัตราการงอกและอัตราการโตของต้นกล้า ผลการออกแบบและจำลองการไหลของแก๊สโดยใช้โปรแกรม Solid Work พบว่าแก๊สที่ไหลเข้าไปในแผ่นกระจายแก๊สจะมีความเร็วลดลง จากนั้นจึงไหลเข้าไปในชั้นกักแก๊สและมีความเร็วลดลงต่ำสุด (ความดันแก๊สมีค่าสูงสุด) ก่อนถูกดันเข้าไปในท่อหัวฉีด ซึ่งแก๊สจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นอีกครั้งขณะไหลผ่านบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงและความถี่สูง การใช้แผ่นกระจายแก๊สที่เหมาะสมจะทำให้ไม่เกิดจุดสะท้อนภายในชั้นกักแก๊ส ส่งผลให้ความเร็วแก๊สที่ไหลผ่านท่อหัวฉีดมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แก๊สอาร์กอนถูกใช้เป็นตัวตั้งต้นในการจุดพลาสมา พบว่าพลาสมาติดได้ดีครบทุกรูและไม่เกิดการอาร์คขณะเคลื่อนที่ผ่านเมล็ดพันธุ์โดยหัวพลาสมาถูกยึดติดกับเครื่องสแกน x-y-z เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแนวลำพลาสมาเจ็ตให้กวาดผ่านเมล็ดพันธุ์อย่างทั่วถึงมากขึ้น ลำพลาสมามีความยาวสูงสุดประมาณ 10 mm เมื่อทดสอบที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่างกัน คือ 200 250 300 และ 350 L/h พบว่าอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนและกำลังไฟฟ้าที่ทำให้พลาสมาติดได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอมากที่สุด คือที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 250 L/h และที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 893 W ความถี่ 52 kHz ผลการประยุกต์ใช้พลาสมาเจ็ตที่ออกแบบและสร้างขึ้นเองได้นำมาทดสอบที่รีดเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว พบว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมามีอัตราการโตในช่วง 4 วันแรกสูงกว่าเมล็ดควบคุม 18 % ซึ่งน่าจะเป็นผลจากอนุมูลอิสระของออกซิเจนและความชื้นในพลาสมาเข้าไปทำอันตรกิริยากับเปลือกหุ้มเมล็ด ทำให้เมล็ดชอบน้ำมากขึ้น จึงสามารถดูดซับแก๊สออกซิเจนและความชื้นจากสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมา

คำสำคัญ : หัวกำเนิดพลาสติกแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ, แผ่นกระจายแก๊ส, อัตราการโต



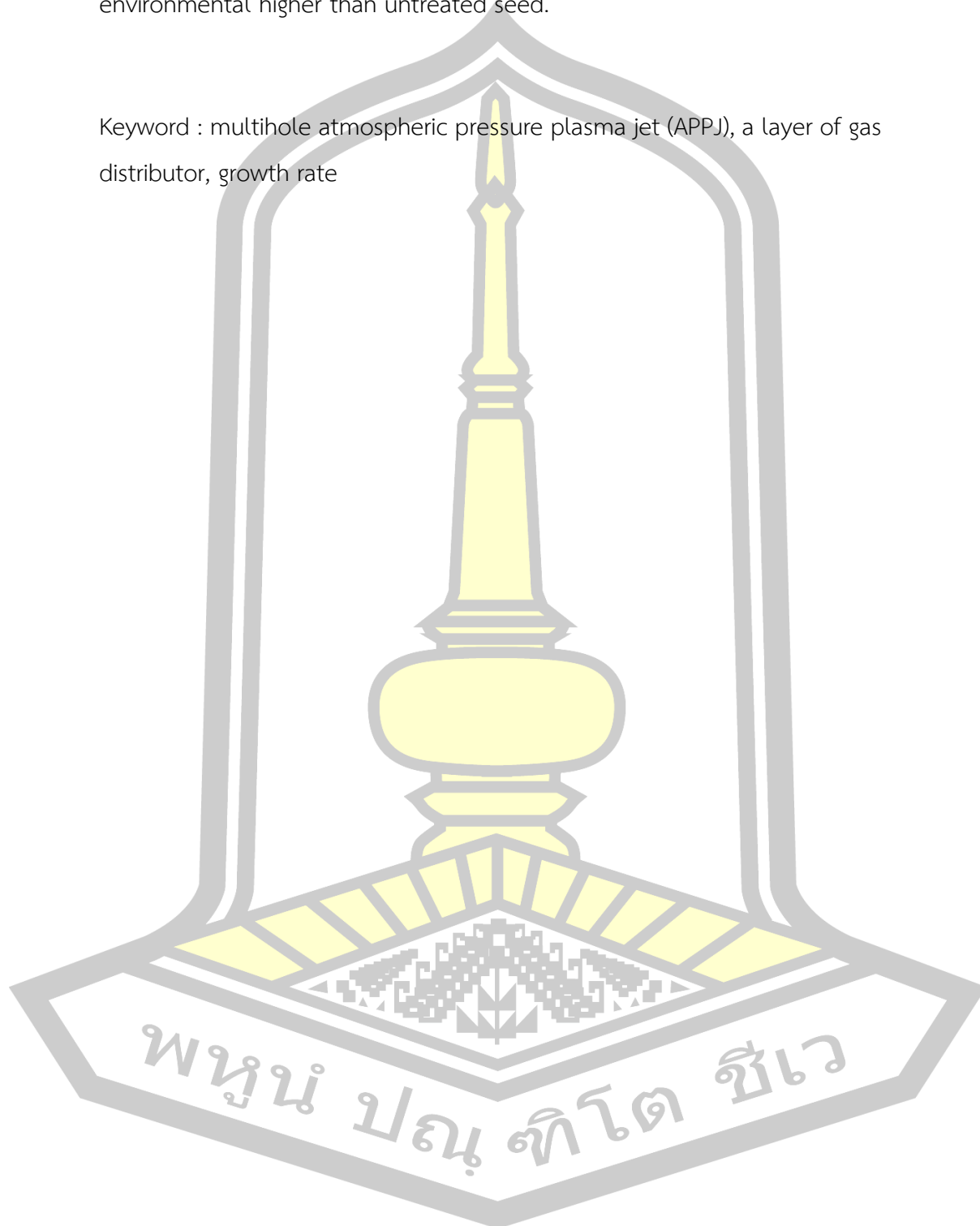
TITLE	Development of Multi-Hole Atmospheric Pressure Plasma Jet for Seed Treatment		
AUTHOR	Khattiya Srakaew		
ADVISORS	Assistant Professor Artit Chingsungnoen , Ph.D. Assistant Professor Poramate Chunpang , Ph.D. Assistant Professor Waraporn Sutthisa , Ph.D.		
DEGREE	Master of Science	MAJOR	Physics
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2019

ABSTRACT

The purpose of this research is to develop the multi-hole atmospheric pressure plasma jet (APPJ) for improving seed germination and growth. In this research, Solid work was used to design gas flow simulation inside the plasma source. The simulated results show that gas velocity decreases when arriving at the layer of the gas distributor. After that gas will be injected to the detain layer with the highest pressure before releasing into the nozzle. At this point, the velocity of gas will increase under the high electric field and hih frequency. Using the appropriate gas distributor resulted in uniform gas flow with no amphibious point. After testing, we found that it works very well for more easily discharge with the argon injection. There are the argon plasma beam come out every hole and no arcing. Moreover, the plasma head 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 10 mm. The argon flow rates of 200, 250, 300, and 350 L/h were used to evaluate the optimum condition for stable discharge. It founds that the AC power of 893 W and frequency of 52 kHz with the argon flow rate of 250 L/h is the suitable condition for the stable discharge. 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. Treated seed give a higher growth rate than the control around 18 %. This is due to the effect of oxygen and humid radicals in plasma which can increase the surface free energy of

seed coat. As a result, the treated seed can absorb oxygen and moisture from the environmental higher than untreated seed.

Keyword : multihole atmospheric pressure plasma jet (APPJ), a layer of gas distributor, growth rate



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลือจากบุคลากรหลายท่าน เป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ปรเมษฐ จันทร์เพ็ง ผศ.ดร.วราภรณ์ สุทธิสา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และ ผศ.ดร.พิชญ พูลเจริญศิลป์ ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือในการทำวิจัย ตรวจสอบข้อบกพร่องและแนะนำวิธีการแก้ไข ปัญหาด้วยความเอาใจใส่อย่างดีเยี่ยมมาตลอดตั้งแต่ต้นจนเสร็จสิ้นเรียบร้อย

ขอขอบคุณ บิดา มารดา ครู อาจารย์ ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู อุปการะในการศึกษาเป็นผู้ซึ่งคอยให้กำลังใจอยู่เบื้องหลังของความสำเร็จ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และรุ่นน้อง ภาควิชาฟิสิกส์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องให้การช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จ

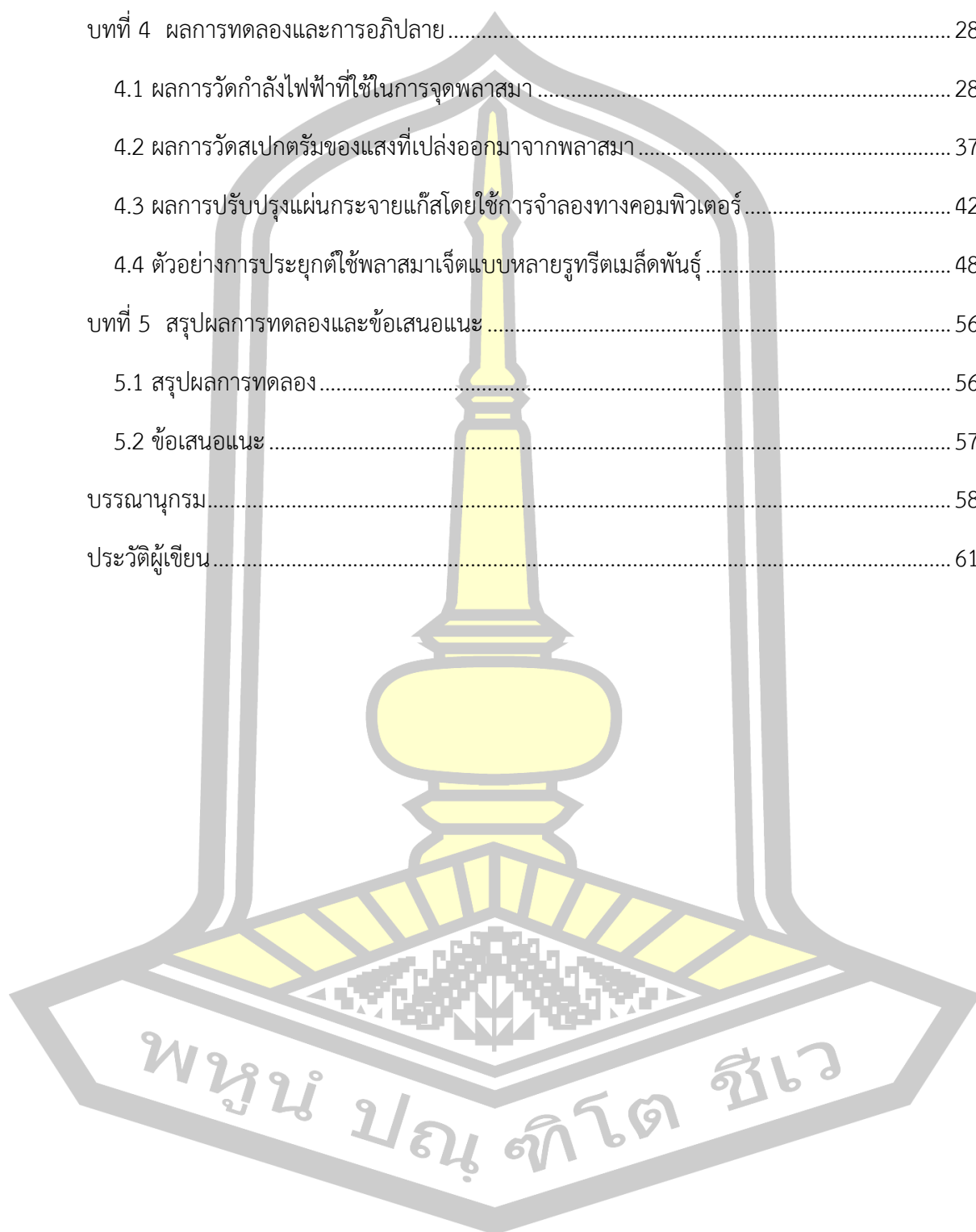
ชัตติยะ สระแก้ว



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฅ
อักษรย่อและสัญลักษณ์.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ระยะเวลาทำการวิจัย.....	3
1.6 สถานที่ทำการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คุณสมบัติของพลาสมา.....	4
2.2 แหล่งจ่ายไฟสำหรับพลาสมา.....	9
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 วิธีการวิจัย.....	17
3.1 กระบวนการออกแบบและสร้างหัวกำเนิดพลาสมา.....	19
3.2 ทดสอบการทำงาน.....	25

3.3 การนำหัวพลาสติกแบบหลายรูปไปใช้ในการทรีตเมนต์พันธุ์.....	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย.....	28
4.1 ผลการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสติก.....	28
4.2 ผลการวัดสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสติก.....	37
4.3 ผลการปรับปรุงแผ่นกระจายแก๊สโดยใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	42
4.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้พลาสติกแบบหลายรูปทรีตเมนต์พันธุ์.....	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	56
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	57
บรรณานุกรม.....	58
ประวัติผู้เขียน.....	61



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1.1 แผนการทำวิจัยตลอดระยะเวลา 2 ปี.....	3
ตาราง 4.1 เงื่อนไขและค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	37
ตาราง 4.2 สปีชีส์ที่ตรวจพบจากการวิเคราะห์เส้นสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากอาร์กอน พลาสมา.....	41



สารบัญภาพประกอบ

หน้า

ภาพที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงานมากขึ้น [2]	4
ภาพที่ 2.2 การสร้างสถานะพลาสมาโดยการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า (Electrical discharge)	5
ภาพที่ 2.3 ภาพจำลองการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างพลาสมากับพื้นผิว [6].....	7
ภาพที่ 2.4 องค์ประกอบของพลาสมาที่ส่งผลกระทบต่อกายภาพและชีวเคมีของเซลล์.....	8
ภาพที่ 2.5 (ก) ตัวอย่างภาพไมโครล CG-402R1 (ข) ไดอะแกรมการต่ออุปกรณ์เสริมเพื่อกำหนดความถี่ และขนาดสัญญาณขาออก	9
ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างภาพถ่ายด้านหน้าและด้านหลังของเครื่องขยายเสียงรุ่น MEGA9004 ที่ถูกนำมาใช้ เป็นส่วนขยายกำลังของภาคกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง.....	10
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น [14].....	15
ภาพที่ 2.8 เปรียบเทียบความยาวต้นอ่อนแรดดิชที่เพาะเป็นเวลา 4 วัน จากเมล็ดที่ผ่านและไม่ผ่าน การพรีตพลาสมา.....	16
ภาพที่ 2.9 โครงสร้างหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น.....	16
ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงาน	18
ภาพที่ 3.2 แบบร่างหัวพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูโดยโปรแกรม Solid Work.....	19
ภาพที่ 3.3 การใช้โปรแกรม Aspire 4.0 สำหรับการสร้าง G-code.....	21
ภาพที่ 3.4 เครื่องกัดซีเอ็นซีที่สร้างขึ้นเอง (CNC milling machine)	22
ภาพที่ 3.5 จำลองความเร็วของแก๊สอาร์กอนที่ไหลในหัวพลาสมาเจ็ต	23
ภาพที่ 3.6 ชิ้นงานจริงหลังการประกอบที่มีการติดตั้งข้อต่อแก๊ส และข้อต่อขั้ว RF Power.....	24
ภาพที่ 3.7 ไดอะแกรมการทดสอบหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตที่ความดันบรรยากาศแบบหลายรู.....	25
ภาพที่ 3.8 ภาพถ่ายเครื่องมือวัดของระบบหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตฯ ในการบันทึกผลการทดลอง	26
ภาพที่ 3.9 ทดสอบการพรีตเมล็ดถั่วเขียวสำหรับการผลิตถั่วงอก	27
ภาพที่ 4.1 การแตกตัวของแก๊สอาร์กอนโดยใช้หัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่ความดัน บรรยากาศ ที่ช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ (Low power mode) และอัตราการไหลของแก๊ส 300 L/h	28
ภาพที่ 4.2 สัญญาณแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของหัวกำเนิดพลาสมาแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศที่ ช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 300 L/h.....	29

ภาพที่ 4.3 (a) ไดอะแกรมภาพตัดขวางของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ต เส้นประสีแดงหมายถึงหัวเสมือนที่อยู่ระหว่างหัวกำลังและหัวกรวดที่ผิวด้านในของท่อแก๊ส (b) แบบจำลองวงจรสมมูลของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ต..... 30

ภาพที่ 4.4 กราฟ Lissajous ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ ช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 300 L/h..... 31

ภาพที่ 4.5 กำลังไฟฟ้าของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 300 L/h..... 32

ภาพที่ 4.6 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในการจุดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่าง ๆ กัน..... 33

ภาพที่ 4.7 ลักษณะลำพลาสมาเจ็ต ที่ช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ และอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่างกัน 35

ภาพที่ 4.8 ลักษณะลำพลาสมาเจ็ต ที่ช่วงกำลังไฟฟ้าสูง และอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่างกัน..... 36

ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากหัวพลาสมาเจ็ตฯ ที่ช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่าง ๆ กัน..... 38

ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากหัวพลาสมาเจ็ตฯ ที่ช่วงกำลังไฟฟ้าสูง ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่าง ๆ กัน 39

ภาพที่ 4.11 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมอาร์กอนโดยการปลดปล่อยโฟตอนที่ความยาวคลื่น (Ar II) = 616.85 nm..... 41

ภาพที่ 4.12 ภาพร่างแผ่นกระจายแก๊ส (a) แบบที่ 1 (b) แบบที่ 2 43

ภาพที่ 4.13 ภาพโครงสร้างภายในหัวกำเนิดพลาสมาฯ (a) ใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 1 (b) ใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 2..... 44

ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบผลการคำนวณความเร็วแก๊สอาร์กอน (a), (b), (c), (d) และความดันแก๊ส (e), (f), (g), (h) ภายในหัวพลาสมาเจ็ตฯ เมื่อใช้แผ่นกระจายแก๊ส **แบบที่ 1** ที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน 46

ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบผลการคำนวณความเร็วแก๊สอาร์กอน (a), (b), (c), (d) และความดันแก๊ส (e), (f), (g), (h) ภายในหัวพลาสมาเจ็ตฯ เมื่อใช้แผ่นกระจายแก๊ส **แบบที่ 2** ที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน 47

ภาพที่ 4.16 การประยุกต์ใช้พลาสมาที่ความดันบรรยากาศทางเกษตรกรรม..... 48

ภาพที่ 4.17 ภาพจำลองการวัดอุณหภูมิที่ระยะห่างจากปลายท่อ 5 mm ทั้งแบบหัวพลาสมาเคลื่อนที่และอยู่กับที่..... 49

ภาพที่ 4.18 ผลการวัดอุณหภูมิที่ระยะห่างจากปลายท่อ 5 mm ทั้งแบบหัวพลาสมาเคลื่อนที่และหัวพลาสมาอยู่กับที่..... 50

ภาพที่ 4.19 ภาพจำลองการใช้พลาสติกเจ้าๆ ทรีตเมิลด์พันธ์ุ.....	52
ภาพที่ 4.20 ตัวอย่างการทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสติกเจ้าๆ ทรีตเมิลด์พันธ์ุถั่วเขียว	52
ภาพที่ 4.21 ผลการซึ่งมวลต้นอ่อนถั่วเขียวที่เงื่อนไขต่าง ๆ กัน.....	53
ภาพที่ 4.22 ผลการซึ่งมวลต้นถั่วเขียวในช่วง 4 วันแรก จากเมล็ดที่ผ่านการทรีตพลาสติกที่เวลาต่าง ๆ กัน	54
ภาพที่ 4. 23 เปรียบเทียบต้นถั่วเขียวในช่วง 4 วันแรก ซึ่งถูกเพาะจากเมล็ดพันธ์ุถั่วเขียวที่ถูกทรีตด้วยพลาสติกที่เวลาต่าง ๆ กัน.....	54
ภาพที่ 4.24 ภาพถ่ายต้นถั่วเขียวในช่วง 6 วันแรก เพาะจากเมล็ดที่ผ่านการทรีตพลาสติกที่เวลาประมาณ 4 นาที	55



อักษรย่อและสัญลักษณ์

อักษรย่อและสัญลักษณ์

ความหมาย

Ar	Argon
V	Voltage
I	Current
RF	Radio frequency
rms	Root mean square
\bar{P}	Average power
APP	Atmospheric pressure plasma
APPJ	Atmospheric pressure plasma jet
DBD	Dielectric barrier discharge
GND	Grounding electrode conductor
HV	High Voltage
B_0	Maximum magnetic flux density
U_p	Highest primary potential
A_c	Core area
CAD	Computer aided design
CAM	Computer Aided manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
n_i	Ion density
n_e	Electron density
m_i	Mass of Ions
m_e	Mass of electrons
OH	Hydroxyl radical
-C=O	Carbonyl
-COOH	Carboxyl
OES	Optical emission spectrometer
CCD	Charge coupled device

พหุ ประถมศึกษา

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

สถานะพลาสมา (Plasma state) จัดเป็นสถานะที่ 4 (4th Ionized state) ที่เกิดจากการให้พลังงานมากพอกับแก๊สเพื่อทำให้แก๊สแตกตัว (Ionized) โดยพลังงานที่ให้อาจอยู่ในรูปความร้อน (Heat) แสง (Light) สนามไฟฟ้า (Electric field) ซึ่งจะทำให้สถานะพลาสมาประกอบไปด้วยอนุภาคหลายชนิด เช่น ไอออน (Ions) อิเล็กตรอน (Electrons) โมเลกุล (Molecule) และเรดิคัล (Radicals) ซึ่งเป็นอะตอมหรือโมเลกุลที่ไม่เสถียร มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา การประยุกต์ใช้พลาสมาเพื่อการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว (Plasma surface modification) สามารถทำได้หลายเทคนิคขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นในกลุ่มของการเพิ่ม (Addition) อะตอมหรือโมเลกุลเพื่อเพิ่มพลังงานเชิงผิว (Increase of surface energy) เพิ่มหมู่ฟังก์ชัน (Introduction of Chemical groups) หรือเพื่อการเคลือบ (Deposition/Coating) ขณะที่ในกลุ่มของการกำจัด (Removal) อะตอมที่พื้นผิวได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ 1. เพื่อการทำความสะอาด (Cleaning) 2. เพื่อการกัดเซาะ (Etching) 3. เพื่อการฆ่าเชื้อ (Sterilization) โดยในงานวิจัยนี้พลาสมาที่ถูกสร้างขึ้นจะไปทำหน้าที่ทั้งการฆ่าเชื้อและเพิ่มพลังงานเชิงผิวของชิ้นงาน ดังนั้นถ้านำหัวพลาสมาเจ็ตที่พัฒนาขึ้นนี้มาปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ จะทำให้ลดการเกิดโรคในกระบวนการเพาะปลูก เมล็ดพันธุ์สามารถดูดซับความชื้นและออกซิเจนได้ดีขึ้น ทำให้เมล็ดงอกได้ดีและโตเร็ว ทนต่อสภาพภูมิอากาศที่แห้งแล้งได้มากขึ้น โดยงานวิจัยของ I. Adamovich และคณะ [1] ได้คาดการณ์ไว้ว่าในช่วงปี ค.ศ. 2017-2060 การประยุกต์ใช้พลาสมาทางการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหารจะมีมากขึ้น ซึ่งจะช่วยส่งเสริมให้เกิดการทำเกษตรแบบยั่งยืน (Sustainable farming) และช่วยเพิ่มผลผลิต (Productivity)

พลาสมา ถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ พลาสมาเย็น (Cold plasma) และพลาสมา ร้อน (Hot plasma) ในกรณีของพลาสมาเย็น อุณหภูมิของพลาสมาจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในสภาวะสุญญากาศหรือในสภาวะความดันต่ำ ที่ซึ่งอัตราการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับแก๊สตั้งต้นมีค่าไม่สูงพอ จึงทำให้อัตราการถ่ายเทพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกับแก๊สตั้งต้นซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิห้อง มีค่าน้อยมาก อุณหภูมิของพลาสมาโดยรวมจึงสูงกว่าอุณหภูมิห้องเล็กน้อย แต่สำหรับพลาสมา ร้อน ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่สภาวะความดันสูงกว่าหรือเท่ากับ ความดันบรรยากาศ ที่ซึ่งอัตราการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับแก๊สตั้งต้นมีค่าสูงมาก จึงทำให้อัตราการถ่ายเทพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนและแก๊สตั้งต้นมีค่าสูง อิเล็กตรอนซึ่งรับพลังงานจาก

สนามไฟฟ้าภายนอกได้ดีและมีอุณหภูมิสูงจึงสามารถส่งผ่านพลังงานให้กับอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมาได้ดี อุณหภูมิของพลาสมาโดยรวมจึงสูงขึ้นถึงระดับหลักพันหรือหลักหมื่นเคลวิน การฆ่าเชื้อโดยใช้พลาสมาเย็น (Sterilization by cold plasmas) ที่ความดันบรรยากาศ คืออีกหนึ่งตัวอย่างของการประยุกต์ใช้พลาสมา ซึ่งมีข้อดี คือ การใช้ต้นทุนต่ำ เนื่องจากไม่ต้องลงทุนในระบบสุญญากาศ และมีความสะดวกในการนำชิ้นงานเข้าและออก

การประยุกต์ใช้พลาสมาในอุตสาหกรรมอาหารและทางการแพทย์ เพื่อช่วยในการฆ่าเชื้อเพิ่มอัตราการงอกและการเจริญเติบโต ถือว่าเป็นเรื่องใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจทั้งจากนักวิชาการเกษตรและนักวิจัยพลาสมาเทคโนโลยี ในปัจจุบันพลาสมาที่สามารถดำเนินการ ณ ระดับความดันหนึ่งบรรยากาศ (Atmospheric pressure plasma: APP) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากระบบ APP ไม่ต้องใช้อุปกรณ์สุญญากาศ เช่น ปั๊มโรตารี เกจวัดความดัน และแชนเบอร์สุญญากาศ จึงสามารถลดต้นทุนในการสร้างระบบไปได้อย่างมาก ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานปรับปรุงคุณสมบัติเชิงผิวของวัสดุที่มีพื้นที่หน้าตัดกว้าง และทำให้มีความสะดวกในการปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์เพื่อกระตุ้นการงอก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สามารถพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ (homemade design) ขึ้นมาใช้เอง
2. สามารถประยุกต์ใช้แหล่งกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศในงานทางการเกษตร

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สตั้งต้นหลักในการจุดพลาสมา และใช้เครื่องสแกน X-Y-Z ในการควบคุมตำแหน่งหัวพลาสมา
2. ในขั้นตอนการทดสอบการทำงานของหัวพลาสมาฯ และผลของพลาสมาต่อการปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ต้นแบบของเครื่องปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์โดยใช้พลาสมาเจ็ตแบบหลายรู

2. สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาในการปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์เพื่อกระตุ้นการงอกของเมล็ดพันธุ์ได้

1.5 ระยะเวลาทำการวิจัย

ตาราง 1.1 แผนการทำวิจัยตลอดระยะเวลา 2 ปี

รายละเอียดการดำเนินการ	พ.ศ. 2560		พ.ศ. 2561					พ.ศ. 2562	
	Q1	Q2	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q1	Q2
ขออนุมัติชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์และแต่งตั้งอาจารย์ที่ปรึกษา									
ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ									
เขียนรายงานการวิจัยบทที่ 1 ถึง 3									
พัฒนาเครื่องมือสำหรับการวิจัย									
สอบเค้าโครงวิทยานิพนธ์									
ทดสอบการทำงานของหัวพลาสมาฯ									
วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย									
เขียนรายงานการวิจัยบทที่ 4 ถึง 5 และบทความวิจัยวิทยานิพนธ์									
สอบวิทยานิพนธ์ และส่งบทความวิจัยเพื่อเผยแพร่									

หมายเหตุ :

Q1 หมายถึง ระยะเวลาช่วงเดือน มกราคม - มีนาคม

Q2 หมายถึง ระยะเวลาช่วงเดือน เมษายน - พฤษภาคม

Q3 หมายถึง ระยะเวลาช่วงเดือน มิถุนายน - กรกฎาคม

Q4 หมายถึง ระยะเวลาช่วงเดือน สิงหาคม - ตุลาคม

Q5 หมายถึง ระยะเวลาช่วงเดือน พฤศจิกายน - ธันวาคม

1.6 สถานที่ทำการวิจัย

หน่วยวิจัยพลาสมาเทคโนโลยี (SC1-211) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

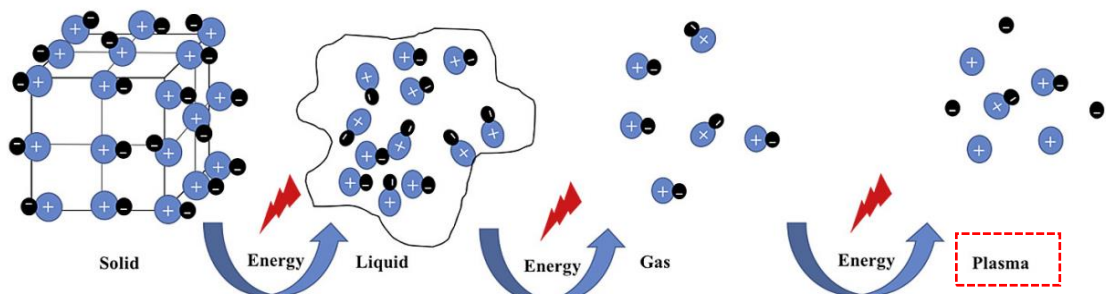
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงสมบัติพื้นฐานของพลาสมา วัสดุทางวิศวกรรมและอิเล็กทรอนิกส์ ที่เกี่ยวข้องสำหรับการศึกษาค้นคว้าอันตรกิริยาของพลาสมา และพฤติกรรมของพลาสมาเจ็ตที่ความดันบรรยากาศ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ สำหรับการทรีตเมนต์พื้นผิว

2.1 คุณสมบัติของพลาสมา

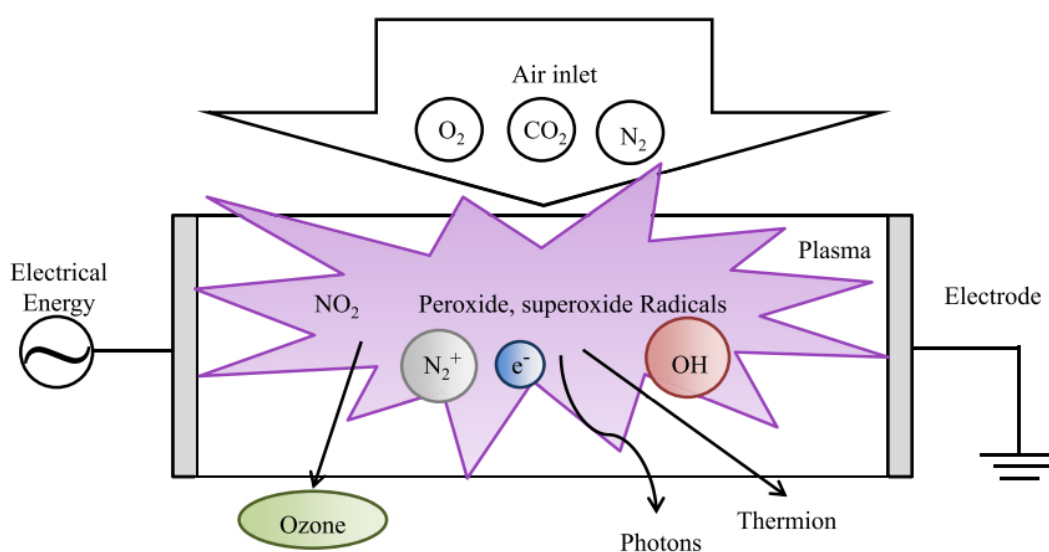
โดยปกติแล้วอากาศจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่เมื่อให้พลังงานกับโมเลกุลของแก๊สมากขึ้นถึงจุดหนึ่ง แก๊สจะแตกตัว (Discharge) และนำไฟฟ้าได้ ทั้งนี้เนื่องจากแก๊สถูกไอออไนซ์และปลดปล่อยอนุภาคย่อยที่มีประจุไฟฟ้าออกมา เช่น ไอออนลบ หรือไอออนบวก และอิเล็กตรอน โดยแก๊สที่ถูกไอออไนซ์อย่างต่อเนื่องจะอยู่ในสถานะพลาสมา ดังภาพที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสสารเนื่องจากสสารได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [2]



ภาพที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงานมากขึ้น

พลาสมามีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างจากสถานะของแข็ง ของเหลว และแก๊ส อย่างชัดเจน เนื่องจากพลาสมาประกอบด้วยไอออนที่เคลื่อนที่ช้าและอิเล็กตรอนที่มีความคล่องตัวสูง เนื่องจากมีมวลน้อยกว่ามาก ในพลาสมาไอออนและอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้กันจะสร้างสนามไฟฟ้าขึ้น และส่งแรงคูลอมบ์ไปยังอนุภาคใกล้เคียงที่มีประจุไฟฟ้า นอกจากนั้นการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าจะสร้างกระแสและสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำในบริเวณนั้น ๆ ขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความหนาแน่นอิเล็กตรอน (n_e) และความหนาแน่นไอออน (n_i) ในพลาสมาจะมีค่าเท่าๆ กันเสมอ นั่นคือ $n_e = n_i$ จึงทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ พลาสมาจึงอยู่ในสถานะกึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า (Quasineutrality) และพลาสมาจะแสดงพฤติกรรมร่วม (Collective behavior) ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่กลุ่มอนุภาคในพลาสมาแสดงออกมา

ร่วมกัน เช่น ความสามารถในการป้องกันการรบกวนจากสนามไฟฟ้าภายนอก และการสร้างชีท (Sheath) บริเวณรอยต่อระหว่างพลาสมากับผิวสัมผัส ซึ่งตัวอย่างของกระบวนการสร้างพลาสมาสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.2 ด้วยการให้กำลังไฟฟ้าเพื่อเร่งอิเล็กตรอนให้ชนกับโมเลกุลของแก๊ส O_2 CO_2 และ N_2 เพื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานมากขึ้นถึงจุดหนึ่ง การชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของแก๊สจะสามารถกระตุ้นให้แก๊สแตกตัวเป็นพลาสมา อนุภาคในพลาสมามีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา พลาสมาสามารถเปล่งแสงและแผ่ความร้อนออกมาได้ ตัวอย่างขององค์ประกอบในพลาสมาอากาศ คือ NO_2 , N_2^+ , e^- , OH , O_3 , Peroxide, Superoxide radicals, Photons, [3] ดังแสดงตามภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การสร้างสถานะพลาสมาโดยการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า (Electrical discharge)

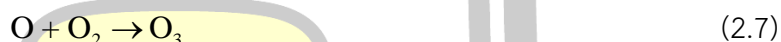
ในกรณีของแก๊ส การเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะถูกกำหนดโดยอุณหภูมิ แต่ในกรณีของพลาสมา มวลของไอออน (m_i) มีค่ามากกว่ามวลของอิเล็กตรอน (m_e) มาก โดยมวลของโปรตรอน $m_p > 1835m_e$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงมีสภาพความคล่องตัว (Mobility) สูงกว่าไอออนมาก เมื่อถูกกระตุ้นหรือได้รับพลังงานจากภายนอก อิเล็กตรอนจะตอบสนองได้เร็วกว่า แต่การส่งผ่านโมเมนตัมเนื่องจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนและไอออนนั้นกลับทำได้น้อยมาก จึงทำให้แก๊สที่ถูกไอออนไนซ์เป็นพลาสมา ความดันต่ำ (Low pressure plasma) พลังงานของอิเล็กตรอนจะมีค่าสูงกว่าพลังงานของไอออนมาก ในขณะที่ไอออนกับโมเลกุลของแก๊สที่เป็นกลางทางไฟฟ้าจะมีพลังงานเท่าๆ กัน เนื่องจากมีมวลใกล้เคียงกัน ตามสมการ

$$k_B T_e \gg k_B T_i \approx k_B T_g \quad (2.1)$$

โดยที่ T_e คือ อุณหภูมิของอิเล็กตรอน T_i คือ อุณหภูมิของไอออน และ T_g คือ อุณหภูมิของแก๊ส ยกตัวอย่างเช่น ที่พลาสมาความดันต่ำ (< 100 Pa) อุณหภูมิของแก๊สและไอออนจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง (≈ 300 K) ในขณะที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอนนั้นอาจสูงถึง 20,000 K ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการจุดพลาสมา ด้วยเหตุที่อุณหภูมิของอนุภาคในพลาสมาที่อาจสูงถึงหลายหมื่นเคลวิน เราจึงนิยมบอกอุณหภูมิหรือพลังงานของอนุภาคในพลาสมาในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) โดยที่

$$k_B T = 1 \text{ eV} \equiv 11,600 \text{ K} \quad (2.2)$$

สถานะพลาสมา (Plasma state) จะประกอบไปด้วยอนุภาคหลายชนิด เช่น ไอออน (Ions) อิเล็กตรอน (Electrons) นิวทรัลสปีชีส์ (Neutral species) และแอคทีฟสปีชีส์ (Active species) ซึ่งเป็นอะตอมหรือโมเลกุลที่ไม่เสถียร ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลของแก๊สตั้งต้น ตัวอย่างเช่น เมื่อเร่งอิเล็กตรอนให้มีความเร็วสูง (Fast electron) เข้าชนโมเลกุลของแก๊สออกซิเจน (O_2) จะมีหลายปฏิกิริยาที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ เช่น [4], [5]

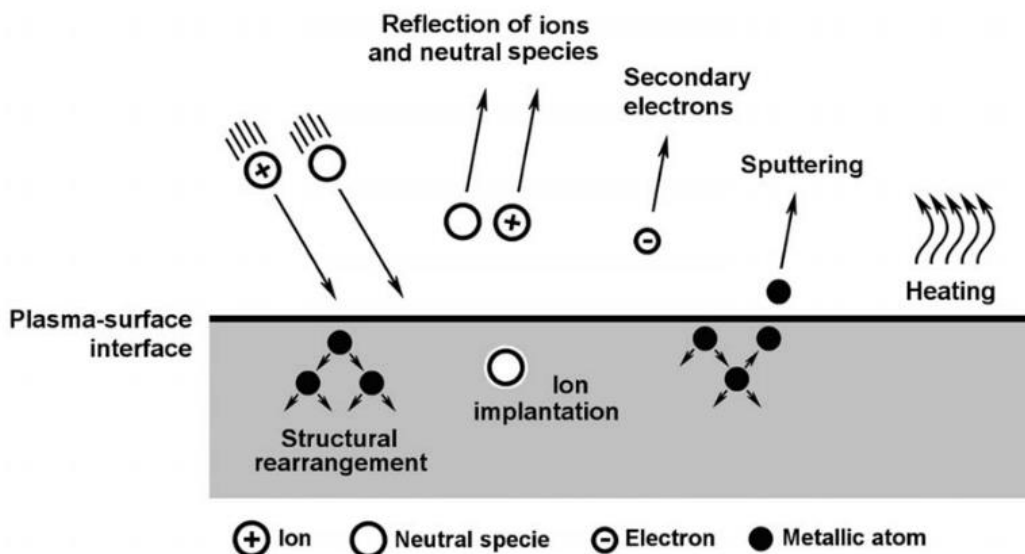


โดยที่ e และ O^+ หมายถึง อิเล็กตรอนและออกซิเจนไอออน ตามลำดับ

O , O^* และ O_3 คือ เรดิคัลที่เกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจน มีชื่อเรียกต่างกัน คือ ออกซิเจนอะตอม ออกซิเจนที่ถูกกระตุ้น และโอโซน

O_2^* หมายถึง โมเลกุลของออกซิเจนที่ถูกกระตุ้น

ธรรมชาติของแอคทีฟสปีชีส์จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อนำผิววัสดุเข้าใกล้พลาสมาที่มีส่วนผสมของสปีชีส์ต่างๆ ข้างต้น ก็จะมีโอกาสที่สปีชีส์เหล่านี้กับอะตอมที่พื้นผิวของสารเกิดอันตรกิริยา (Plasma surface interactions) ซึ่งกันและกัน ดังภาพที่ 2.3

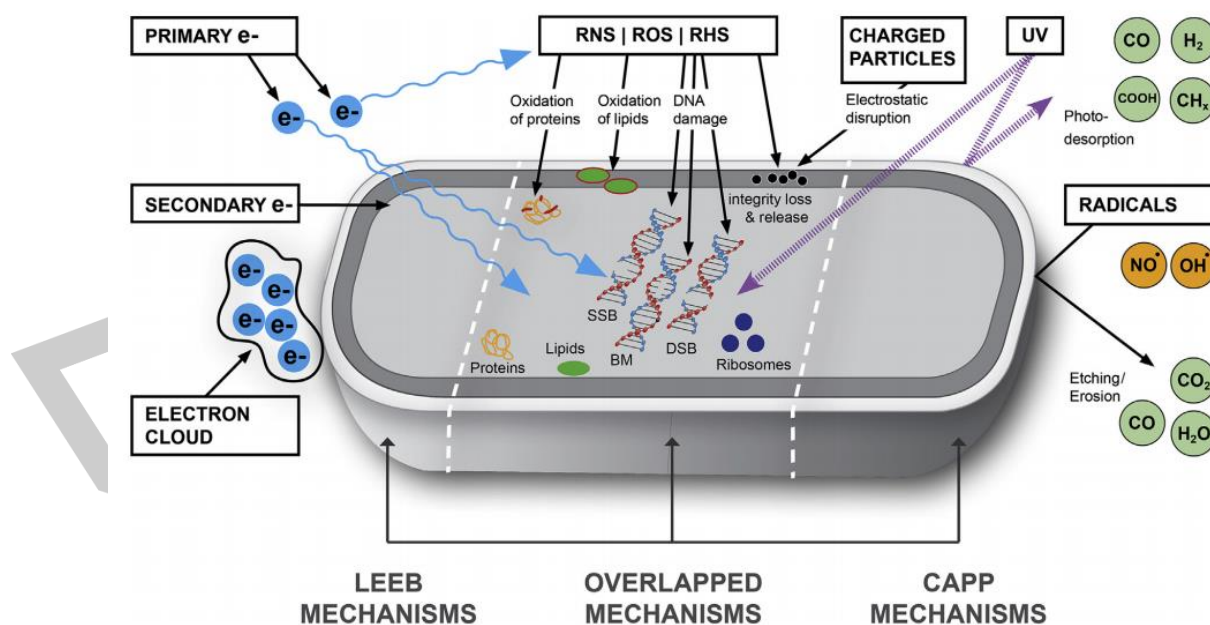


ภาพที่ 2.3 ภาพจำลองการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างพลาสมา กับพื้นผิว [6]

ในกรณีที่แก๊สตั้งต้นที่ใช้ในการสร้างพลาสมามีส่วนผสมของแก๊สที่ว่องไวปฏิกิริยา (Active gases) เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไอน้ำ หรือ อากาศ เมื่อแก๊สเหล่านี้เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา จะเกิดเรดิคอลที่มีความว่องไวขึ้นปะปนอยู่ในตัวกลางพลาสมาได้หลายชนิด เช่น ถ้าพลาสมาถูกสร้างขึ้นที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งมีส่วนผสมของไนโตรเจน (N_2) ออกซิเจน (O_2) และไอน้ำ (H_2O) เราจะได้พลาสมาอากาศ (Air plasma) หลังจากนั้นเรดิคอลที่เคลื่อนที่เข้าไปใกล้บริเวณรอยต่อ (Boundary layer) ระหว่างผิวแผ่นฐาน (ซึ่งในที่นี้คือ พอลิโพลีลีน) กับพลาสมาอากาศ จะไปสร้างพันธะกับอะตอมที่ผิว เช่น O เข้าไปดึง H ออกจากพันธะ C-H เกิดเป็นเรดิคอลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, OH) ที่ยังมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาจึงสามารถเข้าไปจับกับอะตอมอื่น ๆ ที่ผิวได้อีก ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้พลังงานเชิงผิว (Surface energy) ของวัสดุเปลี่ยนไป เช่น การสร้างหมู่เรดิคอลในกลุ่มคาร์บอนิล ($-C=O$) คาร์บอกซิล ($-COOH$) ไฮดรอกซิล ($-OH$) และเอมีน ($-N-$) จะเพิ่มพลังงานเชิงผิวของวัสดุ ซึ่งจะทำให้ผิวของวัสดุมีความชอบน้ำมากขึ้น (Increase hydrophilic) และมีการยึดติดดีขึ้น (Improve adhesion)

การฆ่าเชื้อโดยใช้พลาสมาเย็น (Sterilization by low temperature plasmas) การฆ่าเชื้อโดยใช้พลาสมาเย็นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ การอาบพลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศ และการอาบพลาสมาเย็นที่ความดันต่ำ สองเทคนิคนี้มีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกัน คือ การสร้างสถานะพลาสมาที่ความดันบรรยากาศจะใช้ต้นทุนต่ำ เนื่องจากไม่ต้องลงทุนในระบบสุญญากาศ และมีความสะดวกในการนำชิ้นงานเข้าและออก แต่มีข้อจำกัดในเรื่องลักษณะและปริมาณของชิ้นงาน ที่สามารถโหลดชิ้นงานได้ในปริมาณน้อย เพราะจะมีปัญหาเรื่องความทั่วถึงและความ

สม่ำเสมอของบริเวณที่ถูกพริตด้วยพลาสมา ในขณะที่การใช้พลาสมาเย็นที่ความดันต่ำนั้นจะทำให้ระยะปลอดการชนเฉลี่ยภายในแชนเบอร์สูญญากาศมากขึ้น จึงสามารถสร้างพลาสมาได้ในบริเวณกว้าง และพลาสมาสามารถกระจายตัวเข้าไปโดยรอบชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้เป็นระยะทางที่มากกว่า แต่จะต้องมีการลงทุนในระบบสูญญากาศในระยะแรก ซึ่งข้อดีข้อนี้สามารถถูกชดเชยด้วยปริมาณชิ้นงานที่ถูกฆ่าเชื้อในแต่ละครั้งที่มากกว่า ใช้เวลาการฆ่าเชื้อในแต่ละครั้งสั้นกว่า และสามารถฆ่าเชื้อชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า โดยอันตรกิริยาระหว่างพลาสมา กับเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์สามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบ เนื่องจากพลาสมาประกอบด้วยสปีชีส์หลายชนิดที่เกิดจากแก๊สแตกตัว (Glow discharge) ภายในแชนเบอร์สูญญากาศระหว่างขั้วไฟฟ้าความถี่วิทยุ (RF) สปีชีส์เหล่านี้จะทำอันตรกิริยากับชิ้นงานหรือเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ได้แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดและความว่องไวของแต่ละ สปีชีส์ องค์ประกอบของสปีชีส์ในพลาสมาโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย รั้งสียูวี เรดิคอลลที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา อิเล็กตรอนอิสระ และไอออนอิสระ รั้งสีและอนุภาคเหล่านี้จะมีผลต่อเซลล์ในลักษณะที่แตกต่างกันไป เช่น รั้งสียูวี จะทำให้เกิดความร้อนสะสม จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเชิงแสงและความร้อนที่ผนังเซลล์ ส่วนเรดิคอลล จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเกิดการกัดกร่อนเชิงเคมีทั้งที่ผนังเซลล์และที่เยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน ขณะที่อิเล็กตรอนและไอออนอิสระสามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนทั้งทางเคมีและทางกายภาพต่อเซลล์ได้ [7] รายละเอียดดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 2.4

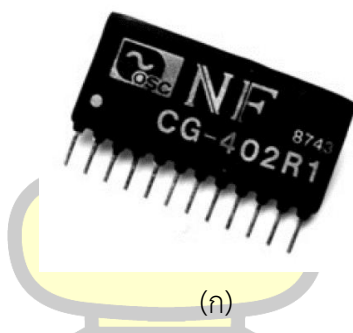


ภาพที่ 2.4 องค์ประกอบของพลาสมาที่ส่งผลกระทบต่อกายภาพและชีวเคมีของเซลล์

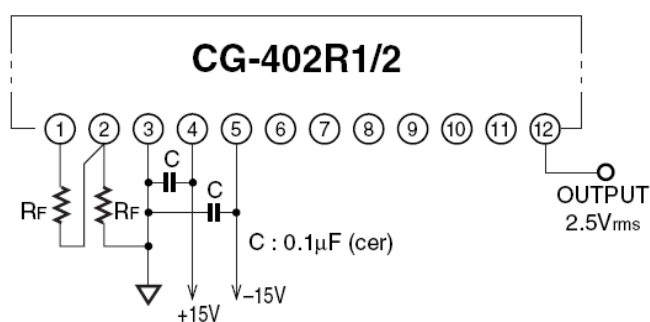
2.2 แหล่งจ่ายไฟสำหรับพลาสมา

2.2.1 ส่วนกำเนิดสัญญาณ

ในโครงการวิจัย ได้ใช้ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ CG-402R1 ตามภาพที่ 2.5 (ก) สำหรับสร้างสัญญาณไซน์ โดยสามารถกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณ (f_0) ด้วยค่าความต้านทาน (R_F) ของตัวต้านทานภายนอกจำนวนสองตัว ตามสมการ $R_F = 15.9 \times 10^6 / f_0$ ดังนั้น ถ้ากำหนดให้ $f_0 = 10$ kHz จะใช้ $R_F = 1.59$ k Ω ไตอะแกรมการต่ออุปกรณ์เสริมแสดงได้ตามภาพที่ 2.5 (ข) ประกอบด้วย ตัวต้านทาน $R_F = 1.59$ k Ω เพื่อกำหนดความถี่ของสัญญาณไซน์ และตัวเก็บประจุ $C = 0.1$ μ F เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของไมโคร และสามารถกำหนดขนาดของสัญญาณไซน์ให้มีค่าประมาณ 1.4 V_{rms} (± 2 V) ด้วยการลัดวงจรระหว่างขาที่ 11 และขาที่ 12 ของไมโคร CG-402R1 เนื่องจากความต้านทานเชิงซ้อนขาออกของ CG-402R1 มีค่าต่ำ (5 Ω) จึงสามารถใช้ CG-402R1 เพียงตัวเดียวสำหรับป้อนสัญญาณไซน์เข้าส่วนขยายกำลังสำหรับภาคจ่ายไฟ



(ก)



Output voltage

Pins ⑩ – ⑪ shorted: $\pm 10V$

Pins ⑪ – ⑫ shorted: $\pm 2V$

(ข)

ภาพที่ 2.5 (ก) ตัวอย่างภาพไมโคร CG-402R1 (ข) ไตอะแกรมการต่ออุปกรณ์เสริมเพื่อกำหนดความถี่และขนาดสัญญาณขาออก

2.2.2 ส่วนขยายกำลัง

ในโครงการวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องขยายเสียงรุ่น MEGA9004 ของบริษัท TAFN Engineering (Thailand) จำนวน 1 เครื่อง ดังแสดงตามภาพที่ 2.6 เป็นส่วนขยายกำลังในภาคกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยเหตุผลสำคัญ ดังนี้

1. มีจำนวนช่องขยายสัญญาณจำนวน 2 ช่องที่เป็นอิสระจากกัน
2. มีกำลังขับสูงสุด $4 \text{ kW}_{\text{rms}}$ ต่อช่องสัญญาณ เมื่อใช้กับโหลด 4Ω
3. ศักย์ไฟฟ้าขาออกมีค่าสูงสุด 190 V
4. มีวงจรอัตโนมัติป้องกันตัวเครื่องจากการขับโหลดเกินกำลัง
5. ตอบสนองสัญญาณความถี่สูงสุดที่ 20 kHz



ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างภาพถ่ายด้านหน้าและด้านหลังของเครื่องขยายเสียงรุ่น MEGA9004 ที่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนขยายกำลังของภาคกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง

เนื่องจากเครื่องขยายเสียงดังกล่าวมีจำนวนช่องขยายสัญญาณจำนวน 2 ช่องที่เป็นอิสระจากกัน อัตราขยายสัญญาณ h ของแต่ละช่องมีค่าสูงสุดประมาณ 15 เท่า และสามารถถูกปรับแต่งได้อย่างอิสระจากการปรับไวลุ่มด้านหน้า นั่นคือ ถ้าสัญญาณขาเข้ามีขนาด $1.4 \text{ V}_{\text{rms}}$ สัญญาณขาออกจากส่วนขยายกำลังจะมีขนาด $0 - 130 \text{ V}_{\text{rms}}$ สำหรับใช้เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท์

2.2.3 หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท์

หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังไฟฟ้า จากฝั่งขดลวดปฐมภูมิไปฝั่งขดลวดทุติยภูมิ ผ่านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กในแกนหม้อแปลง หม้อแปลงแกนเหล็กตอบสนองการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ในย่าน 100 Hz ในขณะที่หม้อแปลงเฟอร์ไรท์ตอบสนองในย่าน > 1 kHz ความถี่ของการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กในแกนหม้อแปลงเป็นพารามิเตอร์สำคัญอันดับแรกที่ต้องพิจารณาในการออกแบบหม้อแปลง

พิจารณาฟลักซ์กำลังไฟฟ้า P_2 ที่ส่งผ่านหม้อแปลงอุดมคติไปยังโหลด จากศักย์ไฟฟ้า V_2 และกระแสไฟฟ้า I_2 ของขดลวดทุติยภูมิ

$$P_2 = V_2 I_2 \quad (2.9)$$

ศักย์ไฟฟ้า V_2 ของขดลวดทุติยภูมิจำนวน N_2 ขด ถูกเหนี่ยวนำจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็ก B ในแกนหม้อแปลงที่มีพื้นที่หน้าตัด A_c

$$V_2 = N_2 \frac{d(BA_c)}{dt} \quad (2.10)$$

ถ้ากำหนดให้ความเข้มสนามแม่เหล็ก B ในแกนหม้อแปลง มีฟังก์ชันเป็น

$$B(t) = B_0 \sin(2\pi ft) \quad (2.11)$$

ดังนั้น

$$V_2 = N_2 A_c B_0 2\pi f \cos(2\pi ft) \quad (2.12)$$

ในขณะที่กระแสไฟฟ้า I_2 ที่ไหลผ่านขดลวดทุติยภูมิและโหลด สัมพันธ์กับกระแส I_1 ของขดลวดปฐมภูมิจำนวน N_1 ขด คือ

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 \quad (2.13)$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้า P_2 ที่ส่งผ่านหม้อแปลงอุดมคติไปยังโหลดจึงพิจารณาตามสมการ

$$P_2 = N_1 I_1 B_0 A_c 2\pi f \cos(2\pi ft) \quad (2.14)$$

พิจารณา กำลังที่ส่งผ่าน P_2 ต่อพื้นที่หน้าตัดแกน A_c (ขนาดหม้อแปลง)

$$\frac{P_2}{A_c} \propto f \quad (2.15)$$

จากสมการข้างต้น อัตราของกำลังที่ส่งผ่านต่อขนาดหม้อแปลง (ซึ่งพิจารณาจากพื้นที่หน้าตัดแกน A_c) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความถี่ f ดังนั้นการใช้หม้อแปลงเฟอร์ไรท์ที่ความถี่สูงจะสามารถช่วยลดขนาดและน้ำหนักของแหล่งจ่ายไฟได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับการใช้หม้อแปลงแกนเหล็กความถี่ต่ำ

นอกจากการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงยังทำหน้าที่ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ V_1 ให้เป็นศักย์ไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ V_2 ที่ตรงกับย่านการทำงานของโหลด ศักย์ไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิ V_2 มีความสัมพันธ์โดยตรงกับศักย์ที่ขดลวดปฐมภูมิ V_1 ตามสมการ $V_2 = (N_1/N_2)V_1$ เมื่อ N_1 และ N_2 คือจำนวนขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ

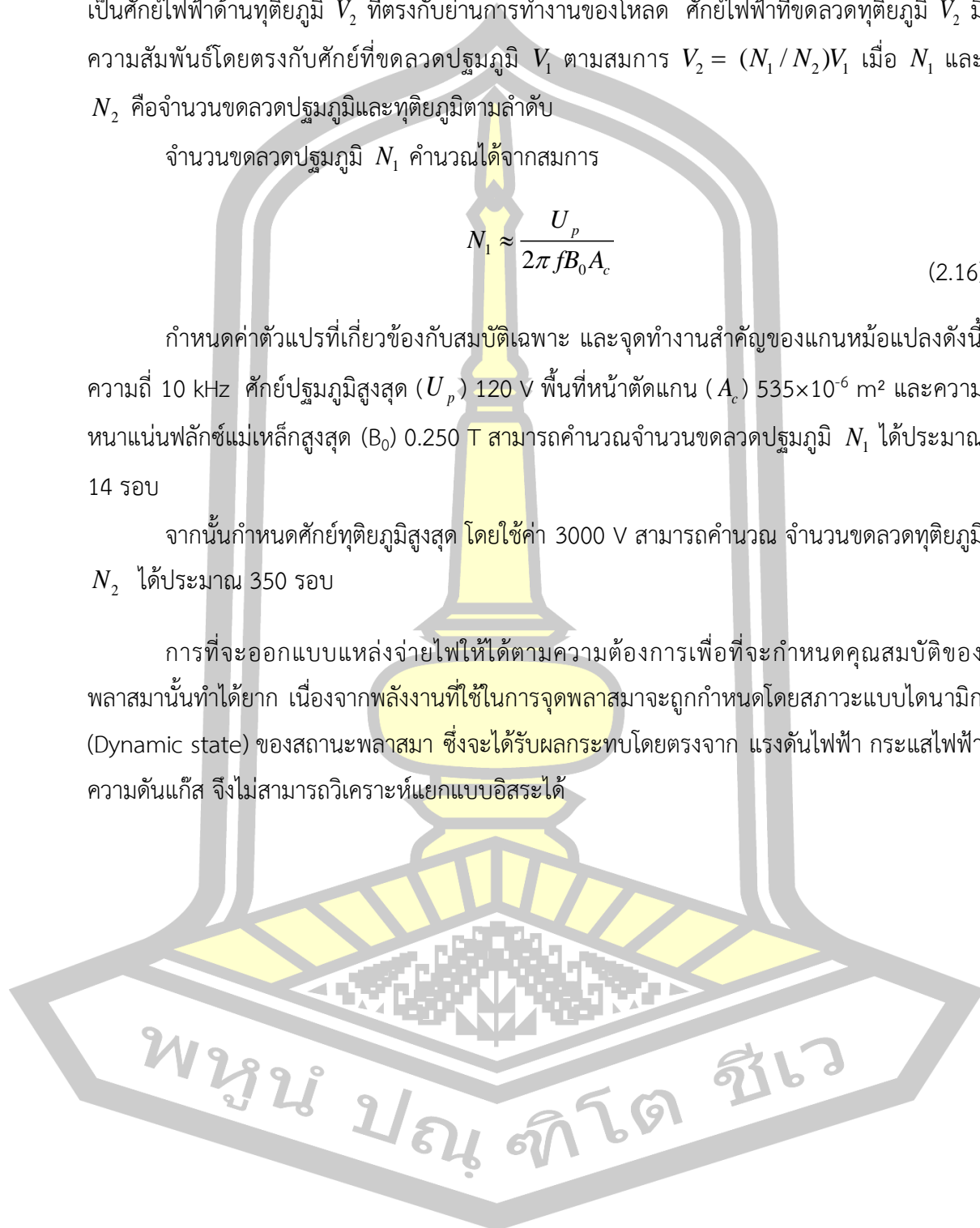
จำนวนขดลวดปฐมภูมิ N_1 คำนวณได้จากสมการ

$$N_1 \approx \frac{U_p}{2\pi f B_0 A_c} \quad (2.16)$$

กำหนดค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมบัติเฉพาะ และจุดทำงานสำคัญของแกนหม้อแปลงดังนี้ ความถี่ 10 kHz ศักย์ปฐมภูมิสูงสุด (U_p) 120 V พื้นที่หน้าตัดแกน (A_c) $535 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (B_0) 0.250 T สามารถคำนวณจำนวนขดลวดปฐมภูมิ N_1 ได้ประมาณ 14 รอบ

จากนั้นกำหนดศักย์ทุติยภูมิสูงสุด โดยใช้ค่า 3000 V สามารถคำนวณ จำนวนขดลวดทุติยภูมิ N_2 ได้ประมาณ 350 รอบ

การที่จะออกแบบแหล่งจ่ายไฟให้ได้ตามความต้องการเพื่อที่จะกำหนดคุณสมบัติของพลาสมานั้นทำได้ยาก เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการจุดพลาสมาจะถูกกำหนดโดยสภาวะแบบไดนามิก (Dynamic state) ของสถานะพลาสมา ซึ่งจะได้รับผลกระทบโดยตรงจาก แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความดันแก๊ส จึงไม่สามารถวิเคราะห์แยกแบบอิสระได้



2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประยุกต์ใช้พลาสมาเพื่อการปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์พืชต่าง ๆ เพื่อช่วยในการงอกและการเจริญเติบโต ถือว่าเป็นเรื่องใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจทั้งจากนักวิชาการเกษตรและนักพลาสมาเทคโนโลยี โดยในปี ค.ศ. 2011 Z. Zhou และคณะ [8] จาก Institute of Applied Physics of Guizhou Normal College ประเทศจีน ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้นปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศ โดยศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า (4,760 V – 6,120 V) ที่ใช้ในการจุดพลาสมาต่ออัตราการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิต พบว่าเมล็ดพันธุ์ที่ถูกพริตภายใต้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6,120 V มีอัตราการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตสูงสุด ซึ่งอธิบายว่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงเพียงพอจะทำให้การดิสชาร์จเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และรุนแรงพอที่จะทำให้อนุภาคที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Active air particles) และรังสีอัลตราไวโอเล็ต สามารถทะลุผ่านเยื่อหุ้มเมล็ด (Capsule of the seeds) กระตุ้นให้เกิดการส่งผ่านของเหลวที่หล่อเลี้ยงส่วนต่างๆ ของเซลล์ ทำให้เกิดการงอกของรากออกจากเมล็ดได้ดีขึ้น

ต่อมาในปี ค.ศ. 2013 I. Filatova และคณะ [9] ได้ใช้แหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุ ทำการจุดพลาสมาจากแก๊สตั้งต้นที่เป็นอากาศภายใต้ขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นคู่ขนานและแบบทรงกระบอก จากนั้นนำพลาสมามาพริตเมล็ดข้าวโพด ข้าวสาลี และเมล็ดถั่วลันเตา โดยศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าและความดัน ซึ่งพบว่าที่ความดัน 500 mTorr และกำลังไฟฟ้า 0.2 W/cm^2 และใช้เวลาในการพริต 5 นาที ผิวเปลือกหุ้มเมล็ดพันธุ์ถูกกัดกร่อนทั้งจากไอออนและเรดิคัลจากพลาสมา ซึ่งสังเกตได้จากภาพถ่าย SEM ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปในเมล็ดได้ดีขึ้น ส่งผลให้อัตราการงอกมีค่ามากขึ้น

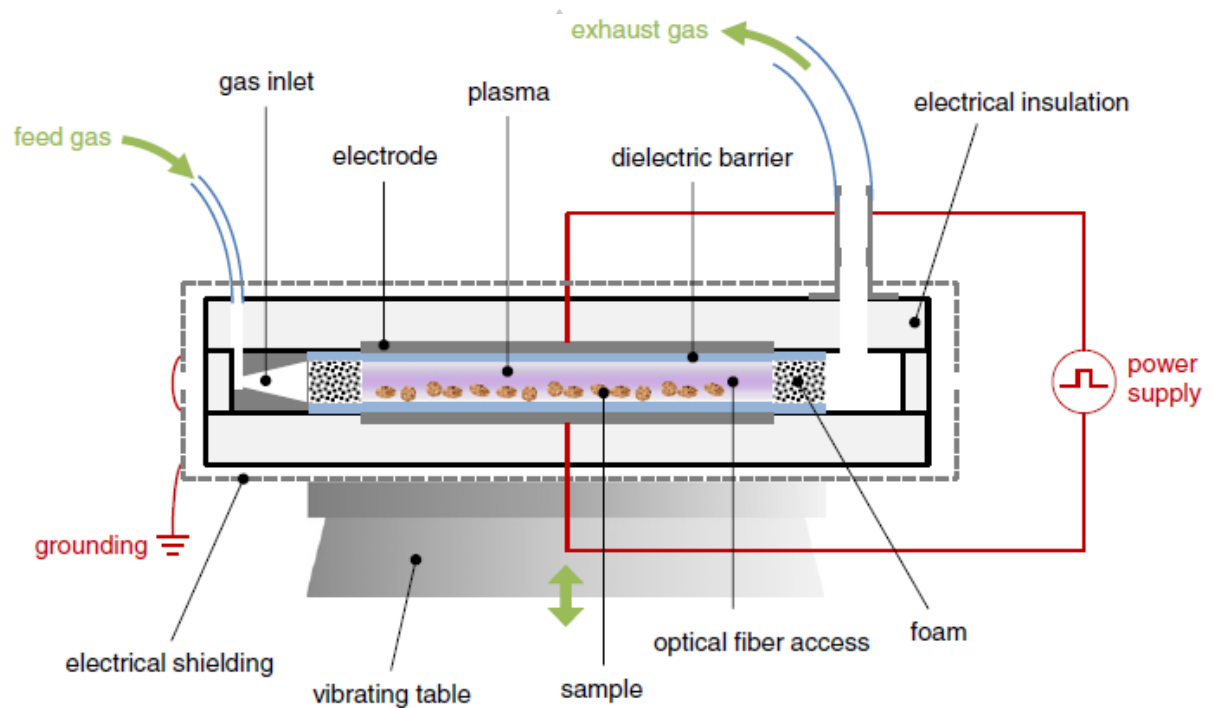
ต่อมาในปี ค.ศ. 2014 T. Sarinont และคณะ [10] ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้นปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ถั่วงอก โดยใช้เวลาในการพริต 3 นาที โดยศึกษาอัตราการเจริญเติบโตเมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน และ 7 วัน ซึ่งพบว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการพริตพลาสมาโตเร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการพริตถึง 3.7 เท่าในวันแรก และ 1.3 เท่า เมื่อผ่านไป 7 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของเมล็ดถั่วเขียวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ต่ำกว่า $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ในระหว่างการพริต ซึ่งไม่ส่งผลต่ออัตราการงอกและการเจริญเติบโต ในปีเดียวกันนี้ L. Ling และคณะ [11] ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันต่ำในการพริตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองเป็นเวลาสั้นๆ เพียง 15 วินาที โดยศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าในการจุดพลาสมาในช่วง 60-120 W ผลการศึกษาพบว่าที่กำลังไฟฟ้า 80 W เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองมีความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น 14.03% สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การงอกเพิ่มขึ้น 14.66% และเปอร์เซ็นต์ดัชนีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 63.33% นอกจากนี้ Tong Jiayun และคณะ [4] ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น เพื่อทำการปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์พืชหลายใจ โดยศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมาในช่วง 3,400-5,950 V และเวลาการพริต

(Exposure time) ในช่วง 0-20 วินาที ผลการทดลองพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการจุพลาสมา 5,950 V และเวลาการทรีต 10 วินาที สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การงอกได้อย่างมีนัยสำคัญ

ต่อมาในปี ค.ศ. 2015 Li Ling และคณะ [5] ได้ใช้พลาสมาเย็นดังกล่าวมาปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์พืชที่นำมาสกัดเอาน้ำมันจากเมล็ด ผลการทดลองให้ผลเช่นเดียวกับการทรีตเมล็ดถั่วเหลือง คือ การทรีตพลาสมาสามารถเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์การงอก อีกทั้งยังลดอัตราการคายน้ำมันออกจากเมล็ดที่สภาวะแห้งแล้งได้อีกด้วย

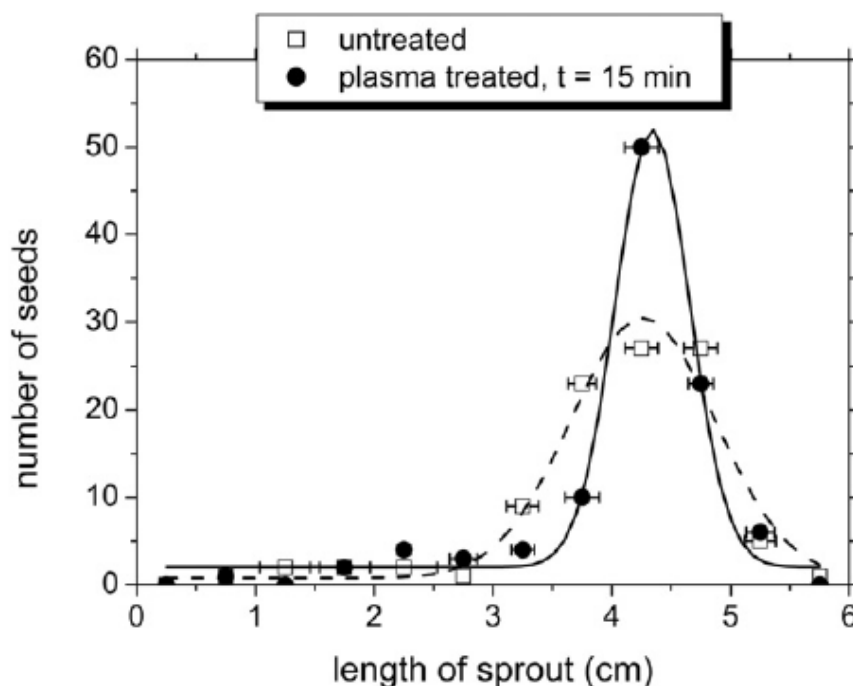
ต่อมาในปี ค.ศ. 2016 S. H. Ji และคณะ [12] ได้ใช้แหล่งจ่ายไฟศักย์ไฟฟ้าสูงแบบพัลส์สร้างพลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น เพื่อทำการปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ฝักโขม เนื่องจากโดยปกติแล้วเมล็ดพันธุ์ฝักโขมจะมีอัตราการงอกต่ำ แต่จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้อากาศเป็นแก๊สตั้งต้นในการจุพลาสมาแบบพัลส์ เมล็ดพันธุ์ฝักโขมที่ผ่านการทรีตมีเปอร์เซ็นต์การงอกเพิ่มขึ้น แต่ถ้าทรีตเมล็ดพันธุ์มากกว่า 10 ครั้งติดๆ กัน เปอร์เซ็นต์การงอกจะลดลง ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าช่วงเวลาการใช้พลาสมาทรีตเมล็ดพันธุ์จะต้องมีความเหมาะสมหรือจะต้องไม่นานเกินไป เนื่องจากเรติคูลจากออกซิเจนที่่องไวในการเกิดปฏิกิริยา และแสงยูวีจากพลาสมาอาจทะลุผ่านเยื่อหุ้มเมล็ดเข้าไปทำลายระบบเซลล์ (Cellular damage) และในปีเดียวกันนี้ A. Zahoranova และคณะ [13] ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศภายใต้ขั้วไฟฟ้าแบบ Diffuse Coplanar Surface Barrier Discharge (DCSBD) ทำการทรีตเมล็ดพันธุ์ข้าวสาลี โดยระบบขั้วไฟฟ้าชนิดนี้สามารถสร้างพลาสมาที่กำลังไฟฟ้าสูงถึง 100 W/cm^2 เวลาการทรีตในช่วง 10-600 วินาที จากการศึกษาพบว่าเวลาการทรีตในช่วง 20-50 วินาที สามารถให้เปอร์เซ็นต์การงอกและดัชนีความแข็งแรงของเมล็ด (Vigor of seeding) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการซึมน้ำ (Wettability) ที่มากขึ้น นอกจากนั้นผลจากการทดสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่เติมลงไป พบว่าการทรีตพลาสมาสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์บนผิวเมล็ดพันธุ์ได้

ในปี ค.ศ. 2016 D. Butscher และคณะ [14] ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น (Dielectric barrier discharge: DBD) โดยใช้แหล่งจ่ายไฟความถี่ 10 kHz แรงดันไฟฟ้า 8 kV และความกว้างพัลส์ 500 ns ทรีตเมล็ดแรดิช หัวหอม และเมล็ดธัญพืช เพื่อยับยั้งเชื้อ *E. coli* ผลการทดลองพบว่าพลาสมาสามารถทำให้เชื้อลดลงได้สูงสุดถึง 3.4 Logarithmic เมื่อใช้เวลาการฉายพลาสมาใน 5 นาทีแรก ซึ่งโครงสร้างของระบบ DBD แสดงดังภาพที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อต้องการทรีตเมล็ดพันธุ์อย่างต่อเนื่องและปริมาณมากจะทำได้ยาก



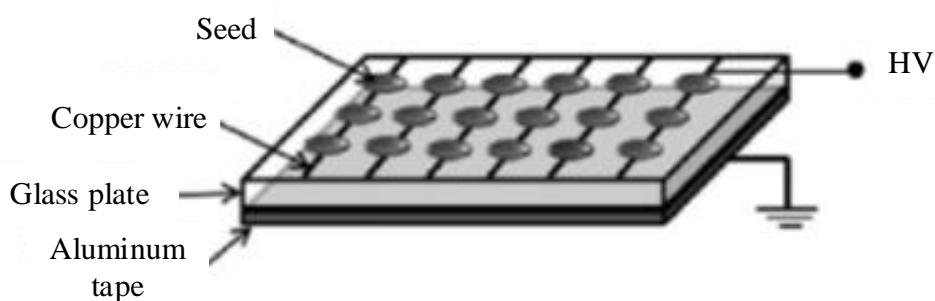
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกัน [14]

ในปี ค.ศ. 2017 Y. J. Oh และคณะ [15] ได้ใช้ไมโครเวฟสร้างพลาสมาเย็นที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สไนโตรเจนที่ความดันต่ำทำการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Salmonella typhimurium* ในต้นอ่อนเรดิช ผลการทดลองพบว่าที่กำลังไฟฟ้า 900 W และความดัน 667 Pa ใช้เวลาการทรีต 20 นาที พลาสมาสามารถทำให้เชื้อลดลงได้สูงสุดถึง $2.6 \pm 0.4 \log \text{CFU/g}$ ซึ่งจะพบว่าเวลาที่ใช้ในการทรีตค่อนข้างนาน และการใช้ความดันขณะทำงาน (Working pressure) ที่ค่อนข้างต่ำจะทำให้ต้นอ่อน (Sprout) ที่ผ่านการทรีตเสียความชุ่มชื้นและเหี่ยวง่ายเนื่องจากการระเหยของน้ำในสภาวะสุญญากาศ ผลของการที่เมล็ดเรดิชสามารถเปรียบเทียบความยาวต้นอ่อนเรดิชที่เพาะเป็นเวลา 4 วัน จากเมล็ดที่ผ่านและไม่ผ่านการทรีตพลาสมา [16] ได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 เปรียบเทียบความยาวต้นอ่อนแรติซที่เพาะเป็นเวลา 4 วัน จากเมล็ดที่ผ่านและไม่ผ่านการทรีตพลาสมา

ในปี ค.ศ. 2015 D. Dobrin และคณะ [12] ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกันปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ข้าวสาลี โดยใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 2.7 W แรงดันไฟฟ้า 15 kV และใช้อากาศเป็นแก๊สตั้งต้น ผลการวัดอัตราการเติบโตของต้นอ่อนจากเมล็ดที่ผ่านการทรีตพลาสมาพบว่าพลาสมาสามารถเพิ่มพลังงานเชิงผิวของเมล็ดพันธุ์ ทำให้เมล็ดดูดซับความชื้นและออกซิเจนได้ดีขึ้น จึงงอกและเติบโตได้เร็วกว่า ซึ่งโครงสร้างหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกันแสดงดังภาพที่ 2.9 [16]



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกัน

บทที่ 3

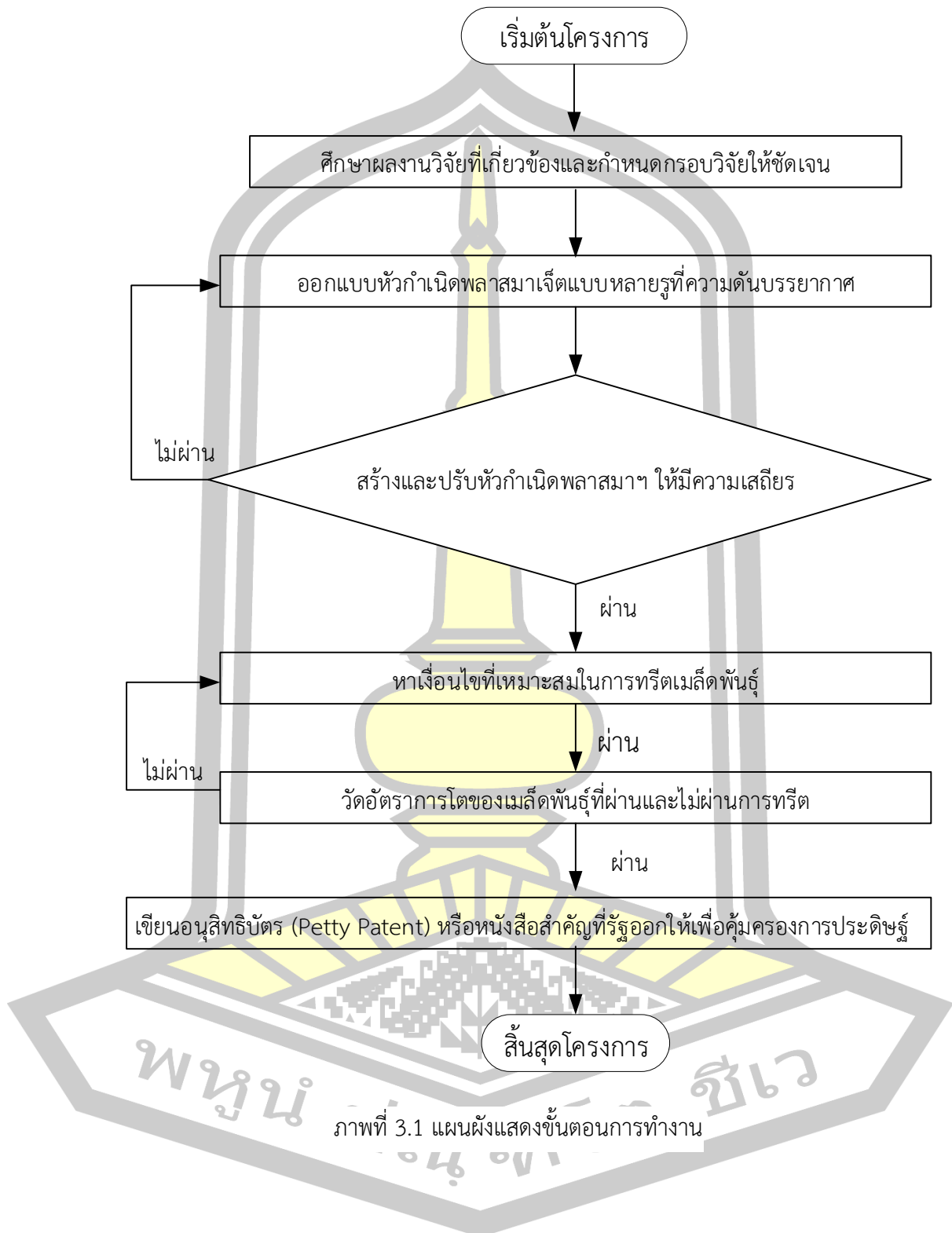
วิธีการวิจัย

การสร้าง“หัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ” หรือเรียกสั้นๆ ว่า Multi-hole-APPJ มีขั้นตอนการทำงานหลักๆ สรุปได้ดังนี้

1. ออกแบบหัวกำเนิดพลาสมาฯ โดยใช้โปรแกรม Solid Work
2. ทดสอบการไหลของแก๊สผ่านชั้นและรูภายในหัวกำเนิดพลาสมาฯ โดยใช้ฟังก์ชัน Flow simulation ของโปรแกรม Solid Work
3. ตรวจสอบและปรับแก้แบบ โดยใช้โปรแกรม Solid Work
4. ขึ้นรูปชิ้นงานที่เป็นชิ้นส่วนต่างๆ ของหัวกำเนิดพลาสมาฯ
5. ประกอบและทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสมาฯ
6. หาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการทรีตเมนต์พลาสมาฯ
7. วัดอัตราการโตของเมล็ดพันธุ์แก้วที่ผ่านและไม่ผ่านการทรีต
8. เขียนอนุสิทธิบัตร (Petty Patent) หรือหนังสือสำคัญที่รัฐออกให้เพื่อคุ้มครองการประดิษฐ์

ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการดำเนินงานในรูปแบบของไดอะแกรม ดังภาพที่ 3.1

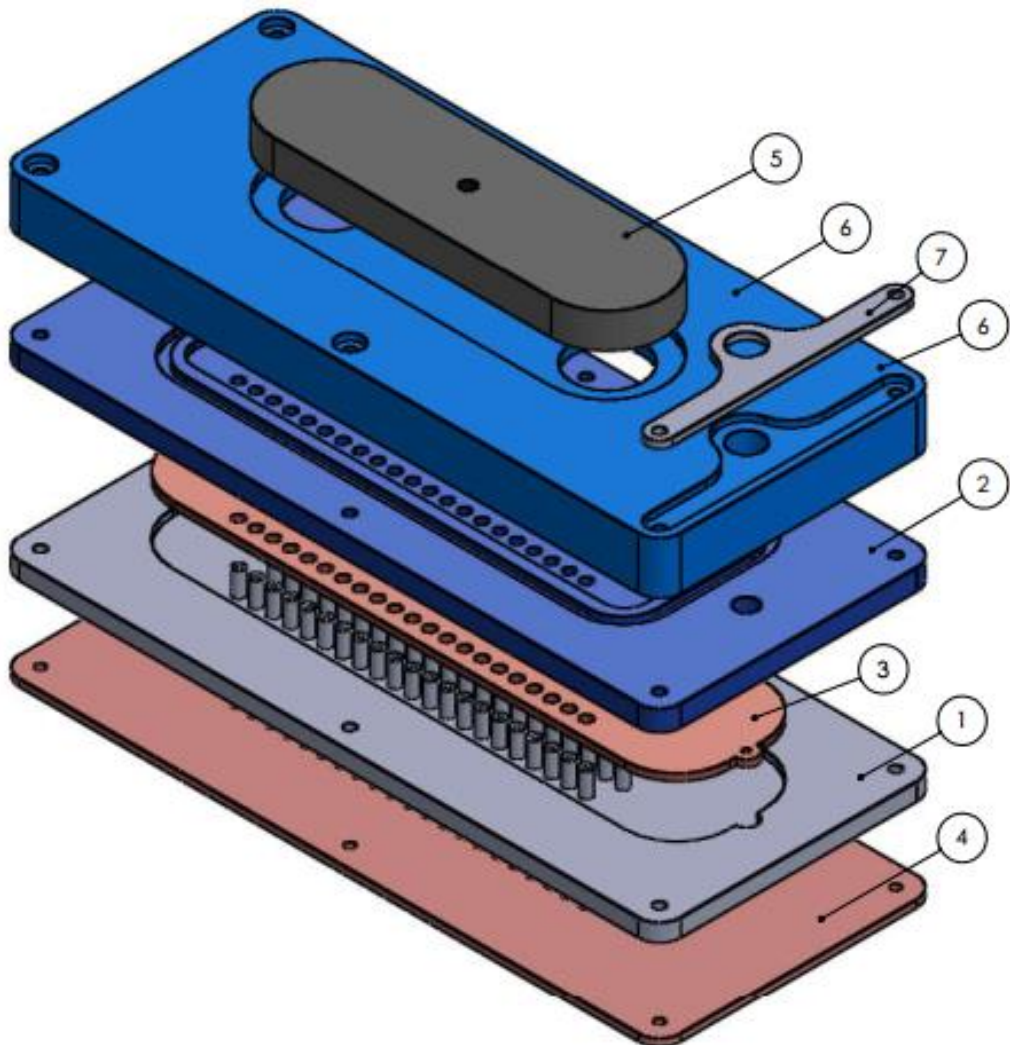
พหุ ประถมศึกษา ชีวะ



ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงาน

3.1 กระบวนการออกแบบและสร้างหัวกำเนิดพลาสมา

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบเพื่อสร้างภาพแบบจำลอง (Model) โดยใช้โปรแกรม Solid Work ซึ่งสามารถนำแบบที่ได้ออกแบบไว้นั้นมาแก้ไขหรือปรับปรุงในภายหลังได้ โดยต้นแบบของชิ้นส่วนที่ถูกนำมาประกอบรวมเป็นหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตๆ มีส่วนประกอบการทำงานดังภาพที่ 3.2 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่สำคัญทั้งหมด 7 ชิ้น โดยหมายเลขที่กำกับบนชิ้นงานจะบ่งบอกหน้าที่การทำงานของชิ้นส่วนนั้น ๆ ดังนี้



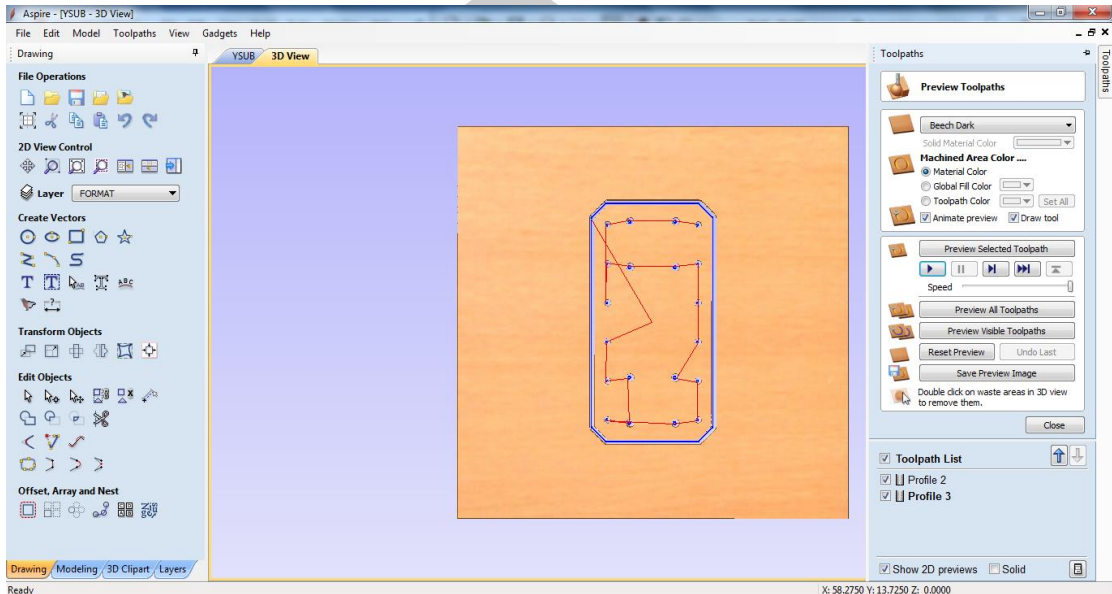
ภาพที่ 3.2 แบบร่างหัวพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูโดยโปรแกรม Solid Work

1. **แผ่นฉนวนกัน** ① ชั้นส่วนนี้ทำจากแผ่นเทฟลอน (Teflon) ถูกขึ้นรูปให้เป็นท่อแก๊สซึ่งสามารถสวมกับ ชั้นที่ ② ③ และ ④ ได้อย่างพอดี ป้องกันการอาร์ค (Arc) ระหว่างขั้วกำลังและขั้วกราวด์
2. **แผ่นฉนวนกันแก๊ส** ② ชั้นส่วนนี้ทำจากแผ่นอะคริลิก (Acrylic) ถูกเจาะเป็นรูให้สามารถสวมกับ ชั้นที่ ① ได้อย่างพอดี มีร่องโอรังป้องกันการอาร์คระหว่างขั้วกำลังและขั้วกราวด์
3. **ขั้วกำลัง** ③ ทำจากแผ่นอะลูมิเนียม ถูกเจาะเป็นรูให้สามารถสวมเข้าไปในท่อเทฟลอนของชั้นที่ ① ได้พอดี โดยขั้วกำลังจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุ
4. **ขั้วกราวด์** ④ ชั้นส่วนนี้ทำจากแผ่นอะลูมิเนียม (Aluminum) ถูกเจาะเป็นรูให้สามารถสวมเข้ากับท่อ เทฟลอน ด้านล่างของชั้นที่ 1 ได้พอดี ขั้วกราวด์จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับกราวด์ของแหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุ
5. **บล็อกแก๊สเข้า** ⑤ ชั้นส่วนนี้ทำจากแผ่นอะคริลิก ทำหน้าที่เป็นห้องบรรจุและกระจายแก๊ส มีรูสำหรับ ต่อท่อแก๊สอาร์กอนเข้า
6. **บล็อกแก๊สและยึดข้อต่อ RF** ⑥ ชั้นส่วนนี้ทำจากแผ่นอะคริลิก ทำหน้าที่เป็นห้องบรรจุและกระจายแก๊สเข้าสู่รูแก๊สของเทฟลอนอย่างสม่ำเสมอ และเป็นตัวยึดข้อต่อ Radio-Frequency (RF)
7. **ขั้วต่อกราวด์** ⑦ ทำจากแผ่นอะลูมิเนียม ทำหน้าที่เชื่อมต่อกราวด์จากข้อต่อ RF ไปยังชั้นที่ 4 ด้วยการยึดนี้่อดผ่าน ชั้นที่ ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ และ ⑦

การออกแบบชิ้นส่วนด้วยคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถปรับปรุงรูปแบบและลักษณะการทำงาน ของชิ้นส่วนย่อยให้สอดคล้องกัน และสามารถแยกชิ้นส่วนหรือทำการประกอบใหม่ หากพบข้อบกพร่องซึ่งสามารถมองในมุมมองได้รอบทิศ และภาพตัดขวาง (Cross-sectional) ที่แสดงมุมมอง ภายในของแบบจำลองพลาสติกแบบหลายรูที่มีลักษณะการจัดเรียงที่มีความซับซ้อนมากได้ โดยที่ การกำหนดขนาดและตำแหน่งจึงต้องแม่นยำชัดเจนและสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความต้องการ ดังนั้นการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบจึงเป็นเครื่องมือสมัยใหม่ที่ได้รับคามนิยมสำหรับใช้ อำนวยความสะดวกในการออกแบบ และยังสามารถใช้ภาพที่ได้เพื่อการนำเสนอหรือสื่อสารให้คนอื่น เข้าใจได้โดยไม่ต้องขึ้นรูปชิ้นงานจริง

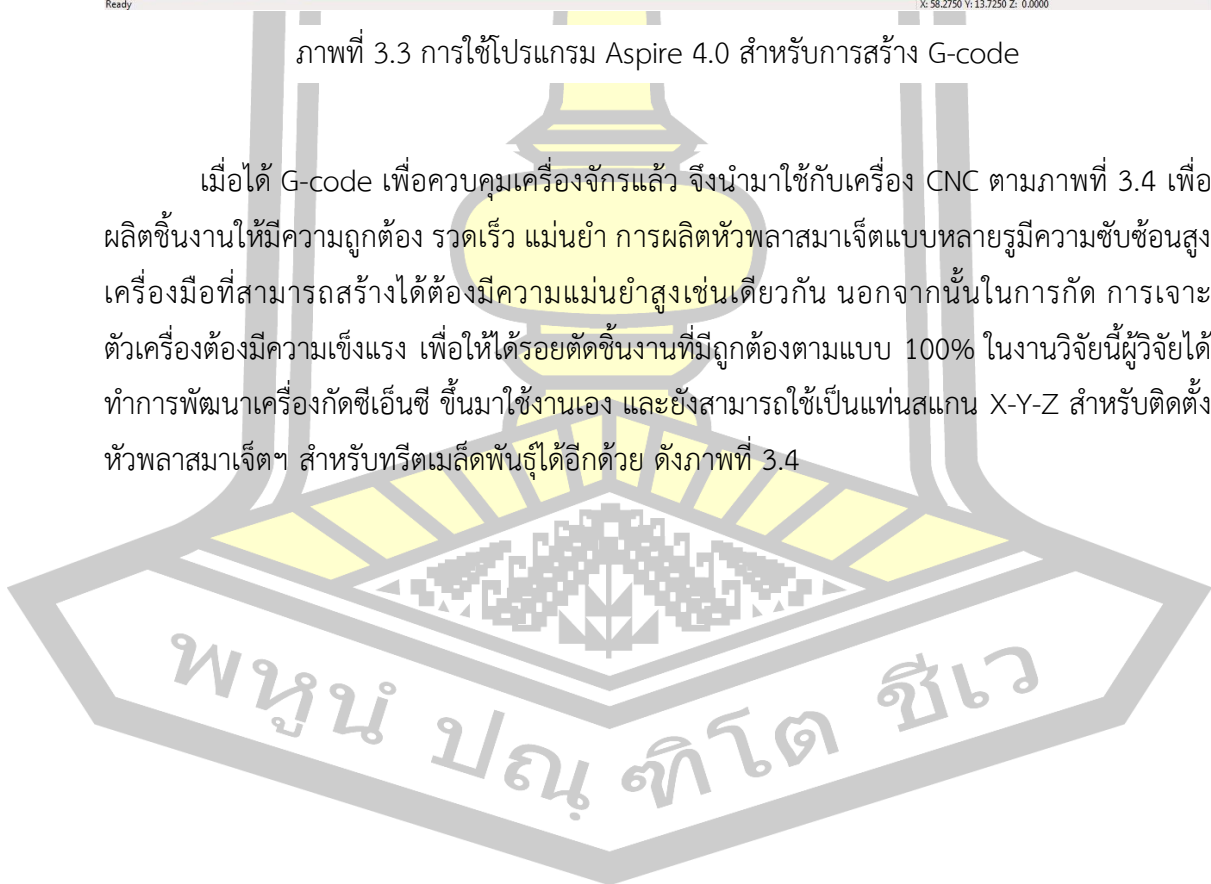
เมื่อได้แบบจำลอง (Model) จากคอมพิวเตอร์แล้ว เราสามารถนำไฟล์แบบจำลองที่ได้มา แปลงด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing: CAM) เพื่อช่วย ในการสร้าง G-code ซึ่งเป็นการแปลงแบบจำลองให้เป็นข้อมูลตัวเลขสำหรับควบคุมเครื่องจักรที่มี การควบคุมด้วยระบบตัวเลข (Computer Numerical Control: CNC) หรือที่นิยมเรียกว่า เครื่อง

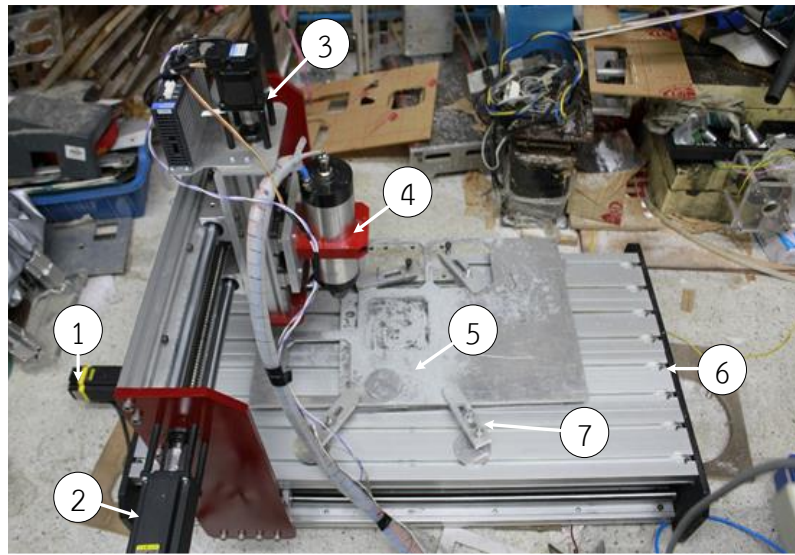
ซีเอ็นซี (CNC) ในการกัดขึ้นรูปชิ้นส่วน โดยใช้ข้อมูล Modeling มาแปลงเป็น G-code โดยตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้แสดงดังภาพที่ 3.3 ด้วยการโปรแกรม Aspire 4.0 สำหรับการสร้าง G-code



ภาพที่ 3.3 การใช้โปรแกรม Aspire 4.0 สำหรับการสร้าง G-code

เมื่อได้ G-code เพื่อควบคุมเครื่องจักรแล้ว จึงนำมาใช้กับเครื่อง CNC ตามภาพที่ 3.4 เพื่อผลิตชิ้นงานให้มีความถูกต้อง รวดเร็ว แม่นยำ การผลิตหัวพลาสติกแบบหลายรูมีความซับซ้อนสูง เครื่องมือที่สามารถสร้างได้ต้องมีความแม่นยำสูงเช่นเดียวกัน นอกจากนั้นในการกัด การเจาะ ตัวเครื่องต้องมีความแข็งแรง เพื่อให้ได้รอยตัดชิ้นงานที่มีถูกต้องตามแบบ 100% ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาเครื่องกัดซีเอ็นซี ขึ้นมาใช้งานเอง และยังสามารถใช้เป็นแทนสแกน X-Y-Z สำหรับติดตั้งหัวพลาสติกๆ สำหรับทริตเมิลด์พันธุ์ได้อีกด้วย ดังภาพที่ 3.4



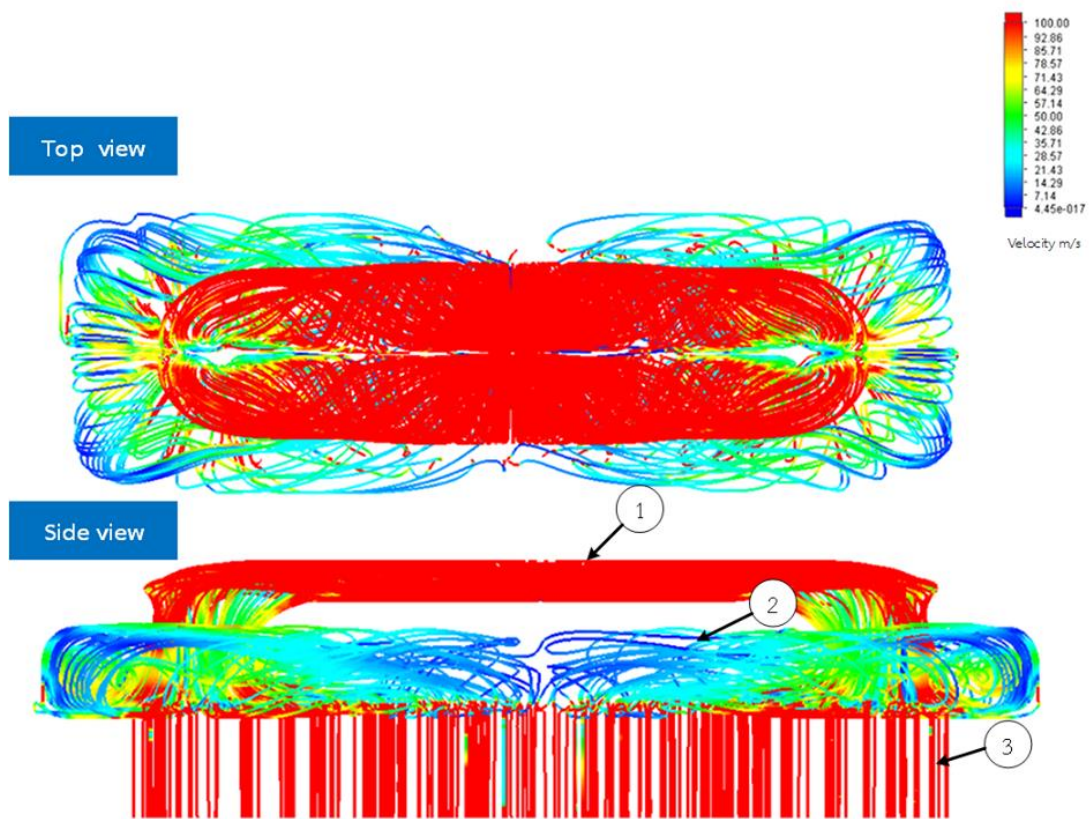


ภาพที่ 3.4 เครื่องกัดซีเอ็นซีที่สร้างขึ้นเอง (CNC milling machine)

โครงสร้างเครื่องกัดซีเอ็นซีที่สร้างขึ้นมีส่วนประกอบการทำงาน 7 ชิ้น ความหมายของหมายเลขที่กำกับบนภาพ มีดังนี้

1. มอเตอร์ขับเคลื่อน Y ① ใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยสามารถควบคุมระยะการหมุนและความเร็วได้ ซึ่งทำงานสัมพันธ์ กับแกน X และ Z ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
2. มอเตอร์ขับเคลื่อน X ② ใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยสามารถควบคุมระยะการหมุนและความเร็วได้ ซึ่งทำงานสัมพันธ์ กับแกน Y และ Z ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
3. มอเตอร์ขับเคลื่อน Z ③ ชิ้นส่วนนี้ใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยสามารถควบคุมระยะการหมุนและความเร็วได้ ซึ่งทำงานสัมพันธ์ กับแกน Y และ X ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
4. โรเตอร์มอเตอร์ ④ ชิ้นส่วนนี้ใช้สำหรับจัดยึดดอกกัดชิ้นงาน ให้สามารถกำหนดความเร็วที่เหมาะสมสำหรับวัสดุและขนาดของดอกกัด ความเร็วการหมุนในช่วง 1000 – 12000 RPM ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยใช้ G-code
5. พื้นี่วางชิ้นงาน ⑤ เป็นพื้นที่สำหรับวางวัสดุของตัวเครื่องมีขนาด 60*95 cm
6. แท่นเครื่อง ⑥ คือ โครงหลักสำหรับยึดส่วนประกอบแกน X Y Z เข้ามาทำงานร่วมกัน
7. ตัวยึดวัสดุ ⑦ ชิ้นส่วนนี้ใช้สำหรับยึดชิ้นงานกับแท่นเครื่องเพื่อให้ชิ้นงานไม่เคลื่อนที่และสั่นเนื่องจากแรงการกัดของโรเตอร์มอเตอร์

ผลการจำลองการไหลของแก๊สผ่านหัวพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูเพื่อทดสอบการทำงานบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Solid work flow simulation ก่อนการสร้างจริงซึ่งเป็นการจำลองหาความเร็วของแก๊สอาร์กอนที่ไหลผ่านรูจากรูจ่ายแก๊สด้านบน 1 รู ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm แล้วกระจายออกตามท่อเล็กที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm จำนวน 105 รู ที่อยู่ด้านล่าง โดยโปรแกรมจะแสดงแนวโน้มความเร็วด้วยเส้นแฉดสี สีน้ำเงินแทนความเร็วแก๊สมีค่าต่ำสุด และไล่ระดับสีจนถึงเส้นสีแดงซึ่งแสดงความเร็วแก๊สมีค่าสูงที่สุด ดังแสดงตามภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 จำลองความเร็วของแก๊สอาร์กอนที่ไหลในหัวพลาสมาเจ็ต

จากภาพที่ 3.5 ลายเส้นจะบ่งบอกถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของแก๊สอาร์กอน ส่วนสีน้ำเงินและสีแดง แทนความเร็วของแก๊สในช่วง 1-100 m/s จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบการไหล เส้นสีแดงหมายถึงมีความเร็วสูง เส้นสีน้ำเงินคือความเร็วต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะแบบไล่ระดับสี ที่มีส่วนสำคัญ 3 ส่วนตามหมายเลขกำกับ คือ

1. ส่วนแก๊สเข้า ① เป็นกล่องที่รองรับแก๊สจากภายนอกเข้ามา 1 รู ก่อนที่จะกระจายไปยังส่วนที่ ② เพื่อให้มีการกระจายความดันภายใน ทำให้ความเร็วคงที่ในท้องแก๊สส่วนที่①

2. ส่วนกระจายแก๊ส ② เป็นห้องแก๊สสำหรับกระจายแก๊สไปยังท่อพ่นแก๊ส ③ ซึ่งจะทำให้แก๊สสามารถกระจายตัวอย่างทั่วถึงเข้าสู่ท่อพ่นแก๊สทุกท่อให้มีความเร็วเท่าๆ กัน
3. ท่อพ่นแก๊ส ③ เป็นบริเวณที่ปลายด้านล่างจะลำพลาสมาพุ่งออกมา ดังนั้นความเร็วแก๊สต้องมีความสม่ำเสมอเท่ากันทุกรู เพื่อให้ลำของพลาสมาที่เกิดขึ้นมีความสมดุลและพุ่งออกมาได้ยาวเท่าๆ กันทุกรู

เมื่อทำการออกแบบและสร้างหัวพลาสมาเจ็ทฯ เสร็จแล้ว จึงทำการประกอบหัวพลาสมาที่ผ่านการขึ้นรูปจริง ผลการประกอบตามแบบแสดงดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ชิ้นงานจริงหลังการประกอบที่มีการติดตั้งข้อต่อแก๊ส และข้อต่อหัว RF Power

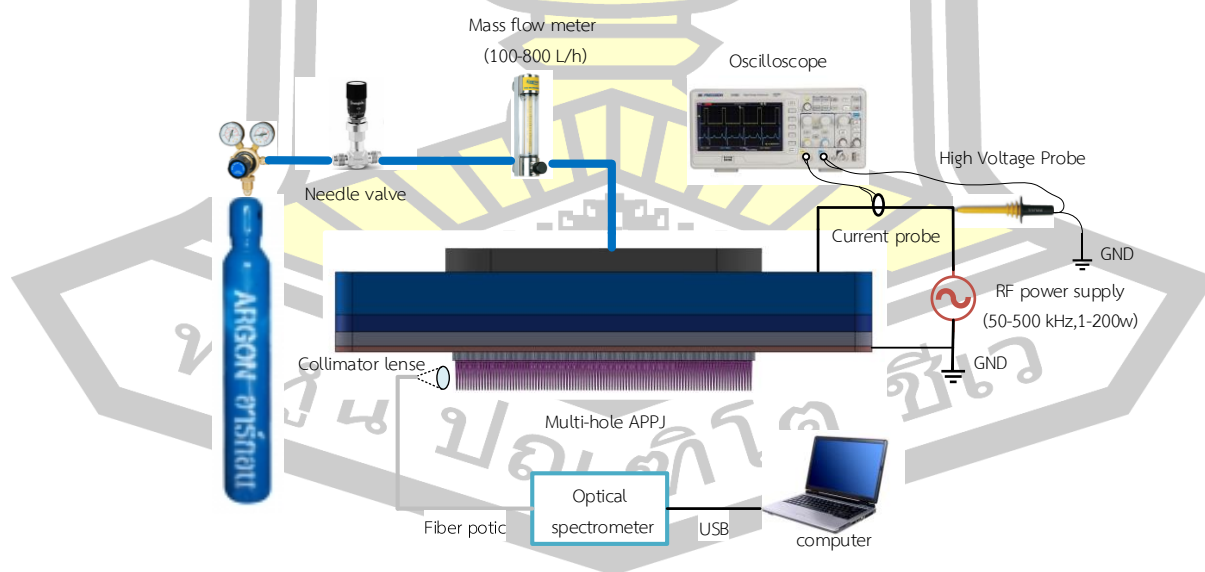
พหุ ประถมศึกษา

3.2 ทดสอบการทำงาน

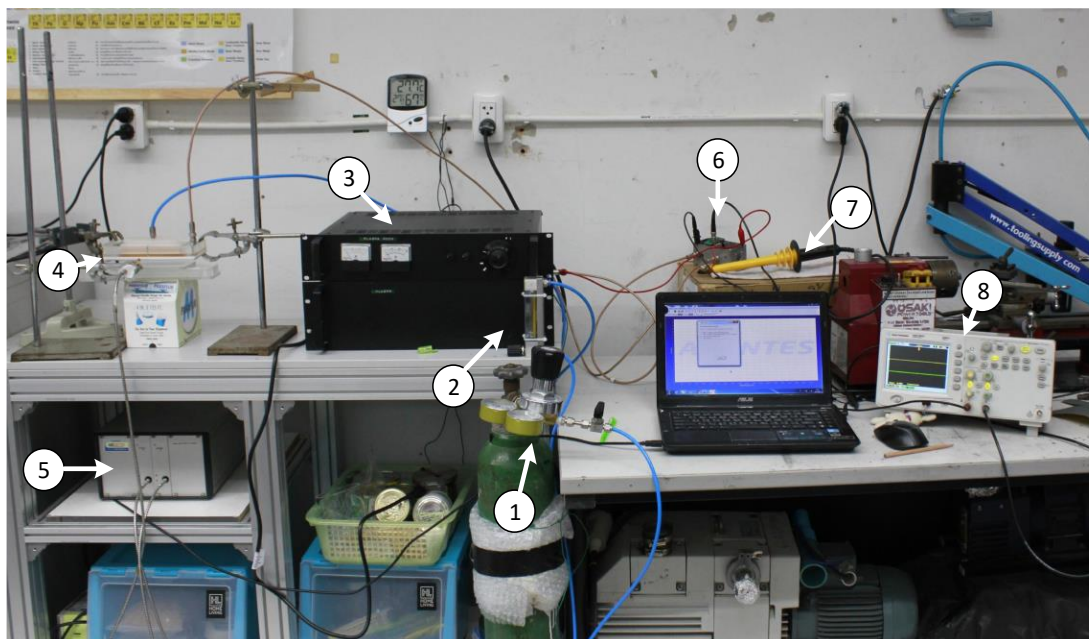
วัสดุอุปกรณ์

1. อุปกรณ์ประกอบหัวพลาสมาเจ็ตแบบหลายรู
2. ถังแก๊สอาร์กอน ซึ่งเป็นแก๊สเกรดอุตสาหกรรม ที่มีเรกกูเรเตอร์พร้อมวาล์วเปิด-ปิด
3. แหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุช่วง 50-500 kHz
4. ข้อต่อไฟแรงดันสูง
5. เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส
6. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)
7. สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer)
8. คอมพิวเตอร์ (Computer)
9. โพรบวัดกระแส (Current probe)
10. โพรบวัดแรงดัน (Voltage probe)

วิธีการทดสอบ เริ่มจากเชื่อมต่อแก๊สและระบบไฟเข้ากับหัวพลาสมาเจ็ตที่ได้ทำการออกแบบ จากนั้นเปิดวาล์วแก๊สอาร์กอนแล้วทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับ Multi-hole APPJ แล้วทำการบันทึกผลด้วยเครื่องมือวัดอัตราการไหลของแก๊ส กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมา ดังแสดงตามภาพที่ 3.7 ซึ่งเป็นไดอะแกรมการทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตฯ และภาพที่ 3.8 แสดงภาพถ่ายเครื่องมือวัดของระบบหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตฯ ที่ใช้ในการบันทึกผลการทดลอง



ภาพที่ 3.7 ไดอะแกรมการทดสอบหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตที่ความดันบรรยากาศแบบหลายรู



ภาพที่ 3.8 ภาพถ่ายเครื่องมือวัดของระบบหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตา ในการบันทึกผลการทดลอง

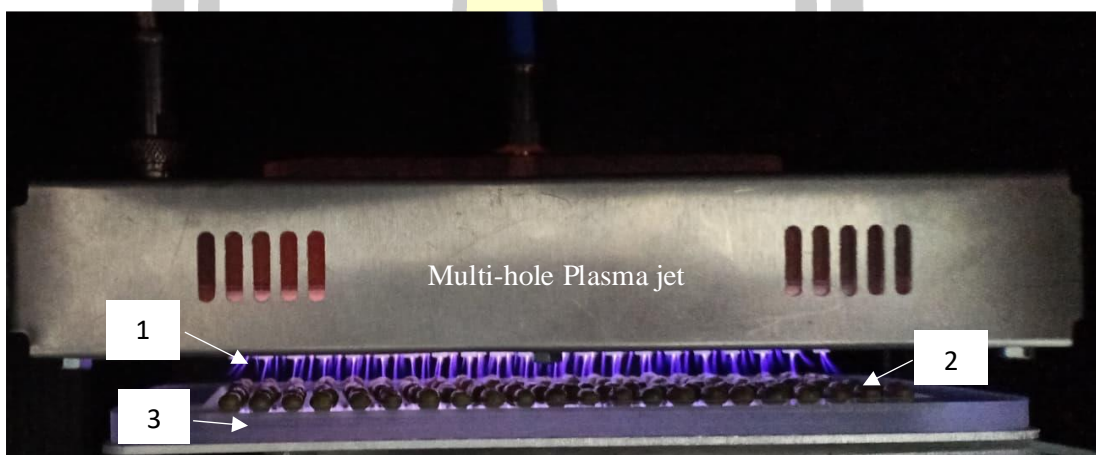
ในขั้นตอนการทดสอบมีอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่สำคัญ 8 ส่วน ดัง ซึ่งมีรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้แต่ละชิ้น ดังนี้

1. **ถังแก๊สอาร์กอน ①** ซึ่งเป็นแก๊สเกรดอุตสาหกรรม มีเรีกูเรเตอร์พร้อมวาล์วเปิด-ปิด สำหรับปรับอัตราการไหลของแก๊สในช่วง 100-800 L/h เพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสม
2. **เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส ②** ซึ่งสามารถอ่านค่าได้ในช่วง 100-800 L/h
3. **แหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุ ③** ที่สามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 50-500 kHz จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 1.5 kW
4. **หัวกำเนิดพลาสมา ④** โดยหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรู ต่อกับสายแก๊สที่ผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล และขั้วไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุที่ติดตั้งโพรบวัดกระแสและแรงดันไว้
5. **สเปกโตรมิเตอร์ ⑤** เก็บข้อมูลเชิงแสงของพลาสมาเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สหรือชนิดของสปีชีส์ที่เปล่งแสงผ่านเลนส์เก็บแสง (Collimator lens) ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลบนคอมพิวเตอร์ได้
6. **โพรบวัดกระแส ⑥** ใช้สำหรับเก็บข้อมูลกระแสที่ทำให้เกิดพลาสมาที่เงื่อนไขต่างกัน
7. **โพรบวัดแรงดัน ⑦** ใช้สำหรับเก็บข้อมูลแรงดันที่ทำให้เกิดพลาสมาที่เงื่อนไขต่างกัน
8. **ออสซิลโลสโคป ⑧** ใช้บันทึกแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งออสซิลโลสโคปสามารถวัดค่าและบันทึกข้อมูลเพื่อนำมาพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงที่ถูกต้องและแม่นยำ

3.3 การนำหัวพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูไปใช้ในการทรีตเมนต์เม็ดพันธุ์

เมื่อทำการทดสอบการทำงานของหัวพลาสมาเจ็ตฯ และปรับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน กำลังไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างเม็ดพันธุ์กับหัวพลาสมาให้มีความเหมาะสมแล้ว ในขั้นตอนต่อไปคือการนำหัวพลาสมาเจ็ตไปทรีตเมนต์เม็ดพันธุ์ถั่วเขียว โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 250 L/h กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 893 W ความถี่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 52 kHz ซึ่งเป็นค่าที่ลำพลาสมาเจ็ตติดอย่างสม่ำเสมอ โดยอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ตามหมายเลข 1 2 และ 3 บนภาพที่ 3.9 ดังนี้

1. ลำพลาสมา ส่วนนี้ คือ ลำพลาสมาเจ็ตที่มีลักษณะเป็นเส้นที่ยืดลงไปบนผิวเมล็ดพันธุ์
2. เมล็ดพันธุ์ เป็นเมล็ดถั่วเขียวสำหรับการผลิตถั่วงอกบริโภค ซึ่งบรรจุอยู่ในภาตใส่เมล็ดพันธุ์
3. ภาตใส่เมล็ด ใช้สำหรับใส่เมล็ดพันธุ์แต่ละชนิด เพื่อให้เกิดการทรีตอย่างทั่วถึงและตรงจุดที่มีความสำคัญต่อการงอก



ภาพที่ 3.9 ทดสอบการทรีตเมนต์ถั่วเขียวสำหรับการผลิตถั่วงอก

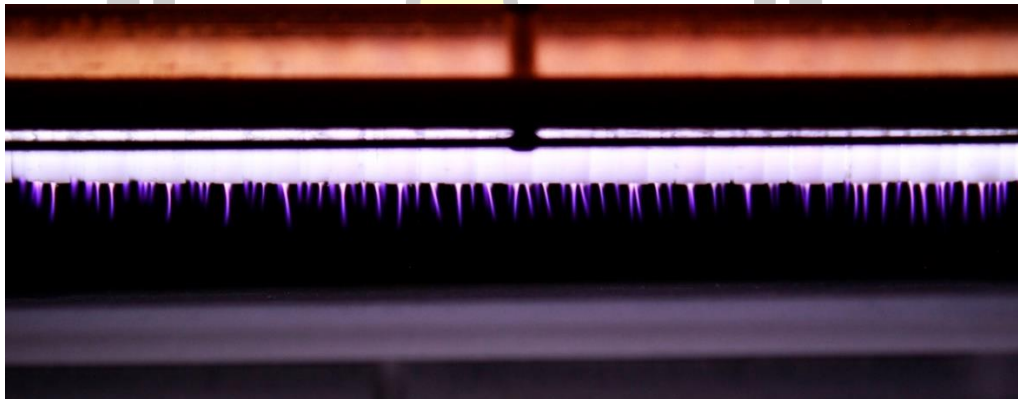
สำหรับขั้นตอนการทรีตเมนต์เม็ดพันธุ์ถั่วเขียว ได้นำเมล็ดพันธุ์วางบนภาต จำนวน 100 เมล็ด ทำการทรีต โดยการเคลื่อนหัวกำเนิดพลาสมาผ่านเมล็ดพันธุ์ด้วยอัตราเร็ว 0.1 m/s โดยการทดลองทรีต โดยใช้เวลาต่างกัน ซึ่งทำการทรีตที่เวลา 1 และ 4 นาที แล้วทำการสุ่มเมล็ดมาเพาะเป็นต้นอ่อน จำนวน 30 เมล็ด เมื่อได้ต้นอ่อนถั่วเขียวที่เจริญเป็นเวลา 4 วัน จากนั้นสุ่มตัวอย่างละ 10 ต้น เพื่อชั่งเปรียบเทียบมวลกับตัวอย่างควบคุมแล้วทำการเพาะเมล็ดเป็นเวลา 4 วันจะได้ต้นอ่อนที่มีขนาดเหมาะสมสำหรับการบริโภคแล้วทำการชั่งมวลตัวอย่างครั้งละ 10 ต้น โดยสุ่มตัวอย่าง 3 รอบ แล้วหาค่ามวลเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบผลการโตระหว่างของเมล็ดควบคุม และเมล็ดพันธุ์ที่ผ่านการทรีตเป็นเวลา 1 นาที และ 4 นาที

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 ผลการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมา

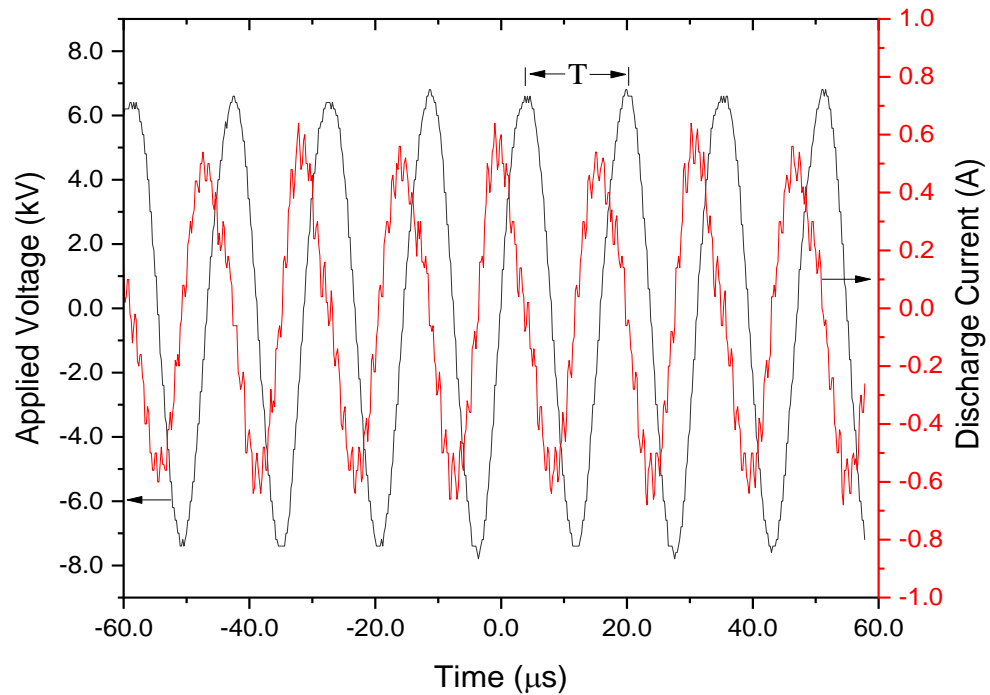
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ เพื่อใช้ในการพริตเมล็ดพันธู์ การคำนวณหา กำลังไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมในการใช้งานจึงมีความจำเป็น เนื่องจากถ้าใช้กำลังไฟฟ้าต่ำเกินไปพลาสมาอาจจะไม่ติดหรือติดไม่เสถียร แต่ถ้าใช้กำลังไฟฟ้าสูงเกินไป หัวพลาสมาอาจจะร้อนและเสียหายได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของแก๊ส อัตราการไหลแก๊ส การออกแบบขั้วไฟฟ้ากับขั้วกราวด์ ดังนั้นจึงได้ทำการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมา เพื่อศึกษาอัตราการไหลของแก๊สว่ามีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมาอย่างไร โดยการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมาของแก๊สอาร์กอน (Argon) เมื่อทำการจุดพลาสมาและพลาสมาเจ็ดติดอย่างเสถียรจะมีลำพลาสมาพุ่งออกอย่างสม่ำเสมอครบทุรู ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 การแตกตัวของแก๊สอาร์กอนโดยใช้หัวกำเนิดพลาสมาเจ็ดแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ ที่ช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ (Low power mode) และอัตราการไหลของแก๊ส 300 L/h

การหา กำลังไฟฟ้าในการจุดพลาสมา สามารถทำได้จากการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วไฟฟ้า $v(t)$ และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วไฟฟ้า $I(t)$ โดยใช้ออสซิลโลสโคปแบบ 2 ช่องสัญญาณ ยี่ห้อ Agilent technologies รุ่น DSO1002A ตอบสนองความถี่สูงสุดได้ 60 MHz ซึ่งได้ทำการต่อช่องสัญญาณที่ 1 ของออสซิลโลสโคปเข้ากับหัววัดแรงดันสูง (High voltage probe) ยี่ห้อ Agilent technologies รุ่น 10076B ที่สามารถวัดแรงดันสูงสุด 4,000 โวลต์ และช่องสัญญาณที่ 2 ต่อเข้ากับหัววัดกระแสแบบแคลมป์มิเตอร์ (Clamp meter current) ยี่ห้อ Pearson รุ่น 4100 ที่สามารถวัดกระแสสูงสุดได้ 500 แอมแปร์ ลักษณะสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของหัวกำเนิดพลาสมาแบบ

หลายรูปที่ความดันบรรยากาศ แสดงได้ดังภาพที่ 4.2 ซึ่งเป็นกราฟแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะจุดพลาสมา เพื่อใช้หาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (Average power, \bar{P}) ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่าง ๆ กัน



ภาพที่ 4.2 สัญญาณแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของหัวกำเนิดพลาสมาแบบหลายรูปที่ความดันบรรยากาศในช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 300 L/h

จากภาพที่ 4.2 แสดงกราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วกำลังและขั้วกราวด์ ซึ่งสามารถเขียนสมการอธิบายสัญญาณทางไฟฟ้าได้ ดังนี้

$$V(t) = V_{\max} \sin\left(2\pi ft - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.1)$$

$$i(t) = i_{\max} \sin(2\pi ft) \quad (4.2)$$

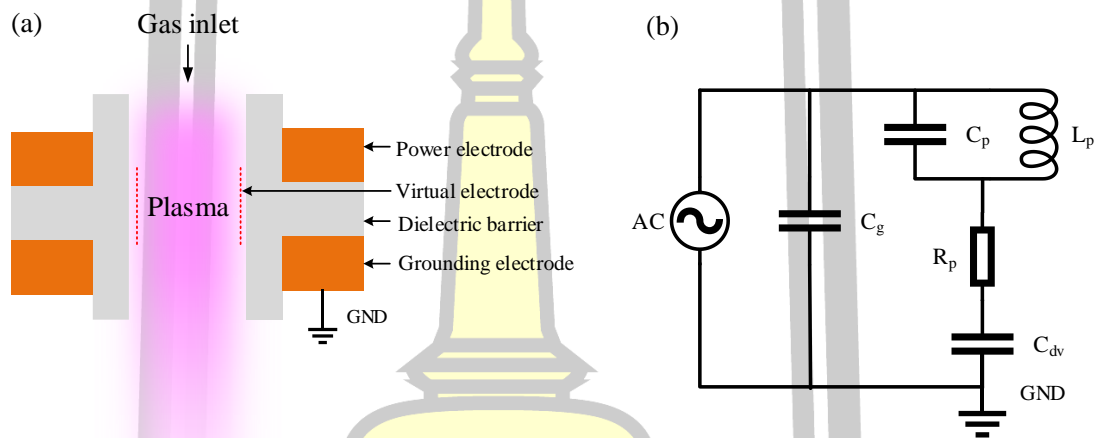
โดยที่ V_{\max} คือ แอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจากภาพที่ 4.2 พบว่ามีค่าประมาณ 7 kV

f คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งหาได้จาก $\frac{1}{T} = \frac{1}{16 \mu\text{s}} = 52 \text{ kHz}$

$-\frac{\pi}{2}$ คือ มุมเฟสเริ่มต้นของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีเฟสตามกระแสไฟฟ้าอยู่ 90°

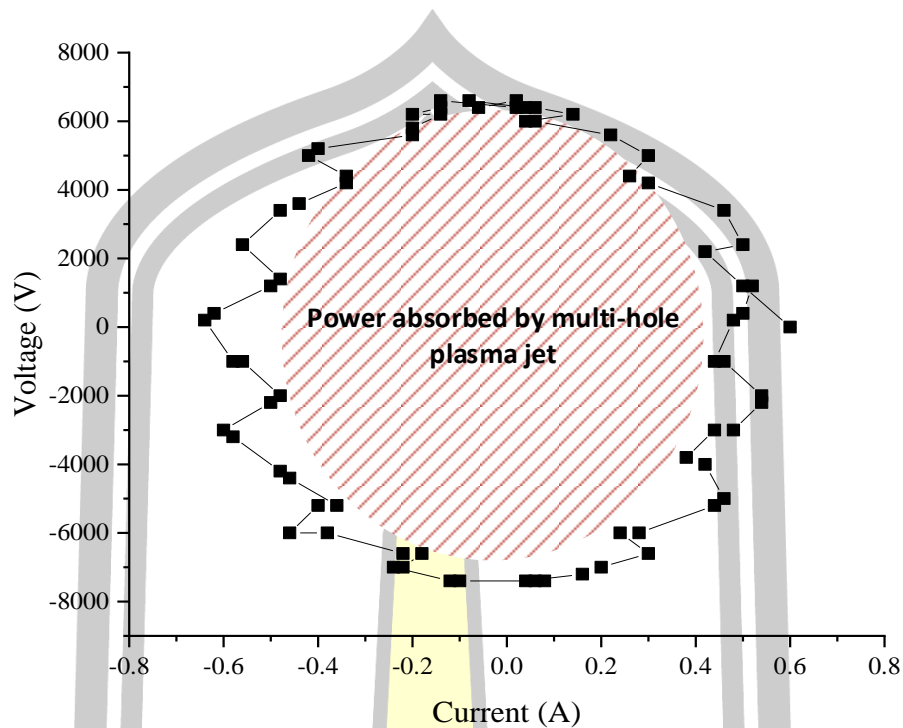
i_{\max} คือ แอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งพบว่ามีค่าประมาณ 0.6 A

เนื่องจากโครงสร้างของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ต ตามภาพที่ 4.3 (a) สามารถเทียบได้กับวงจรสมมูลที่มีตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทานในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ทางไฟฟ้า ดังภาพที่ 4.3 (b) โดยที่ C_g คือ ความจุไฟฟ้าของช่องว่างที่อยู่ระหว่างหัวกำลังและหัวกราวด์ก่อนจุดพลาสมา C_p , L_p คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าและตัวเหนี่ยวนำในขณะที่เกิดระหว่างหัวไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา C_{dv} คือ ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างหัวเสมือน และหัวกราวด์ และ R_p คือ ความต้านทานไฟฟ้าของพลาสมา



ภาพที่ 4.3 (a) ไดอะแกรมภาพตัดขวางของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ต เส้นประสีแดงหมายถึงหัวเสมือนที่อยู่ระหว่างหัวกำลังและหัวกราวด์ที่ผิวด้านในของท่อแก๊ส (b) แบบจำลองวงจรสมมูลของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ต

เมื่อทำการเขียนกราฟ Lissajous ของแรงดันไฟฟ้าซึ่งมีเฟสตามกระแสไฟฟ้าอยู่ 90° และกระแสไฟฟ้า จะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นวงปิดคล้ายวงรี ดังภาพที่ 4.4 ที่มีพื้นที่ภายในแสดงถึงกำลังไฟฟ้าในหนึ่งคาบเวลาที่หัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูใช้ในการจุดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศที่เงื่อนไขอัตราการไหลของแก๊สหนึ่งๆ



ภาพที่ 4.4 กราฟ Lissajous ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ ช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 300 L/h

อีกวิธีหนึ่งที่ยิยมใช้ในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้จุดพลาสมา คือ หาค่าสัมบูรณ์ (Absolute) ของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ตามสมการ 4.3

$$P(t) = |V(t) \cdot I(t)| \quad (4.3)$$

โดยที่ $P(t)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมา

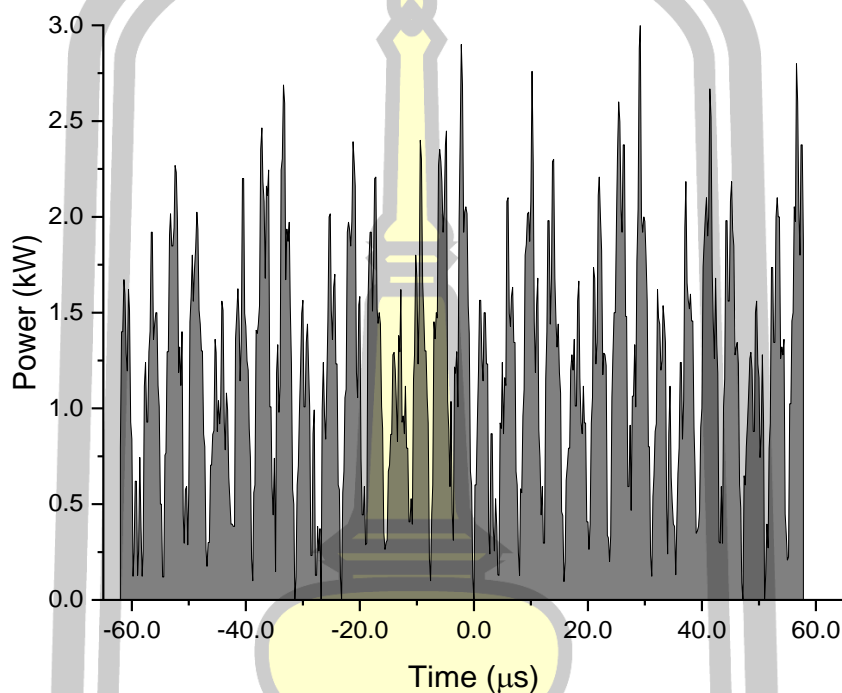
$V(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$I(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

เมื่อคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจากสมการ 4.3 ได้แล้ว จากนั้นก็นำค่ากำลังไฟฟ้าพล็อตกราฟเทียบกับเวลา ได้ผลดังภาพที่ 4.5 จากนั้นทำการหาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ที่ใช้ในการจุดพลาสมาแต่ละเงื่อนไขในการทดลอง โดยสามารถหาจากการอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟ ที่มี

คาบเวลา (T) ดังภาพที่ 4.5 และสามารถอธิบายเป็นความสัมพันธ์ ได้ดังสมการ 4.4 โดยที่ \bar{P} คือ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการจุดพลาสมา

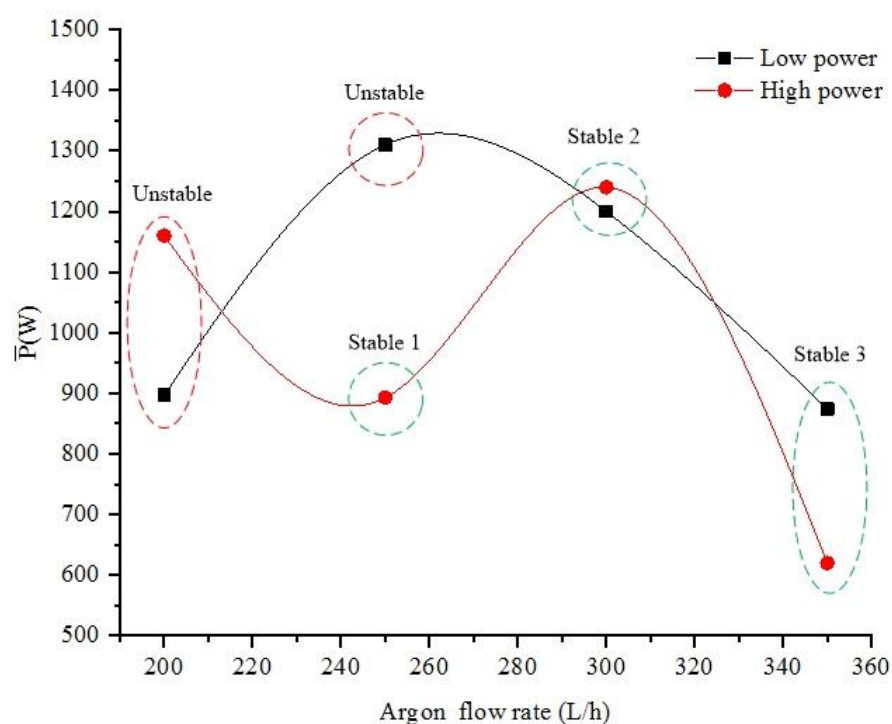
$$\bar{P} = \frac{1}{t} \int_{t_0}^t P(t) dt ; t > T \quad (4.4)$$



ภาพที่ 4.5 กำลังไฟฟ้าของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่มีความดันบรรยากาศ ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 300 L/h

จากการวัดกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้สำหรับจุดพลาสมาที่เงื่อนไขอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ในช่วง 200 250 300 และ 350 L/h พบว่าความยาวของลำพลาสมามีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามค่าอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ดังนั้นในการทดลองจึงได้ทำการแบ่งช่วงกำลังไฟฟ้า (Power) ที่ใช้ออกเป็น 2 ช่วง สำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าให้หัวพลาสมา ซึ่งจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ซึ่งตามภาพที่ 4.6 โดยมีความหมาย ดังต่อไปนี้

1. ที่ช่วงกำลังไฟฟ้าน้ำ (Low power) หมายถึง ช่วงกำลังไฟฟ้าที่มีค่าต่ำสุดที่สามารถจุดพลาสมาได้ ซึ่งจะทำให้การปรับอัตราการไหลของแก๊สแต่ละเงื่อนไข แล้วทำการบันทึกสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย
2. ที่ช่วงกำลังไฟฟ้าสูง (High power) หมายถึง ช่วงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถจุดพลาสมาได้โดยไม่เกิดการอาร์ค แล้วทำการบันทึกสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย



ภาพที่ 4.6 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในการจุดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่าง ๆ กัน

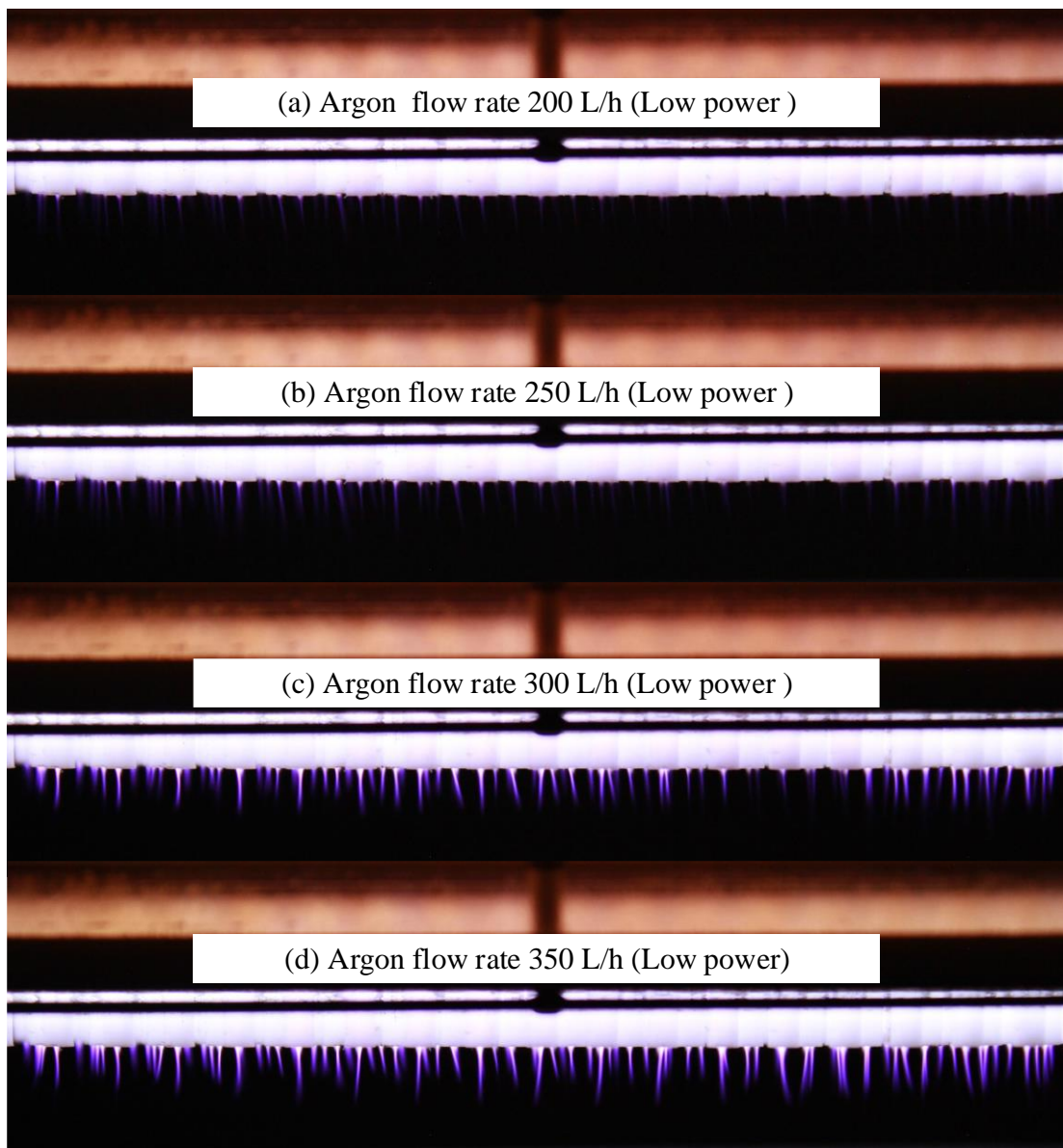
กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในการจุดพลาสมามีการเปลี่ยนแปลงตามค่าอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมหมายถึงลำพลาสมาสามารถพุ่งออกมาอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอโดยไม่เกิดการอาร์ค ตามภาพที่ 4.6 สามารถสรุปของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการจุดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่าง ๆ กัน ได้ดังนี้

1. ตำแหน่ง Stable 1 หมายถึง เงื่อนไขที่ใช้กำลังไฟฟ้าน้ำและใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่ำ แล้วทำให้ลำพลาสมาพุ่งออกมาอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ

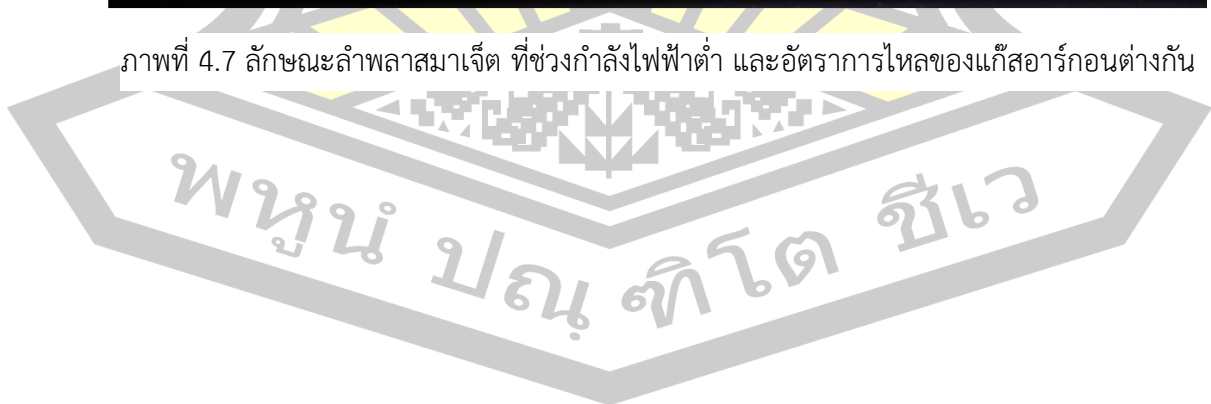
2. ตำแหน่ง Stable 2 หมายถึง เงื่อนไขที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงและใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนปานกลาง แล้วทำให้ลำพลาสมาพุ่งออกมาอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ
3. ตำแหน่ง Stable 3 หมายถึง เงื่อนไขที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนสูง จึงจำเป็นต้องใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากในขณะที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนสูง ถ้าใช้กำลังไฟฟ้าสูงเกินไป ลำพลาสมาจะมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสถานะ Abnormal glow ไปยัง Arc discharge ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นที่แผ่นเทฟลอนที่ทำหน้าที่เป็นชั้นฉนวนกั้นระหว่างขั้วกำลังและขั้วกราวด์ และทำให้หัวกำเนิดพลาสมาเสียหายได้ จึงต้องมีการปรับลดกำลังไฟฟ้าลง เพื่อให้ลำพลาสมามีความเสถียรมากขึ้นนั่นเอง
4. ตำแหน่ง Unstable หมายถึง ลำพลาสมาเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่อง หรือไม่มีลำพลาสมาพุ่งออกมา ซึ่งเกิดจากการใช้อัตราการไหลของแก๊สต่ำเกินไปหรือสูงเกินไป และ/หรือการใช้กำลังไฟฟ้าไม่เหมาะสมกับอัตราการไหลของแก๊ส

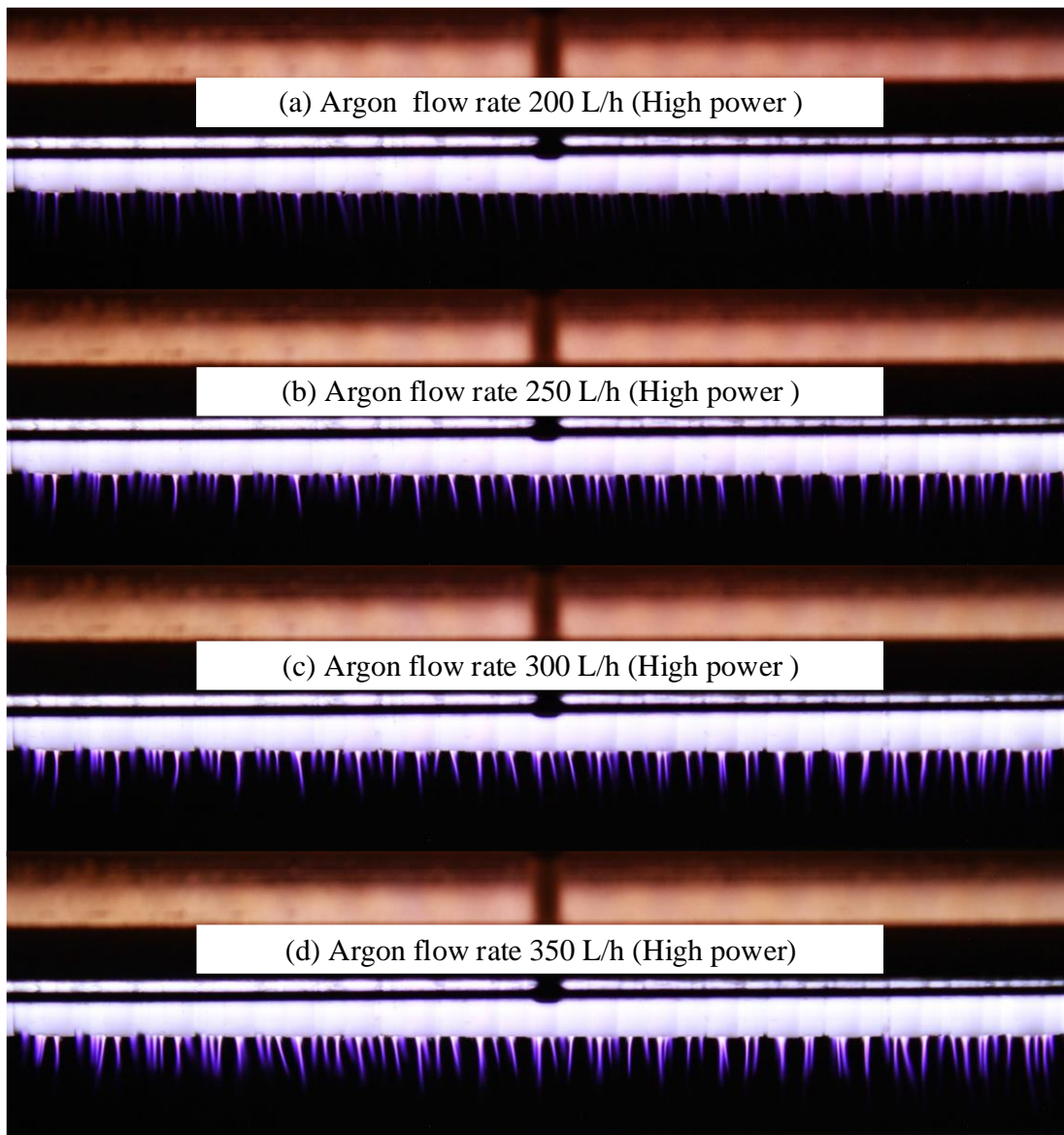
ในขั้นตอนต่อไปเป็นการทดสอบการทำงานของหัวพลาสมาเจ็ตๆ ที่กำลังไฟฟ้าและอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่าง ๆ กัน ตามภาพที่ 4.7 แสดงลักษณะลำพลาสมาเจ็ตในช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ และ ภาพที่ 4.8 แสดงลักษณะลำพลาสมาเจ็ตในช่วงกำลังไฟฟ้าสูง พบว่าเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 200 ลิตรต่อชั่วโมง (L/h) จะเห็นลำพลาสมาเจ็ตพุ่งออกมาจางๆ ไม่ยาว แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 250 300 และ 350 L/h จะสังเกตเห็นลำพลาสมาพุ่งออกมาเข้มและยาวขึ้น แต่เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สมากกว่า 350 L/h จะเกิดการอาร์คที่รูของหัวพลาสมาเจ็ตบางรู และถ้าปล่อยให้เกิดการอาร์คนานเกินไปจะส่งผลให้ชั้นเทฟลอนเสียหายได้ จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขในการจุดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูให้มีความเสถียรมากที่สุด คือ ปรับกำลังไฟฟ้าไปอยู่ที่ช่วงกำลังไฟฟ้าประมาณ 893 W และใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 250 L/h จะทำให้ลำพลาสมาติดอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลานานได้ ดังแสดงในภาพ 4.7 (b) โดยมีความยาวของลำพลาสมาที่พุ่งออกมาประมาณ 10 mm

พหุ ประสิทธิภาพ ชีวะ



ภาพที่ 4.7 ลักษณะลำพลาสมาเจ็ต ที่ช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ และอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่างกัน





ภาพที่ 4.8 ลักษณะลำพลาสมาเจ็ด ที่ช่วงกำลังไฟฟ้าสูง และที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่างกัน



4.2 ผลการวัดสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมา

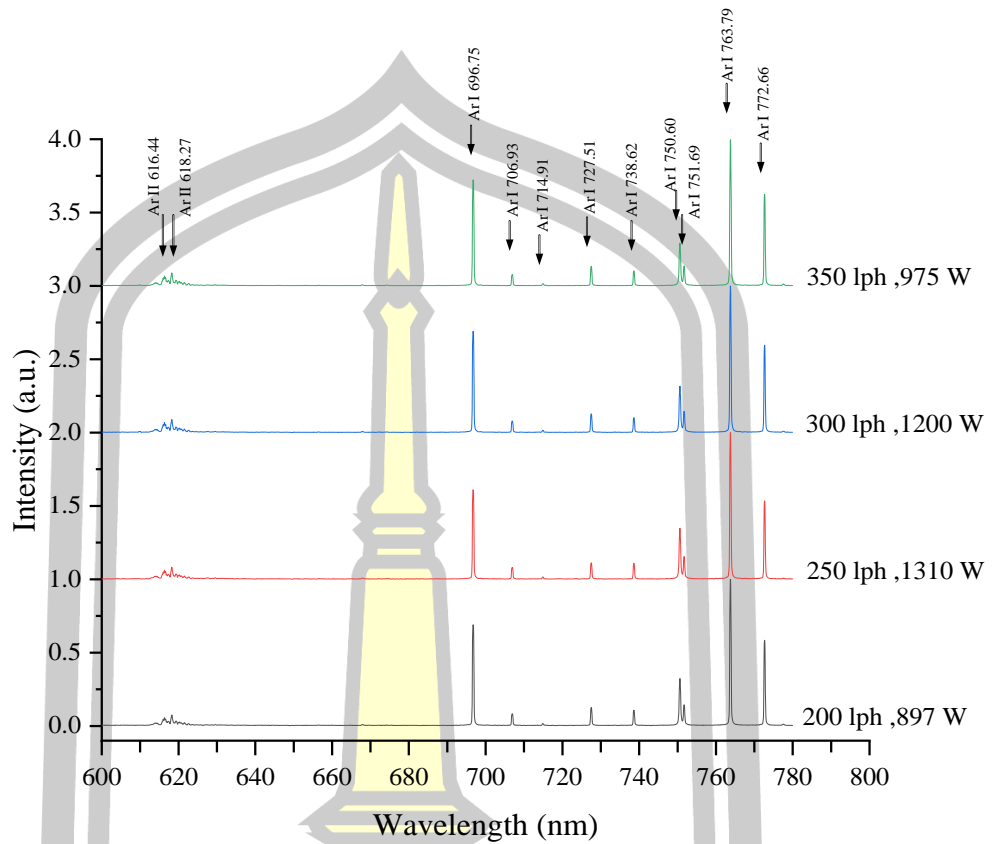
ในงานวิจัยนี้ได้วัดสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากพลาสมาที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สอาร์กอน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมทางแสง (Optical emission spectrometer, OES) รุ่น GetSpec-3648-Vis ซึ่งมีจำนวนพิกเซลของซีซีดี (CCD Pixel) 3648 พิกเซล ตรวจวัดสเปกตรัมทางแสงมีความละเอียด (Resolution) ประมาณ 0.1 nm โดยใช้ช่องสัญญาณที่ 2 (Channel-2) ซึ่งตอบสนองในช่วงความยาวคลื่น 600 ถึง 800 nm โดยทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์ GetSpec7.0 ในการประมวลผล และมีเงื่อนไขในการเก็บข้อมูล คือ กำหนดค่าเวลาในการเก็บข้อมูล (Integration time) และจำนวนการเฉลี่ยข้อมูล ซึ่งเงื่อนไขและค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสามารถสรุปได้ดังตาราง 4.1 ดังนี้

ตาราง 4.1 เงื่อนไขและค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

ตัวแปร	ปริมาณ
จำนวนครั้งที่ข้อมูลถูกเก็บแล้วแสดงผลแบบเฉลี่ย	3
เวลาในการเก็บข้อมูลแต่ละครั้ง (ms)	30
ช่วงความยาวคลื่นสแกน Channel-2 (nm)	600-800
ความละเอียดสูงสุดในการระบุตำแหน่งพิก (nm)	0.1

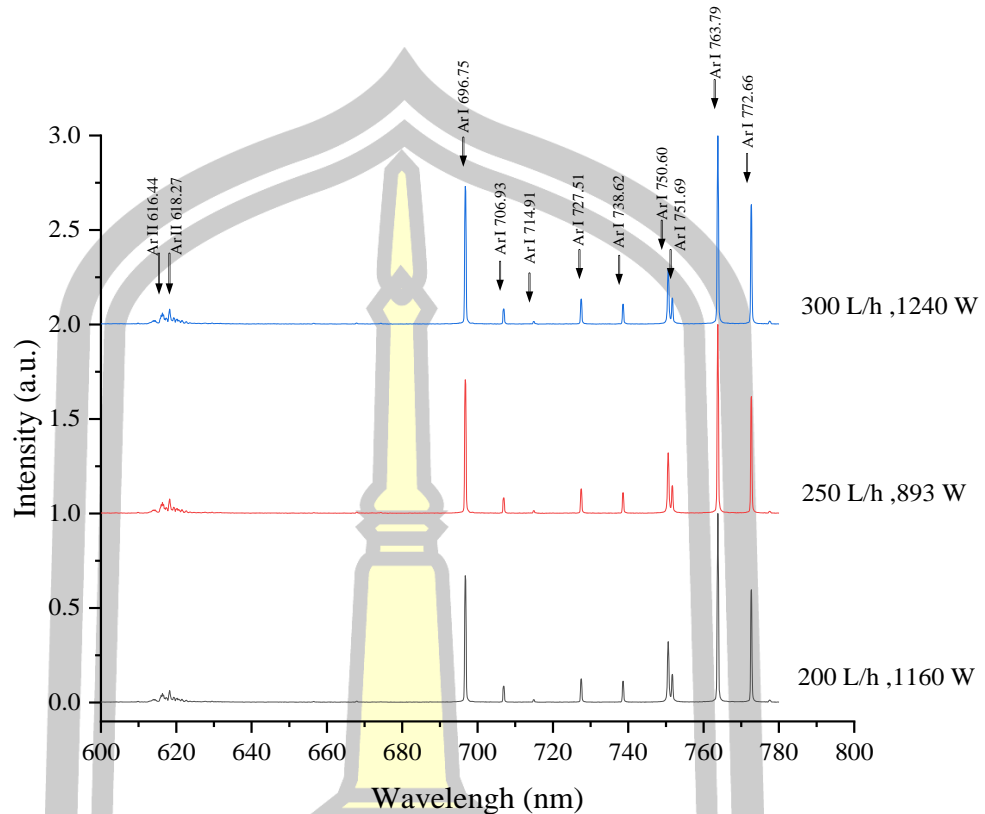
ต่อมาได้ทำการตรวจวิเคราะห์พิก (Peak identification) เพื่อระบุชนิดของสปีชีส์ที่คายพลังงานออกมาโดยการนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลออนไลน์ในเว็บไซต์ NIST Atomic Spectra Database Lines Data ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งพิกที่สอดคล้องกับสปีชีส์ที่คายพลังงานออกมาในช่วงความยาวคลื่น 600-800 nm แสดงได้ดังภาพที่ 4.9 ในกรณีที่ใช้ช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ และภาพที่ 4.10 ในกรณีที่ใช้ช่วงกำลังไฟฟ้าสูง

พหุ ประถมศึกษา



ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากหัวพลาสมาเจ็ตๆ ที่ช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่าง ๆ กัน





ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากหัวพลาสมาเจ็ตๆ ที่ช่วงกำลังไฟฟ้าสูง ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่าง ๆ กัน

จากภาพที่ 4.9 และ 4.10 เมื่อพิจารณาเส้นสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยจากลำพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สอาร์กอน ที่เงื่อนไขอัตราการไหล 200 250 300 และ 350 L/h ที่ช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำและช่วงกำลังไฟฟ้าสูง สามารถสรุปชนิดสปีชีส์ที่ตรวจพบได้ดังตาราง 4.2 ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการของโบลทซ์มานน์ (Boltzmann's law) โดยความหนาแน่นของอะตอม N_i ที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงาน E_i ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของอิเล็กตรอน T สามารถหาได้จาก

$$N_i = N \frac{g_i}{U(T)} e^{-E_i/k_B T} \quad (4.5)$$

โดยที่ k_B คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มานน์

N คือ ความหนาแน่นรวมของอะตอมแก๊สในทุกสถานะ

g_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักทางสถิติ (Statistical weight) ของอะตอมที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่สถานะ i ซึ่งหาได้จากเลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุมรวม คือ $g_i = 2J_i + 1$ และ

$U(T)$ คือ ฟังก์ชันพาร์ทิชัน (Partition function) ที่สามารถเขียนในรูปของระดับพลังงาน E_i และอุณหภูมิเฉลี่ยที่ใช้กระตุ้นอิเล็กตรอน T (Electron excitation temperature) คือ

$$U(T) = \sum_i g_i e^{-E_i/k_B T} \quad (4.6)$$

ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนมีการคายพลังงานจากระดับพลังงาน j ไปอยู่ที่ระดับพลังงาน i สัดส่วนความหนาแน่นอะตอมที่สอดคล้องกับระดับพลังงานทั้งสอง คือ

$$\frac{N_j}{N_i} = \frac{g_j}{g_i} e^{-(E_j - E_i)/k_B T} \quad (4.7)$$

โดยความแตกต่างของระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนปลดปล่อยออกมาจะสอดคล้องกับความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตรวจวัดได้ ($\lambda_{\text{detected}}$) คือ

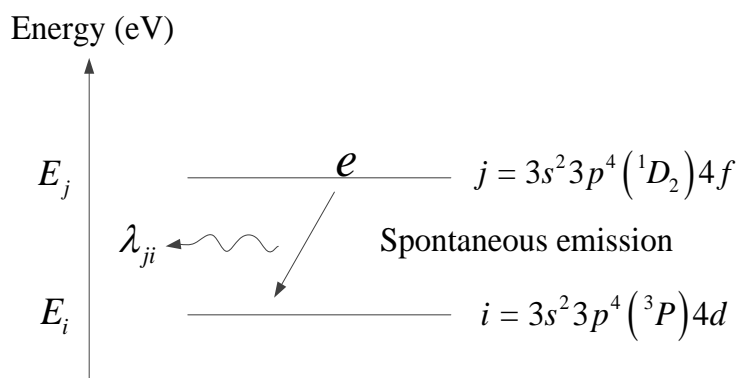
$$\lambda_{\text{detected}} = \frac{hc}{E_j - E_i} \quad (4.8)$$

ในรูปของความเข้มเส้นสเปกตรัม (Line intensity) ที่ตรวจวัดได้เนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงาน j ไปอยู่ที่ระดับพลังงาน i จะหาได้จาก

$$I_{ji} = \frac{N}{U(T)} g_j A_{ji} \frac{hc}{\lambda_{ji}} e^{-E_j/k_B T} \quad (4.9)$$

โดยที่ A_{ji} คือ สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยพลังงานแบบฉับพลัน (Einstein coefficients of spontaneous emission)

ตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมที่ตรวจพบจากเส้นสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูปที่ความดันบรรยากาศ พบว่าสามารถตรวจพบข้อมูลสเปกตรัม ทั้ง Ar I Ar II และ O IV ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.11 แสดงตัวอย่างการเกิดปรากฏการณ์ Spontaneous emission ที่ได้แสดงการปลดปล่อยโฟตอนของ Ar II ที่ความยาวคลื่น 616.85 nm



ภาพที่ 4.11 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมอาร์กอนโดยการปลดปล่อยโฟตอนที่ความยาวคลื่น (Ar II) = 616.85 nm

ตาราง 4.2 สเปกตรัมที่ตรวจพบจากการวิเคราะห์เส้นสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากอาร์กอนพลาสมา

$\lambda_{detected}$ (nm)	Species identify	λ_{ref} (nm)	Transition (j→i)		$g_j A_{ij}$ (S ⁻¹)	E_i (eV)	E_j (eV)
			i	j			
616.44	Ar II	616.85	$3s^2 3p^4 ({}^3P) 4d$	$3s^2 3p^4 ({}^1D_2) 4f$	-	23.89	25.90
618.27	Ar II หรือ O IV	618.47	$3s^2 3p^4 ({}^3P) 4d$	$3s^2 3p^4 ({}^3P_1) 5f$	-	23.54	25.55
		618.33	$2s 2p ({}^3P^\circ) 4s$	$2s 2p ({}^3P^\circ) 4p$	2.88×10^7	71.15	73.16
696.76	AR I	696.74	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{3/2}) 4s$	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{1/2}) 4p$	1.9×10^7	11.54	13.32
706.93	AR I	706.92	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{3/2}) 4s$	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{1/2}) 4p$	1.9×10^7	11.54	13.30
714.92	AR I	714.90	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{3/2}) 4s$	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{1/2}) 4p$	1.9×10^6	11.54	13.28
727.51	AR I	727.49	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{3/2}) 4s$	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{1/2}) 4p$	5.49×10^6	11.62	13.32
738.62	AR I	738.60	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{3/2}) 4s$	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{1/2}) 4p$	4.2×10^7	11.62	13.30
750.61	AR I	750.59	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{1/2}) 4s$	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{1/2}) 4p$	4.5×10^7	11.82	13.47
751.69	AR I	751.67	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{3/2}) 4s$	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{3/2}) 4p$	4.0×10^7	11.62	13.27
763.79	AR I	763.72	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{3/2}) 4s$	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{3/2}) 4p$	1.22×10^8	11.54	13.17
772.67	AR I	772.63	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{1/2}) 4s$	$3s^2 3p^5 ({}^2P^\circ_{1/2}) 4p$	3.51×10^7	11.72	13.32

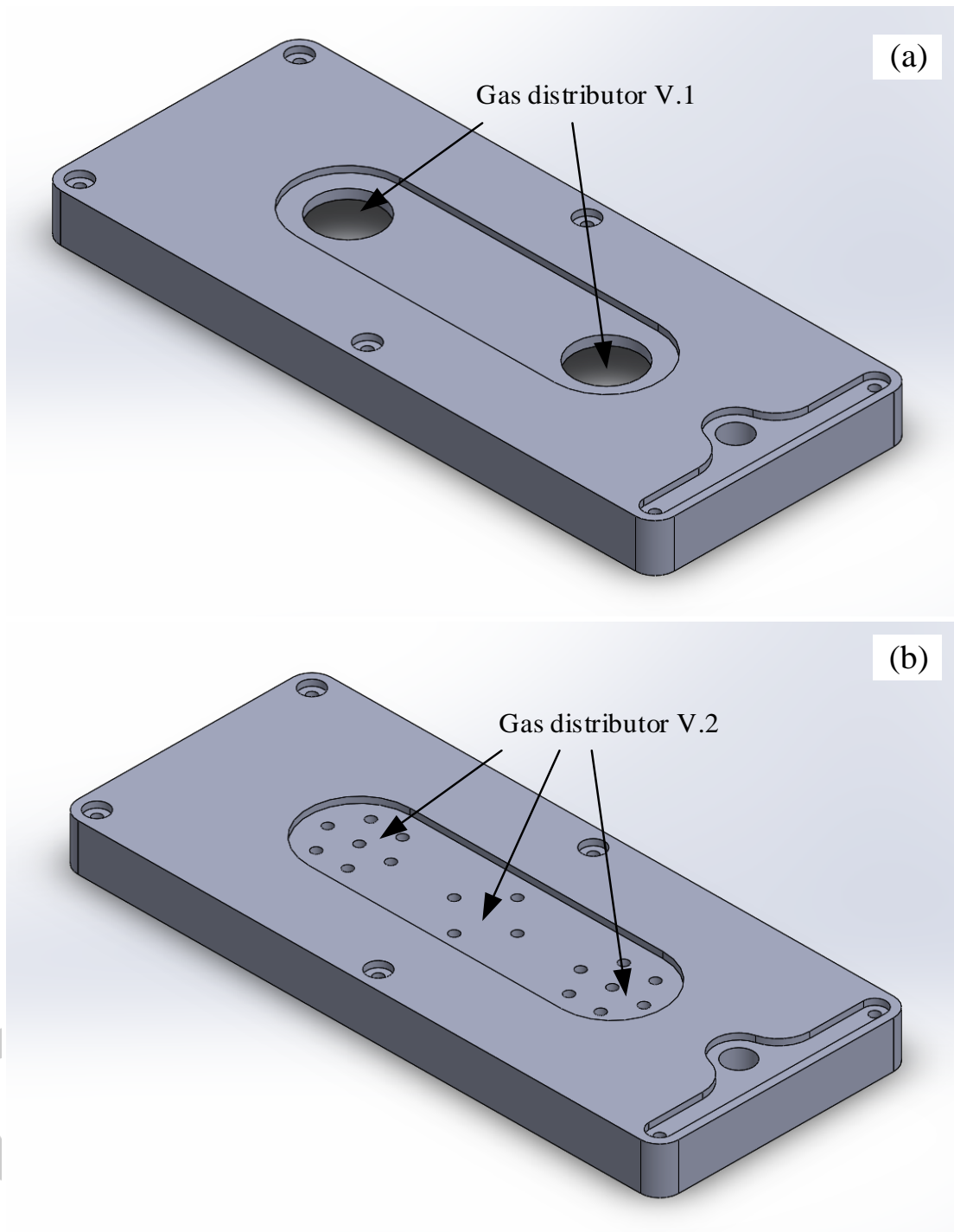
จากตารางที่ 4.2 เส้นสเปกตรัม (Line intensity) ที่ตรวจวัดได้เนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน สเปกตรัมที่ตรวจพบจึงเป็นพิคที่เป็นของอะตอมเดียวเป็นหลักที่เปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีความเข้มที่สูงจึงสามารถใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมทางแสงวิเคราะห์ได้ ส่วนสเปกตรัมที่เป็นโมเลกุลมีความเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมาในช่วงที่ตามองเห็นได้ต่ำมาก ซึ่งทำให้เครื่องตรวจวัดจำแนกไม่ได้ว่าเป็นสัญญาณรบกวน (Noise) หรือสัญญาณจากสเปกตรัมที่เป็นโมเลกุล

4.3 ผลการปรับปรุงแผ่นกระจายแก๊สโดยใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์

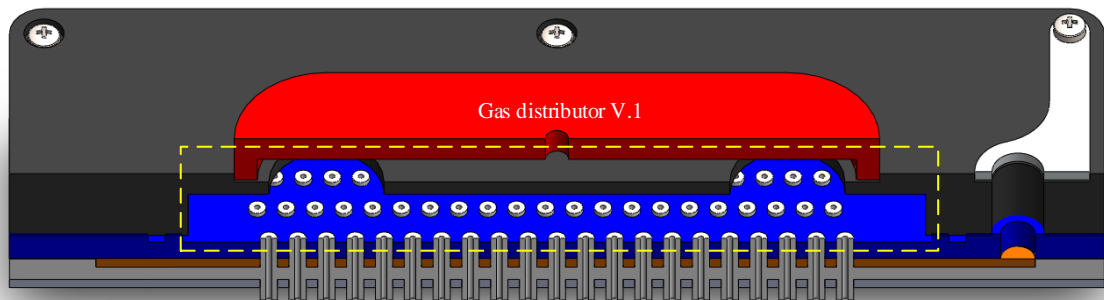
ในการออกแบบแผ่นกระจายแก๊สโดยใช้การจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์จะช่วยให้สามารถเห็นภาพรวมของระบบก่อน ซึ่งมีความสะดวกในการแก้ไข เนื่องจากหากพบข้อผิดพลาดก็จะสามารถแก้ไขได้ในคอมพิวเตอร์ทันทีโดยไม่ต้องไปเสียเวลาขึ้นรูปชิ้นงาน สามารถมองแบบเป็นสามมิติสามารถตรวจสอบความเข้ากันได้ของชิ้นส่วนตามขนาดจริง ดังนั้นการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์จึงเป็นเครื่องมือที่อำนวยความสะดวกในการสร้างชิ้นงานต้นแบบที่มีประสิทธิภาพ ป้องกันการสูญเสียวัสดุซึ่งมีราคาสูง

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้พบว่าตัวแปรที่มีความสำคัญ สำหรับหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรู คือ การกระจายตัวของแก๊สที่ต้องมีความสม่ำเสมอเท่ากันทุกรู เนื่องจากอัตราเร็วและความดันของแก๊สภายในจะส่งผลถึงกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมา และหากอัตราเร็วของแก๊สในแต่ละรูมีค่าไม่เท่ากัน จะส่งผลให้ลำพลาสมาพุ่งออกมาไม่สม่ำเสมอทุกรู ซึ่งงานวิจัยนี้ได้แก้ปัญหาโดยใช้โปรแกรม Solid Work ในการออกแบบ และจำลองการไหลของแก๊สภายในหัวพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูโดยใช้โมดูล Solid Work flow simulation เพื่อทดสอบการทำงานบนคอมพิวเตอร์ก่อนการสร้างชิ้นงานจริง ผลการออกแบบแสดงได้ดังภาพที่ 4.12 ซึ่งเป็นภาพร่าง (a) แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 1 และ (b) แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 2 แผ่นกระจายแก๊สแต่ละแบบมีแนวคิดการออกแบบ ดังนี้

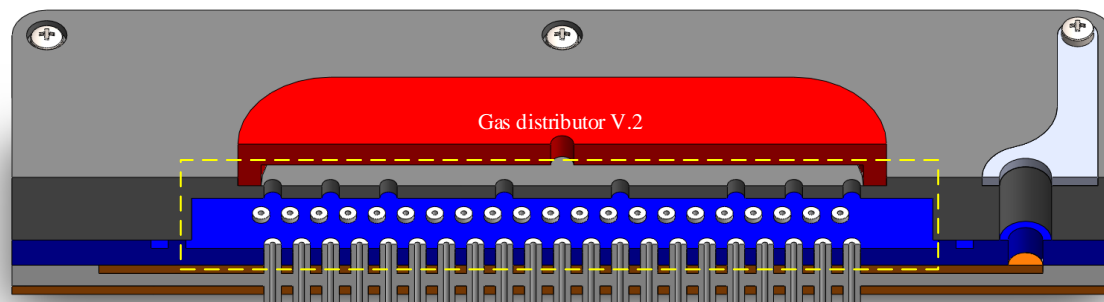
- แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 1 ผู้วิจัยได้ทำการเจาะรูขนาดใหญ่ 2 รู แต่ละรูมีขนาด 10 มิลลิเมตร และอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางไปทางซ้ายและขวาเท่ากัน คือ 2 เซนติเมตร ซึ่งจะทำให้แก๊สที่ไหลเข้ามา 1 รูถูกกระจายออก และไหลลงไปยังชั้นไดอิเล็กตริกที่มีรูกระจายอยู่ 105 รู ได้ง่าย
- แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 2 ผู้วิจัยได้ทำการเจาะรูเล็ก ขนาด 3 มิลลิเมตร และแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มรูทางซ้ายและขวามือ มีจำนวนรูกลุ่มละ 7 รู ขณะที่กลุ่มรูตรงกลางมีจำนวน 4 รู ซึ่งจะทำให้แก๊สที่ไหลเข้ามาสู่ตรงกลางถูกกระจายออกและไหลลงไปยังชั้นไดอิเล็กตริกที่มีรูกระจายอยู่ 105 รู ได้สม่ำเสมอมากขึ้น



ภาพที่ 4.12 ภาพร่างแผ่นกระจายแก๊ส (a) แบบที่ 1 (b) แบบที่ 2



(a) Gas distributor V.1



(b) Gas distributor V.2

ภาพที่ 4.13 ภาพโครงสร้างภายในหัวกำเนิดพลาสติก (a) ใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 1 (b) ใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 2

ในการออกแบบและสร้างแผ่นกระจายแก๊ส มีหลักการอยู่ 2 ข้อ คือ 1. ต้องสามารถทำให้แก๊สพุ่งออกมาจากหัวฉีดสม่ำเสมอด้วยความเร็วที่เท่ากัน 2. แก๊สที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดต้องมีความเร็วมากพอที่จะทำให้พลาสติกเจ็ตติดได้ง่าย เนื่องจากอะตอมของแก๊สจะเกิดการชนกันเองด้วยความถี่ที่สูงขึ้นจึงจะทำให้แก๊สแตกตัวเป็นพลาสติกที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงได้ง่าย จากภาพที่ 4.13 แสดงภาพรวมของหัวกำเนิดพลาสติกเจ็ตแบบหลายรูที่ถูกประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนย่อย (รายละเอียดของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 หัวข้อ 3.1) เมื่อให้แก๊สอาร์กอนไหลเข้าหัวพลาสติกเจ็ตแล้วทำการคำนวณความเร็วของแก๊สตามตำแหน่งที่ไหลผ่านช่องว่างภายในชิ้นต่าง ๆ ของหัวพลาสติกเจ็ต ผลการคำนวณแสดงได้ตามภาพที่ 4.14 (a), (b), (c), และ (d) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความเร็วแก๊สอาร์กอนเมื่อใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 1 ขณะที่ภาพที่ 4.14 (e), (f), (g), และ (h) เปรียบเทียบผลการคำนวณความดันแก๊สภายในหัวพลาสติกที่สอดคล้องกับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน เท่ากับ 200 250 300 และ 350 L/h ตามลำดับ และภาพที่ 4.15 (a), (b), (c), และ (d) เปรียบเทียบความเร็วแก๊สอาร์กอนเมื่อใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 1 ขณะที่ภาพที่ 4.14 (e), (f), (g), และ (h) เปรียบเทียบผลการคำนวณความดันแก๊สที่สอดคล้องกับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน เท่ากับ 200 250 300 และ 350 L/h ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่า ณ ที่ตำแหน่งแก๊สชะลอตัวและมีความเร็วต่ำ ความดันแก๊สจะ

มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการของแบร์นูลลี ซึ่งกล่าวว่า “ผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในท่อที่ของไหลไหลผ่าน มีค่าคงตัว” หรือเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{constant} \quad (4.10)$$

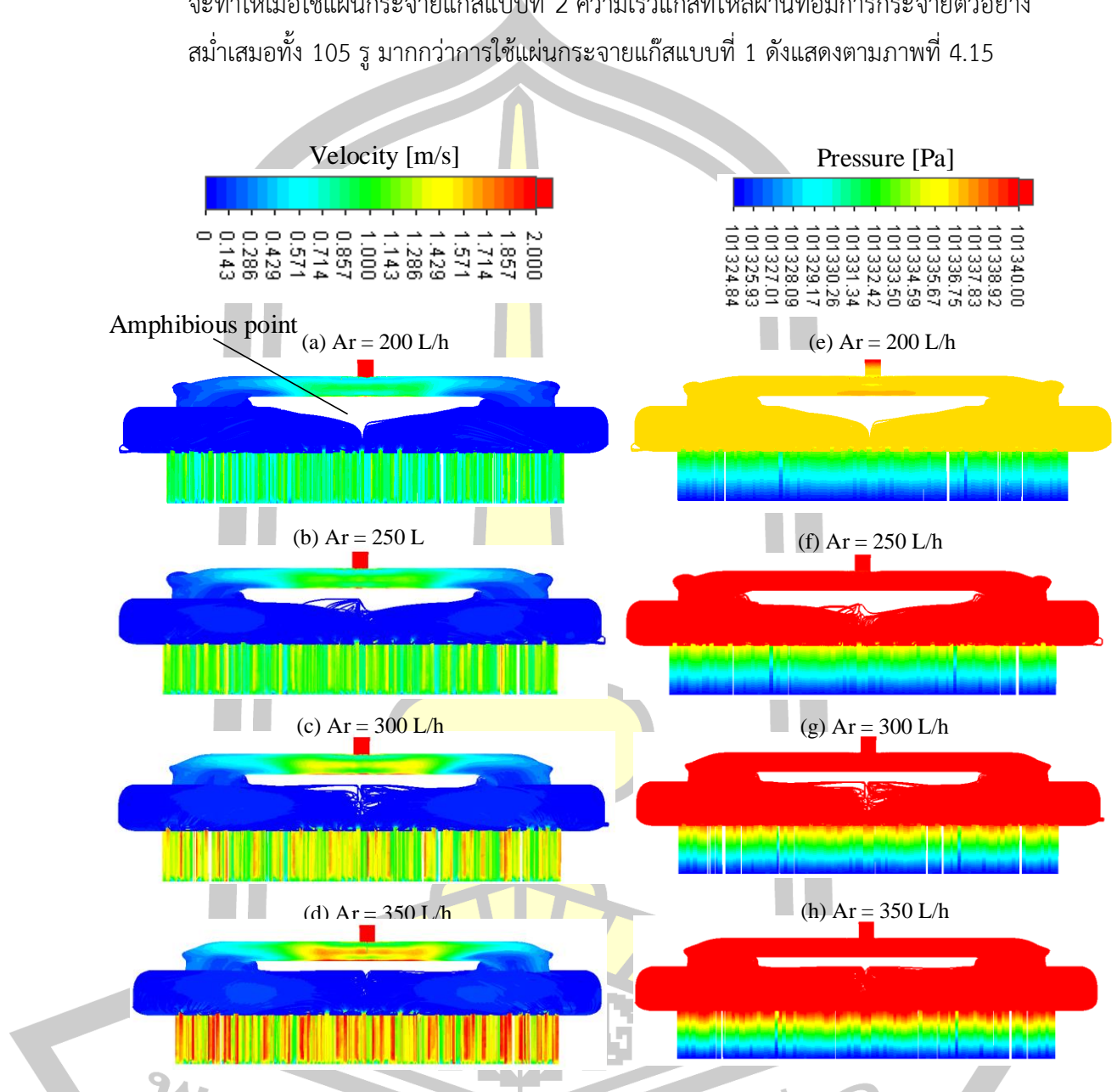
โดยที่ P คือ ความดันภายในของไหล ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล v คือ ความเร็วของของไหล และ h คือ ระดับความสูง ณ ตำแหน่งที่ของไหลกำลังไหลผ่าน

จากสมการที่ 4.10 ในกรณีของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตฯ ความหนาแน่นของแก๊ส ρ และระดับความสูง ณ ตำแหน่งที่แก๊สกำลังไหลผ่าน ถือว่ามีค่าคงที่ ดังนั้น เมื่อความเร็วแก๊สลดลง ความดันแก๊สจึงมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง โดยผลการวิเคราะห์ความเร็วและความดันแก๊สอาร์กอนเมื่อใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 1 และแบบที่ 2 แสดงได้ดังนี้

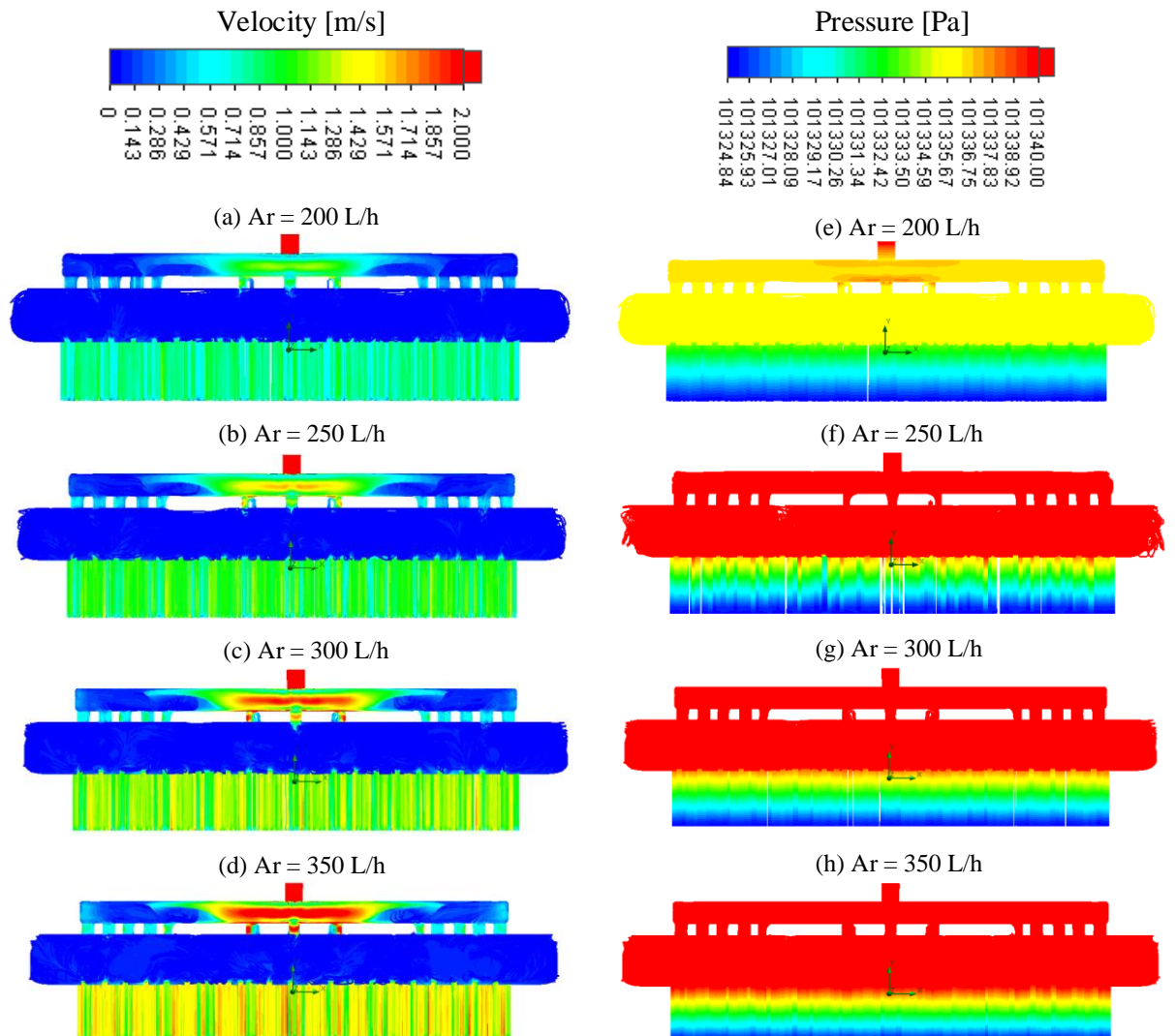
- เมื่อใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 1 จากภาพจะพบว่าแก๊สที่ไหลเข้าหัวพลาสมาเจ็ตฯ ผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6 mm มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 mm มีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 2 m/s (ความดันแก๊สมีค่าต่ำสุด) จากนั้นแก๊สจะไหลเข้าไปในแผ่นกระจายแก๊สซึ่งจะมีความเร็วลดลงอยู่ในช่วง 1.0-1.4 m/s จากนั้นแก๊สก็จะชะลอตัวมีความเร็วลดลงอยู่ในช่วง 0.1-0.4 m/s ก่อนไหลเข้าไปในชั้นกักแก๊สซึ่งแก๊สจะมีความเร็วเหลือเพียง 0-0.1 m/s (ความดันแก๊สมีค่าสูงสุด) เนื่องจากรูที่แก๊สจะต้องถูกดันเข้าไปในหัวฉีดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 1 mm แต่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจำนวน 105 รู เมื่อแก๊สในชั้นกักแก๊สไหลเข้าไปในท่อจะมีความเร็วมากขึ้นเฉลี่ยอยู่ที่ 1.0 1.2 1.4 และ 1.7 m/s ที่อัตราการไหลเข้าของแก๊สอาร์กอน 200 250 300 และ 350 L/h ตามลำดับ แต่มีข้อสังเกตว่าเกิดจุดสะเทิน (Amphibious point) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แก๊สไม่ไหลผ่านอยู่ตรงกึ่งกลางภายในชั้นกักแก๊ส ดังแสดงตามภาพที่ 4.14

- เมื่อใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 2 จากภาพจะพบว่าความเร็วแก๊สที่ไหลเข้าหัวพลาสมาเจ็ตฯ มีค่าประมาณ 2 m/s (ความดันแก๊สมีค่าต่ำสุด) จากนั้นแก๊สจะไหลเข้าไปในแผ่นกระจายแก๊สซึ่งจะมีความเร็วลดลงอยู่ในช่วง 1.1-2.0 m/s จากนั้นแก๊สก็จะชะลอตัวมีความเร็วลดลงอยู่ในช่วง 0.2-0.7 m/s ก่อนไหลเข้าไปในชั้นกักแก๊สซึ่งแก๊สจะมีความเร็วเหลือเพียง 0-0.1 m/s (ความดันแก๊สมีค่าสูงสุด) เมื่อแก๊สในชั้นกักแก๊สไหลเข้าไปในท่อจะมีความเร็วมากขึ้นเฉลี่ยอยู่ที่ 0.8 1.0 1.2 และ 1.5 m/s ที่อัตราการไหลเข้าของแก๊สอาร์กอน 200 250 300 และ 350 L/h ตามลำดับ ซึ่งแม้ว่าโดยเฉลี่ยความเร็วแก๊สที่ไหลภายในท่อจะค่า

น้อยกว่าการใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 1 แต่พบว่าไม่เกิดจุดสะท้อนภายในชั้นกักแก๊ส ซึ่งจะทำให้เมื่อใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 2 ความเร็วแก๊สที่ไหลผ่านท่อมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้ง 105 รู มากกว่าการใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 1 ดังแสดงตามภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบผลการคำนวณความเร็วแก๊สอาร์กอน (a), (b), (c), (d) และความดันแก๊ส (e), (f), (g), (h) ภายในหัวพลาสติกฯ เมื่อใช้แผ่นกระจายแก๊ส แบบที่ 1 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน



ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบผลการคำนวณความเร็วแก๊สอาร์กอน (a), (b), (c), (d) และความดันแก๊ส (e), (f), (g), (h) ภายในหัวพลาสมาเจ็ตฯ เมื่อใช้แผ่นกระจายแก๊ส แบบที่ 2 ที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน

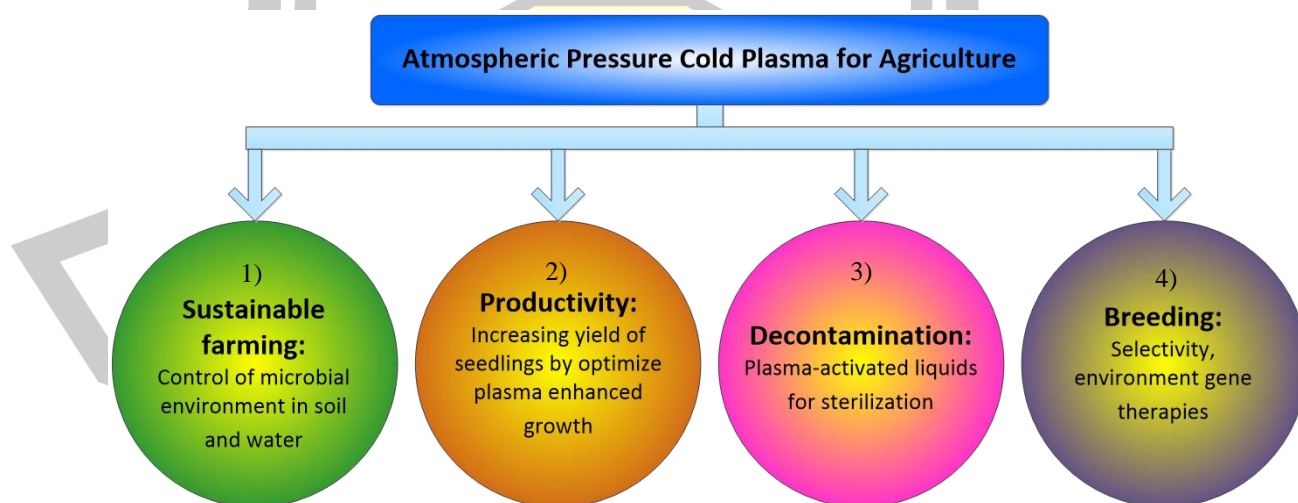


4.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้พลาสมาเจ็ตแบบหลายรูทรีตเมนต์พันธุ์

ในปัจจุบันพลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure cold plasma) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ทางการเกษตรอย่างแพร่หลาย โดยแบ่งการประยุกต์ใช้พลาสมาออกเป็น 4 กลุ่มหลักๆ ตามภาพที่ 4.16 คือ

- 1) เพื่อการทำฟาร์มแบบยั่งยืน (Sustainable farming)
- 2) เพื่อเพิ่มผลผลิต (Productivity)
- 3) เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ (Decontamination)
- 4) การทำให้ยีนเกิดการกลายพันธุ์ (Breeding)

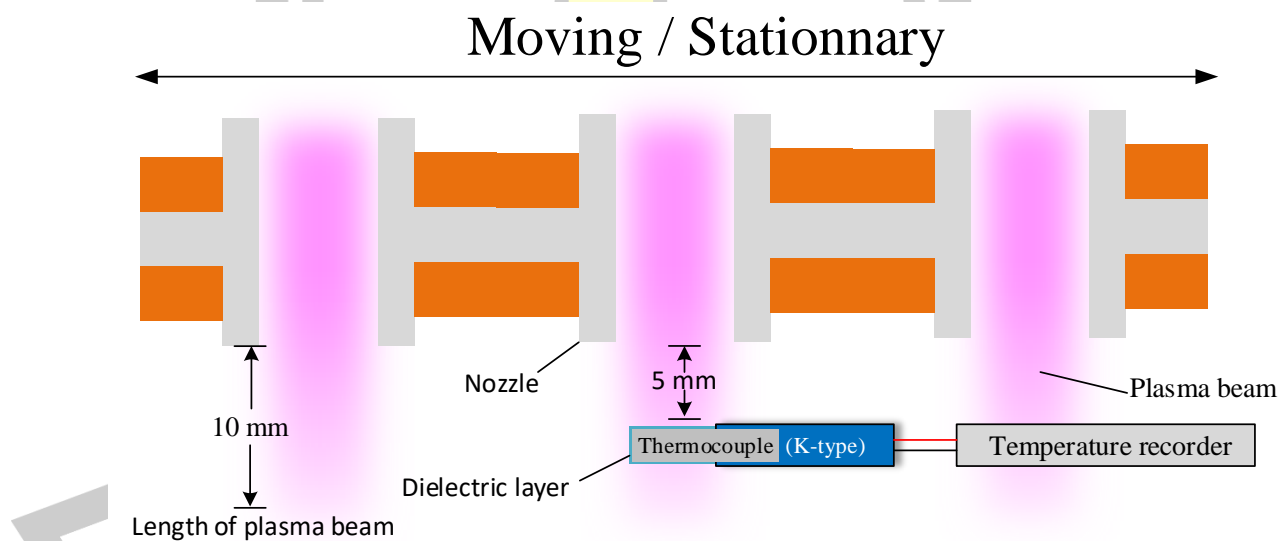
สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มที่ 2 คือ การประยุกต์ใช้พลาสมาเจ็ตแบบหลายรูทรีตเมนต์พันธุ์เพื่อเพิ่มอัตราการงอกและอัตราการโต แต่อย่างไรก็ตามขอบเขตหลักของวิทยานิพนธ์นี้ คือการออกแบบและพัฒนาหัวพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศให้มีความเสถียร ในขณะที่งานในส่วนการนำไปประยุกต์ใช้จริง คือ ทำการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ทำให้เมล็ดพันธุ์มีอัตราการโตสูงขึ้น (Optimize conditions for enhanced growth) ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้เมล็ดถั่วเขียวและทำการทรีตเพียงบางเงื่อนไขเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้เท่านั้น



ภาพที่ 4.16 การประยุกต์ใช้พลาสมาที่ความดันบรรยากาศทางเกษตรกรรม

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดอุณหภูมิของลำพลาสมาที่พุ่งออกจากปลายท่อที่มีความยาว 10 mm โดยตำแหน่งที่ทำการวัด จะมีระยะห่างจากปลายท่อ 5 mm ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้สำหรับการทรีตเมล็ดพันธ์ุ เพื่อให้แน่ใจว่าในการทรีตที่ช่วงเวลา 0-10 นาที ผลของอุณหภูมิจะไม่เพิ่มขึ้นเกิน 55°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สามารถทำลายโครงสร้างภายในของเมล็ดพันธ์ุ ดังนั้นผู้ทดลองจึงได้ทำการวัดอุณหภูมิของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ดๆ ทั้งแบบที่หัวพลาสมาเคลื่อนที่ (Moving) และหัวพลาสมาอยู่กับที่ (Stationary) ดังภาพที่ 4.17 ซึ่งมีความหมายดังนี้

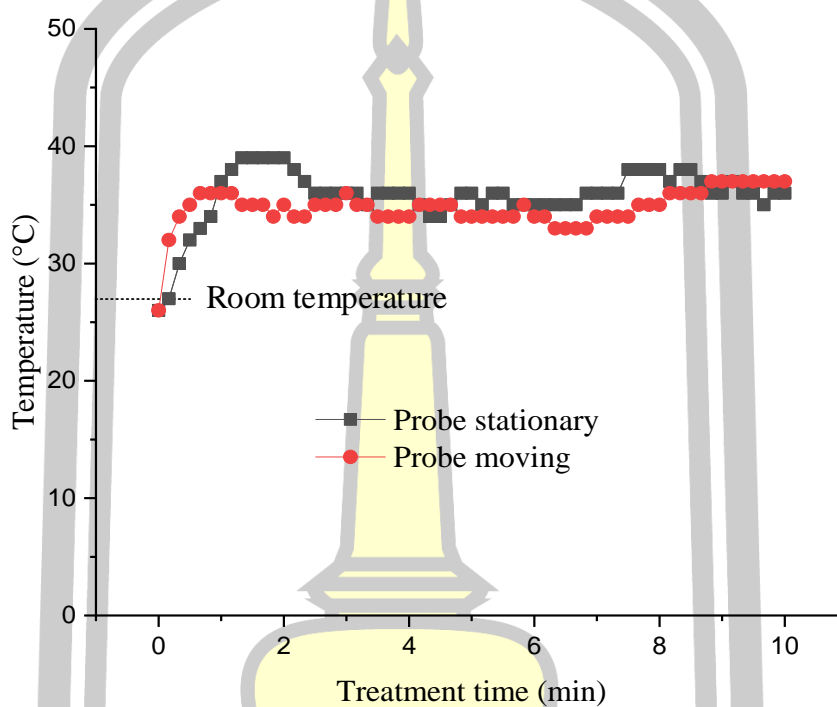
- Moving คือการเคลื่อนหัวพลาสมาไปมาระหว่างการวัดด้วยเครื่องสแกน X-Y-Z โดยใช้อัตราเร็ว 0.1 m/s พร้อมบันทึกผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ทุก ๆ 10 วินาที จนถึง 10 นาที
- Stationary คือ การยึดหัวพลาสมาให้อยู่กับที่เมื่อเทียบกับหัววัดอุณหภูมิ พร้อมบันทึกผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ทุก ๆ 10 วินาที จนถึง 10 นาที



ภาพที่ 4.17 ภาพจำลองการวัดอุณหภูมิที่ระยะห่างจากปลายท่อ 5 mm ทั้งแบบหัวพลาสมาเคลื่อนที่และอยู่กับที่

จากนั้นนำข้อมูลอุณหภูมิมาพล็อตกราฟ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิห้อง ดังภาพที่ 4.18 พบว่าเมื่อทำการทรีตติดต่อกันนาน 10 นาที อุณหภูมิที่ระยะห่างจากปลายท่อ 5 mm เพิ่มขึ้นจาก 26°C เป็น 35°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ไม่ส่งผลให้เมล็ดพันธ์ุถั่วเขียวเกิดความเสียหาย ซึ่งเป็นการพิสูจน์ว่าพลาสมามีผลต่อการงอกโดยไม่ทำลายเมล็ดพันธ์ุ อันเนื่องจากความร้อนสะสม ใน

กรณีของหัวพลาสมาที่มีการเคลื่อนที่ขณะทำการวัดจะช่วยให้ความร้อนสะสมลดลงประมาณ 1-3 °C ซึ่งเส้นของอุณหภูมิจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาการวัดผ่านไป 1 นาที โดยลักษณะของเส้นอุณหภูมิของทั้ง 2 แบบ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกัน

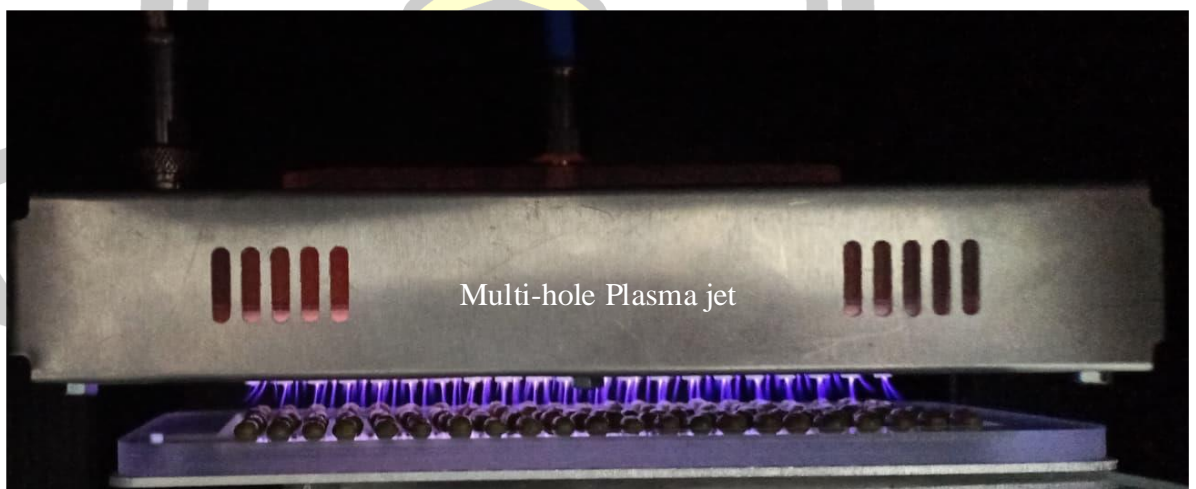
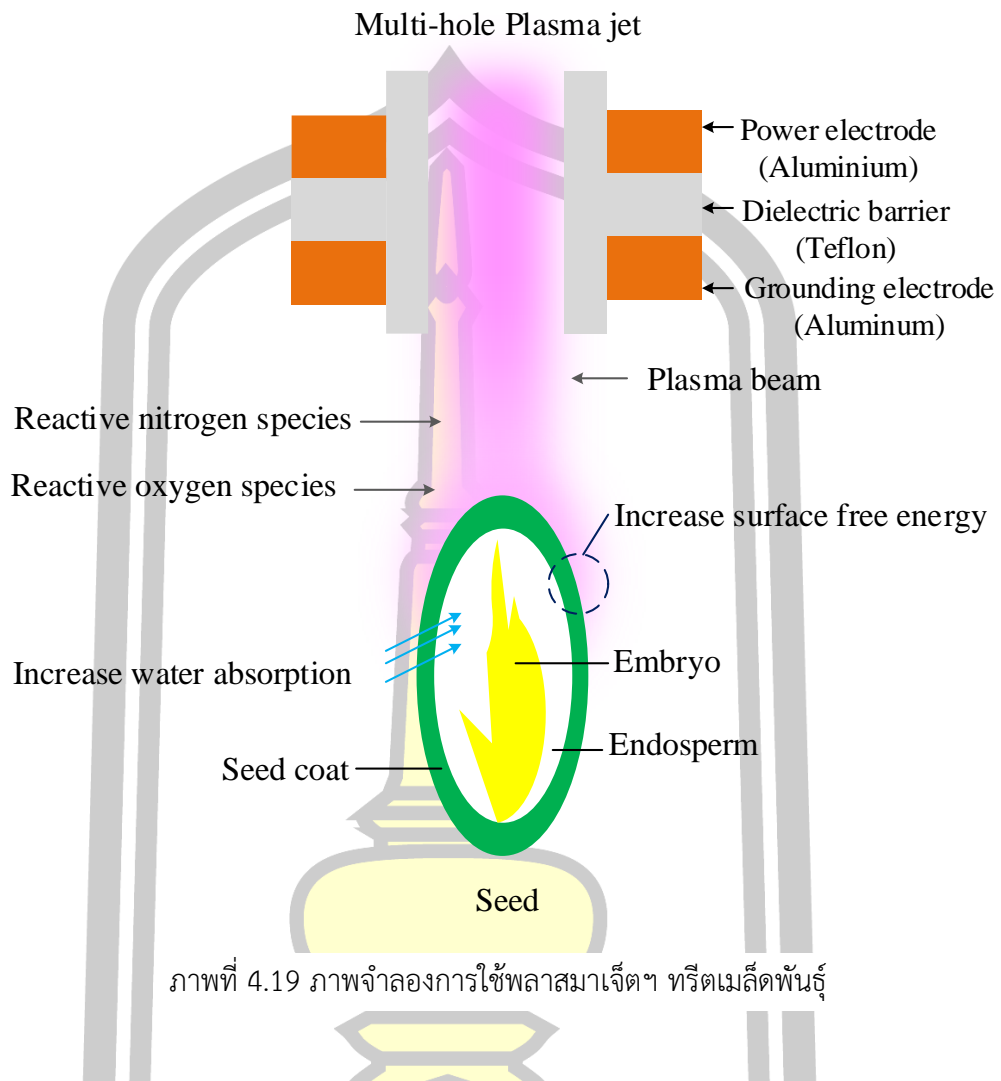


ภาพที่ 4.18 ผลการวัดอุณหภูมิที่ระยะห่างจากปลายท่อ 5 mm ทั้งแบบหัวพลาสมาเคลื่อนที่และหัวพลาสมาอยู่กับที่

สถานะพลาสมา (Plasma state) ถูกจัด เป็นสถานะที่ 4 ที่เกิดจากการให้พลังงานมากพอกับแก๊สเพื่อทำให้แก๊สแตกตัว (Ionized) โดยพลังงานที่ให้อาจอยู่ในรูปความร้อน (Heat) แสง (Light) สนามไฟฟ้า (Electric field) ซึ่งจะทำให้สถานะพลาสมาประกอบไปด้วยอนุภาคหลายชนิด เช่น ไอออน (Ions) อิเล็กตรอน (Electrons) โมเลกุล (Molecule) และเรดิคอล (Radicals) ซึ่งเป็นอะตอมหรือโมเลกุลที่ไม่เสถียร มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ในกรณีที่แก๊สตั้งต้นที่ใช้ในการสร้างพลาสมา มีส่วนผสมของแก๊สที่ว่องไวปฏิกิริยา (Active gases) เช่น ไนโตรเจน (N_2) ออกซิเจน (O_2) และไอน้ำ (H_2O) เราจะได้พลาสมาอากาศ (Air plasma) ที่ประกอบด้วย เรดิคอลหลายชนิด หลังจากนั้นเรดิคอลจะเคลื่อนที่เข้าไปใกล้ผิวเมล็ดพันธุ์และสร้างพันธะกับอะตอมที่ผิว เช่น O เข้าไปตั้ง H ออกจากพันธะ C-H เกิดเป็นเรดิคอลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, OH) ที่ยังมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาจึงสามารถเข้าไปจับกับอะตอมอื่น ๆ ที่ผิวได้อีก เป็นต้น

ในการทรีตเมนต์พันธุ์ได้ทำการพ่นลำพลาสมาให้เข้าใกล้ผิวของเมล็ด ดังภาพที่ 4.19 เพื่อให้พื้นผิวเมล็ดพันธุ์มีความชอบน้ำมากขึ้น จึงมีการดูดซับน้ำ และอากาศที่จำเป็นต่อการงอกผ่านเปลือกหุ้มเมล็ดได้เร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการทรีต ด้วยกลไกของพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ ที่ประกอบไปด้วย Reactive nitrogen species และ Reactive oxygen species จึงสามารถสร้างพันธะบริเวณเปลือกหุ้มเมล็ด การสร้างหมู่เรดิคอลลขึ้นมาใหม่ที่ผิวของเปลือกหุ้มเมล็ด เราเรียกว่า ขบวนการนี้ว่า “Functionalize surface” ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้พลังงานเชิงผิว (Surface energy) ของเมล็ดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสร้างหมู่เรดิคอลลในกลุ่มคาร์บอนิล ($-C=O$) คาร์บอกซิล ($-COOH$) ไฮดรอกซิล ($-OH$) และเอมีน ($-N-$) จะเพิ่มพลังงานเชิงผิวของเมล็ด ซึ่งจะทำให้ผิวของเมล็ดมีความชอบน้ำมากขึ้น (Increase hydrophilic) และมีการยึดติดดีขึ้น (Improve adhesion) โดยลักษณะการใช้งาน พลาสมาจะพุ่งออกมาเป็นลำตกกระทบส่วนเปลือกเมล็ด (Seed coat) เพื่อกระตุ้นพื้นผิวให้ดูดซับน้ำ และออกซิเจน เข้าไปยังเอ็มบริโอ (Embryo) โดยมีเอนโดสเปิร์ม (Endosperm) ทำหน้าที่ให้อาหารแก่เอ็มบริโอ มีโครงสร้างประกอบด้วยเซลล์สร้างอาหารเรียงกันเป็นชั้นติดต่อกันอยู่โดยรอบ ภาพที่ 4.19 แสดงตัวอย่างการฉายพลาสมาไปที่เมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว โดยการใส่เมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวขนาดเรียงแบบ 1 ชั้น เพื่อให้เมล็ดโดนฉายพลาสมาอย่างทั่วถึง



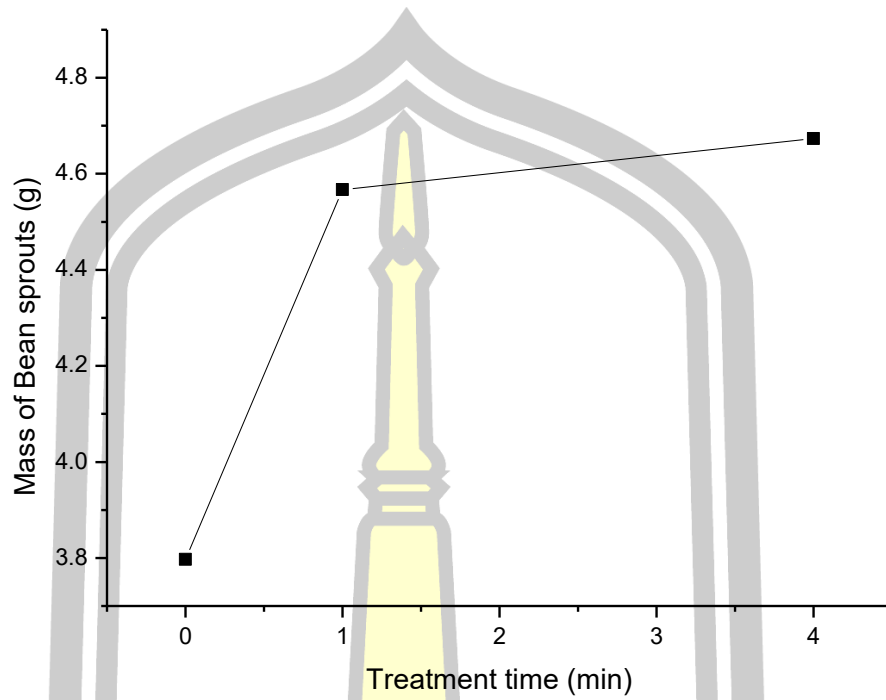


ภาพที่ 4.20 ตัวอย่างการทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตๆ ทรีตเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว

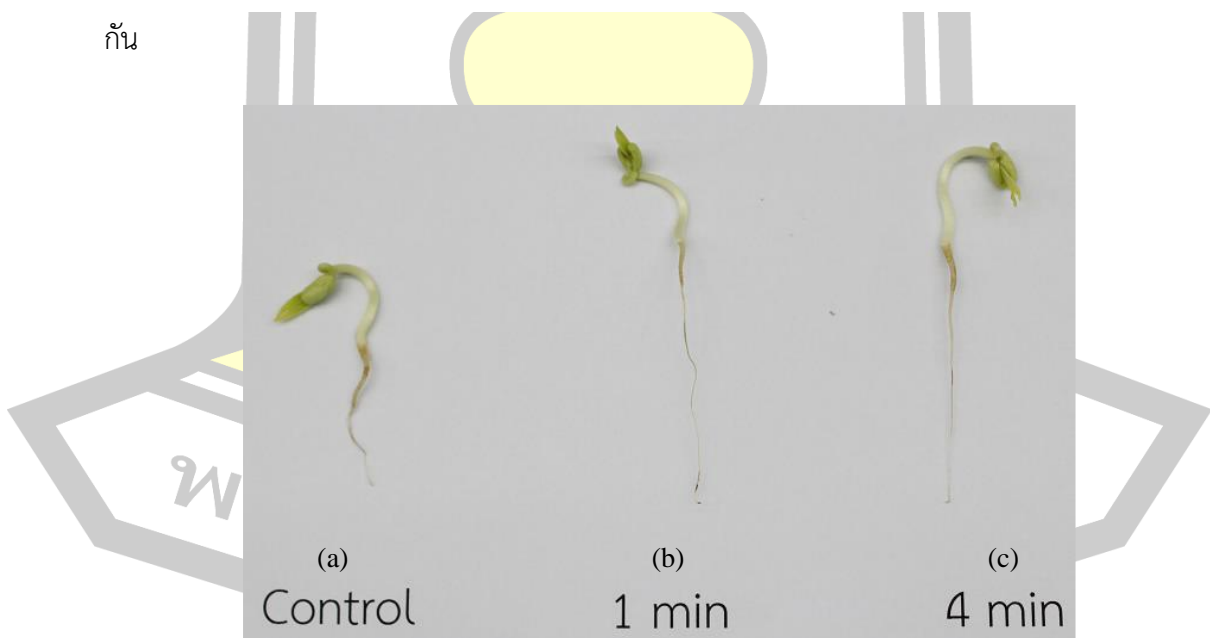
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้พลาสมาเจ็ตฯ ที่ออกแบบและสร้างขึ้น ในการทรีตเมนต์พันธุ์ถั่วเขียว เพื่อเพิ่มอัตราการโตของต้นอ่อนหรือต้นถั่วงอก ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด ไม่มีการใช้สารเคมีเพื่อเร่งการโตและการฟอกขาว ซึ่งจะเป็นประโยชน์กับเกษตรกรในการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าในกลุ่มผู้บริโภคที่รักสุขภาพต่อไป ตัวอย่างผลการใช้หัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตฯ ทรีตเมนต์พันธุ์ถั่วเขียว แสดงได้ตามภาพที่ 4.20 เมื่อทำการทรีตเมนต์พันธุ์ถั่วเขียว โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 250 L/h กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 893 W ความถี่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 52 KHz โดยทำการทรีตที่เวลา 1 และ 4 นาที แล้วทำการสุ่มเมล็ดมาเพาะปลูกจำนวน 30 เมล็ด เมื่อได้ต้นอ่อนถั่วเขียวที่เจริญเป็นเวลา 4 วัน ทำการสุ่มตัวอย่างละ 10 ต้น เพื่อชั่งเปรียบเทียบมวลกับตัวอย่างควบคุม พบว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมา จะมีอัตราการโตสูงกว่าเมล็ดควบคุม ซึ่งสามารถยืนยันด้วยผลการวัดมวลที่มีการเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างควบคุมที่มีมวล 4.03 g และที่เวลาการทรีต 1 และ 4 นาที มวลเพิ่มเป็น 4.58 g และ 4.79 g ตามลำดับ ดังแสดงในรูปภาพได้ตามภาพที่ 4.21 ซึ่งแสดงว่าพลาสมามีผลต่อการโตของเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวจริงตามสมมติฐานข้างต้น และเมื่อสุ่มต้นถั่วงอกในช่วง 4 วันแรก ซึ่งถูกเพาะจากเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวที่ถูกทรีตด้วยพลาสมาที่เวลาต่าง ๆ กัน ตามภาพที่ 4.22 พบว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมามีความยาวรากและลำต้นมากกว่าเมล็ดควบคุม



ภาพที่ 4.21 ผลการชั่งมวลต้นอ่อนถั่วเขียวที่เงื่อนไขต่าง ๆ กัน

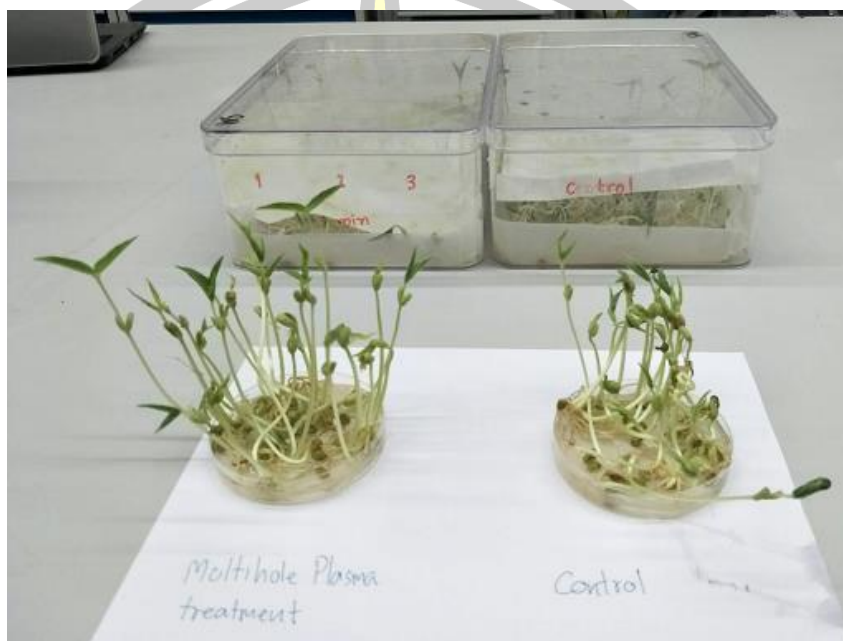


ภาพที่ 4.22 ผลการซึ่งมวลต้นถั่วงอกในช่วง 4 วันแรก จากเมล็ดที่ผ่านการทรีตพลาสมาที่เวลาต่าง ๆ กัน



ภาพที่ 4. 23 เปรียบเทียบต้นถั่วงอกในช่วง 4 วันแรก ซึ่งถูกเพาะจากเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวที่ถูกทรีตด้วยพลาสมาที่เวลาต่าง ๆ กัน

นอกจากนั้นผู้วิจัยได้ทดลองนำเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวที่ผ่านการทรีตพลาสมาเป็นเวลา 4 นาที มาทำการเพาะแล้วสังเกตการโตในช่วง 6 วันแรก พบว่าเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวที่ผ่านการทรีตพลาสมามีอัตราการโตสูงกว่าเมล็ดควบคุมอย่างชัดเจน ดังแสดงตามภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 ภาพถ่ายต้นถั่วงอกในช่วง 6 วันแรก เพาะจากเมล็ดที่ผ่านการทรีตพลาสมาที่เวลาประมาณ 4 นาที



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ เพื่อใช้ในการทรีตเล็ดพันธุ์ พบว่ากำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมในการใช้งานมีผลต่อการแตกตัวเป็นพลาสมาของอะตอมแก๊ส ที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน การออกแบบหัวไฟฟ้ากับหัวกราวด์ และแผ่นกระจายแก๊ส มีผลโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ทำให้ลำพลาสมาพุ่งออกมาอย่างความสม่ำเสมอและเกิดความร้อนภายในหัวน้อย จากการวัดกำลังไฟฟ้าในการจุดพลาสมาที่เงื่อนไขอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ต่างกัน พบว่าความยาวของลำพลาสมามีการเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ต่างกัน คือ 200 250 300 350 L/h โดยพบว่าอัตราการไหล 250 L/h และใช้กำลังไฟฟ้า 893 W ทำให้เกิดลำพลาสมาที่มีความเสถียรและความยาวของลำพลาสมาสูงสุดประมาณ 10 mm

เมื่อใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 1 และแบบที่ 2 แก๊สมีความเร็วขณะไหลเข้าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 2 m/s (ความดันแก๊สมีค่าต่ำสุด) จากนั้นแก๊สจะไหลเข้าไปในแผ่นกระจายแก๊สและมีความเร็วลดลงก่อนไหลเข้าไปในชั้นกักแก๊สซึ่งแก๊สจะมีความเร็วต่ำสุด (ความดันแก๊สมีค่าสูงสุด) เนื่องจากรูที่แก๊สจะต้องถูกดันเข้าไปในหัวฉีดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 1 mm แต่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจำนวน 105 รู เมื่อแก๊สในชั้นกักแก๊สไหลเข้าไปในท่อจะมีความเร็วมากขึ้น แต่แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 1 ทำให้เกิดจุดสะเทินซึ่งเป็นตำแหน่งที่แก๊สไม่ไหลผ่านอยู่ตรงกึ่งกลางภายในชั้นกักแก๊สซึ่งจะทำให้ความเร็วแก๊สที่ไหลผ่านท่อบริเวณนั้นมีค่าน้อยกว่าบริเวณอื่น เมื่อใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 2 พบว่าไม่เกิดจุดสะเทินภายในชั้นกักแก๊ส ซึ่งทำให้ความเร็วแก๊สที่ไหลผ่านท่อที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้ง 105 รู มากกว่าการใช้แผ่นกระจายแก๊สแบบที่ 1

ผลการประยุกต์ใช้พลาสมาเจ็ตฯ ที่ออกแบบและสร้างขึ้นทรีตเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว พบว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมา มีอัตราการโตสูงกว่าเมล็ดควบคุม ซึ่งสามารถยืนยันด้วยผลการวัดมวลที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงว่าพลาสมามีผลต่อการโตของเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวจริง และเมื่อสูมนำต้นถั่วออกในช่วง 4 วันแรก ซึ่งถูกเพาะจากเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวที่ถูกทรีตด้วยพลาสมาที่เวลาต่าง ๆ กัน พบว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมามีความยาวรากและลำต้นมากกว่าเมล็ดควบคุม

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) การสร้างหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรู ลักษณะโครงสร้างมีความซับซ้อนสูงในการออกแบบผู้วิจัยต้องมีพื้นฐานในการเขียนแบบเพื่อใช้แบบในการสร้างคำสั่งสำหรับควบคุมเครื่องกำเนิดขึ้นงานให้ออกมาตามแบบที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง
- 2) เนื่องจากหัวพลาสมาเจ็ตฯ ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าสูงและความถี่สูง การออกแบบหัวกำลังต้องคำนึงถึงค่าความต้านทานเชิงซ้อนด้วย เพื่อให้สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้เต็มประสิทธิภาพ
- 3) ในงานต่อไป คณะผู้วิจัยจะได้นำหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตฯ ไปทดสอบกับเมล็ดพันธุ์ชนิดอื่น และศึกษาผลของแก๊สต่อการสร้างหมู่เรดิคอลในกรณีที่มีการผสมแก๊สชนิดอื่น เช่น ออกซิเจน และไนโตรเจน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเพิ่มพลังงานเชิงผิวเมล็ดพันธุ์ที่สามารถดูดซับความชื้น ออกซิเจน และแร่ธาตุได้เร็วขึ้น



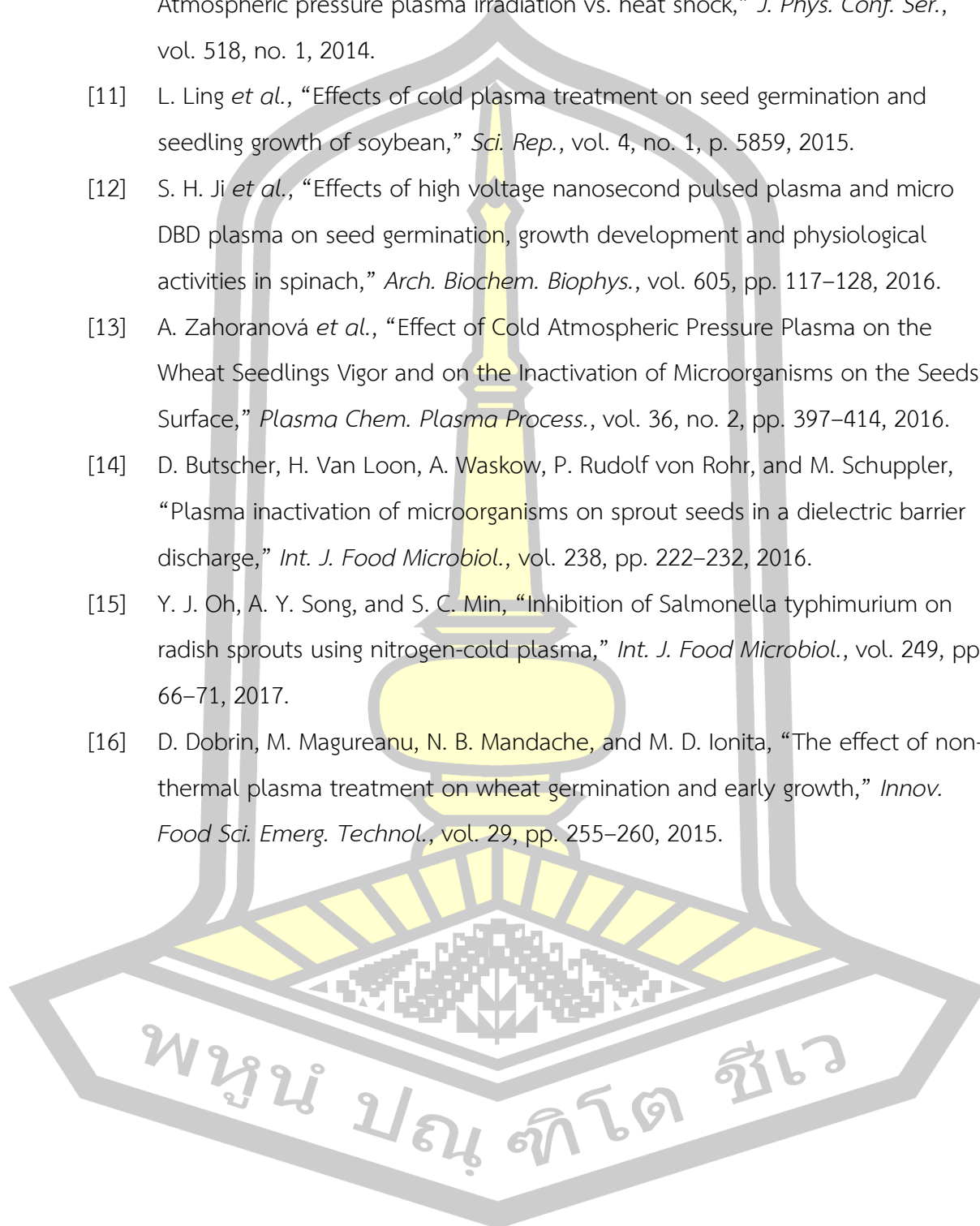
บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- [1] I. Adamovich *et al.*, “The 2017 Plasma Roadmap : Low temperature The 2017 Plasma Roadmap : Low temperature plasma science and technology,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 50, p. 323001, 2017.
- [2] X. Liao *et al.*, “Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review,” *Food Control*, vol. 75, pp. 83–91, 2017.
- [3] R. Mandal, A. Singh, and A. Pratap Singh, “Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 80, no. July, pp. 93–103, 2018.
- [4] J. Tong, R. He, X. Zhang, R. Zhan, W. Chen, and S. Yang, “Effects of atmospheric pressure air plasma pretreatment on the seed germination and early growth of *andropogon paniculata*,” *Plasma Sci. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 260–266, 2014.
- [5] L. Ling, L. Jiangang, S. Minchong, Z. Chunlei, and D. Yuanhua, “Cold plasma treatment enhances oilseed rape seed germination under drought stress,” *Sci. Rep.*, vol. 5, pp. 1–10, 2015.
- [6] A. N. Klein *et al.*, “DC plasma technology applied to powder metallurgy: An overview,” *Plasma Sci. Technol.*, vol. 15, no. 1, pp. 70–81, 2013.
- [7] C. Hertwig, N. Meneses, and A. Mathys, “Cold atmospheric pressure plasma and low energy electron beam as alternative nonthermal decontamination technologies for dry food surfaces: A review,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 77, no. October 2017, pp. 131–142, 2018.
- [8] Z. Zhou, Y. Huang, S. Yang, and W. Chen, “Introduction of a new atmospheric pressure plasma device and application on tomato seeds,” *Agric. Sci.*, vol. 02, no. 01, pp. 23–27, 2011.
- [9] I. Filatova, V. Azharonok, V. Lushkevich, A. Zhukovsky, G. Gadzhieva, and K. Spasi, “Plasma seeds treatment as a promising technique for seed germination improvement,” *31st ICPIG*, pp. 4–7, 2013.

- [10] T. Sarinont *et al.*, “Growth enhancement effects of radish sprouts: Atmospheric pressure plasma irradiation vs. heat shock,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 518, no. 1, 2014.
- [11] L. Ling *et al.*, “Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean,” *Sci. Rep.*, vol. 4, no. 1, p. 5859, 2015.
- [12] S. H. Ji *et al.*, “Effects of high voltage nanosecond pulsed plasma and micro DBD plasma on seed germination, growth development and physiological activities in spinach,” *Arch. Biochem. Biophys.*, vol. 605, pp. 117–128, 2016.
- [13] A. Zahoranová *et al.*, “Effect of Cold Atmospheric Pressure Plasma on the Wheat Seedlings Vigor and on the Inactivation of Microorganisms on the Seeds Surface,” *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 36, no. 2, pp. 397–414, 2016.
- [14] D. Butscher, H. Van Loon, A. Waskow, P. Rudolf von Rohr, and M. Schuppler, “Plasma inactivation of microorganisms on sprout seeds in a dielectric barrier discharge,” *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 238, pp. 222–232, 2016.
- [15] Y. J. Oh, A. Y. Song, and S. C. Min, “Inhibition of Salmonella typhimurium on radish sprouts using nitrogen-cold plasma,” *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 249, pp. 66–71, 2017.
- [16] D. Dobrin, M. Magureanu, N. B. Mandache, and M. D. Ionita, “The effect of non-thermal plasma treatment on wheat germination and early growth,” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 29, pp. 255–260, 2015.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายชัตติยะ สระแก้ว
วันเกิด	24 สิงหาคม พ.ศ.2537
สถานที่เกิด	อำเภอสุวรรณภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	72 หมู่ 14 ตำบลทุ่งกุลา อำเภอสุวรรณภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด 45130
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2553 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสุวรรณภูมิวิทยาลัย อำเภอสุวรรณภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด พ.ศ. 2555 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสุวรรณภูมิวิทยาลัย อำเภอ สุวรรณภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด พ.ศ. 2560 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ (อิเล็กทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2562 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.ม.) สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนุ่ ปณุ่ ทีโตะ ชีเว