



การเพิ่มคุณสมบัติความชอบน้ำของเมล็ดพันธุ์โดยใช้กระบวนการพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ

วิทยานิพนธ์
ของ
ชัตติยะ สระแก้ว

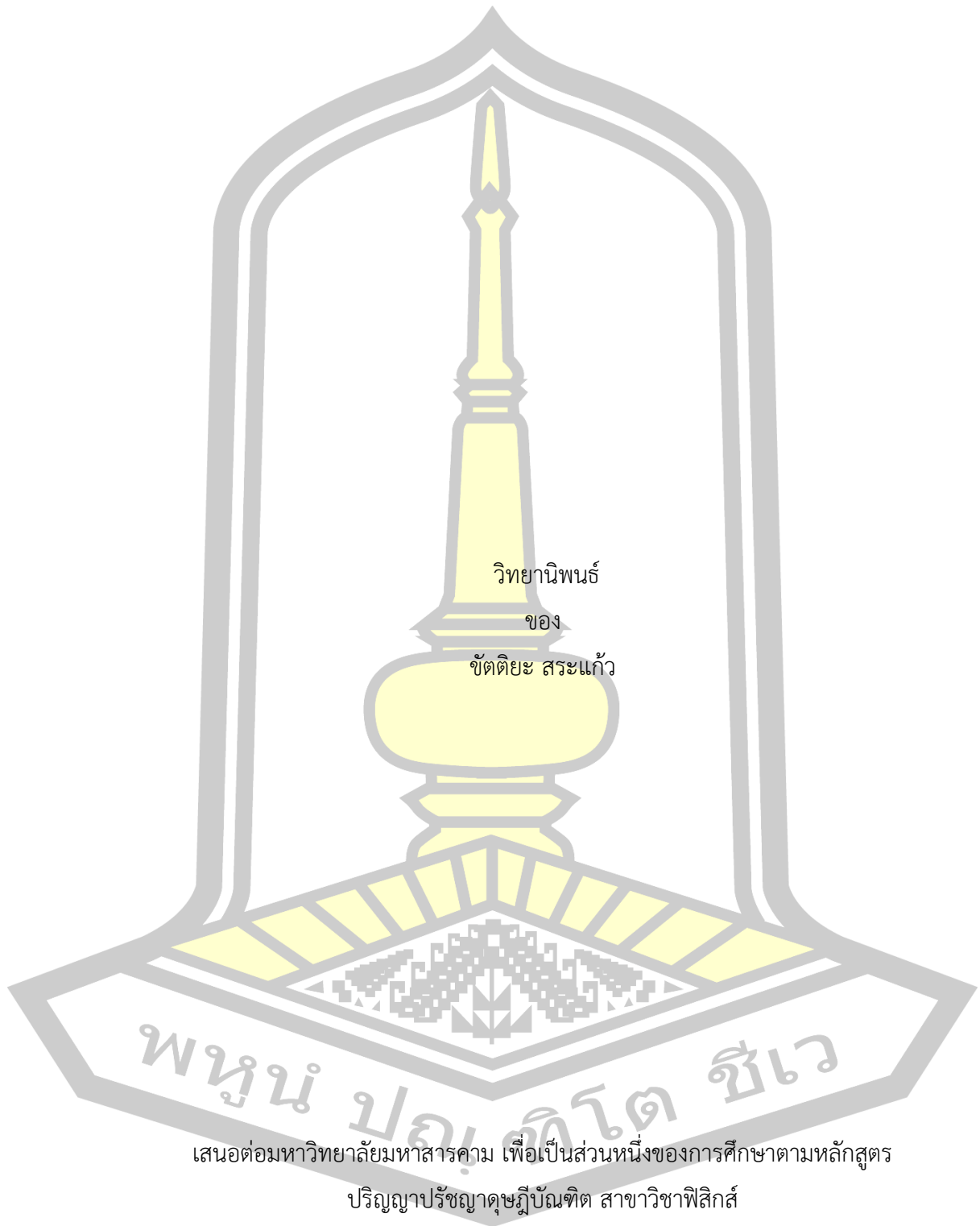
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

กรกฎาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การเพิ่มคุณสมบัติความชอบน้ำของเมล็ดพันธุ์โดยใช้กระบวนการพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ



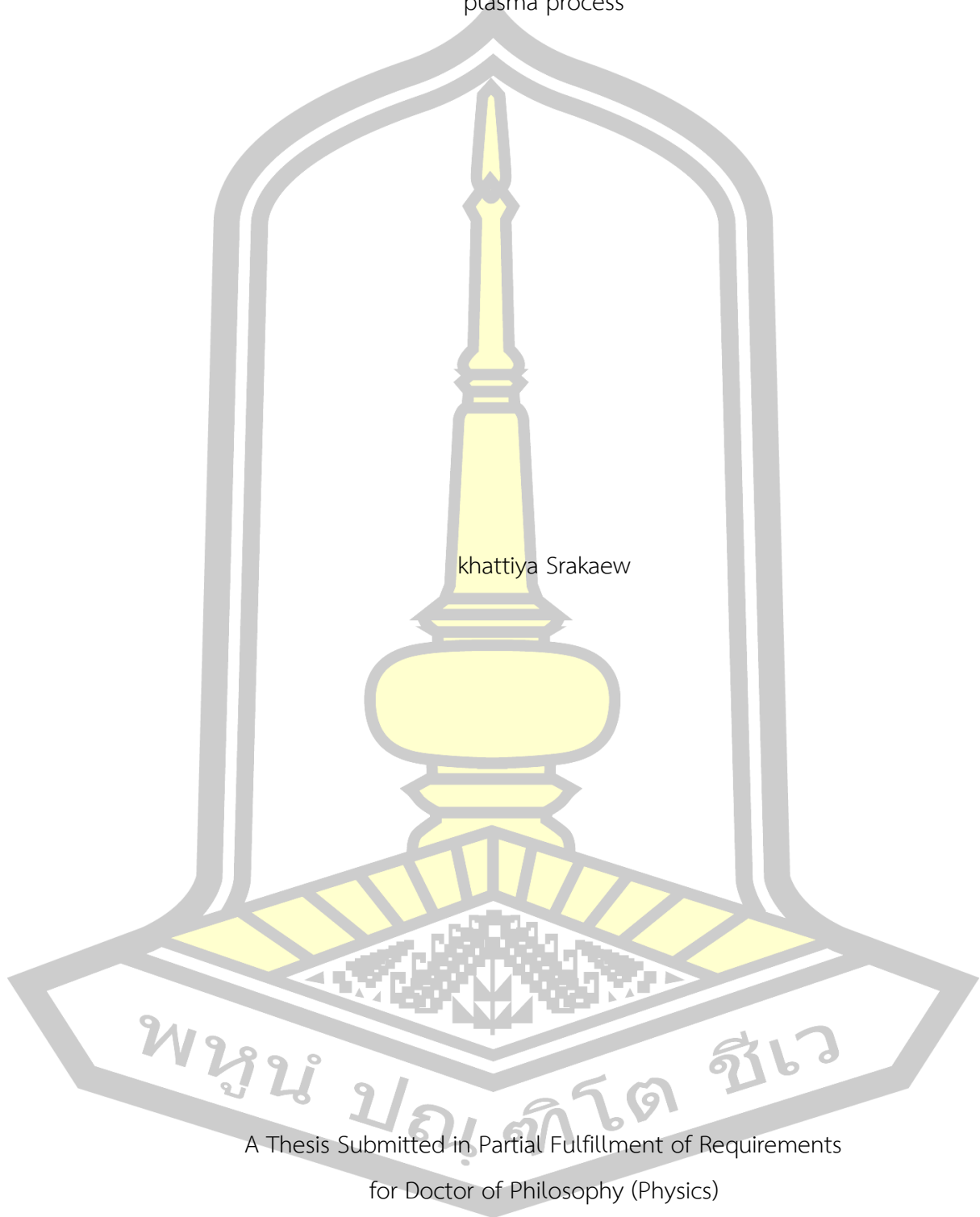
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

กรกฎาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Enhancement of the hydrophilic property of seeds using an atmospheric pressure
plasma process



khattiya Srakaew

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Physics)

July 2023

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายชัตติยะ สระแก้ว แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. วิรัตน์ เจริญบุญ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. พิษณุ พูลเจริญศิลป์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผศ. ดร. อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน)

กรรมการ

(รศ. ดร. ปวีณา เหลาภูล)

กรรมการ

(ดร. นิตศักดิ์ ปาสางะ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ขวัญฤทัย วงศาพรม)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(ศ. ดร. ไทโรจน์ ประมวล)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การเพิ่มคุณสมบัติความชอบน้ำของเมล็ดพันธุ์โดยใช้กระบวนการพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ

ผู้วิจัย ชัตติยะ สระแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุ พูลเจริญศิลป์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน

ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต **สาขาวิชา** ฟิสิกส์

มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีที่พิมพ์** 2566

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความชอบน้ำซึ่งใช้ในกระบวนการงอกของเมล็ดพันธุ์ โดยการพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาแบบ DBD-like plasm jet หัวกำเนิดพลาสมาถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรม SolidWorks และใช้ Add-in จำลองการไหลของแก๊สเพื่อให้แน่ใจว่าแก๊สมีการไหลสม่ำเสมอ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นเมื่อลดพื้นที่ภาคตัดขวางของหัวฉีดแก๊ส หัวพลาสมาที่พัฒนาขึ้นสามารถทำให้แก๊สแตกตัวเป็นพลาสมาได้ดีที่แรงดันไฟฟ้าได้ในช่วง 3-5 kV และความถี่ 76 kHz โดยการทดสอบที่อัตราการไหลของแก๊สที่ 0, 0.5 และ 1 lpm พบว่าลำพลาสมามีความเสถียรและต่อเนื่อง เมล็ดฟ้าทะลายโจรที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาเป็นเวลา 5-25 วินาที จะมีอัตราการงอกสูงกว่าเมล็ดควบคุมถึง 10% ในช่วง 5 วันแรกของการเพาะ อัตราการงอกที่เพิ่มขึ้นนี้สอดคล้องกับค่าเวลาการดูดซับน้ำที่เร็วขึ้น และพลังงานการยึดติดของผิวเมล็ดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้สามารถดูดซับออกซิเจนและความชื้นจากสิ่งแวดล้อมได้ดีขึ้น

คำสำคัญ : หัวกำเนิดพลาสมาแบบ DBD like plasm jet, อัตราการงอก, การปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา

พจนัน ปณุกิจโต ชีเว

TITLE Enhancement of the hydrophilic property of seeds using an atmospheric pressure plasma process

AUTHOR khattiya Srakaew

ADVISORS Assistant Professor Phitsanu Poolcharuansin , Ph.D.
Assistant Professor Artit Chingsungnoen , Ph.D.

DEGREE Doctor of Philosophy **MAJOR** Physics

UNIVERSITY Maharakham **YEAR** 2023
University

ABSTRACT

The aim of this study is to increase water uptake during seed germination by developing a DBD-like plasma jet generator. To achieve this, the plasma source was designed using SolidWorks and simulated using the flow simulation add-in to ensure uniform gas flow. The gas velocity was increased by reducing the cross-sectional area of the nozzle. The developed plasma source can discharge gases into a stable plasma with a voltage range of 3-5 kV and a frequency of 70 kHz. The gas flow rate was tested at 0, 0.5 and 1 lpm. It was found that the maximum electrical power was observed at a gas flow rate of 0.5 lpm. The seeds were treated with the plasma source to promote their germination, varying the treatment time from 5 to 25 seconds. The study showed that the germination rate of the plasma-treated seeds was 10% higher than that of the control seeds within the first five days of growth, indicating an improvement in the ability of the seed coat to absorb water and nutrients from the environment. This improvement was attributed to the increased ability of the seed coat to adsorb oxygen and moisture.

Keyword : DBD-like plasma jet, Germination rate, Plasma-treated seeds

กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิษณุ พูลเจริญศิลป์ (อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์) และผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน (อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์) และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประเมษฐ์ จันทรเพ็ง ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ให้โอกาสในการศึกษาช่วยเหลือและให้กำลังใจในทุกปัญหาในการการเรียน การทำงานวิจัย และการใช้ชีวิตให้ประสบความสำเร็จ

ขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิรัตน์ เจริญบุญ (ประธานกรรมการสอบ) รองศาสตราจารย์ ปวีณา เหล่ากุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ขวัญฤทัย วงศาพรม และอาจารย์ นิตศักดิ์ ปาสาจะ ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการตรวจสอบและแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามทุกท่านที่ให้ความกรุณาอบรมสั่งสอน และให้ความรู้ในการทำวิจัย

ขอบพระคุณมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ทุนสนับสนุนทุนในการทำวิจัยและค่าตอบแทนในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัยในหลายโครงการ

ขอบพระคุณ รศ.ดร.สุธี อักษรกิตติ อาจารย์นักวิทยาศาสตร์ผู้ออกแบบ "สายอากาศสุธี" สนองพระราชดำริของในหลวงรัชกาลที่ 9 ที่เคยให้คำแนะนำและแนวคิดในการสร้างงานวิจัยและพัฒนาทางด้านพลาสมา และให้โอกาสในการแนะนำแหล่งทุนของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(กฟผ.) สำหรับการต่อยอดงานวิจัยในการศึกษาทั้งในระดับปริญญาโท และปริญญาเอก

ขอบคุณ ดร.ณัฐกานต์ กาญจนะ ดร.อัญธิกา ละครชัย ดร.นพพล เสาวเวียง พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทีมมหาวิทยาลัยมหาสารคาม และหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสมา ที่คอยให้คำปรึกษา กำลังใจ และช่วยเหลือในทั้งการใช้ชีวิตและการทำงานวิทยานิพนธ์

สุดท้าย ขอบกราบขอบพระคุณ คุณพ่อศักดิ์ สระแก้ว และคุณแม่ระวีวรรณ สระแก้ว และพี่สาว นางทัศนิตมา สระแก้ว และคุณดวงพร รัตนสังข์ ที่เป็นกำลังใจในทุกเรื่องในชีวิต คอยสนับสนุนในทุกเรื่องไม่เคยห่าง

ชัตติยะ สระแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 ระยะเวลาทำการวิจัย.....	5
1.6 สถานที่ทำการวิจัย	5
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 คุณสมบัติของพลาสมา.....	6
2.2 แหล่งจ่ายไฟสำหรับพลาสมา.....	11
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย.....	24
3.1 กระบวนการออกแบบและสร้างระบบกำเนิดพลาสมา.....	24
3.2 การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟสำหรับพลาสมา	30
3.2.1 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง	33

3.2.2 ส่วนกำเนิดสัญญาณ.....	35
3.2.3 หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท์.....	37
3.3 ทดสอบการทำงานของระบบพลาสมา.....	39
3.3.1 วัสดุอุปกรณ์.....	39
3.3.2 วิธีการทดสอบ.....	39
3.4 การวินิจฉัยพลาสมา.....	44
3.4.1 การหาค่ากำลังไฟฟ้าที่หัวกำเนิดพลาสมา.....	44
3.4.2 การวิเคราะห์พลาสมาจากลักษณะทางสเปกตรัม.....	47
3.4.3 การจำลองการไหลของแก๊สผ่านหัวพลาสมา.....	51
3.5 การทดสอบการเพิ่มเปอเซ็นการงอกของเมล็ดพันธุ์ฟ้าทลายโจร.....	52
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย.....	56
4.1 ผลการทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสมา.....	56
4.1.1 ผลการการพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมา.....	56
4.1.2 ผลการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมา.....	58
4.1.3 ผลการวัดสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมา.....	66
4.1.4 ผลการปรับปรุงแผ่นกระจายแก๊สโดยใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	71
4.2 ผลการประยุกต์ใช้พลาสมาทรีตเมนต์พันธุ์.....	72
4.2.1 ผลการงอกของเมล็ดพันธุ์.....	73
4.2.2 ผลการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM).....	78
4.2.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและสารประกอบด้วยเทคนิค FTIR.....	79
4.2.4 ผลการวัดค่ามุมสัมผัสผิวน้ำ (Water contact angle: WCA).....	81
4.2.5 ผลการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์เอ็กซ์เรย์ (X-ray Tomography microscopy: XTM).....	82

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 84

 5.1 สรุปผลการวิจัย 84

 5.2 ข้อเสนอแนะ 84

 บรรณานุกรม 85

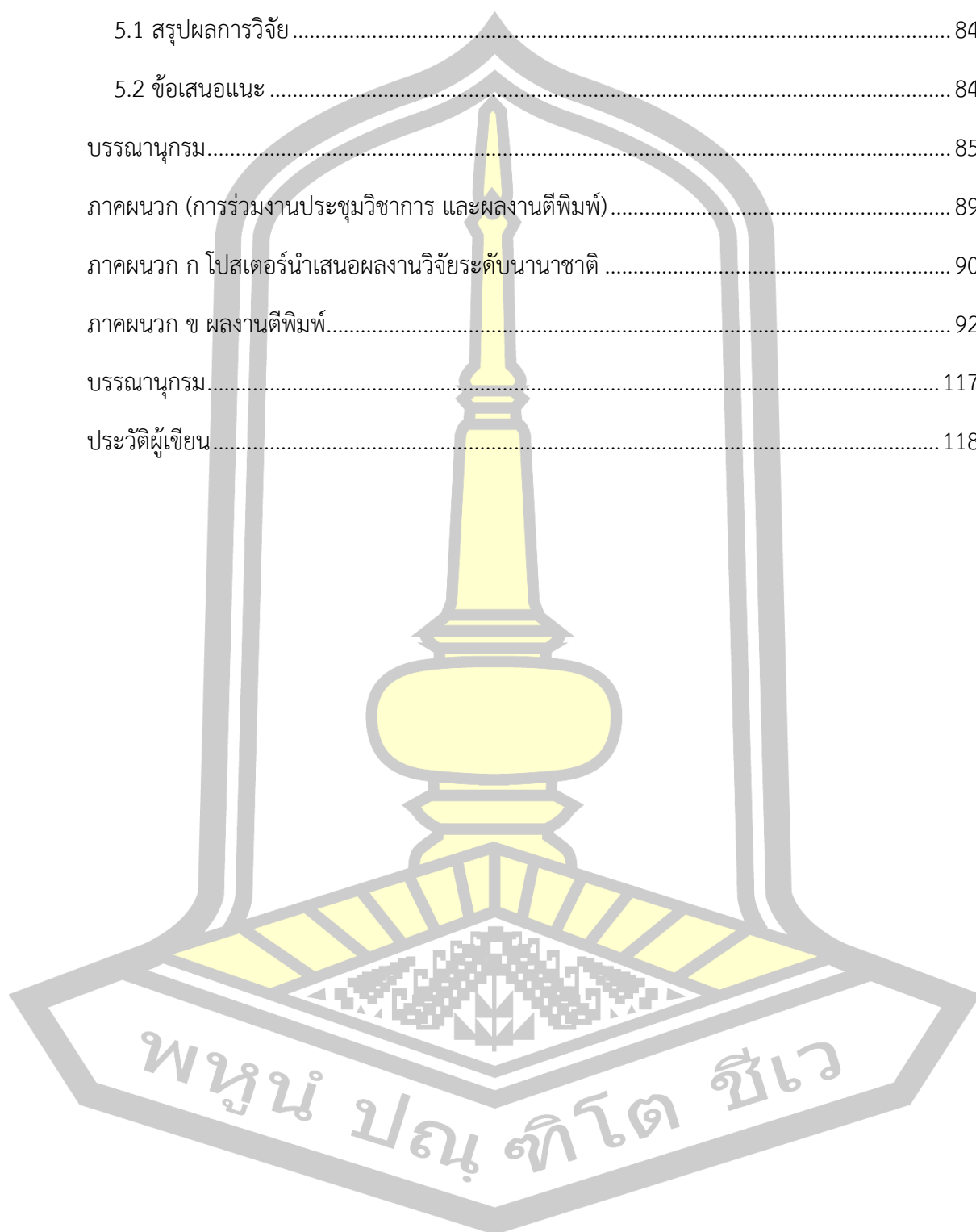
 ภาคผนวก (การร่วมงานประชุมวิชาการ และผลงานตีพิมพ์) 89

 ภาคผนวก ก โปสเตอร์นำเสนอผลงานวิจัยระดับนานาชาติ 90

 ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์ 92

 บรรณานุกรม 117

 ประวัติผู้เขียน 118



สารบัญตาราง

ตาราง 1.1 แผนการทำวิจัยตลอดระยะเวลา 3 ปี	5
ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการพัฒนาเครื่องต้นแบบเคลื่อนสิ่งทอโดยใช้พลาสมาความดันบรรยากาศ	25
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทางเทคนิค AvaSpec รุ่นULS4096CL-EVO.....	48
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขและค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	49
ตารางที่ 3.4 ตารางออกแบบการทดลองการปรับปรุงด้วยพลาสมา โดยใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สพื้นฐานร่วมด้วย โดยระยะห่างจานถึงหัวพลาสมา 1.75 mm ความเร็วของจานหมุนคงที่ 5 RPM... 54	
ตารางที่ 4.1 แสดงผลของกำลังไฟฟ้าจริงที่ทำงานวัดเป็นวัตต์ (Watts, W) แปรเปลี่ยนตามการปรับระดับวอลลุ่มกำลังของแหล่งจ่ายไฟที่สัมพันธ์กับอัตราไหลของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น	62
ตารางที่ 4.2 แสดงผลกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏมีหน่วยวัดเป็น โวลต์-แอมแปร์ (Volt-amperes, VA) ที่แปรเปลี่ยนตามการปรับระดับวอลลุ่มกำลังของแหล่งจ่ายไฟที่สัมพันธ์กับอัตราไหลของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น	62
ตารางที่ 4.3 แสดงผลค่าแรงดันประสิทธิผล หน่วยวัดเป็น โวลต์ (Volt, V) ที่แปรเปลี่ยนตามการปรับระดับวอลลุ่มกำลังของแหล่งจ่ายไฟที่สัมพันธ์กับอัตราไหลของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น	63
ตารางที่ 4.4 แสดงผลค่ากระแสประสิทธิผล หน่วยวัดเป็นแอมแปร์ (Amperes, A) ที่แปรเปลี่ยนตามการปรับระดับวอลลุ่มกำลังของแหล่งจ่ายไฟที่สัมพันธ์กับอัตราไหลของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น	63
ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขและค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	66
ตารางที่ 4.6 ตารางที่ สปีชีส์ที่ตรวจพบจากการวิเคราะห์เส้นสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากพลาสมา.....	69
ตารางที่ 4.7 ผลทดลองเปอร์เซ็นต์การงอกในวันสุดท้ายที่การงอกเริ่มคงตัว ด้วยการทรีทพลาสมาโดยใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สพื้นฐานร่วมด้วย โดยระยะห่างจานถึงหัวพลาสมา 1.75 mm ความเร็วของจานหมุนคงที่ 5 RPM.....	76
ตารางที่ 4.8 แสดงข้อมูลสเปกตรัมในช่วงความถี่ IR ลักษณะของการสั่นและการดูดซับที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชัน.....	80

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงานมากขึ้น [1].....	6
ภาพที่ 2.2 การสร้างสถานะพลาสมาโดยการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า (Electrical discharge) [3]	7
ภาพที่ 2.3 ภาพจำลองการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างพลาสมากับพื้นผิว [12].....	9
ภาพที่ 2.4 องค์ประกอบของพลาสมาที่ส่งผลกระทบต่อกายภาพและชีวเคมีของเซลล์ [5]	10
ภาพที่ 2.5 ไดอะแกรมและวงจรเสมือนของหัวกำเนิดพลาสมาระบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ 12	
ภาพที่ 2.6 แนวทางการพัฒนาพลาสมาเพื่อการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร [13].....	14
ภาพที่ 2.7 A. ฟ้าทะลายโจรก่อนและหลังการรักษาด้วยพลาสมาอากาศ (B) ลักษณะการงอกของ เมล็ดของกลุ่มควบคุมและกลุ่มที่ได้รับการบำบัดที่ 28 และ 48 ชั่วโมง [14].....	15
ภาพที่ 2.8 โครงสร้างหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น [21]	17
ภาพที่ 2.9 เปรียบเทียบความยาวต้นอ่อนแรดิกซ์ที่เพาะเป็นเวลา 4 วัน จากเมล็ดที่ผ่านและไม่ผ่าน การปรับปรุงด้วยพลาสมา [22].....	18
ภาพที่ 2.10 โครงสร้างหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น [23]	19
ภาพที่ 2.11 ภาพจำลองด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ และเคมี ที่ส่งผลต่อการเพิ่มความชอบน้ำของ พื้นผิว [24].....	20
ภาพที่ 2.12 ภาพซ้ายมือเป็นแบบจำลองระบบปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวน ขวางกั้น ภาพขวามือคือผลการใช้พลาสมาในน้ำทำให้มีผลต่อการโตของเมล็ดถั่วลิ้นเต่า [25].....	21
ภาพที่ 2.13 กลไกการกัดเซาะที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวฟิล์ม (a) ไม่มีSSM (b) มี SSM [26].....	22
ภาพที่ 2.14 กระบวนการทรีทเมนต์บรีดโคลล์ด้วยหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ทแบบหลายรูเพื่อเพิ่มพลังงาน เชิงผิวซึ่งสอดคล้องกับมุมสัมผัสที่ลดลง [27].....	23
ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงาน.....	24
ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างการจำลองระบบด้วยการออกแบบก่อนการสร้างจริง (a) มุมมอกสำหรับใช้ในการ ประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน (b) เป็นภาพเสมือนจริงหลังขึ้นรูปแล้วนำมาประกอบ.....	26

ภาพที่ 3.3 องค์ประกอบของหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศในรูแบบ 3 มิติ ด้วยการใช้โปรแกรม Solid Work.....	27
ภาพที่ 3.4 จำลองความเร็วของแก๊สอาร์กอนที่ไหลในหัวพลาสมา	28
ภาพที่ 3.5 การใช้โปรแกรม Aspire 4.0 สำหรับการสร้าง G-code.....	29
ภาพที่ 3.6 เครื่องกัดซีเอ็นซีที่สร้างขึ้นเอง.....	30
ภาพที่ 3.7 ไดอะแกรมแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงสำหรับพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ.....	31
ภาพที่ 3.8 แผนผังวงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย (0-200 V, 10A).....	32
ภาพที่ 3.9 ลายวงจรพิมพ์แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายแรงดัน 0-200 V กระแสสูงสุด 10 A	32
ภาพที่ 3.10 ภาพจำลอง 3 มิติ ของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย	33
ภาพที่ 3.11 สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายแรงดัน 220V กระแส 10A.....	34
ภาพที่ 3.12 ภาพที่ (ก) การต่อวงจรโมดูล IR2153(S) (ข) กราฟแสดงต่ออุปกรณ์เสริมเพื่อกำหนดความถี่และขนาดสัญญาณขาออก.....	36
ภาพที่ 3.13 แสดงองค์ประกอบของระบบทดสอบการทำงานหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ	40
ภาพที่ 3.14 ภาพถ่ายเครื่องมือวัดของระบบหัวกำเนิดพลาสมา ในการบันทึกผลการทดลอง	40
ภาพที่ 3.15 ภาพถ่ายขณะทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสมา.....	42
ภาพที่ 3.16 แบบร่างระบบพลาสมา DBD like plasma jet สำหรับปรับปรุงเมล็ดพันธุ์.....	42
ภาพที่ 3.17 ความสัมพันธ์ของสามเหลี่ยมกำลัง.....	46
ภาพที่ 3.18 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างความต้านทาน รีแอคแตนซ์ และอิมพีแดนซ์	46
ภาพที่ 3.19 การตรวจวัดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศที่เกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลแก๊สเป็นพลาสมา.....	47
ภาพที่ 3.20 สเปกโตรมิเตอร์ที่ผลิตโดยบริษัท AvaSpec รุ่น ULS4096CL-EVO.....	48
ภาพที่ 3.21 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมอาร์กอนโดยการปลดปล่อยโฟตอนที่ความยาวคลื่น (Ar II) = 616.85 nm.....	50

ภาพที่ 3.22 จำลองความเร็วของแก๊สอาร์กอนที่ไหลในหัวพลาสมา	51
ภาพที่ 3.23 แสดงให้เห็นกระบวนการของการทดลองความงอกที่ดำเนินการกับเมล็ดที่ผ่านการบำบัดด้วยพลาสมาและตัวอย่างควบคุม	52
ภาพที่ 3.24 ขั้นตอนการตรวจสอบความงอกของเมล็ดพันธุ์ฟ้าทลายโจร	55
ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายระบบทรีตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศที่ต่อหัวไฟฟ้าและแก๊สเข้าแล้ว.....	56
ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายกล่องควบคุมการทำงานของระบบทรีตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ.....	57
ภาพที่ 4.3 การแตกตัวของแก๊สอาร์กอนโดยใช้หัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศที่อัตราการไหลของแก๊ส 4 lpm.....	58
ภาพที่ 4.4 การติดตั้งเครื่องมือวัดเพื่อหากำลังไฟฟ้าในการจุดพลาสมา.....	59
ภาพที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบทางไฟฟ้าทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะจุดพลาสมาสำหรับใช้วิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (a) หาพื้นที่ใต้กราฟของ $i^2(t)$ (c) หาพื้นที่ใต้กราฟของ $v^2(t)$ (b)และ (d) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะจุดพลาสมา (ใช้วอลลุ่มกำลังไฟฟ้า 25% ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0 lpm).....	59
ภาพที่ 4.6 ใช้วอลลุ่มกำลังไฟฟ้า 25% ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0 lpm (a) ผลอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟที่ของกระแสยกกำลังสอง $i^2(t)$ (b) ผลอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟที่ของแรงดันยกกำลังสอง $v^2(t)$	60
ภาพที่ 4.7 สัญญาณแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของหัวกำเนิดพลาสมา ใช้วอลลุ่มกำลังไฟฟ้า 25% ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0 lpm แสดงความต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า	61
ภาพที่ 4.8 ผลจากการวัดหัวกำเนิดพลาสมา DBD-like plasma jet ที่เงื่อนไขวอลลุ่มกำลังไฟฟ้าและอัตราไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้น (a) ผลของกำลังไฟฟ้าจริง (b) ค่าแรงดันประสิทธิผล (c) ค่ากระแสประสิทธิผล (d) ผลกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ	64
ภาพที่ 4.9 แสดงช่วงเวลาในการแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะจุดพลาสมา เมื่อใช้วอลลุ่มกำลังไฟฟ้า 25 30 และ 35% ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0.5 lpm)	65
ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากหัวพลาสมา กับแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน	67

ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากหัวพลาสมาเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน	68
ภาพที่ 4.12 แสดงผลของการจำลองการไหลของแก๊สอาร์กอนภายในเครื่องกำเนิดพลาสมาเพื่อดูผลกระทบของความเร็วของแก๊สและความดันภายใน เมื่อฉีดแก๊ส 0.5 lpm และ 1.5 lpm.....	71
ภาพที่ 4.13 แบบร่างระบบพลาสมา DBD like plasma jet สำหรับทรีตเมนต์พันธู์.....	72
ภาพที่ 4.14 ผลการงอกเนื่องจากการปรับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน.....	73
ภาพที่ 4.15 ผลการงอกเนื่องจากการปรับวอลุ่มกำลังไฟฟ้า	74
ภาพที่ 4.16 ผลการงอกเนื่องจากการปรับเวลาในการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมา	75
ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบการงอกของเมล็ดในช่วง 10 วัน จากเมล็ดที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยพลาสมาที่เงื่อนไขเวลาต่างกัน (a) ภาพถ่ายด้านหน้า (b) ภาพถ่ายมุมมองด้านบน.....	77
ภาพที่ 4.18 ผลการถ่ายภาพด้วยเทคนิค SEM แสดงพื้นผิวเมล็ดฟ้าทะลายโจรที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยพลาสมา ที่เงื่อนไข 30 60 และ 90 วินาทีโดยใช้กำลังขยายภาพที่ 60 และ 300 เท่า .	78
ภาพที่ 4.19 สเปกตรัม FTIR ของเมล็ดพันธู์ฟ้าทะลายโจรที่ปรับปรุงด้วยพลาสมา 5 วินาที โดยใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 25 % ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0.5 lpm เทียบกับตัวอย่างควบคุม.....	79
ภาพที่ 4.20 สเปกตรัม FTIR ของเมล็ดพันธู์ฟ้าทะลายโจรที่ปรับปรุงด้วยพลาสมา 20 วินาที โดยใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 35% ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0.5 lpm เทียบกับตัวอย่างควบคุม	80
ภาพที่ 4.21 ภาพถ่ายมุมสัมผัสของหยดน้ำก่อนและหลังสัมผัสกับเมล็ดฟ้าทะลายโจร (a) ตัวอย่างควบคุม (b) ปรับปรุงด้วยพลาสมา 5 วินาที (c) ปรับปรุงด้วยพลาสมา 30 วินาที (d) ปรับปรุงด้วยพลาสมา 90 วินาที.....	81
ภาพที่ 4.22 ถ่ายภาพเมล็ดฟ้าทะลายโจรด้วยกล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์ (XTM) (a) ตัวอย่างควบคุม (b) ปรับปรุงด้วยพลาสมา 5 วินาที (c) ปรับปรุงด้วยพลาสมา 30 วินาที (d) ปรับปรุงด้วยพลาสมา 90 วินาที.....	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

สถานะพลาสมาจัดเป็นสถานะที่ 4 ของสสารที่เกิดจากการให้พลังงานมากพอกับแก๊สเพื่อทำให้แก๊สแตกตัว โดยพลังงานที่ให้อาจอยู่ในรูปความร้อน แสง สนามไฟฟ้าซึ่งจะทำให้สถานะพลาสมาประกอบไปด้วยอนุภาคหลายชนิด เช่น ไอออน อิเล็กตรอน โมเลกุล และเรดิคัล (Radicals) ซึ่งเป็นอะตอมหรือโมเลกุลที่ไม่เสถียร [1] และมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา [2] การประยุกต์ใช้พลาสมาเพื่อการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว (Plasma surface modification) สามารถทำได้หลายเทคนิคขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นในกลุ่มการกำจัดอะตอมที่พื้นผิวได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ 1. เพื่อการทำความสะอาด (Cleaning) 2. เพื่อการกัดเซาะ (Etching) 3. เพื่อการฆ่าเชื้อ (Sterilization) [3] ขณะที่ในกลุ่มของการเพิ่ม (Addition) [4] อะตอมหรือโมเลกุล เช่น การเคลือบผิว (Coating) และการปรับเปลี่ยนพลังงานเชิงผิว เช่น การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันโดยการปรับปรุงพลาสมา เป็นต้น เมื่อแก๊สได้รับพลังงานมากเพียงพอจนทำให้แก๊สส่วนหนึ่งถูกไอออไนซ์ แก๊สจะเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมาที่ประกอบด้วยอนุภาคหรือสปีชีส์ชนิดต่างๆ คือ อิเล็กตรอน ไอออน อนุภาคมูลฐานหรืออนุภาคที่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี และอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้น ทำให้พลาสมามีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างจากแก๊ส ที่สำคัญคือ พลาสมาเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเนื่องจากมีทั้งประจุบวกและประจุลบในสัดส่วนที่เท่าๆ กัน และทำให้พลาสมาตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ดี นอกจากนี้ยังมีโฟตอนที่พลังงานอยู่ในย่านที่ตามองเห็นได้ ถูกปลดปล่อยออกมาจากอิเล็กตรอนในอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น จึงสามารถสังเกตเห็นการเรืองแสง (Glow discharge) ของพลาสมาได้

เมื่อแบ่งแยกตามลักษณะอุณหภูมิของพลาสมาจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ “พลาสมาร้อน” และ “พลาสมาเย็น” สำหรับพลาสมาร้อนที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิของแก๊สจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอิเล็กตรอน ซึ่งมากกว่าหมื่นเคลวิน และสัดส่วนแก๊สที่ถูกไอออไนซ์จะมีค่าสูง ในขณะที่พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศ อิเล็กตรอนเท่านั้นที่มีพลังงานสูง ในขณะที่ไอออนจะมีพลังงานใกล้เคียงกับแก๊ส จึงทำให้พลาสมามีอุณหภูมิใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิห้อง พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศจะมีสัดส่วนแก๊สที่ถูกไอออไนซ์ต่ำ จึงมีความหนาแน่นของอนุภาคที่มีประจุต่ำตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามพลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศกลับมีความหนาแน่นของสปีชีส์ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง เนื่องจากพลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศมีส่วนผสมของแก๊สที่ว่องไว

ปฏิกิริยา (Active gases) เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และไอน้ำ เมื่อแก๊สเหล่านี้เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา จะเกิดอนุมูลหลายชนิดที่มีความว่องไวขึ้นปะปนอยู่ในตัวกลางพลาสมา เช่น หมู่อนุมูลในกลุ่มคาร์บอนิล ($-C=O$) คาร์บอกซิล ($-COOH$) ไฮดรอกซิล ($-OH$) และเอมีน ($-N-$) อนุมูลเหล่านี้ช่วยเพิ่มพลังงานเชิงผิวของวัสดุ ซึ่งจะทำให้ผิวของวัสดุมีความชอบน้ำมากขึ้น (Increase hydrophilic) และมีการยึดติดดีขึ้น (Improve adhesion)

จากคุณสมบัติดังกล่าว การประยุกต์ใช้พลาสมาในอุตสาหกรรม ถือว่าเป็นเรื่องใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจจากนักวิจัยพลาสมาเทคโนโลยี ซึ่งในปัจจุบันพลาสมาที่สามารถดำเนินการ ณ ระดับความดันหนึ่งบรรยากาศ (Atmospheric pressure plasma: APP) [5] ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่ต้องใช้อุปกรณ์สุญญากาศ เช่น บีมโรตารี เกจวัดความดัน และแอมเบอร์สุญญากาศ จึงสามารถลดต้นทุนในการสร้างระบบไปได้อย่างมาก [6]

การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟสำหรับใช้กับหัวกำเนิดพลาสมาความดันบรรยากาศถือเป็นความท้าทายทั้งในเชิงวิชาการและเชิงเทคโนโลยี แหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่ในระดับกิโลเฮิร์ตซ์สำหรับหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศอาจต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูงถึง 20 kV และควรมีการออกแบบให้สามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 30-300 kHz เพื่อให้ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance frequency) ของหัวกำเนิดพลาสมา ซึ่งจะทำให้การแตกตัวของแก๊สได้ง่ายขึ้น โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงและความถี่สูง ซึ่งถูกออกแบบให้เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดพลาสมา [7] แหล่งจ่ายไฟส่วนใหญ่ประกอบด้วยตัวแปลง เรโซแนนซ์แบบอนุกรมและหม้อแปลงเพิ่มแรงดันไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งสามารถออกแบบตัวแปรวงจรเรโซแนนซ์ที่สอดคล้องกันได้อย่างเหมาะสม ดังตัวอย่างในงานวิจัยของ Yong-Nong และคณะ [8] ได้ใช้อิเล็กโทรสเปร์ย์และพลาสมาเจ็ทที่ความดันบรรยากาศสำหรับการปรับปรุงพื้นผิวผ้าฝ้ายให้มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำโดยการเคลือบฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (Diamond like carbon) ต่อมา Mandala และคณะ [4] ได้พัฒนาแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบพัลส์ยูนิโพลาร์ เพื่อปรับปรุงระบบต้นแบบพลาสมาที่มีโครงสร้างต้นแบบวงจร RLC ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสร้างพัลส์และควบคุมลักษณะของกระแสพลาสมาโดยการปรับตัวแปรให้มีความเหมาะสม นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Zheng และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการย้อมสีเส้นใยของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate) โดยเส้นใยได้ผ่านการปรับปรุงด้วยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ ที่กำลังไฟฟ้า 50 W ทำให้สียึดติดอย่างเหนียวแน่นกับเส้นใยจากพันธะโควาเลนต์ เพื่อให้สามารถนำปรับปรุงพื้นผิวด้วยพลาสมา

การใช้วงจรรหัสพี-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์กับแหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุสำหรับหัวกำเนิดพลาสมา ที่ความดันบรรยากาศ มีข้อโดดเด่นคือ มีแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะไม่นำกระแสขั้ว เมื่อเทียบกับแรงดันอินพุต และยังช่วยในการลดผลของความไม่สมมาตรของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้ และสามารถปรับหาความถี่เรโซแนนซ์ที่เหมาะสมต่อลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุนี้สามารถนำไปใช้กับหัวพลาสมาที่ความดันบรรยากาศในการเพิ่มคุณสมบัติความชอบน้ำของเมล็ดพันธุ์เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับออกซิเจนและความชื้นในบรรยากาศ ที่จำเป็นต่อการงอกและการโตของต้นอ่อน (Sprouts) ทำให้เมล็ดพันธุ์มีอัตราการโตและอัตราการงอกเพิ่มขึ้นได้

ฟ้าทะลายโจร มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Andrographis paniculata* (Burm.f. Wall.ex Nees) [9] สำหรับในประเทศไทยมีชื่อเรียกเฉพาะแตกต่างกันไปในแต่ละภาค เช่น หล้าก้านงู เมฆทะลายฟ้าสะท้าน สามสิบดี ฟ้าสาบ หรือน้ำลายพังพอน ลักษณะเป็นพืชล้มลุก มีรสขมทุกส่วน กิ่งใบเป็นสี่เหลี่ยม ใบมีสีเขียวเข้มผิวมัน เมื่อแก่จะมีสีน้ำตาล ด้านในมีเมล็ดจำนวนมาก สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เมื่อต้นมีอายุประมาณ 3-5 เดือน ใช้ได้ทั้งต้น ใบสด และใบแห้ง จากการศึกษาพบว่า ฟ้าทะลายโจรมีสารที่ชื่อว่า “แอนโดรกราโฟไลด์ (Andrographolide)” ที่สามารถยับยั้งการแพร่เชื้อโควิด-19 ได้ ทำให้ผู้ป่วยอาการไม่รุนแรงมีอาการดีขึ้น และมีส่วนช่วยในการป้องกันปอดอักเสบ แต่อย่างไรก็ตามสารชนิดนี้เป็นสารที่ต้องจำกัดปริมาณที่ร่างกายควรได้รับในแต่ละวันอย่างถูกต้อง เพื่อให้ยาฟ้าทะลายโจรสามารถออกฤทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กรมการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก กระทรวงสาธารณสุข แนะนำให้ใช้ในผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 โดยรับประทานสารสกัดฟ้าทะลายโจรแอนโดรกราโฟไลด์ ขนาด 180 มิลลิกรัมต่อวัน โดยแบ่งรับประทาน 3 ครั้ง ก่อนอาหาร รับประทานไม่เกิน 5 วัน ทำให้ในปัจจุบันเมล็ดพันธุ์ฟ้าทะลายโจรเป็นที่ต้องการของประชาชนจำนวนมาก เมล็ดพันธุ์จึงขาดตลาด เกิดปัญหาผลผลิตไม่เพียงพอ ประกอบกับอัตราการงอก (Seed germination rate) ของเมล็ดพันธุ์ฟ้าทะลายโจรมีค่าประมาณ 70% ทำให้ผลผลิต (Productivity) ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่สูง

การใช้เทคโนโลยีพลาสมาปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ก่อนการเพาะปลูกจะช่วยเพิ่มอัตราการงอกและอัตราการโตของต้นอ่อนได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เป็นการผลิตสินค้าเกษตรคุณภาพสูงที่มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ส่งเสริมให้เกษตรกรมีความเข้มแข็งโดยการแข่งขันด้วยนวัตกรรม เพื่อให้เกิดเศรษฐกิจ BCG (Bio-Circular-Green Economy) ที่เติบโต แข่งขันได้ในระดับโลก เกิดการกระจายรายได้ลงสู่ชุมชน ลดความเหลื่อมล้ำ ชุมชนเข้มแข็ง มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและการพัฒนาที่ยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาความดันบรรยากาศในการปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ข้าวทะลายโจรเพื่อศึกษาอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ได้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างหัวกำเนิดพลาสมาแบบ APP โดยใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สตั้งต้นหลักในการจุดพลาสมา
2. ศึกษาผลกระทบของตัวแปร กำลังไฟฟ้า ระยะเวลา อัตราการไหลของแก๊ส ในขั้นตอนการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวทะลายโจร (อายุไม่เกิน 1 ปี)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ต้นแบบของเครื่องปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์โดยใช้พลาสมาที่ความดันบรรยากาศ
2. สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาทางการเกษตรเพื่อกระตุ้นการงอกของเมล็ดพันธุ์ได้



1.5 ระยะเวลาทำการวิจัย

ตาราง 1.1 แผนการทำวิจัยตลอดระยะเวลา 3 ปี

รายละเอียดการดำเนินการ	พ.ศ. 2564		พ.ศ. 2565					พ.ศ. 2566	
	Q1	Q2	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q1	Q2
ขออนุมัติชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์และแต่งตั้งอาจารย์ที่ปรึกษา									
ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ พลาสมาที่ความดันบรรยากาศ									
เขียนรายงานการวิจัยบทที่ 1 ถึง 3									
พัฒนาเครื่องมือสำหรับการวิจัย									
สอบเค้าโครงวิทยานิพนธ์									
ทดสอบการทำงานของหัวพลาสมาฯ									
ทดสอบอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์									
วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย									
เขียนรายงานการวิจัยบทที่ 4 ถึง 5 และ บทความวิจัยวิทยานิพนธ์									
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

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมา (SC1-211) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

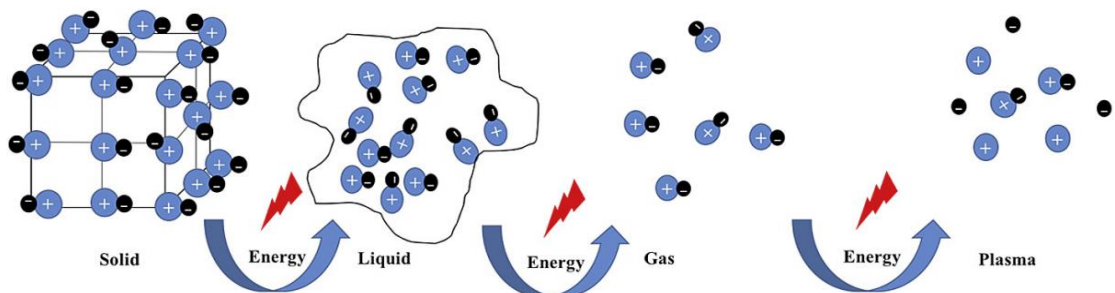
บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงสมบัติพื้นฐานของพลาสมา วัสดุทางวิศวกรรมและอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องสำหรับการศึกษานิวเคลียร์ของพลาสมา และพฤติกรรมของพลาสมาที่ความดันบรรยากาศเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาความดันบรรยากาศ สำหรับการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ต่อไป

2.1 คุณสมบัติของพลาสมา

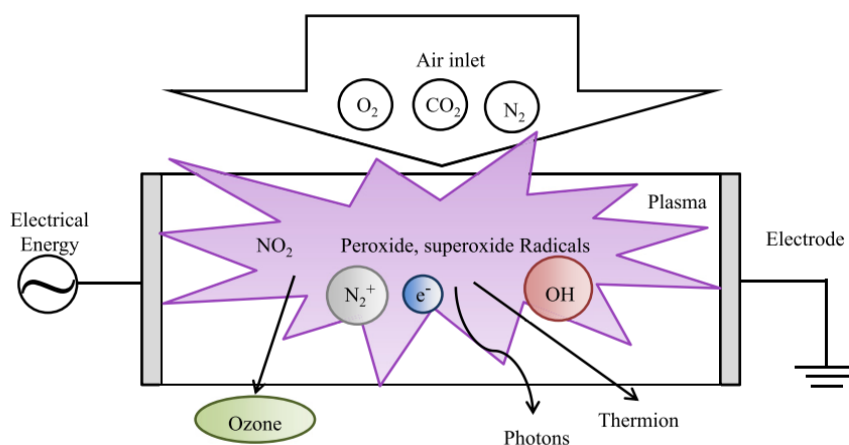
โดยปกติแล้วอากาศจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่เมื่อให้พลังงานกับโมเลกุลของแก๊สมากขึ้นถึงจุดหนึ่ง แก๊สจะแตกตัว (Discharge) และนำไฟฟ้าได้ ทั้งนี้เนื่องจากแก๊สถูกไอออไนซ์และปลดปล่อยอนุภาคย่อยที่มีประจุไฟฟ้าออกมา เช่น ไอออนลบ หรือไอออนบวก และอิเล็กตรอน โดยแก๊สที่ถูกไอออไนซ์อย่างต่อเนื่องจะอยู่ในสถานะพลาสมา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



ภาพที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงานมากขึ้น [1]

พลาสมามีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างจากสถานะของแข็ง ของเหลว และแก๊ส อย่างชัดเจน เนื่องจากพลาสมาประกอบด้วยไอออนที่เคลื่อนที่ช้าและอิเล็กตรอนที่มีความคล่องตัวสูง เนื่องจากมีมวลน้อยกว่ามาก ในพลาสมาไอออนและอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้กันจะสร้างสนามไฟฟ้าขึ้น และส่งแรง Coulomb ไปยังอนุภาคใกล้เคียงที่มีประจุไฟฟ้า นอกจากนั้นการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าจะสร้างกระแสและสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำในบริเวณนั้น ๆ ขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความหนาแน่นอิเล็กตรอน (n_e) และความหนาแน่นไอออน (n_i) ในพลาสมาจะมีค่าเท่า ๆ กันเสมอ นั่นคือ $n_e = n_i$ จึงทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ พลาสมาจึงอยู่ในสภาวะกึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า (Quasineutrality) และพลาสมาจะแสดง

พฤติกรรมร่วม (Collective behavior) ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่กลุ่มอนุภาคในพลาสมาแสดงออกมา ร่วมกัน เช่น ความสามารถในการป้องกันการรบกวนจากสนามไฟฟ้าภายนอก และการเกิดบริเวณชีท (Sheath region) ที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่ำกว่าความหนาแน่นของไอออนบริเวณรอยต่อ ระหว่างพลาสมากับผิววัสดุ สนามไฟฟ้าบริเวณชีทนี้จะสร้างแรงทางไฟฟ้าที่ต้านการเคลื่อนที่ของ อิเล็กตรอนออกจากพลาสมา ตัวอย่างของกระบวนการสร้างพลาสมาแบบ Electrical discharge สามารถแสดงได้ ดังภาพที่ 2.2 ด้วยการให้สนามไฟฟ้าเพื่อเร่งอิเล็กตรอนให้ชนกับโมเลกุลของแก๊ส O_2 , CO_2 และ N_2 เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานมากขึ้นถึงจุดหนึ่ง การชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของ แก๊สจะสามารถกระตุ้นให้แก๊สแตกตัวเป็นพลาสมา อนุภาคในพลาสมามีความว่องไวต่อการ เกิดปฏิกิริยา พลาสมาสามารถเปล่งแสงและแผ่ความร้อนออกมาได้ ตัวอย่างขององค์ประกอบใน พลาสมาอากาศ คือ NO_2 , N_2^+ , e^- , OH , O_3 , Peroxide, Superoxide radicals, Photons, [3] เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 การสร้างสถานะพลาสมาโดยการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า (Electrical discharge) [3]

ในกรณีของแก๊ส การเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะถูกกำหนดโดยอุณหภูมิ แต่ในกรณีของพลาสมา มวลของไอออน (m_i) มีค่ามากกว่ามวลของอิเล็กตรอน (m_e) มาก โดยมวลของโปรตรอน $m_i > 1835m_e$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงมีสภาพความคล่องตัว (Mobility) สูงกว่าไอออนมาก เมื่อถูกกระตุ้น หรือได้รับพลังงานจากภายนอก อิเล็กตรอนจะตอบสนองได้เร็วกว่า แต่การส่งผ่านโมเมนตัม เนื่องจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนและไอออนนั้นกลับทำได้น้อยมาก จึงทำให้แก๊สส่วนใหญ่ยังคงมีพลังงานต่ำใกล้เคียงกับพลังงานที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจึงมีค่าสูงกว่าพลังงานของ ไอออนและแก๊สมาก 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 เช่น พลาสมาความดันบรรยากาศชนิดหนึ่ง 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 [10], [11]

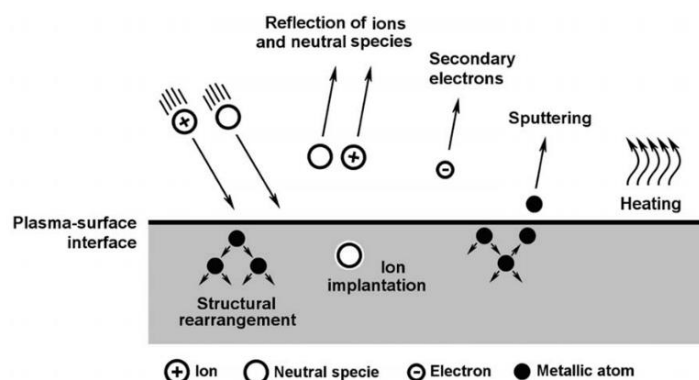


โดยที่ e และ O^+ หมายถึง อิเล็กตรอนและออกซิเจนไอออน ตามลำดับ

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

O_2^* หมายถึง โมเลกุลของออกซิเจนที่ถูกกระตุ้น

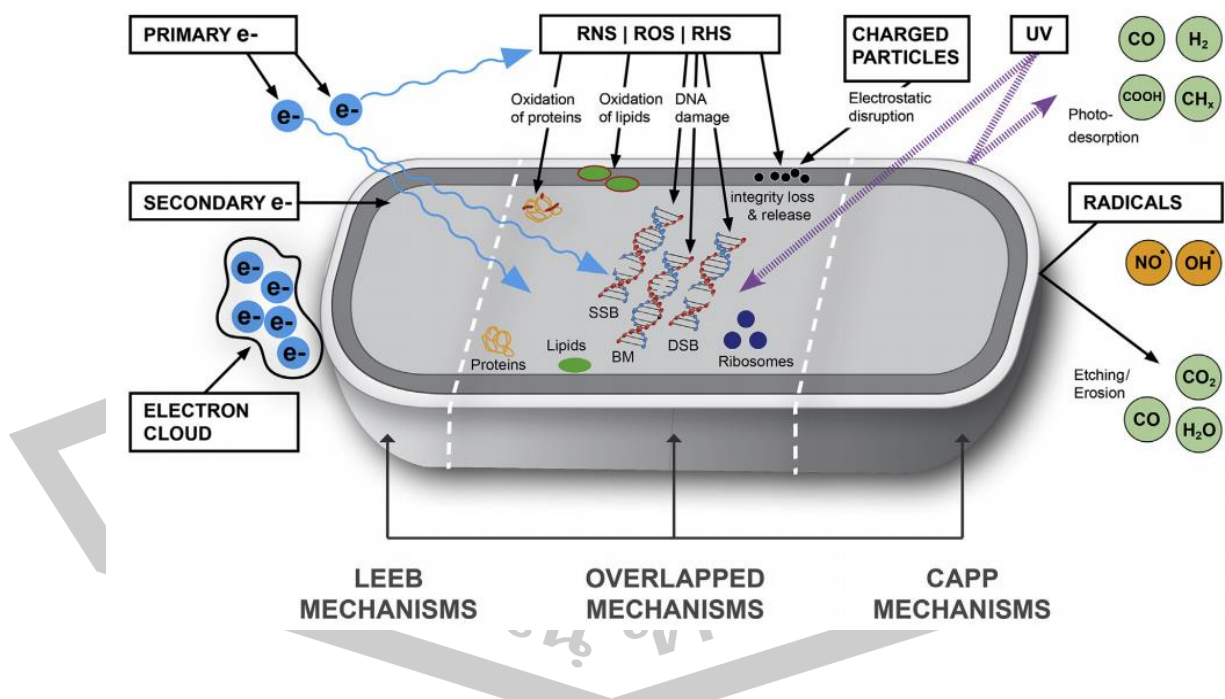
ธรรมชาติของแอคทีฟสปีชีส์จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อนำผิววัสดุเข้าใกล้พลาสมาที่มีส่วนผสมของสปีชีส์ต่าง ๆ ข้างต้น ก็จะมีโอกาสที่สปีชีส์เหล่านี้กับอะตอมที่พื้นผิวของสารเกิดอันตรกิริยา (Plasma surface interactions) ซึ่งกันและกัน ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ภาพจำลองการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างพลาสมากับพื้นผิว [12]

ในกรณีที่แก๊สตั้งต้นที่ใช้ในการสร้างพลาสมามีส่วนผสมของแก๊สที่ว่องไวปฏิกิริยา (Active gases) เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไอน้ำ หรือ อากาศ เมื่อแก๊สเหล่านี้เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา จะเกิดเรดิคอลที่มีความว่องไวขึ้นปะปนอยู่ในตัวกลางพลาสมาได้หลายชนิด เช่น พลาสมาถูกสร้างขึ้นที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งมีส่วนผสมของไนโตรเจน (N_2) ออกซิเจน (O_2) และไอน้ำ (H_2O) เราจะได้พลาสมาอากาศ (Air plasma) หลังจากนั้นเรดิคอลที่เคลื่อนที่เข้าไปใกล้บริเวณรอยต่อ (Boundary layer) ระหว่างผิวแผ่นฐาน (ซึ่งในที่นี้คือ โพลีโพลีลีน) กับพลาสมาอากาศ จะไปสร้างพันธะกับอะตอมที่ผิว เช่น O เข้าไปถึง 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 ประเภทหลัก ๆ คือ การอบพลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศ และการอบพลาสมาเย็นที่ความดันต่ำ สองเทคนิคนี้มีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกัน คือ การสร้างสถานะพลาสมาที่ความดันบรรยากาศจะใช้ต้นทุนต่ำ เนื่องจากไม่ต้องลงทุนในระบบสุญญากาศ และมีความสะดวกในการนำชิ้นงานเข้าและออก แต่มีข้อจำกัดในเรื่องลักษณะและปริมาณของชิ้นงาน ที่สามารถโหลดชิ้นงานได้ในปริมาณน้อย เพราะจะมีปัญหาเรื่องความทั่วถึงและความสม่ำเสมอของบริเวณที่ถูกปรับปรุงด้วยพลาสมา ในขณะที่การใช้พลาสมาเย็นที่ความดันต่ำนั้น จะทำให้ระยะปลอดการชนเฉลี่ยภายในแชมเบอร์สุญญากาศมากขึ้น จึงสามารถสร้างพลาสมาได้ในบริเวณกว้าง และพลาสมาสามารถกระจายตัวเข้าไปโดยรอบชิ้นงานที่มี

รูปร่างซับซ้อนได้เป็นระยะทางที่มากกว่า แต่จะต้องมีการลงทุนในระบบสุญญากาศในระยะแรก ซึ่งข้อด้อยนี้สามารถถูกชดเชยด้วยปริมาณชิ้นงานที่ถูกฆ่าเชื้อในแต่ละครั้งมากกว่า ใช้เวลาการฆ่าเชื้อในแต่ละครั้งสั้นกว่า และสามารถฆ่าเชื้อชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า โดยอันตรกิริยาระหว่างพลาสมา กับเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์สามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบ เนื่องจากพลาสมาประกอบด้วยสปีชีส์หลายชนิดที่เกิดจากแก๊สแตกตัว (Glow discharge) ภายในแคมเบอร์สุญญากาศระหว่างขั้วไฟฟ้า ความถี่วิทยุ (RF) สปีชีส์เหล่านี้จะทำอันตรกิริยากับชิ้นงานหรือเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ได้แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดและความว่องไวของแต่ละสปีชีส์ องค์ประกอบของสปีชีส์ในพลาสมาโดยทั่วไป จะประกอบไปด้วยรังสียูวี เรดิคอลที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาอิเล็กตรอนอิสระ และไอออนอิสระ รังสีและอนุภาคเหล่านี้จะมีผลต่อเซลล์ในลักษณะที่แตกต่างกันไป เช่น รังสียูวี จะทำให้เกิดความร้อนสะสม จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเชิงแสงและความร้อนที่ผนังเซลล์ ส่วนเรดิคอลจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเกิดการกัดกร่อนเชิงเคมีทั้งที่ผนังเซลล์และที่เยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน ขณะที่อิเล็กตรอนและไอออนอิสระสามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนทั้งทางเคมีและทางกายภาพต่อเซลล์ได้ [5] รายละเอียดดังกล่าว แสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 องค์ประกอบของพลาสมาที่ส่งผลกระทบต่อกายภาพและชีวเคมีของเซลล์ [5]

2.2 แหล่งจ่ายไฟสำหรับพลาสมา

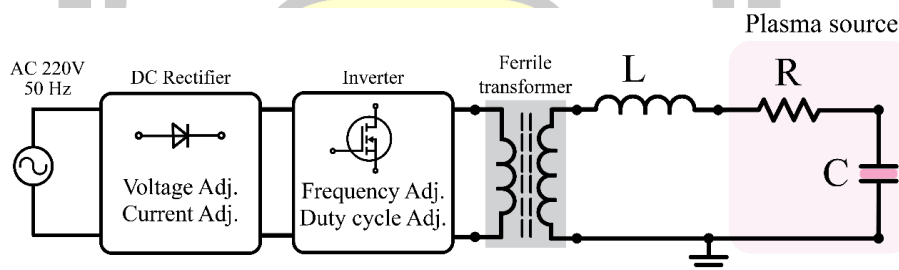
แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงคือแหล่งจ่ายไฟไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่สามารถผลิตเอาต์พุตแรงดันสูงได้ แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงมักใช้ในการใช้งานที่ต้องการสนามไฟฟ้าแรงสูง เช่น ในการผลิตพลาสมา มีอุปกรณ์จ่ายไฟแรงดันสูงหลายประเภทที่สามารถใช้สำหรับการสร้างพลาสมาเช่น

1. แหล่งจ่ายไฟ DC (Direct current) แรงดันสูง: แหล่งจ่ายไฟเหล่านี้สร้างเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และโดยทั่วไปจะใช้ในเครื่องกำเนิดพลาสมาซึ่งอาศัยการปล่อยกระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนและสร้างพลาสมา
2. แหล่งจ่ายไฟ AC (Alternating current) แรงดันสูง: แหล่งจ่ายไฟเหล่านี้ผลิตเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมักใช้ในเครื่องกำเนิดพลาสมาที่ใช้สนามไฟฟ้าสูงความถี่สูงเพื่อทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนและสร้างพลาสมาได้ด้วยความดันบรรยากาศ
3. แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงแบบพัลส์ (Pulse): แหล่งจ่ายไฟเหล่านี้ผลิตเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์และใช้ในเครื่องกำเนิดพลาสมาซึ่งอาศัยการปล่อยกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เพื่อทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนและสร้างพลาสมา

และสำหรับพลาสมาที่ถูกสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่ใช้สนามไฟฟ้าในการทำให้แก๊สแตกตัว ซึ่งมีโครงสร้างแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ (Dielectric barrier discharge) และ Capacitively coupled plasma (CCP) ซึ่งเป็นการดิสชาร์จข้ามฉนวน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับแรงดันสูงโดยความถี่ของแหล่งจ่ายไฟถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

1. ความถี่ต่ำ (Low frequency) ซึ่งมีความถี่ต่ำกว่า 100 kHz ที่ช่วงความถี่นี้ทั้งอิเล็กตรอนและไอออนจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าได้ทัน
2. ความถี่วิทยุ (Radio frequency) เนื่องจากการใช้แหล่งจ่ายไฟย่านความถี่นี้อาจมีคลื่นสัญญาณหลุดลอดออกมารบกวนอุปกรณ์สื่อสาร จึงมีการกำหนดความถี่ที่อนุญาตให้ใช้ทางวิทยาศาสตร์และการแพทย์ คือ 13.56 MHz ที่ช่วงความถี่นี้จะมีเฉพาะอิเล็กตรอนเท่านั้นที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าได้ทัน ในขณะที่ไอออนจะเฉื่อยเนื่องจากเคลื่อนที่ช้า
3. ความถี่ไมโครเวฟ (Microwave frequency) เนื่องจากการใช้แหล่งจ่ายไฟย่านความถี่นี้อาจมีคลื่นสัญญาณหลุดลอดออกมารบกวนอุปกรณ์สื่อสาร จึงมีการกำหนดความถี่ที่อนุญาตให้ใช้ทางวิทยาศาสตร์ อาหารและการแพทย์ คือ 2.45 GHz ที่ช่วงความถี่การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นเร็วมาก แต่อิเล็กตรอนก็ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าได้ทัน ในขณะที่ไอออนเกือบจะหยุดนิ่งเนื่องจากมีมวลเยอะ

ซึ่งแหล่งจ่ายไฟจะเป็นตัวกำหนดสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญสำหรับการสร้างสนามไฟฟ้าในการทำให้แก๊สแตกตัวเป็นพลาสมาได้ที่ความที่ดันบรรยากาศ โดยจุดเด่นในระบบพลาสมาแบบมีโครงสร้างตามหลักการไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ ที่สามารถให้กำเนิดและคงสถานะพลาสมาอุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า $70\text{ }^{\circ}\text{C}$) ณ ระดับความดันใกล้เคียงหนึ่งบรรยากาศ ($\sim 105\text{ Pa}$) อาจเรียกพลาสมาประเภทนี้ว่า “พลาสมาบรรยากาศ” ที่ต้องคำนึงถึงขนาดของแหล่งจ่ายไฟ ความปลอดภัย และความสามารถในการควบคุมระดับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า สำหรับแหล่งจ่ายไฟลับที่มีศักย์สูง (High voltage power supply) ที่ระดับหลายสิบกิโลโวลต์ที่ทำงานในย่านความถี่ในช่วง กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ถึงเมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ตามความเหมาะสมสำหรับหัวกำเนิดพลาสมาแต่ละรูปแบบเนื่องจากฉนวนที่ใช้ชั้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรด มีสภาพทางไฟฟ้าซึ่งเทียบเท่าอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเช่นตัวเก็บประจุที่เกิดจากชั้นไดอิเล็กทริก ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากขั้วโลหะตัวเหนี่ยวนำในวงจรและหม้อแปลงแรงดัน และการให้กำลังงานเนื่องจากการเกิดค่าความต้านทาน R ที่เกิดขึ้นเนื่องจากหัวกำเนิดพลาสมาซึ่งสามารถเทียบเคียงในรูปแบบของวงจรไฟฟ้าได้ เช่น C คือตัวเก็บประจุ และ L คือตัวเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น องค์ประกอบดังที่กล่าวมาจะมีผลต่อการเลือกช่วงของความถี่ที่เหมาะสมตั้งนั้น แหล่งจ่ายไฟที่ใช้จึงควรที่จะต้องสามารถปรับความถี่ได้ เพื่อหาตำแหน่งของการแมทชิงของอิมพีแดนซ์ ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ไดอะแกรมและวงจรเสมือนของหัวกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

เมื่อเราพิจารณาภาพที่ 2.5 พบว่าแรงดันเข้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีขนาด 220 โวลต์ (V) และความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ (Hz) เป็นแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของแหล่งจ่ายไฟทั่วไปที่ใช้ในบ้านหรือสำนักงานในหลายประเทศ ที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับวงจรเรียงกระแสซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่แปลงไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยวงจรจะต้องสามารถจ่ายกระแสและควบคุมระดับของแรงดันที่จ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับความถี่ได้ และเปลี่ยนรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้คล้ายกับรูปคลื่นไซน์ เพื่อจ่ายให้กับหม้อแปลงด้านขดปฐมภูมิ (Primary winding) ที่ใช้การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งตามข้อกำหนดของหม้อแปลง จากนั้นต่อเอาต์พุต (Output) หม้อแปลงด้านขดทุติยภูมิ (Secondary winding) เข้ากับตัวเหนี่ยวนำ

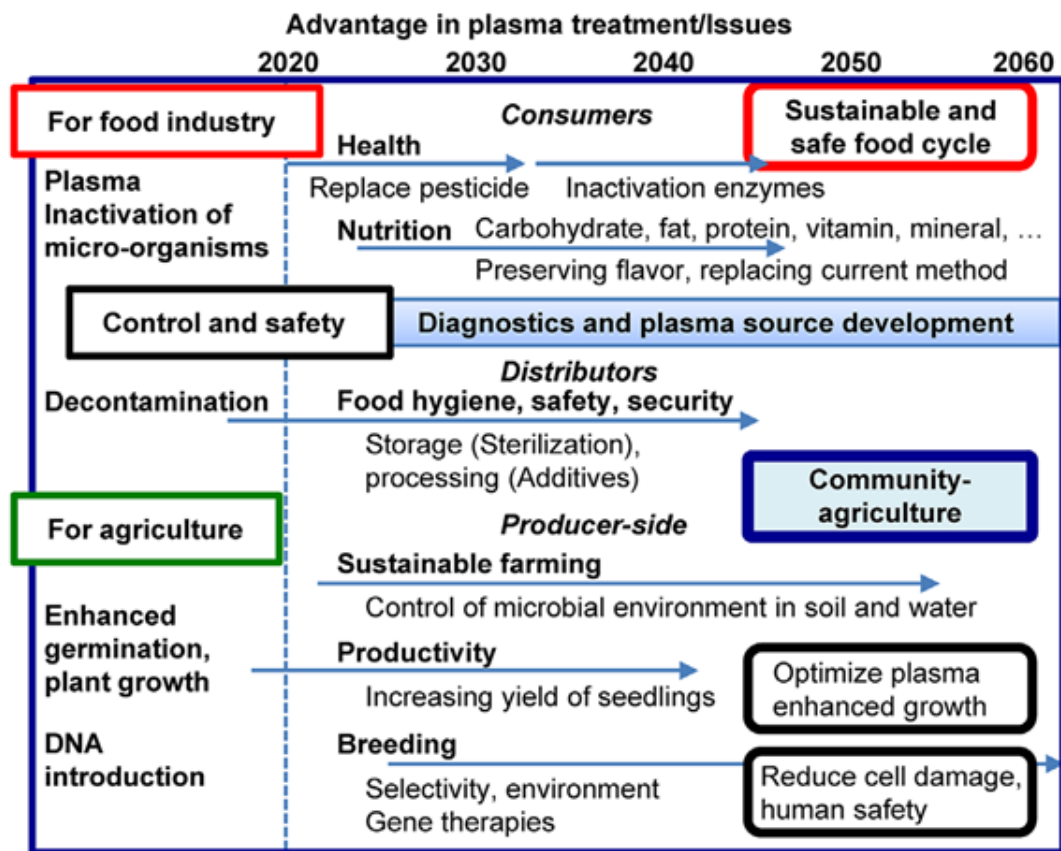
ซึ่งเป็นส่วนประกอบทางไฟฟ้าคือการเก็บพลังงานไว้ในรูปสนามแม่เหล็ก โดยตัวเหนี่ยวนำมีคุณสมบัติที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแส สามารถใช้ตัวเหนี่ยวนำเข้าไปในวงจรเพื่อเป็นองค์ประกอบสำหรับเป็นตัวแปรสำหรับปรับค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร ซึ่งจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานให้กับหัวกำเนิดพลาสมา หากความถี่อิมพีแดนซ์ไม่เหมาะสมจะส่งผลให้กำลังถูกส่งไปยังโหลดน้อยลง ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาประสิทธิภาพลดลง เกิดความร้อนเพิ่มขึ้น และความผิดปกติของสัญญาณเพิ่มขึ้น ดังนั้นการกำหนดค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสม แล้วทำการปรับหาความถี่ที่เหมาะสม จะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบหัวกำเนิดพลาสมา สามารถหาความสัมพันธ์จากสมการที่ (2.9)

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.9)$$

เมื่อ f_r ความถี่เรโซแนนซ์ L คือค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจร R คือ โหลดที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สเป็นพลาสมา และ C คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากโครงสร้างของหัวกำเนิดพลาสมาที่เสมือนเป็นตัวเก็บประจุในวงจร

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

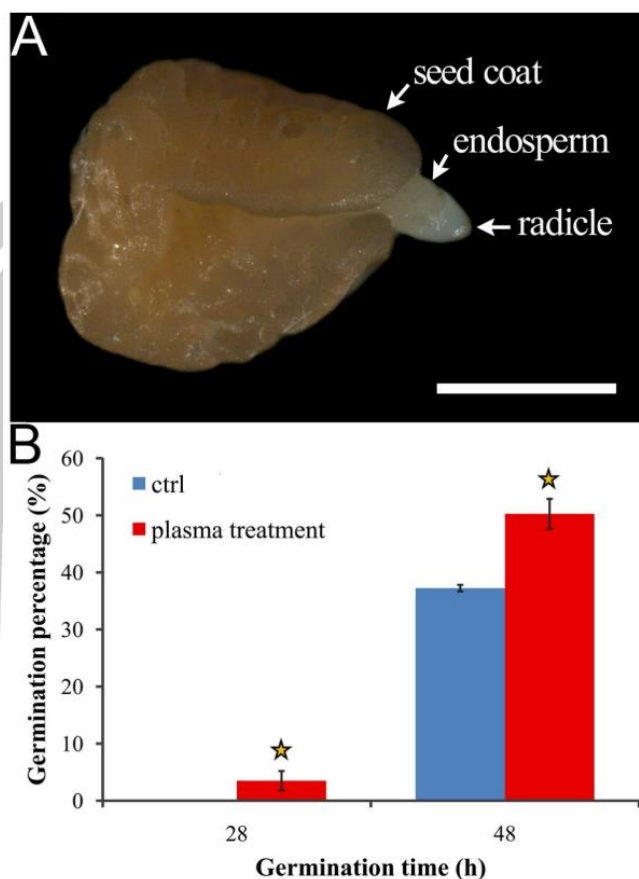
การประยุกต์ใช้พลาสมาเพื่อการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของสารมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นในกลุ่มของการเพิ่ม (Addition) อะตอมหรือโมเลกุล เพื่อเพิ่มพลังงานเชิงผิว (Increase of surface energy) เพิ่มหมู่ฟังก์ชัน (Introduction of chemical groups) หรือเพื่อการเคลือบ (Deposition/coating) ขณะที่ในกลุ่มของการกำจัด (Removal) อะตอมที่พื้นผิว จะถูกแบ่งออกเป็นเพื่อการทำมาสะอาด (Cleaning) เพื่อการกัดเซาะ (Etching) หรือเพื่อการฆ่าเชื้อ (Sterilization) โดยในงานวิจัยนี้พลาสมาที่ถูกสร้างขึ้นจะไปทำหน้าที่ทั้งการฆ่าเชื้อ เพิ่มพลังงานเชิงผิวและเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน ของผิวเมล็ดพันธุ์ข้าวหอมมะลิ ซึ่งจะทำให้ลดการเกิดโรคในกระบวนการเพาะปลูก เมล็ดสามารถดูดซับความชื้นและออกซิเจนได้ดีขึ้น ทำให้เมล็ดงอกได้ดีและโตเร็ว ทนต่อสภาพภูมิอากาศที่แห้งแล้งได้มากขึ้น โดยแนวทางการพัฒนาพลาสมาเพื่อการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหารในช่วงปี 2017-2060 สามารถแสดงดังภาพที่ 2.6 ซึ่งจะเห็นว่าการประยุกต์ใช้พลาสมาเพื่อการเกษตร จะช่วยส่งเสริมให้เกิดการทำเกษตรแบบยั่งยืน (Sustainable farming) โดยการควบคุมสภาพแวดล้อมทางชีวเคมีทั้งดินและน้ำ ช่วยเพิ่มผลผลิต ในขั้นตอนการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ และช่วยให้เกิดการผสมพันธุ์ (Breeding) โดยการปรับปรุงยีน เป็นต้น



ภาพที่ 2.6 แนวทางการพัฒนาพลาสมาเพื่อการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร [13]

ในปี ค.ศ. 2020 J. Tonng และคณะ[14] ได้ใช้พลาสมาอากาศแบบฉนวนขวางกั้นปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์พืชหลายชนิดที่เวลาต่าง ๆ กัน แล้วศึกษาอัตราการงอกและการวิเคราะห์ยีน ผลการศึกษาพบว่า การปรับปรุงด้วยพลาสมาโดยใช้เวลาเพียง 3 วินาที สามารถเพิ่มอัตราการงอกได้ ในขณะที่ถ้าใช้เวลาการปรับปรุงด้วยพลาสมาเพิ่มขึ้นเป็น 9 วินาที พลาสมาสามารถทำลายยีนและยับยั้งการงอกของเมล็ดพันธุ์ได้

พหุ ประถมศึกษา



ภาพที่ 2.7 A. ฟั้ทะลยัรก่อนและหลั้การร้กษัด้วยพลาสมาอากาศ (B) ลั้ขณะการงอกของ เมลั้ดของกลุ้มควบคุ้มและกลุ้มที่ด้รับการบ้บดั้ที่ 28 และ 48 ชั้โมง [14]

การประกยुकดั้ใช้พลาสมาเพื่อการปร้บปรุ้งผัวมลั้ดพันธุ้พืชต่าง ๆ เพื่อกั้ช้ในการงอกและการเจรึญเตบ้โต ถ็ือว่าเป็นเรื่งใหม้ที่ก้าลังด้รับความสนัใจท้ังจากนักวัชการเกษตรและนักพลาสมาเทคโนโลยี โดยในปี ค.ศ. 2011 Z. Zhou และคณะ [15] จาก Institute of Applied Physics of Guizhou normal college ประเทศจ้ิน ด้ใช้พลาสมาเ้ยนที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้ันปร้บปรุ้งผัวมลั้ดพันธุ้มะเชื่อกเทศ โดยศั้ษาผลของความต่างศักยัไฟฟ้า (4,760 V – 6,120 V) ที่ช้ในการจุดพลาสมาต่ออ้ตราการเจรึญเตบ้โตและการให้ผลผลัิต พบว่าเมลั้ดพันธุ้ที่ถูกปร้บปรุ้งภายใด้ความต่างศักยัไฟฟ้า 6,120 V มีอ้ตราการเจรึญเตบ้โตและให้ผลผลัิตสูงสุด้ ซึ่งอธิบายว่าศักยัไฟฟ้าที่สูงเพ็ียงพอจะท้าให้การดิสซาร์จกั้เกิดขึ้นอย่างสม้่าเสมอ และรุนแรงพอที่จะทำให้อุณหภูมิที่ว้องไว้ต่อปฏัีกิริยา (Active air particles) และรังสีอัลตราไว้โอเลต สามารถทะลุดูผ่านเยื่อหุ้มเมลั้ด (Capsule of the seeds) กระตุ้ันให้กั้เกิดการส่งผ่านของเหลวที่หลอ้เล็้ียงส่วนต่าง ๆ ของเซลล์ ท้าให้กั้เกิดการงอกของรากออกจากเมลั้ดได้ด้ช้ขึ้น

ต่อมาในปี ค.ศ. 2013 I. Filatova และคณะ [16] ได้ใช้แหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุ ทำการจูดพลาสมาจากแก๊สตั้งต้นที่เป็นอากาศภายใต้ขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นคู่ขนานและแบบทรงกระบอก จากนั้นนำพลาสมาไปปรับปรุงเมล็ดข้าวโพด ข้าวสาลี และเมล็ดถั่วลันเตา โดยศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าและความดัน ซึ่งพบว่าที่ความดัน 500 mTorr และกำลังไฟฟ้า 0.2 W/cm^2 และใช้เวลาในการปรับปรุง 5 นาที ผิวเปลือกหุ้มเมล็ดพันธุ์ถูกกัดกร่อนทั้งจากไอออนและเรดิคอลลจากพลาสมา ซึ่งสังเกตได้จากภาพถ่าย SEM ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปในเมล็ดได้ดีขึ้น ส่งผลให้อัตรการงอกมีค่ามากขึ้น

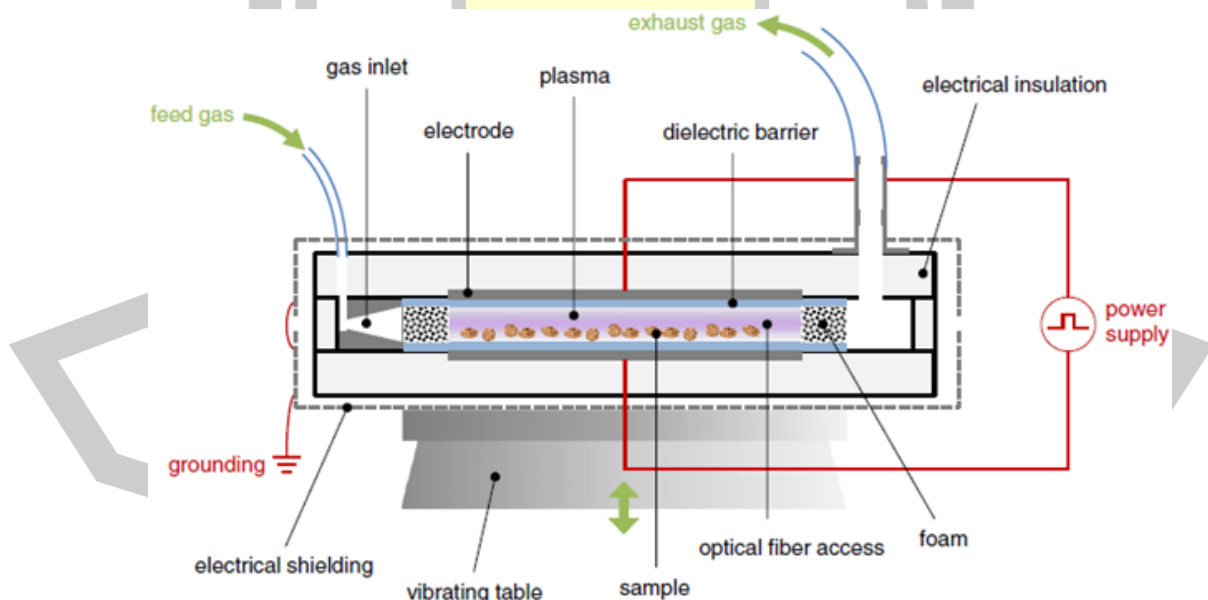
ต่อมาในปี ค.ศ. 2014 T. Sarinont และคณะ [17] ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้นปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ถั่วงอก โดยใช้เวลาในการปรับปรุง 3 นาที โดยศึกษาอัตราการเจริญเติบโตเมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน และ 7 วัน ซึ่งพบว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยพลาสมาโตเร็วกว่าเมล็ดที่ควบคุมถึง 3.7 เท่าในวันแรก และ 1.3 เท่า เมื่อผ่านไป 7 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของเมล็ดถั่วเขียวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ต่ำกว่า $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ในระหว่างการปรับปรุงด้วยพลาสมา ซึ่งไม่ส่งผลต่ออัตราการงอกและการเจริญเติบโต ในปีเดียวกันนี้ L. Ling และคณะ [18] ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันต่ำในการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองเป็นเวลาสั้น ๆ เพียง 15 วินาที โดยศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าในการจูดพลาสมาในช่วง 60-120 W ผลการศึกษาพบว่าที่กำลังไฟฟ้า 80 W เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองมีความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น 14.03% สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การงอกเพิ่มขึ้น 14.66% และเปอร์เซ็นต์ดัชนีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 63.33% นอกจากนี้ Tong Jiayun และคณะ [10] ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น เพื่อทำการปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์พื้ทะเลทรายโจร โดยศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการจูดพลาสมาในช่วง 3,400-5,950 V และเวลาการปรับปรุง (Exposure time) ในช่วง 0-20 วินาที ผลการทดลองพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการจูดพลาสมา 5,950 V และเวลา 10 วินาที สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การงอกได้อย่างมีนัยสำคัญ

ต่อมาในปี ค.ศ. 2015 Li Ling และคณะ [11] ได้ใช้พลาสมาเย็นดังกล่าวมาปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์พืชที่นำมาสกัดเอาน้ำมันจากเมล็ด ผลการทดลองให้ผลเช่นเดียวกับเมล็ดถั่วเหลือง คือ พลาสมาสามารถเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์การงอก อีกทั้งยังลดอัตราการคายน้ำมันออกจากเมล็ดที่สภาวะแห้งแล้งได้อีกด้วย

ต่อมาในปี ค.ศ. 2016 S. H. Ji และคณะ [19] ได้ใช้แหล่งจ่ายไฟศักย์ไฟฟ้าสูงแบบพัลส์สร้างพลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น เพื่อทำการปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ฝักโขม เนื่องจากโดยปกติแล้วเมล็ดพันธุ์ฝักโขมจะมีอัตราการงอกต่ำ แต่จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้อากาศเป็นแก๊สตั้งต้นในการจูดพลาสมาแบบพัลส์ เมล็ดพันธุ์ฝักโขมที่ผ่านการใช้พลาสมามีเปอร์เซ็นต์การงอกเพิ่มขึ้น แต่ถ้าใช้พลาสมามากเกินไปเมล็ดพันธุ์จะเปอร์เซ็นต์การงอกจะลดลง ผลการทดลองนี้

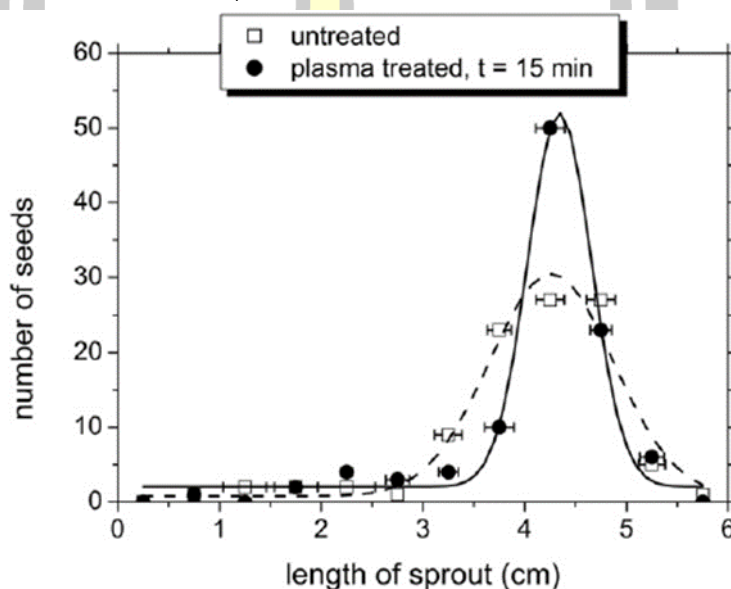
ชี้ให้เห็นว่าช่วงเวลาการใช้พลาสมาเมล็ดพันธุ์จะต้องมีความเหมาะสมหรือจะต้องไม่นานเกินไป เนื่องจากเรติคูลจากออกซิเจนที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา และแสงยูวีจากพลาสมาอาจทะลุผ่านเยื่อหุ้มเมล็ดเข้าไปทำลายระบบเซลล์ (Cellular damage) และในปีเดียวกันนี้ A. Zahoranova และคณะ [20] ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศภายใต้ข้อไฟฟ้าแบบ Diffuse coplanar surface barrier discharge (DCSBD) ทำการใช้กับเมล็ดพันธุ์ข้าวสาลี โดยระบบข้อไฟฟ้าชนิดนี้สามารถสร้างพลาสมาที่กำลังไฟฟ้าสูงถึง 100 W/cm^2 ใช้เวลาในช่วง 10-600 วินาที จากการศึกษาพบว่าเวลาเวลาในช่วง 20-50 วินาที สามารถให้เปอร์เซ็นต์การงอกและดัชนีความแข็งแรงของเมล็ด (Vigor of seeding) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการซึมน้ำ (Wettability) ที่มากขึ้น นอกจากนี้ผลจากการทดสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่เติมลงไป พบว่าการปรับปรุงด้วยพลาสมาสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์บนผิวเมล็ดพันธุ์ได้

ในปี ค.ศ. 2016 D. Butscher และคณะ [21] ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น (Dielectric barrier discharge: DBD) โดยใช้แหล่งจ่ายไฟความถี่ 10 kHz แรงดันไฟฟ้า 8 kV และความกว้างพัลส์ 500 ns ปรับปรุงเมล็ดเรดิซ หัวหอม และเมล็ดธัญพืชเพื่อยับยั้งเชื้อ *E. coli* ผลการทดลองพบว่าพลาสมาสามารถทำให้เชื้อลดลงได้สูงสุดถึง 3.4 Logarithmic เมื่อใช้เวลาการฉายพลาสมาใน 5 นาทีแรก ซึ่งโครงสร้างของระบบ DBD แสดงดังภาพที่ 2.8 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อต้องการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์อย่างต่อเนื่องและปริมาณมากจะทำได้ยาก



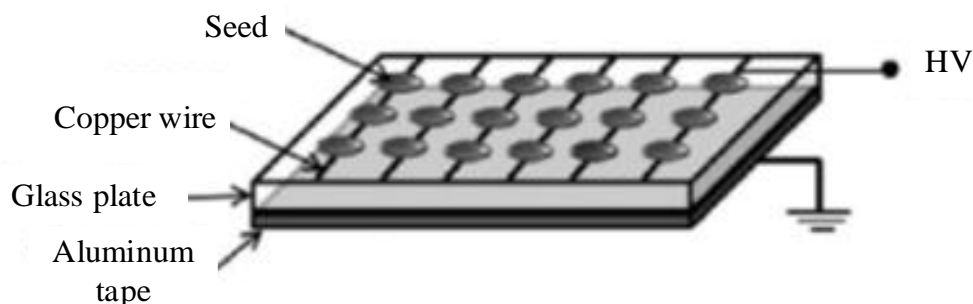
ภาพที่ 2.8 โครงสร้างหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น [21]

ในปี ค.ศ. 2017 Y. J. Oh และคณะ [22] ได้ใช้ไมโครเวฟสร้างพลาสมาเย็นที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สไนโตรเจนที่ความดันต่ำทำการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Salmonella typhimurium* ในต้นอ่อนแรติซ ผลการทดลองพบว่าที่กำลังไฟฟ้า 900 W และความดัน 667 Pa ใช้เวลา 20 นาที พลาสมาสามารถทำให้เชื้อลดลงได้สูงสุดถึง $2.6 \pm 0.4 \log \text{CFU/g}$ ซึ่งจะพบว่าเวลาที่ใช้ค่อนข้างนาน และการใช้ความดันขณะทำงาน (Working pressure) ที่ค่อนข้างต่ำจะทำให้ต้นอ่อน (Sprout) ที่เสียความชุ่มชื้นและเหี่ยวง่ายเนื่องจากการระเหยของน้ำในสภาวะสุญญากาศ ผลของการที่เมล็ดแรติซสามารถเปรียบเทียบความยาวต้นอ่อนแรติซที่เพาะเป็นเวลา 4 วัน จากเมล็ดที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยพลาสมา [23] ได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 เปรียบเทียบความยาวต้นอ่อนแรติซที่เพาะเป็นเวลา 4 วัน จากเมล็ดที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยพลาสมา [22]

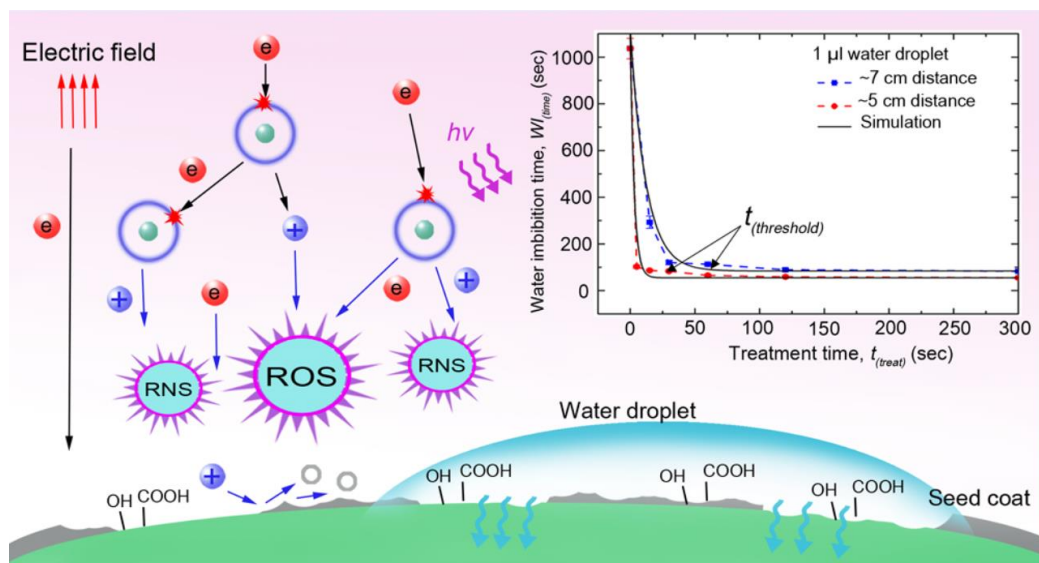
ในปี ค.ศ. 2015 D. Dobrin และคณะ [23] ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้นปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ข้าวสาลี โดยใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 2.7 W แรงดันไฟฟ้า 15 kV และใช้อากาศเป็นแก๊สตั้งต้น ผลการวัดอัตราการเติบโตของต้นอ่อนจากเมล็ดที่ผ่านการใช้พลาสมา พบว่าพลาสมาสามารถเพิ่มพลังงานเชิงผิวของเมล็ดพันธุ์ ทำให้เมล็ดดูดซับความชื้นและออกซิเจนได้ดีขึ้น จึงงอกและเติบโตได้เร็วกว่า ซึ่งโครงสร้างห่อหุ้มเมล็ดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้นแสดงดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกัน [23]

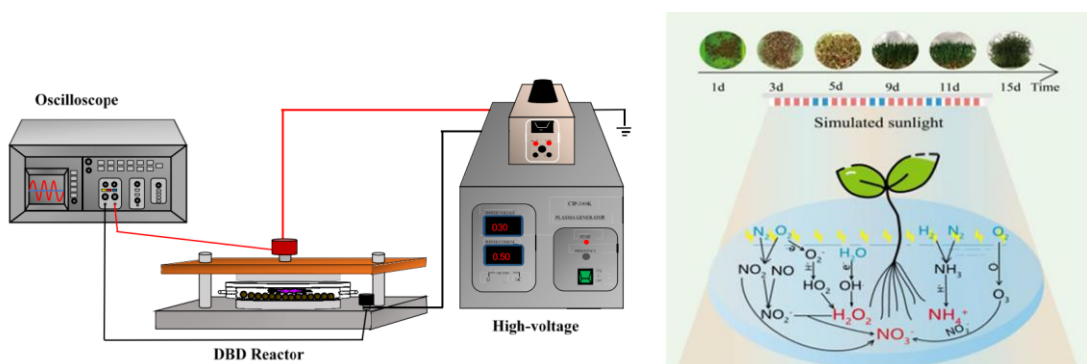
ในปี ค.ศ. 2018 S. Srisonphan [24] ได้ทำการศึกษาวิศวกรรมพื้นผิวชั้นสูงโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อผลิตพื้นผิวที่มีความสามารถในการเปียกน้ำได้ดี การการดูดซึมน้ำ Water imbibition (WI) โดยการใช้พลาสมาแบบไม่ใช้ความร้อนในบรรยากาศ Nonthermal atmospheric plasma (NAP) สามารถเปลี่ยนให้พื้นผิวเปียกน้ำได้เพิ่มขึ้น สำหรับวัตถุทางชีววิทยา เช่น เมล็ดพันธุ์ข้าว พบว่า NAP สามารถควบคุมการดูดซึมน้ำและการแพร่กระจายของของเหลวบนเมล็ดพันธุ์ข้าวได้ ซึ่งเป็นผลกระทบร่วมกันของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี ที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวเป็นไอออน อิเล็กตรอน ที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าซึ่งช่วยเพิ่มการสร้างอนุมูลอิสระ (Free radicals, FR) ที่มีความสำคัญเช่น อนุมูลอิสระ ของออกซิเจน(Reactive oxygen species, ROS) และอนุมูลอิสระของไนโตรเจน Reactive nitrogen species (RNS) โดยที่ไม่ทำให้เมล็ดข้าวเสียหาย และพบว่า 90% ของเมล็ดข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยพลาสมาจะดูดซึมน้ำดียิ่งขึ้นช่วยให้ต้นกล้ามีคุณภาพที่ดีขึ้นและทนแล้ง ซึ่งพลาสมาแบบ NAP สามารถประยุกต์ใช้ได้กับพื้นผิวที่หลากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็น 2 มิติ หรือ 3 มิติ ดังภาพที่ 2.11 ภาพจำลองด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ และเคมี ที่ส่งผลต่อการเพิ่มความชอบน้ำของพื้นผิว





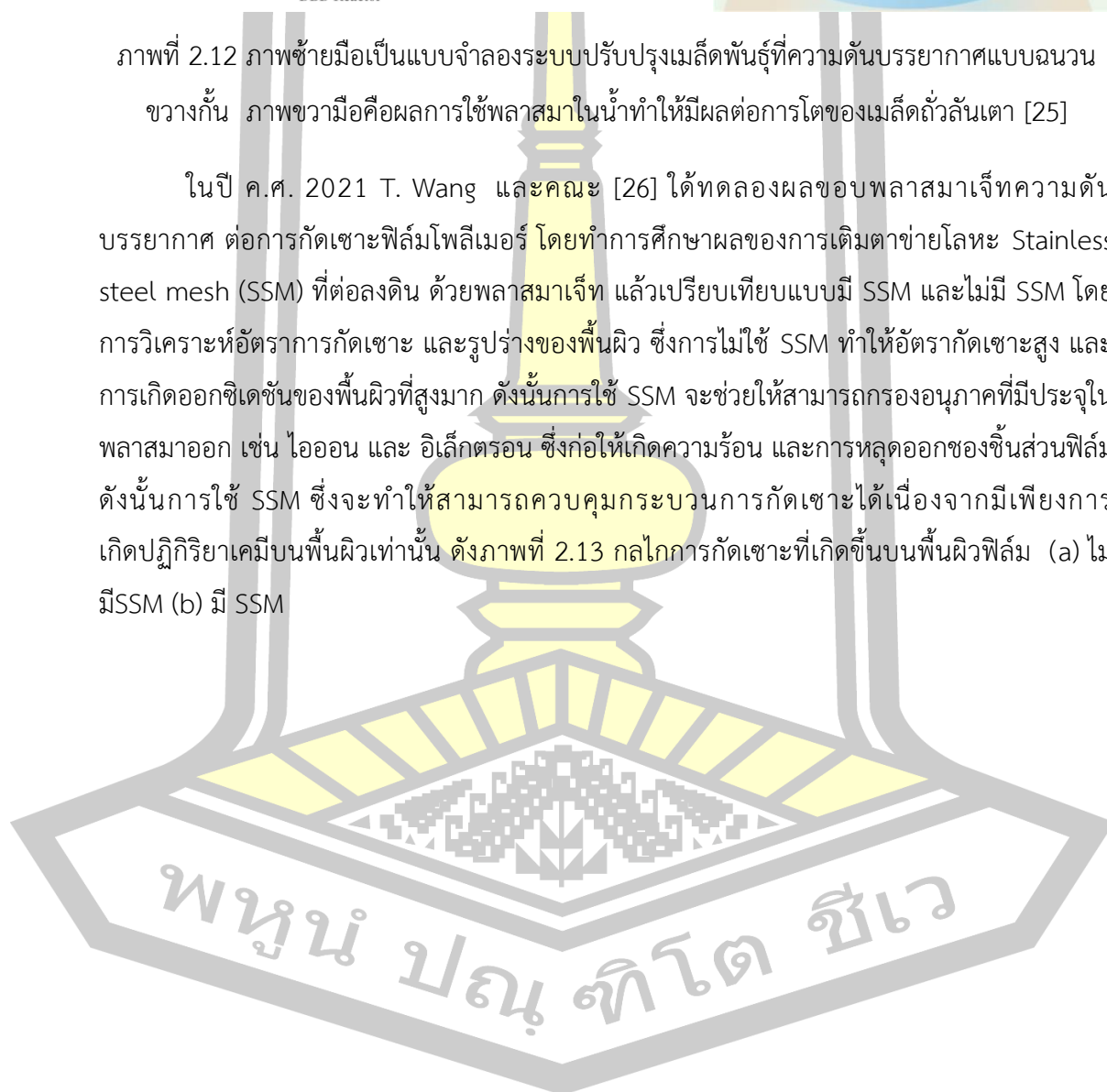
ภาพที่ 2.11 ภาพจำลองด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ และเคมี ที่ส่งผลต่อการเพิ่มความชอบน้ำของพื้นผิว [24]

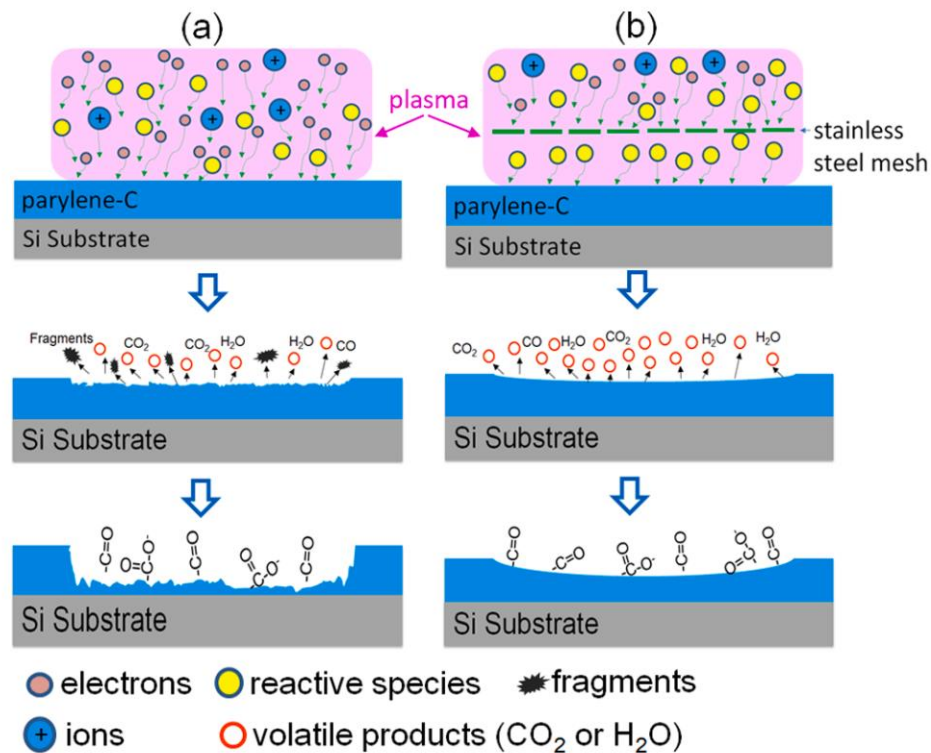
ในปี ค.ศ. 2019 X. Gao และคณะ [25] ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น ทรีตเมนต์พันธุ์ก่อนการปลูก และทรีตน้ำเพื่อนำมาให้น้ำพืชใช้ในการปลูกโดยระบุว่า เป็นวิธีการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ ดั้งเดิมจะใช้เคมีต่าง ๆ ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาผลของพลาสมาเย็นต่อการงอกของเมล็ดพันธุ์ โดยเปรียบเทียบผลของ Plasma-activated tap water (TAPW) หรือการทรีตน้ำด้วยพลาสมา Plasma activated seed (PAS) โดยการเปรียบเทียบอัตราการงอก (Germination rates), ความสูงของต้นกล้า (Seedling height) น้ำหนักแห้ง (Dry weight) และปริมาณคลอโรฟิลล์ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 2 แบบ กับกลุ่มตัวอย่างพบว่า ตัวแปรเหล่านี้เพิ่มขึ้นมากกว่า 50% ซึ่งเป็นผลผลิต และการมีส่วนร่วมของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนเตรต ไนไตรต์ และแอมโมเนียม ในการหาปริมาณพบว่า ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไนเตรตมีบทบาทสำคัญในการเจริญเติบโตของต้นกล้า และโดยการกัดเซาะของอนุมูลอิสระ (Radical) ทำให้สามารถลดมุมสัมผัสน้ำ ทำให้เมล็ดเพิ่มการดูดซึมน้ำ การเพิ่มกระบวนการ PATW และ PAS มีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับปุ๋ยเชิงพาณิชย์ โดย DBD ไม่มีสารเคมีตกค้างแต่อย่างใด ดังนั้น PATW และ PAS จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงการผลิตทางการเกษตร ดังภาพที่ 2.12 ภาพซ้ายมือเป็นแบบจำลองระบบปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น ภาพขวามือคือผลการใช้พลาสมาในน้ำทำให้มีผลต่อการโตของเมล็ดถั่วลันเตา



ภาพที่ 2.12 ภาพซ้ายมือเป็นแบบจำลองระบบปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวน ขวางกัน ภาพขวามือคือผลการใช้พลาสมาในน้ำทำให้มีผลต่อการโตของเมล็ดถั่วลันเตา [25]

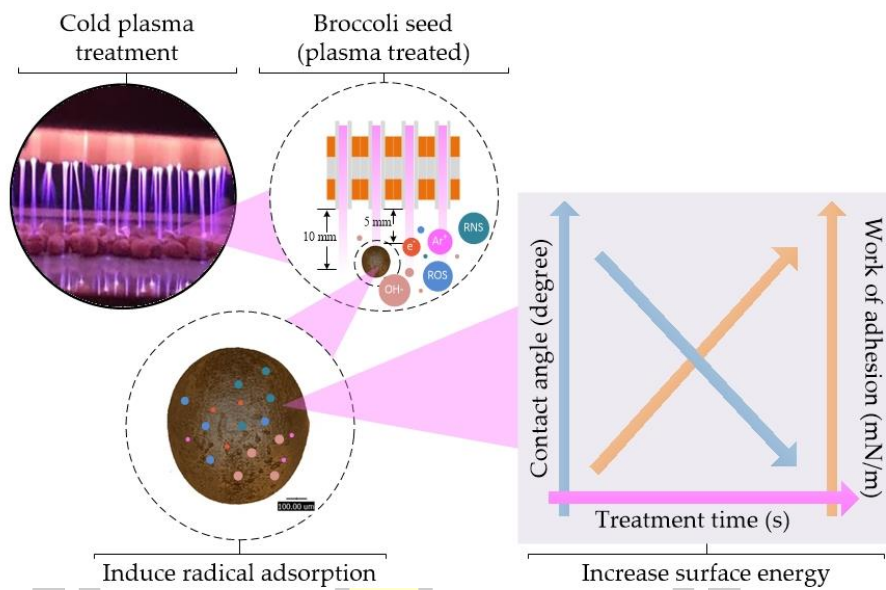
ในปี ค.ศ. 2021 T. Wang และคณะ [26] ได้ทดลองผลของพลาสมาเจ็ทความดันบรรยากาศ ต่อการกัดเซาะฟิล์มโพลีเมอร์ โดยทำการศึกษาผลของการเติมตาข่ายโลหะ Stainless steel mesh (SSM) ที่ต่อลงดิน ด้วยพลาสมาเจ็ท แล้วเปรียบเทียบแบบมี SSM และไม่มี SSM โดยการวิเคราะห์อัตราการกัดเซาะ และรูปร่างของพื้นผิว ซึ่งการไม่ใช้ SSM ทำให้อัตราการกัดเซาะสูง และการเกิดออกซิเดชันของพื้นผิวที่สูงมาก ดังนั้นการใช้ SSM จะช่วยให้สามารถรองอนุภาคที่มีประจุในพลาสมาออก เช่น ไอออน และ อิเล็กตรอน ซึ่งก่อให้เกิดความร้อน และการหลุดออกของชั้นฟิล์ม ดังนั้นการใช้ SSM ซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมกระบวนการกัดเซาะได้เนื่องจากมีเพียงการเกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวเท่านั้น ดังภาพที่ 2.13 กลไกการกัดเซาะที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวฟิล์ม (a) ไม่มี SSM (b) มี SSM





ภาพที่ 2.13 กลไกการกัดเซาะที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวฟิล์ม (a) ไม่มีSSM (b) มี SSM [26]

ในปี ค.ศ. 2021 K. Srakaew และคณะ [27] ได้ทำการพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ทแบบหลายรู สำหรับเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดบร็อคโคลี่ พบว่าเมื่อวัดมุมสัมผัสน้ำบนผิวลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้เวลาในการปรับปรุงด้วยพลาสมาเป็นเวลา 80 วินาที ซึ่งเป็นผลจากไอออนอิเล็กตรอน ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้า ทำให้แก๊สแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระเช่นหมู่ OH-, COOH ช่วยเพิ่มพลังงานเชิงผิวให้มีความสามารถในการดูดซับความชื้น กลุ่ม RNS ที่เป็นส่วนประกอบของอาหารพืชที่ใช้ในการเจริญ และ ROS ซึ่งมีบทบาทในการยับยั้งเชื้อโรคที่ปนเปื้อนมา ดังภาพที่ 2.14 เป็นผลการเพิ่มพลังงานเชิงผิวโดยใช้พลาสมา เจ็ทแบบหลายรู (Multihole APPJ) ปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์บร็อคโคลี่ที่เวลาต่าง ๆ กัน แล้วศึกษาอัตราการงอกและอัตราการโต ผลการศึกษาพบว่าการใช้พลาสมาโดยเป็นเวลา 60 วินาที สามารถเพิ่มน้ำหนักรากของต้นอ่อน (Sprouts) ในช่วง 7 วันแรก ได้ถึง 10.5% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมล็ดพันธุ์โดยใช้พลาสมาที่กำลังและเวลาที่เหมาะสมสามารถเพิ่มผลผลิตได้ ดังภาพที่ 2.14 กระบวนการทรีทเมล็ดบร็อคโคลี่ด้วยหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ทแบบหลายรูเพื่อเพิ่มพลังงานเชิงผิวซึ่งสอดคล้องกับมุมสัมผัสน้ำที่ลดลง



ภาพที่ 2.14 กระบวนการทรีทเมสส์บร็อคโคลี่ด้วยหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ทแบบหลายรูเพื่อเพิ่มพลังงานเชิงผิวซึ่งสอดคล้องกับมุมสัมผัสน้ำที่ลดลง [27]



บทที่ 3

ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 กระบวนการออกแบบและสร้างระบบกำเนิดพลาสมา

การสร้างพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบ DBD-like plasma jet มีหลักการทำงานคล้ายกับหัวพลาสมาแบบDBD แต่มีความคล้ายคลึงกับหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ทแบบรูเดี่ยว เมื่อจ่ายแก๊สตั้งต้นเข้าทางข้อต่อแก๊ส แก๊สตั้งต้นจะเข้าไปกักอยู่ในที่ว่างระหว่างห้องเก็บแก๊ส จากนั้นแก๊สตั้งต้นจะถูกบังคับให้ไหลผ่านรูเล็ก ๆ ของแผ่นกระจายแก๊สและไหลกระจายต่อเนื่องผ่านท่อแก๊ส จากนั้นแก๊สจะถูกบีบให้พุ่งออกทางท่อแก๊สทางด้านล่าง เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับแผ่นขั้วกำลังสูงมากพอ แก๊สจะแตกตัวเป็นพลาสมาบริเวณปลายท่อที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมซึ่งมีขอบที่คมและมีมุมที่เป็นปลายแหลม ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าความเข้มสูงทำให้แก๊สได้รับพลังงานเกิดการแตกตัวและถูกผลักให้พุ่งออกมาเป็นลำพลาสมา และเปล่งแสงให้ตามองเห็นได้ ในบริเวณที่เกิดแสง ซึ่งจะประกอบด้วย อิเล็กตรอน ไอออน และอนุมูลอิสระที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เมื่อลำพลาสมากวาดผ่านเมล็ดพันธุ์ จะเกิดการปรับปรุงสมบัติเชิงผิวเป็นบริเวณกว้างได้ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าความถี่ในช่วง 50-200 kHz (2 kW max.) และกำหนดความเร็วการหมุนของจานใส่เมล็ดพันธุ์ซึ่งจะทำให้พลาสมากระจายลงบนผิวของเมล็ดพันธุ์อย่างทั่วถึงและลดความร้อนสะสมให้อยู่ในช่วง 25-50 องศาเซลเซียส ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 40-60% หรือผสมกับแก๊สอาร์กอน ทำหน้าที่เป็นแก๊สตั้งต้นที่ใช้ในการจุดพลาสมา ซึ่งจะทำให้พลาสมายังคงมีเรดิคอลของ O, O₃, และ OH⁻ ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาในการฆ่าเชื้อและเปลี่ยนแปลงพลังงานเชิงผิว โดยมีกระบวนการในการวิจัย ดังภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงาน ตั้งแต่เริ่มต้นโครงการจนถึงสิ้นสุดโครงการ

- ออกแบบระบบพลาสมา
- วัดสเปกตรัมทางแสง
- เพิ่มเปอร์เซ็นต์การออก

- ผลการทำงานของระบบ
- ผลการวัดสเปกตรัมทางแสง
- ผลการออก

กำหนดกรอบวิจัย

สร้างระบบพลาสมา

ผลการทดลอง

สรุปผลการวิจัย

- หัวกำเนิดพลาสมา
- แหล่งจ่ายไฟ

วิเคราะห์ข้อดี-ข้อเสียของระบบโดยภาพรวม

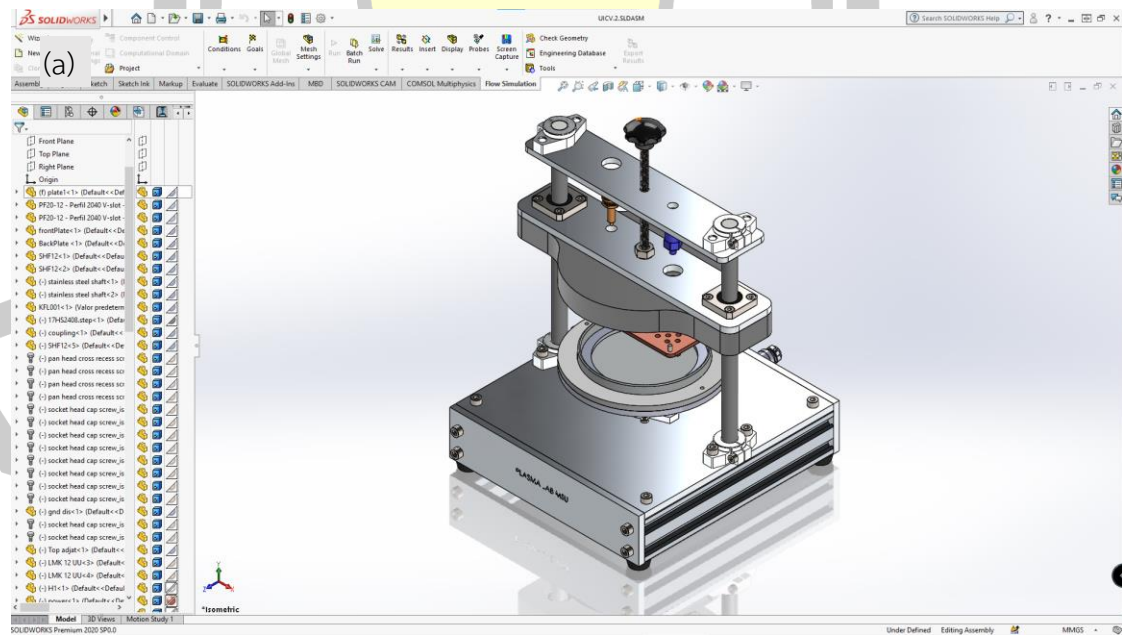
ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงาน

บทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอนการพัฒนาเครื่องต้นแบบเคลื่อนสิ่งทอโดยใช้พลาสติกความดันบรรยากาศ มีขั้นตอนการทำงานหลัก ๆ สรุปได้ดังนี้

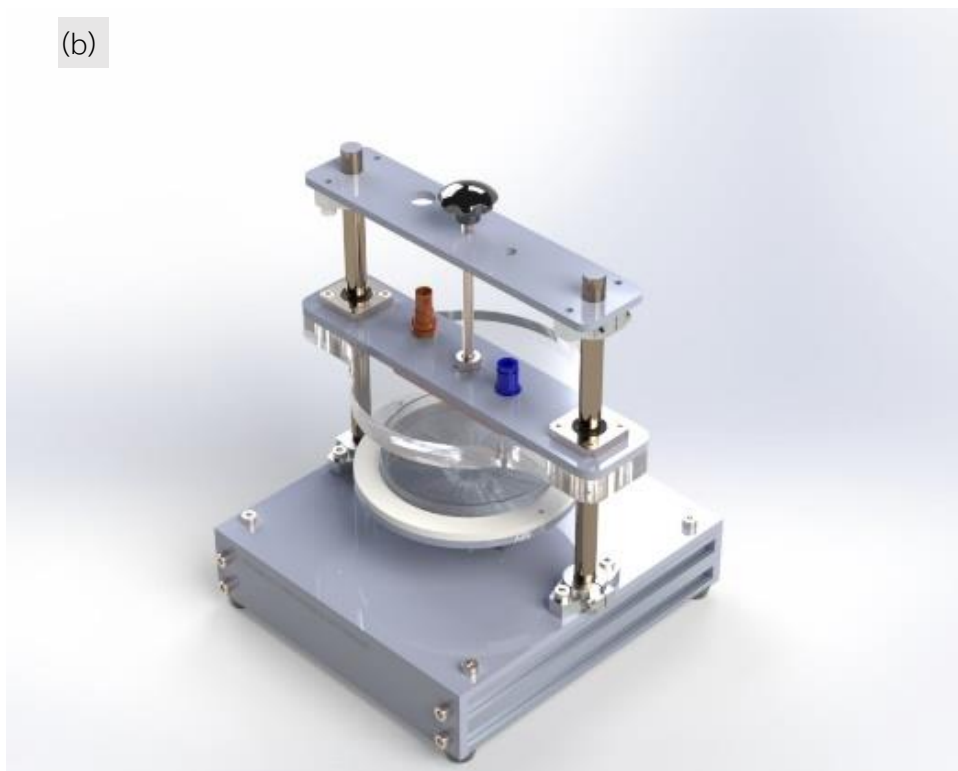
ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการพัฒนาเครื่องต้นแบบเคลื่อนสิ่งทอโดยใช้พลาสติกความดันบรรยากาศ

ขั้นตอน	กิจกรรมที่ดำเนินการ
1	ศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและกำหนดกรอบวิจัยให้ชัดเจน
2	ออกแบบหัวกำเนิดพลาสติก และแหล่งจ่ายไฟสำหรับสร้างพลาสติกความดันบรรยากาศ
3	ตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะของพลาสติก
4	ทดสอบการปรับปรุงเส้นพันธุ์ด้วยพลาสติกที่เงื่อนไขต่างๆเพื่อหาเงื่อนไขที่ให้เปอร์เซ็นต์การงอก
5	วิเคราะห์ข้อดี-ข้อเสียของระบบโดยภาพรวมจากการพัฒนาระบบจากการทดลอง

โดยในงานวิจัยนี้ในงานวิจัยนี้ได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบเพื่อสร้างภาพแบบจำลอง (Model) โดยใช้โปรแกรม Solid Work ซึ่งสามารถนำแบบที่ได้ออกแบบไว้นั้นมาแก้ไขหรือปรับปรุงในภายหลังได้ โดยต้นแบบของชิ้นส่วนที่ถูกนำมาประกอบรวมเป็นระบบ มีส่วนประกอบการทำงานดังภาพที่ 3.2



(b)

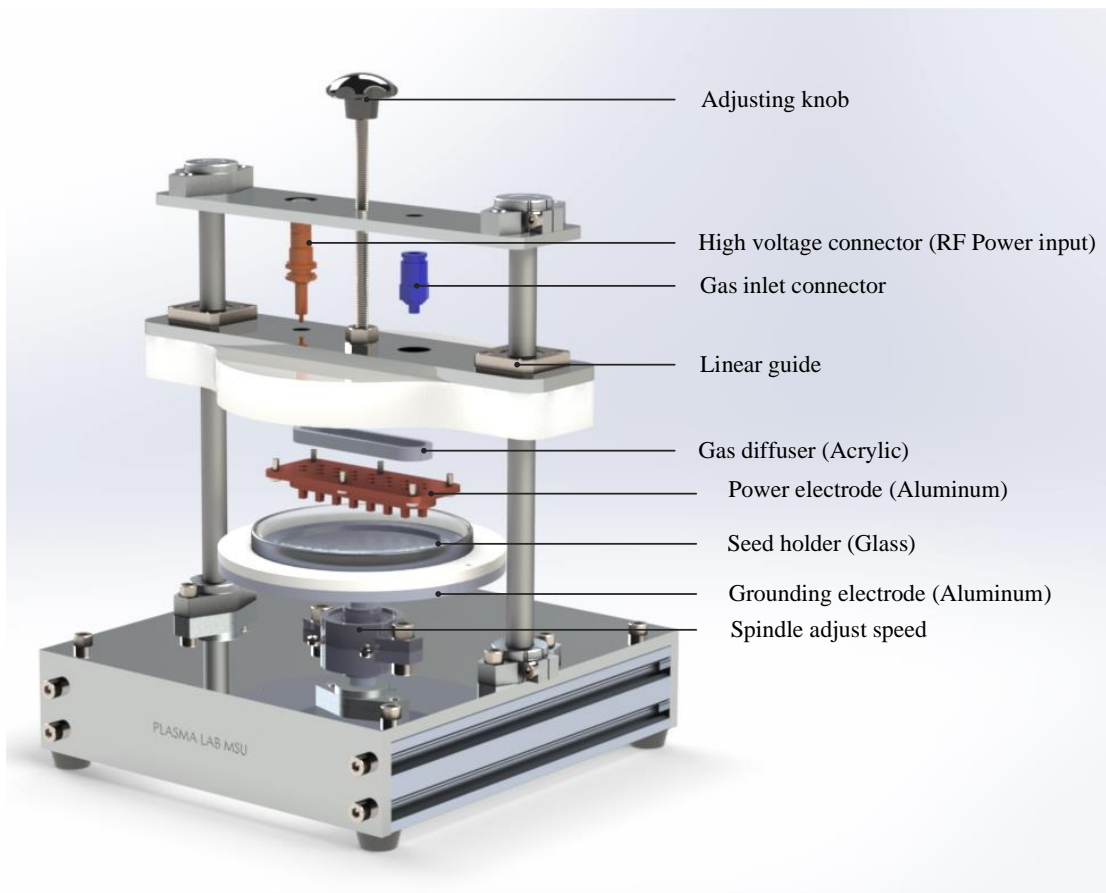


ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างการจำลองระบบด้วยการออกแบบก่อนการสร้างจริง (a) มุมมองสำหรับใช้ในการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน (b) เป็นภาพเสมือนจริงหลังขึ้นรูปแล้วนำมาประกอบ

ในการออกแบบระบบที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนจำนวนมากด้วยการใช้โปรแกรมสำหรับการออกแบบในรูปแบบของชิ้นส่วนที่เป็น 3 มิติที่สามารถนำชิ้นส่วนที่เป็นมาตรฐานสามารถนำโมเดลมาประกอบร่วมกับ

โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ ทั้งหมด 9 ชิ้น โดยมีป้ายกำกับบนชิ้นจะบ่งบอกหน้าที่การทำงานของชิ้นงานนั้นๆ ดังภาพที่ 3.3

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

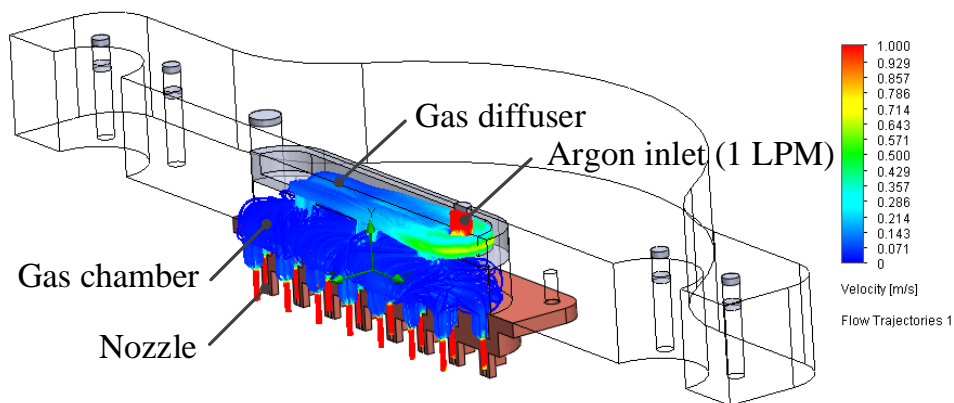


ภาพที่ 3.3 องค์ประกอบของหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศในรูแบบ 3 มิติ ด้วยการใช้โปรแกรม Solid Work

- **Adjusting knob** ใช้สำหรับปรับระดับความสูงของหัวกำลังไฟฟ้าโดยการหมุน 1 รอบจะได้ระยะห่าง 1 mm ซึ่งความสูงจะขึ้นกับจำนวนรอบในการหมุนเพื่อหาระยะที่เหมาะสมได้
- **High voltage connector (RF Power input)** เป็นข้อต่อที่ทำงานได้ในช่วงความถี่ 0-2 GHz และไดอิเล็กทริกทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 10 kV_{rms}
- **Gas inlet connector** ใช้สำหรับเติมแก๊สที่ต้องการเข้าไปข้างในหัวกำเนิดพลาสมา
- **Linear guide** เป็นรางเลื่อนสำหรับการเคลื่อนที่ขึ้นลงที่ได้ระดับตรงตำแหน่งเดิมเสมอ
- **(Acrylic)** เป็นแผ่นสำหรับช่วยในควบคุมการไหลของแก๊สให้กระจายสม่ำเสมอ
- **Power electrode (Aluminum)** หัวกำลังทำจากอะลูมิเนียมที่ถูกกัดขึ้นรูปและเจาะรูให้แก๊สสามารถผ่านไปยังด้านล่างที่เป็นแท่งทรง 4 เหลี่ยมส่วนปลายจะมีมุมซึ่งเป็นปลายแหลมซึ่งมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงทำให้แก๊สที่ถูกปล่อยตรงรูเกิดการกระจายปลายท่อซึ่งจะเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา

- **Seed holder (Glass)** เป็นจานที่มีไว้วางเมล็ดพันธุ์โดยวัสดุเป็นแก้วซึ่งเป็นฉนวนกันเพื่อป้องกันการอาร์ระหว่างหัวกำลังและหัวกราวด์
- **Grounding electrode (Aluminum)** หัวกราวด์ทำจากอะลูมิเนียมที่ถูกกัดขึ้นรูปทรงกลมที่มีผิวเรียบรองรับจานวางเมล็ดพันธุ์และสร้างสนามไฟฟ้ากับหัวกำลังที่อยู่ด้านบน
- **Spindle adjust speed** เป็นแกนหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้โดยการต่อเข้ากับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper motor) ที่สามารถควบคุมเร็วในช่วง 0-100 RPM ซึ่งทำให้หัวกราวด์และจานวางเมล็ดพันธุ์สามารถควบคุมความเร็วรอบการหมุนได้

จากนั้นทำการจำลองการไหลของแก๊สผ่านหัวพลาสมาเพื่อทดสอบการทำงานบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Solid work flow simulation ก่อนการสร้างจริง ซึ่งเป็นการจำลองหาความเร็วของแก๊สอาร์กอนที่ไหลผ่านรูจากกระจายแก๊ส โดยโปรแกรมจะแสดงแนวโน้มความเร็วด้วยเส้นเฉดสี สีน้ำเงินแทนความเร็วแก๊สมีค่าต่ำสุด และไล่ระดับสีจนถึงเส้นสีแดง ซึ่งแสดงความเร็วแก๊สมีค่าสูงสุด โดยบริเวณที่มีความสำคัญดังภาพด้านล่าง



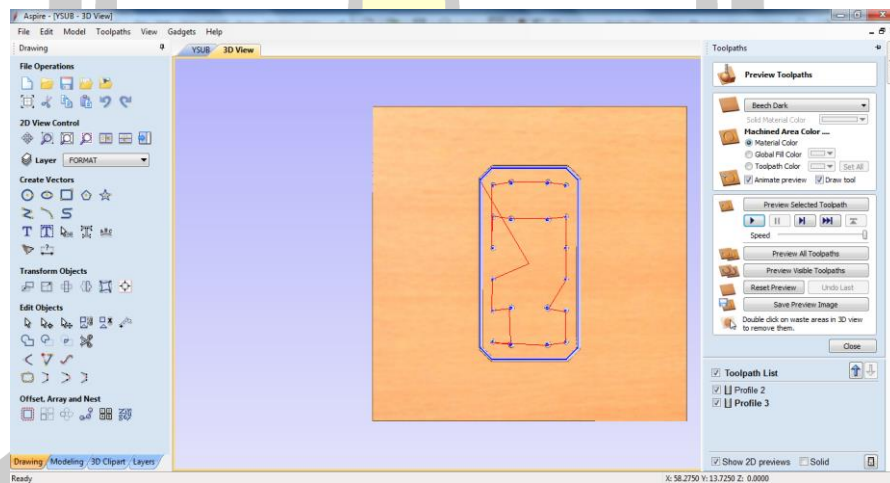
ภาพที่ 3.4 จำลองความเร็วของแก๊สอาร์กอนที่ไหลในหัวพลาสมา

- Argon inlet เป็นส่วนที่จำลองอัตราการไหล 1 lpm ของแก๊สอาร์กอนใช้สำหรับเติมแก๊สเข้าไปข้างในหัวกำเนิดพลาสมา
- Gas diffuser เมื่อแก๊สอาร์กอนถูกเติมเข้ามาในจะเกิดการกระจายตัวแล้วออกตามช่องเปิดด้านล่าง 3 ช่อง เข้าไปยังบริเวณทางออกที่เชื่อมต่อกับห้องเก็บแก๊ส (Gas

chamber) ที่ติดกับหัวกำลังที่มีรูทะลุลงด้านล่างไปยังท่อฉีดแก๊ส (Nozzle) ด้านล่างต่อไป

- Nozzle ท่อฉีดแก๊สจะทำหน้าที่ลำเลียงแก๊สไปยังจุดปลายด้านล่างที่มีสนามไฟฟ้า ทำให้แก๊สเกิดการแตกตัวในตำแหน่งที่เหมาะสมอีกทั้งยังช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวของพลาสมาให้ครอบคลุมบริเวณสำหรับใช้งาน

เมื่อได้แบบจำลองจากคอมพิวเตอร์แล้ว เราสามารถนำไฟล์แบบจำลองที่ได้มาเข้ากระบวนการแปลงด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing: CAM) เพื่อช่วยในการสร้าง G-code ซึ่งเป็นการแปลงแบบจำลองให้เป็นข้อมูลตัวเลขสำหรับควบคุมเครื่องจักรที่มีการควบคุมด้วยระบบตัวเลข (Computer Numerical Control: CNC) หรือที่นิยมเรียกว่า เครื่องซีเอ็นซี (CNC) ในการกัดขึ้นรูปชิ้นส่วน โดยใช้ข้อมูล Modeling มาแปลงเป็น G-code โดยตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้แสดงดังภาพที่ 3.5 การใช้โปรแกรม Aspire 4.0 สำหรับการสร้าง G-code



ภาพที่ 3.5 การใช้โปรแกรม Aspire 4.0 สำหรับการสร้าง G-code

เมื่อได้ G-code เพื่อควบคุมเครื่องจักรแล้ว จึงนำมาใช้กับเครื่อง CNC ตามภาพที่ 3.8 เพื่อผลิตชิ้นงานให้มีความถูกต้อง รวดเร็ว แม่นยำ เครื่องมือที่สามารถสร้างได้ต้องมีความแม่นยำสูงเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ในการกัด การเจาะ ตัวเครื่องต้องมีความแข็งแรง เพื่อให้ได้รอยตัดชิ้นงานที่มีถูกต้องตามแบบ 100% ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาเครื่องกัดซีเอ็นซี ขึ้นมาใช้งานเองซึ่งเป็นเครื่องกัดขึ้นรูปวัสดุ 3 แกนแบบตั้งโต๊ะ (3 Axis CNC Milling Machine) สำหรับงาน 2D หรือ 3D สามารถกัดในแนวแกน XYZ ได้สูงสุดถึง 4000x7000x1000 มิลลิเมตร สามารถกัดวัสดุได้

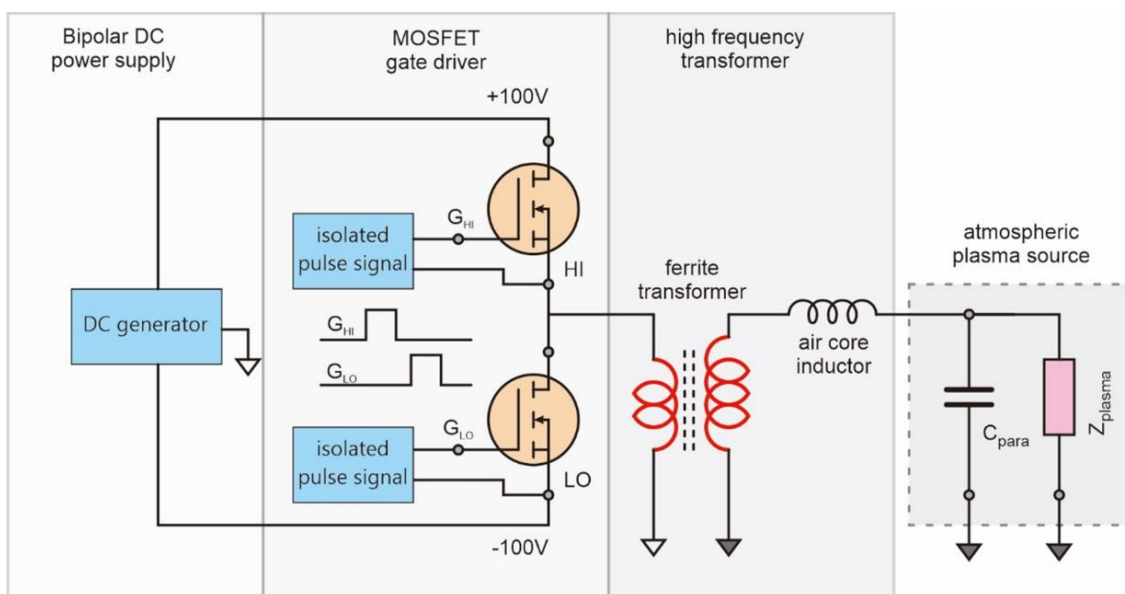
หลากหลาย ได้แก่ วัสดุทำต้นแบบ (Model) โฟม พลาสติก อะคริลิก โลหะอ่อน เป็นต้น พร้อมโปรแกรม CAD/CAM สำหรับออกแบบ และสั่งงานให้เครื่องกัด หรือแกะสลักชิ้นงานตามแบบ



ภาพที่ 3.6 เครื่องกัดซีเอ็นซีที่สร้างขึ้นเอง

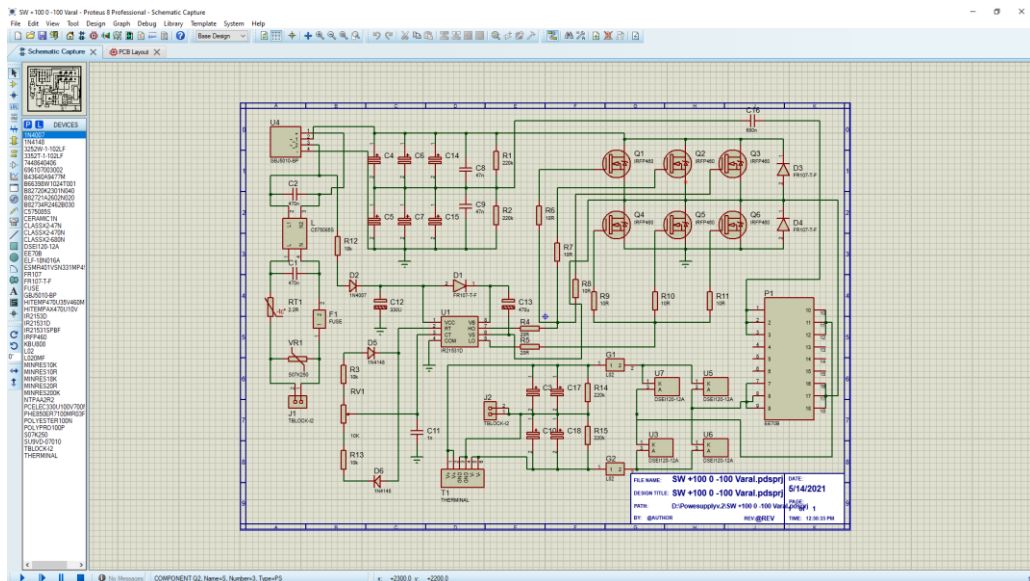
3.2 การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟสำหรับพลาสติก

แหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุสำหรับหัวกำเนิดพลาสติกที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งได้นำวงจรฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุ เนื่องจากมีข้อได้เด่นที่แรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะไม่นำกระแสค่อย เมื่อเทียบกับแรงดันอินพุต และยังช่วยในการลดผลของความไม่สมมาตรของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้ และสามารถปรับหาความถี่เรโซแนนซ์ที่เหมาะสมต่อลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด



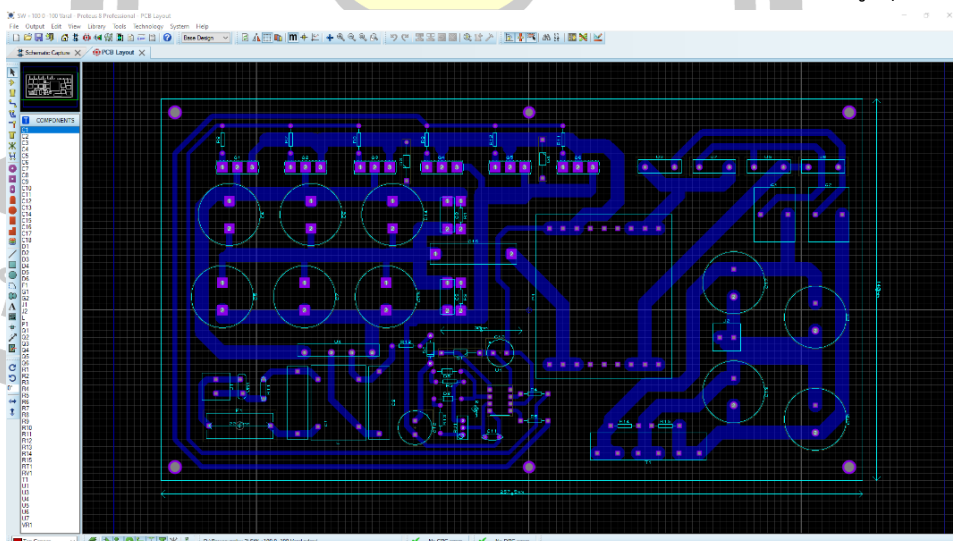
ภาพที่ 3.7 ไดอะแกรมแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงสำหรับพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ

โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบวงจร โดยใช้โปรแกรม Proteus โดยมีชื่อเต็มว่า Labcenter Electronics Proteus ซึ่งสามารถจำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้หลากหลายรูปแบบ ทั้งแบบแอนะล็อก (Analog) และดิจิทัล (Digital) และยังสามารถออกแบบออกแบบลายวงจรพิมพ์ Printed Circuit Board (PCB) ได้อีกด้วยหากมีข้อผิดพลาดสามารถแก้ไขหรือปรับปรุงในภายหลังได้ โดยสามารถเลือกใช้ปรับเปลี่ยนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องได้อย่างหลากหลายตามความต้องการ ลดความผิดพลาดที่เป็นอันตรายต่อผู้ทดลอง อีกทั้งยังลดการสูญเสียวัสดุสำหรับการทดลองที่มีข้อผิดพลาดได้ จุดเด่นของโปรแกรมคืออำนวยความสะดวกให้ผู้ออกแบบสามารถตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของวงจรได้ภายในโปรแกรม ก่อนการสร้างวงจรจริง เช่น รูปแบบการต่อวงจร การวางตำแหน่งของอุปกรณ์ เบอร์ของวงจรรวม Integrated circuit (IC) ทรานซิสเตอร์ (Transistor) ไดโอด (Diode) ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) เชื่อมต่อขาของอุปกรณ์เข้าด้วยกันเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีค่าพื้นฐานในวงจรที่รวบรวมไว้ใน Pick device และ Device libraries ดังเช่นในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบสวิทชิงเพาเวอร์ซัพพลาย (Switching power supply) สำหรับส่งกำลังไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าแรงดันได้ โดยมีแผนผังวงจร (Schematic capture) ดัง ภาพที่ 3.8 แผนผังวงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง สวิทชิงเพาเวอร์ซัพพลาย (0-200 V, 10A)



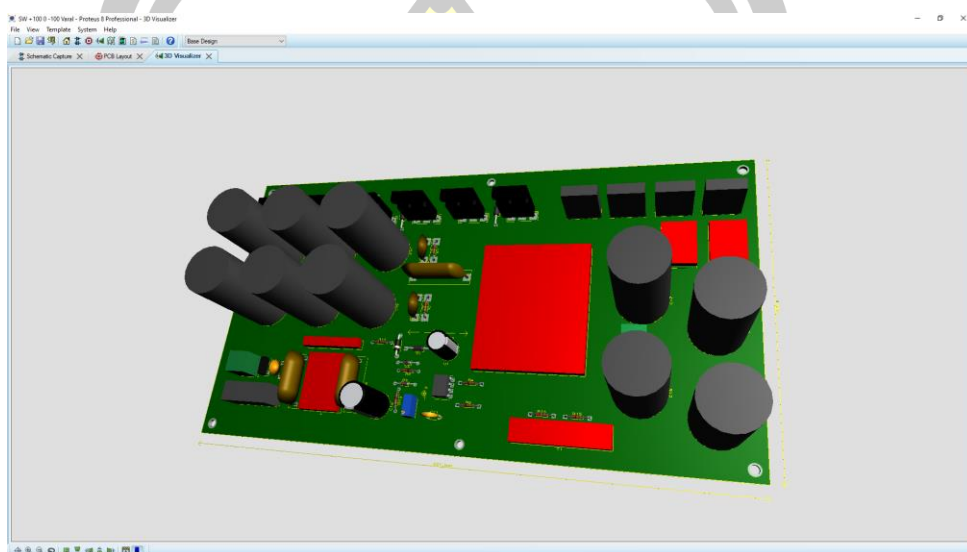
ภาพที่ 3.8 แผนผังวงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย (0-200 V, 10A)

ซึ่งเราจะเห็นได้ว่าเราสามารถกำหนดและการวางแผนในวงจรมีความสะดวกในการย้ายตำแหน่ง หรือปรับเปลี่ยนได้ด้วยการคลิกเมาส์เท่านั้น และโปรแกรมยังมีเครื่องมือเสมือนจริงสำหรับวัดค่าพื้นฐานให้ใช้งาน เช่น ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) โวลต์มิเตอร์ (Volt meter) แอมป์มิเตอร์ (Amp meter) เป็นต้น เมื่อได้แผนภาพวงจรแล้วโดยโปรแกรมสามารถแปลงมาเป็นลายวงจรสำหรับทำ PCB โดยการกำหนดการวางตำแหน่งอุปกรณ์ และการเชื่อมสายดังภาพที่ 3.9 ลายวงจรพิมพ์แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายแรงดัน 0-200 V กระแสสูงสุด 10 A



ภาพที่ 3.9 ลายวงจรพิมพ์แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายแรงดัน 0-200 V กระแสสูงสุด 10 A

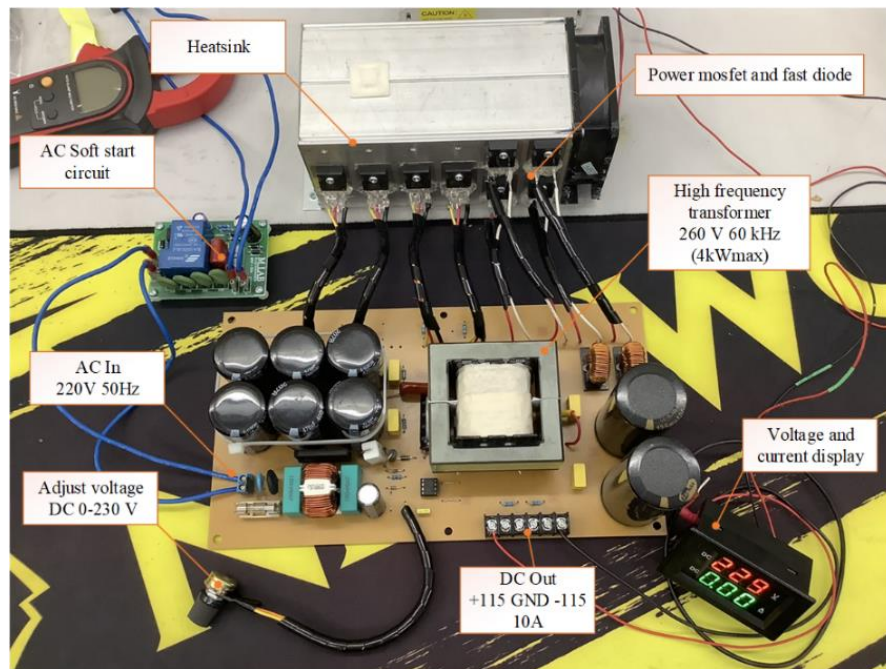
ขั้นตอนต่อมาเมื่อเราออกแบบลายวงจรพิมพ์เสร็จแล้วโปรแกรมสามารถแสดงในรูปแบบ 3 มิติ ที่จะจำลองและแสดงภาพเสมือนจริงขึ้นมา โดยรายละเอียดที่แสดงจะเหมือนของจริง ทำให้เห็นภาพรวมของแผ่น PCB ก่อนสร้างจริงดัง ภาพที่ 3.10 ภาพจำลอง 3 มิติ ของแหล่งจ่ายไฟกระแสดตรงแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย



ภาพที่ 3.10 ภาพจำลอง 3 มิติ ของแหล่งจ่ายไฟกระแสดตรงแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย

3.2.1 แหล่งจ่ายไฟกระแสดตรง

แหล่งจ่ายไฟกระแสดตรง (Direct current : DC) เป็นอุปกรณ์ที่แปลงไฟหลักกระแสสลับ (Alternating current : AC) ให้เป็นไฟ DC ใช้สำหรับจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ แหล่งจ่ายไฟ DC มีหลายรูปแบบซึ่งจะแตกต่างกันไป เช่น กำลัง ประสิทธิภาพ ขนาด และต้นทุน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในงานเฉพาะทาง สามารถจำแนกการทำงานได้เป็น 2 โหมด คือ แหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้น (linear) และโหมดสวิตซ์ (switch-mode) ซึ่งจะประสิทธิภาพมากกว่ามักเป็นที่นิยมสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการกำลังสูง ขนาดที่กะทัดรัด และมีประสิทธิภาพโดยอุปกรณ์เหล่านี้เมื่อทำการประกอบเพื่อทดสอบการทำงาน ดังภาพที่ 3.11 ซึ่งจะแสดงรูปแบบของชิ้นงานจริงของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย 220V 10A



11/05/64 Switch mode power supply (SMPS) EGAT & MSU (v.2)

ภาพที่ 3.11 สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายแรงดัน 220V กระแส 10A

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟตรง (DC generator) แบบสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย (Switching power supply) ที่สามารถปรับค่าแรงดันได้ในช่วง 0-230V จากภาพที่ 3.11 มีองค์ประกอบดังนี้

1 แผงระบายความร้อน (Heatsink) สำหรับระบายความร้อนทำให้อุปกรณ์หลักที่มีความร้อนสูง เช่น ไดโอดแบบฟื้นตัวเร็ว (Fast recovery diodes) และมอสเฟตกำลัง (Power-MOSFET) ไม่เกิดการเสียหายเนื่องจากความร้อนสะสมระหว่างการใช้งาน

2 วงจรซอฟต์แวร์สตาร์ทเตอร์ (AC Soft start circuit) เพื่อป้องกันไฟกระชากขณะเปิดเครื่องเพื่อป้องกันวงจรเสียหาย

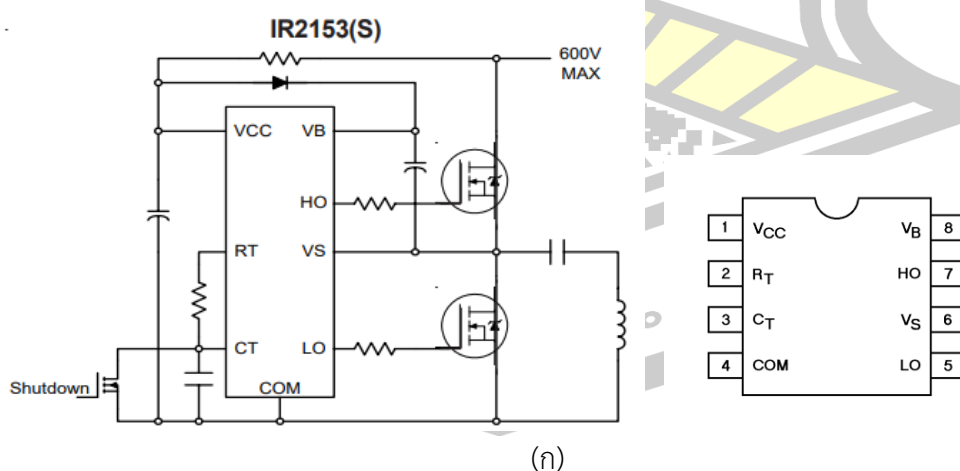
3 การปรับแรงดันไฟฟ้า (Adjust voltage) โดยการปรับ ดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) ในช่วง 0-50% ความถี่ทำงานที่ 60 kHz ทำให้สามารถกระแสและแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยได้

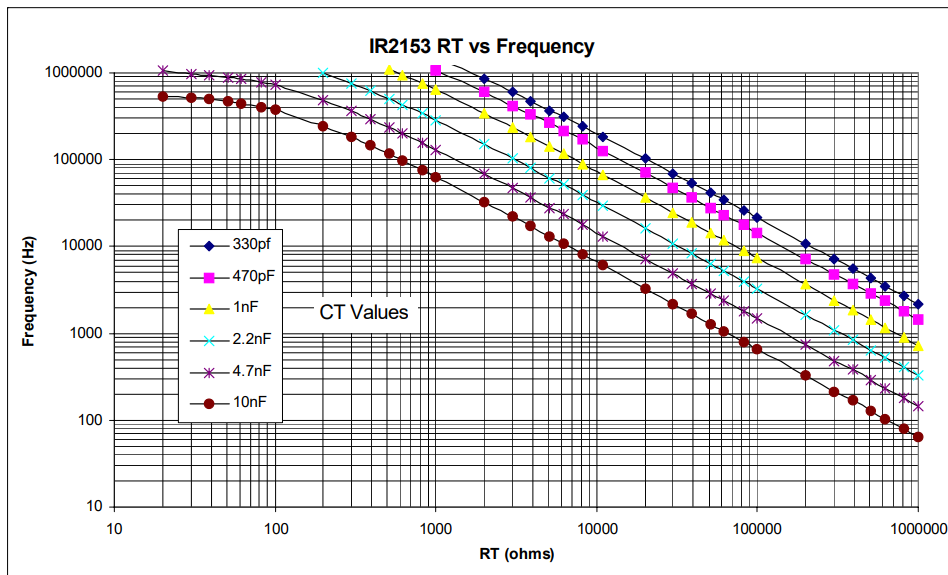
4 หม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งกำหนดความถี่ทำงานที่ 60 kHz โดยใช้แกนแกนเฟอร์ไรท์รุ่น EE70B รองรับกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 4 kW

5 ใช้ไดโอดแบบฟื้นตัวเร็วเบอร์ DSE120-12A และ มอสเฟตกำลังเบอร์ IRFP460

3.2.2 ส่วนกำเนิดสัญญาณ

ในการวิจัยนี้ส่วนแรกที่ทำคือการคือแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง(DC generator) สำหรับจ่าย ศักย์ไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าได้ในช่วง 0-200 V กระแสสูงสุด 10 A เพื่อส่งกำลังให้มอสเฟต (Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor: MOSFET) 2 ตัวซึ่งเป็นส่วยขยายกำลังซึ่งต่อใน รูปแบบโครงสร้างของวงจรฮาล์ฟ-บริดจ์ ที่สามารถปรับความถี่ได้จากวงจรสร้างคลื่นสัญญาณพัลส์ (Pulse signal generator) ได้ใช้โมดูลอิเล็กทรอนิกส์ IR2153(S) เพื่อใช้เป็นส่วนกำเนิดสัญญาณ (MOSFET gate driver) ตามภาพที่ 3.12 ภาพที่ (ก) การต่อวงจรโมดูล IR2153(S) (ข) กราฟแสดง ต่ออุปกรณ์เสริมเพื่อกำหนดความถี่และขนาดสัญญาณขาออก (ก) สำหรับสร้างสัญญาณพัลส์ โดยสามารถกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณ (f_0) ด้วยการกำหนดค่าส่วนประกอบ คือ ตัวต้านทาน (R_T) และตัวเก็บจุประจุ (C_T) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับความถี่พัลส์กับความถี่ ตามภาพที่ (ข) จะเห็นว่า เราสามารถปรับความถี่ได้จากการปรับค่าความต้านทานหรือค่าความจุประจุ หากใช้ค่าความจุคงที่ แล้วใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ก็จะทำให้เราสามารถปรับความถี่ได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับปรับหา ความถี่เรโซแนนซ์ ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่สูงและได้ ศักย์ไฟฟ้าสูง ซึ่งอยู่ในช่วง 1-20KV และความถี่ในช่วง 50-200 kHz จึงต้องใช้หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท์ซึ่งเป็นหม้อแปลงสำหรับงานความถี่สูงหรือเรียกได้ว่าเป็นหม้อแปลงความถี่สูง (high frequency transformer) โดยเอาต์พุตต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ (Air core inductor) ซึ่งเป็นส่วน ในการสร้างไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ (AC High voltage) สำหรับหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดัน บรรยากาศ (Atmospheric pressure plasma source)





(ข)

ภาพที่ 3.12 ภาพที่ (ก) การต่อวงจรโมดูล IR2153(S) (ข) กราฟแสดงต่ออุปกรณ์เสริมเพื่อกำหนด
ความถี่และขนาดสัญญาณขาออก



3.2.3 หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท์

หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังไฟฟ้า จากฝั่งขดลวดปฐมภูมิไปฝั่งขดลวดทุติยภูมิ ผ่านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กในแกนหม้อแปลง หม้อแปลงแกนเหล็กตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ในย่าน 100 Hz ในขณะที่หม้อแปลงเฟอร์ไรท์ตอบสนองในย่าน > 1 kHz ความถี่ของการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กในแกนหม้อแปลงเป็นตัวแปรสำคัญอันดับแรกที่ต้องพิจารณาในการออกแบบหม้อแปลง

พิจารณาฟังก์ชันกำลังไฟฟ้า P_2 ที่ส่งผ่านหม้อแปลงอุดมคติไปยังโหลด จากศักย์ไฟฟ้า V_2 และกระแสไฟฟ้า I_2 ของขดลวดทุติยภูมิ

$$P_2 = V_2 I_2 \quad (3.1)$$

ศักย์ไฟฟ้า V_2 ของขดลวดทุติยภูมิจำนวน N_2 ขด ถูกเหนี่ยวนำจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็ก B ในแกนหม้อแปลงที่มีพื้นที่หน้าตัด A_c

$$V_2 = N_2 \frac{d(BA_c)}{dt} \quad (3.2)$$

ถ้ากำหนดให้ความเข้มสนามแม่เหล็ก B ในแกนหม้อแปลง มีฟังก์ชันเป็น

$$B(t) = B_0 \sin(2\pi ft) \quad (3.3)$$

ดังนั้น

$$V_2 = N_2 A_c B_0 2\pi f \cos(2\pi ft) \quad (3.4)$$

ในขณะที่กระแสไฟฟ้า I_2 ที่ไหลผ่านขดลวดทุติยภูมิและโหลด สัมพันธ์กับกระแส I_1 ของขดลวดปฐมภูมิจำนวน N_1 ขด คือ

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 \quad (3.5)$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้า P_2 ที่ส่งผ่านหม้อแปลงอุดมคติไปยังโหลดจึงพิจารณาตามสมการ

$$P_2 = N_1 I_1 B_0 A_c 2\pi f \cos(2\pi ft) \quad (3.6)$$

พิจารณา กำลังที่ส่งผ่าน P_2 ต่อพื้นที่หน้าตัดแกน A_c (ขนาดหม้อแปลง)

$$\frac{P_2}{A_c} \propto f \quad (3.7)$$

จากสมการข้างต้น อัตราของกำลังที่ส่งผ่านต่อขนาดหม้อแปลง (ซึ่งพิจารณาจากพื้นที่หน้าตัดแกน A_c) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความถี่ f ดังนั้นการใช้หม้อแปลงเพอร์โรที่ความถี่สูงจะสามารถช่วยลดขนาดและน้ำหนักของแหล่งจ่ายไฟได้อย่างมีนัยสำคัญ 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 คือ จำนวนขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ

จำนวนขดลวดปฐมภูมิ N_1 คำนวณได้จากสมการ

$$N_1 \approx \frac{U_p}{2\pi f B_0 A_c} \quad (3.8)$$

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 รอบจากนั้นกำหนดศักย์ทุติยภูมิสูงสุด โดยใช้ค่า 3000 V สามารถคำนวณ จำนวนขดลวดทุติยภูมิ N_2 ได้ประมาณ 350 รอบ

การที่จะออกแบบแหล่งจ่ายไฟให้ได้ตามความต้องการเพื่อที่จะกำหนดคุณสมบัติของพลาสมานั้นทำได้ยาก เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการจุดพลาสมาจะถูกกำหนดโดยสภาวะแบบไดนามิก (Dynamic state) ของสถานะพลาสมา ซึ่งจะได้รับผลกระทบโดยตรงจากแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความดันของแก๊ส จึงไม่สามารถวิเคราะห์แยกแบบอิสระได้

พหุ ประถม วิทยาลัย

3.3 ทดสอบการทำงานของระบบพลาสมา

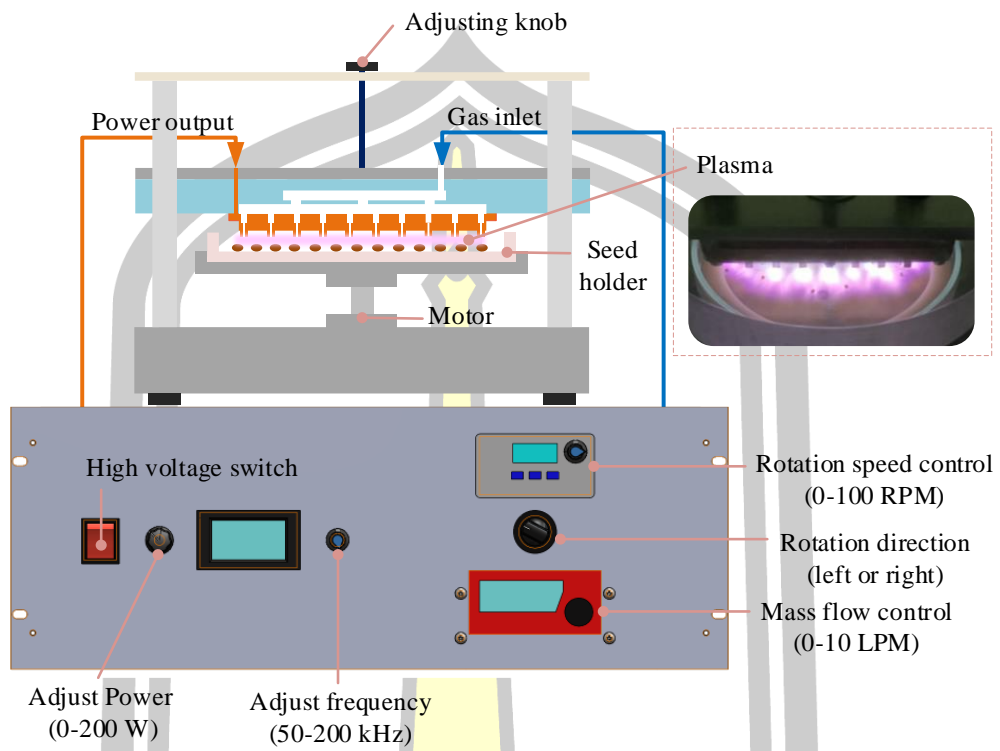
ในขั้นตอนการจุดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศนั้นการใช้แก๊สตั้งต้นหลักในการจุดพลาสมา มักนิยมใช้แก๊สอาร์กอนหรือแก๊สฮีเลียมซึ่งเป็นข้อจำกัด แต่ในงานวิจัยนี้การพัฒนาระบบที่สามารถเลือกใช้แก๊สที่มีความหลากหลาย เช่น อาร์กอน ออกซิเจน ไนโตรเจน และอากาศ ในขณะที่แก๊สที่เกิดปฏิกิริยา (Active gases) เนื่องจากในอากาศประกอบด้วยไนโตรเจน ออกซิเจน และไอน้ำ ที่เมื่อแตกตัวแล้วจะมีอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจำนวนมาก จึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการจุดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศเพื่อการปรับเปลี่ยนพื้นผิวโดยมีอุปกรณ์หลักดังนี้

3.3.1 วัสดุอุปกรณ์

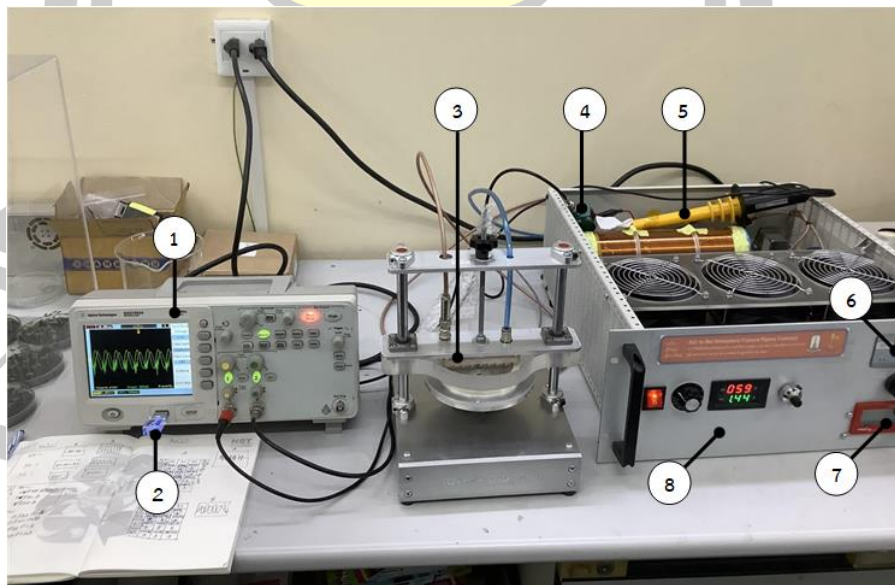
1. อุปกรณ์ประกอบหัวพลาสมา
2. ถังแก๊ส อาร์กอน ออกซิเจน ไนโตรเจน และอากาศ ซึ่งเป็นแก๊สเกรดอุตสาหกรรม ที่มีเรกกูเรเตอร์พร้อมวาล์วเปิด-ปิด
3. แหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุช่วง 50-200 kHz 200 W
4. ข้อต่อไฟแรงดันสูง
5. เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส
6. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)
7. สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer)
8. คอมพิวเตอร์ (Computer)
9. โพรบวัดกระแส (Current probe)
10. โพรบวัดแรงดัน (Voltage probe)

3.3.2 วิธีการทดสอบ

เริ่มจากเชื่อมต่อแก๊สและระบบไฟเข้าระบบพลาสมาที่ได้ทำการออกแบบ ปรับอัตราการไหลของแก๊สแล้วทำการปรับศักย์ไฟฟ้าเพิ่มให้กับหัวกำเนิดพลาสมา แล้วทำการบันทึกผลด้วยเครื่องมือวัดอัตราการไหลของแก๊ส กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมา ดังแสดงตามภาพที่ 3.13 ซึ่งเป็นไดอะแกรมการทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสมา แล้วทำการบันทึกผลการทดลองดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.13 แสดงองค์ประกอบของระบบทดสอบการทำงานหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ



ภาพที่ 3.14 ภาพถ่ายเครื่องมือวัดของระบบหัวกำเนิดพลาสมา ในการบันทึกผลการทดลอง

ในขั้นตอนการทดสอบมีอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่สำคัญ 8 ส่วน ดัง ซึ่งมีรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้แต่ละชิ้น ดังนี้

① **ออสซิลโลสโคป** ใช้บันทึกแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งออสซิลโลสโคปสามารถวัดค่าและบันทึกข้อมูลเพื่อนำมาพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงที่ถูกต้องและแม่นยำ

② **ยูเอสบีแฟลชไดรฟ์** เพื่อเก็บข้อมูลที่ได้จากการวัดเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อยอดด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์

③ **หัวกำเนิดพลาสมา** โดยหัวกำเนิดพลาสมาแบบ DBD like plasma jet ต่อกับสายแก๊สที่ผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล และขั้วไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุที่ติดตั้งโพรบวัดกระแส และแรงดันไว้

④ **โพรบวัดกระแส** ใช้สำหรับเก็บข้อมูลกระแสที่ทำให้เกิดพลาสมาที่เงื่อนไขต่างกัน

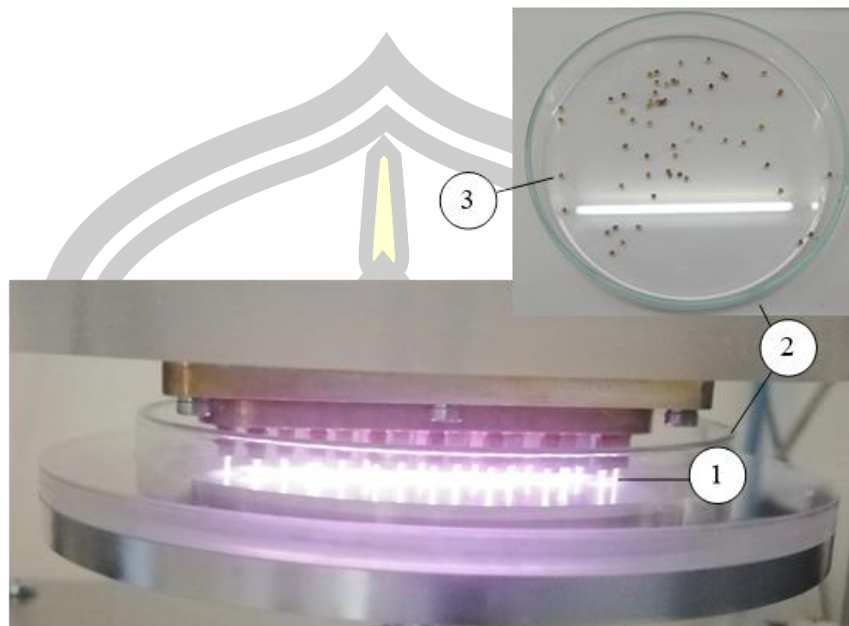
⑤ **โพรบวัดแรงดัน** ใช้สำหรับเก็บข้อมูลแรงดันที่ทำให้เกิดพลาสมาที่เงื่อนไขต่างกัน

⑥ **ตัวปรับความเร็วมอเตอร์** ใช้สำหรับปรับความเร็วรอบการหมุนเพื่อให้พลาสมากวาดผ่านจานใส่เมล็ดพันธุ์ได้อย่างทั่วถึง

⑦ **ชุดควบคุมอัตราการไหล** ซึ่งสามารถควบคุมและอ่านค่าอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนในช่วงช่วง 0-10 lpm

⑧ **แหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุ** ที่สามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 50-500 kHz จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 2 kW

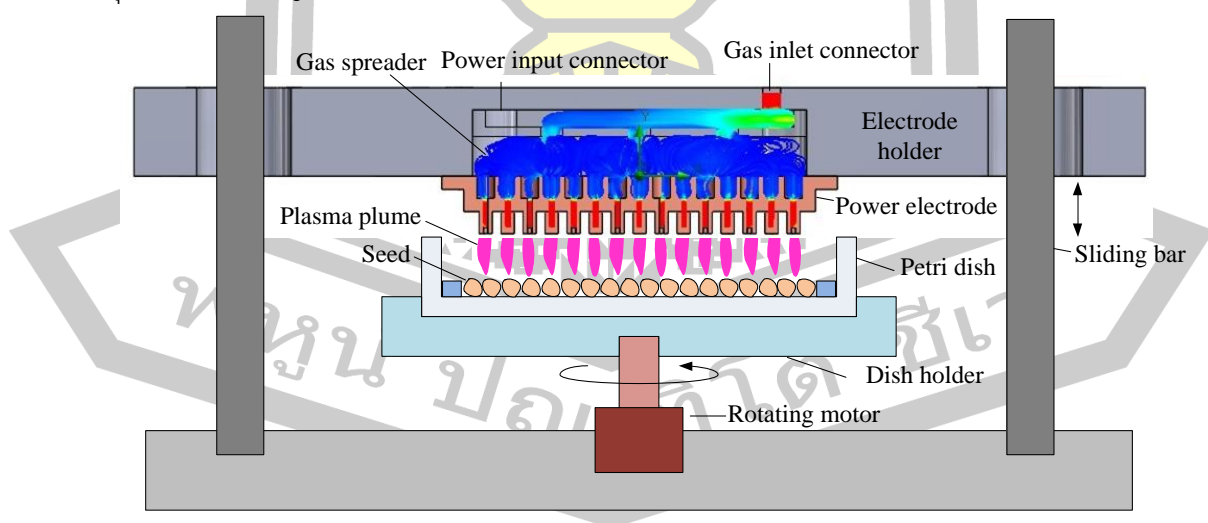
เมื่อทำการทดสอบการทำงานของหัวพลาสมาฯ และปรับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนกำลังไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างเมล็ดพันธุ์กับหัวพลาสมาให้มีความเหมาะสมแล้ว ในขั้นตอนต่อไปคือการนำหัวพลาสมาไปปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0.5 lpm กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 1 kW ความถี่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 75 kHz ซึ่งเป็นค่าที่ลำพลาสมาติดอย่างสม่ำเสมอ โดยอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ฟ้าทะลายโจรประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ตามหมายเลข 1 2 และ 3 ในภาพที่ 3.15 ดังนี้



ภาพที่ 3.15 ภาพถ่ายขณะทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสมา

ขณะทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสมามีอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่สำคัญ 3 ส่วน ซึ่งมีรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้แต่ละชิ้น ดังนี้

- ① ลำพลาสมา ส่วนนี้ คือ ลำพลาสมาที่มีลักษณะเป็นเส้นที่ยืดลงไปบนผิวเมล็ดพันธุ์
- ② เมล็ดพันธุ์ เป็นเมล็ดพืชหลายใจ ซึ่งบรรจุอยู่ในภาตใส่เมล็ดพันธุ์
- ③ ภาตใส่เมล็ด ใช้สำหรับใส่เมล็ดพันธุ์แต่ละชนิด เพื่อให้เกิดการปรับปรุงอย่างทั่วถึงและตรงจุดที่มีความสำคัญต่อการงอก



ภาพที่ 3.16 แบบร่างระบบพลาสมา DBD like plasma jet สำหรับปรับปรุงเมล็ดพันธุ์

จากภาพที่ 3.16 แบบร่างระบบพลาสมา DBD like plasma jet สำหรับการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ จะแสดงภายในการทำงานโดยจะพบว่า เมื่อเราทำการจ่ายแก๊สเข้าไปภายในแก๊สจะถูกกระจายไปยังชั้นกระจายแก๊สก่อนก็จะไหลลงมาที่ขั้วกำลังซึ่งจะมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm และส่วนปลายมีขนาด 1 mm เมื่อแก๊สไหลผ่านส่วนปลายขั้วกำลังซึ่งมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูง จะทำให้แก๊สได้รับพลังงานกระตุ้นและสะสมพลังงานจนแก๊สเกิดการแตกตัวเป็นลำพลาสมาพุ่งลงใส่เมล็ดพันธุ์ที่อยู่ด้านล่างที่มีจานแก้ว ซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกทรงรับอยู่โดยจะวางอยู่บนขั้วกราวด์ที่ยึดกับแกนของมอเตอร์ที่สามารถหมุนได้ โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วนดังนี้

1. จานเพาะเชื้อ (Petri dish) ชั้นส่วนนี้ทำจากแก้วไพเร็กซ์ (Pyrex glass) ทำหน้าที่เป็นชั้นฉนวน (Dielectric) และเป็นภาชนะใส่เมล็ดพันธุ์ ซึ่งสามารถสวมกับฐานรองจานเพาะเชื้อได้พอดี สามารถป้องกันการอาร์ค (Arc) ระหว่างขั้วกำลังและขั้วกราวด์
2. ฐานรองจานเพาะเชื้อ (Dish holder) ชั้นส่วนนี้ขึ้นรูปจากแผ่นอะลูมิเนียมเกรด 6061 สามารถสวมเข้ากับจานเพาะเชื้อได้พอดี ทำหน้าที่เป็นขั้วกราวด์
3. มอเตอร์หมุนชิ้นงาน (Rotating motor) สามารถปรับความเร็วรอบได้ ทำให้เมล็ดพันธุ์กระจายตัวและถูกลำพลาสมาทั่วถึงมากขึ้น
4. แกนยึดหัวพลาสมา (Sliding bar) ทำหน้าที่ยึดหัวพลาสมาและสามารถปรับความสูงต่ำโดยการเลื่อนขึ้นลงได้ชั้นส่วนนี้ทำจากแผ่นอะลูมิเนียม (Aluminum) ถูกเจาะเป็นรูให้สามารถสวมเข้ากับท่อเทฟลอน ด้านล่างของชั้นที่ 1 ได้พอดี ขั้วกราวด์จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับกราวด์ของแหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุ
5. ส่วนยึดขั้วไฟฟ้า (Electrode holder) ชั้นส่วนนี้ทำจากแผ่นอะคริลิก ทำหน้าที่เป็นห้องบรรจุและกระจายแก๊ส (Gas spreader) เข้ารูแก๊สของขั้วไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ มีรูสำหรับต่อท่อแก๊สอาร์กอนเข้า (Gas inlet connector) และเป็นตัวยึดข้อต่อไฟเข้า (Power input connector)
6. ขั้วกำลัง (Power electrode) ชั้นส่วนนี้ขึ้นรูปจากแผ่นอะลูมิเนียมเกรด 6061 ทำหน้าที่เป็นขั้วกำลัง และเป็นหัวพลาสมาพลาสมา (Plasma plume) ถูกออกแบบให้เป็นรูในแนวยาว

การออกแบบชิ้นส่วนด้วยคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถปรับปรุงรูปแบบและลักษณะการทำงานของชิ้นส่วนย่อยให้สอดคล้องกัน และสามารถแยกชิ้นส่วนหรือทำการประกอบใหม่ หากพบ

ข้อบกพร่องซึ่งสามารถมองในมุมมองได้รอบทิศ และภาพตัดขวาง (Cross-sectional) ที่แสดงมุมมองภายในของแบบจำลองพลาสมาที่มีลักษณะการจัดเรียงที่มีความซับซ้อนมากได้ โดยที่การกำหนดขนาดและตำแหน่งจึงต้องแม่นยำชัดเจนและสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความต้องการ ดังนั้นการใช้คอมพิวเตอร์ เพื่อการออกแบบจึงเป็นเครื่องมือสมัยใหม่ที่ได้รับการนิยมนำมาใช้อำนวยความสะดวกในการออกแบบ และยังสามารถใช้ภาพที่ได้เพื่อการนำเสนอหรือสื่อสารให้คนอื่นเข้าใจได้โดยไม่ต้องจำเป็นต้องขึ้นรูปชิ้นงานจริง

3.4 การวินิจฉัยพลาสมา

3.4.1 การหาค่ากำลังไฟฟ้าที่หัวกำเนิดพลาสมา

วิธีที่นิยมใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้จุดพลาสมา คือ ผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า จากนิยามและการแปลงค่ากำลังงานชั่วขณะ (Instantaneous power) และกำลังงานเฉลี่ย กำลังงานชั่วขณะ $p(t)$ ที่ดูดซับด้วยอุปกรณ์เป็นผลคูณของแรงดันชั่วขณะ $v(t)$ ที่ตกคร่อมอุปกรณ์กับกระแสไฟฟ้าชั่วขณะ $i(t)$ ที่ไหลผ่านอุปกรณ์แบบพาสซีฟ (Passive) จะได้ว่า

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (3.9)$$

โดยยังเป็นพลังงานที่อุปกรณ์ได้ดูดซับต่อเวลา หรือเรียกว่ากำลังชั่วขณะหนึ่ง มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watts) เมื่อพิจารณาวงจรที่ถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณรูปไซน์ถ้าให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าเป็น

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v) \quad (3.10a)$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i) \quad (3.10b)$$

โดย V_m และ I_m เป็นขนาดสูงสุด θ_v , θ_i เป็นมุมเฟส (Phase) ของแรงดันและกระแสไฟฟ้างั้นกำลังงานชั่วขณะก็คือ

$$p(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \theta_v) \cos(\omega t + \theta_i) \quad (3.11)$$

จัดรูปสมการโดยใช้เอกลักษณ์ตรีโกณมิติได้ว่า

$$p(t) = \frac{1}{2} V_m I_m [\cos(\theta_v - \theta_i) \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i)] \quad (3.12)$$

จากสมการ (3.12) พบว่าสมการมีส่วนที่เป็นค่าคงที่ และส่วนที่ขึ้นกับเวลาซึ่งเป็นฟังก์ชันโคไซน์ ส่วนนี้เมื่อนำไปหาค่าเฉลี่ยจะมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากมีค่าทั้งซีกบวกและลบจึงสามารถเขียนได้ว่า

$$p(t) = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (3.13)$$

จากนิยาม กำลังงานเฉลี่ยในหน่วยวัตต์ คือการเฉลี่ยของกำลังงานชั่วขณะในช่วงหนึ่งคาบเวลา

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (3.14)$$

แทนสมการ (3.13) ใน (3.14) จะได้ว่า

$$\bar{P} = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) \frac{1}{T} \int_0^T dt \quad (3.15)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (3.16)$$

เนื่องจากว่า $\cos(\theta_v - \theta_i) = \cos(\theta_i - \theta_v)$ สรุปได้ว่าส่วนที่สำคัญจึงเป็นผลต่างของมุมเฟส (Phase angle) ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้า โดยโหลดแบบความต้านทาน R จะดูดซับกำลังงานอยู่ตลอดเวลา ในขณะที่โหลดแบบรีแอกทีฟ (Reactive) (L หรือ C) จะมีการดูดซับเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังนั้นการใช้แนวคิดของค่าประสิทธิผล (rms Value or Effective Value) โดยเป็นการวัดกำลังงานไปยังโหลดความต้านทานจะบ่งบอกถึงกำลังงานจริงที่ทำให้เกิดพลาสมา ซึ่งมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์กราฟแรงดันแทนด้วย $v^2(t)$ และกระแสแทนด้วย $i^2(t)$ ซึ่งได้จากวัดค่าด้วยการใช้ออสซิลโลสโคป จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์การหาลำดับงานเฉลี่ยในหน่วยวัตต์ตามสมการ

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (3.17a)$$

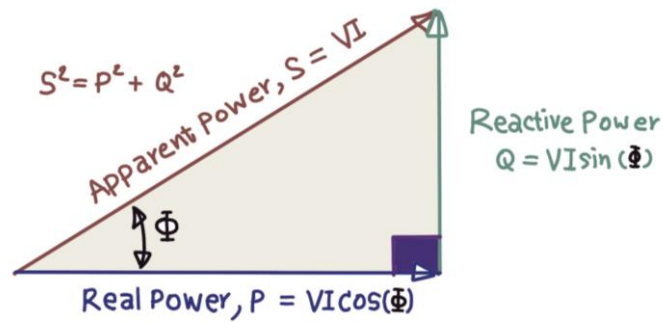
$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (3.17b)$$

ดังนั้นเราสามารถหาลำดับงานเฉลี่ยที่ส่งไปให้โหลดในวงจรไฟสลับที่สถานะคงที่ เขียนได้เป็น

$$\bar{P} = V_{rms} I_{rms} \cos(\theta_v - \theta_i) = V_{rms} I_{rms} \cos(\Phi) \quad (3.18)$$

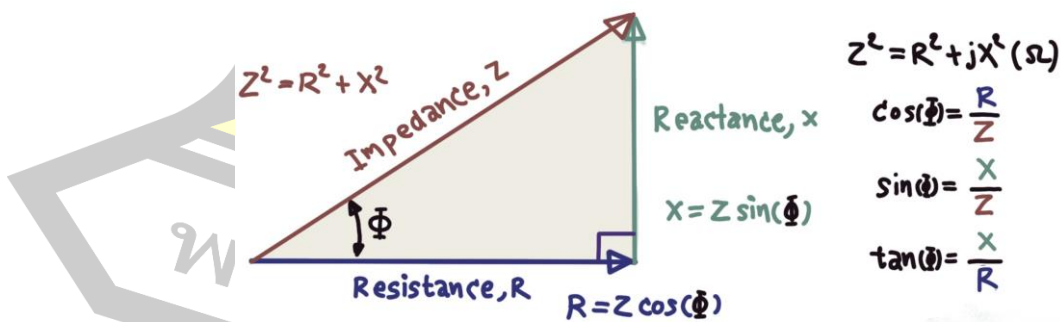
เนื่องจาก $\cos(\theta_v - \theta_i) = \cos(\Phi)$ คืออัตราส่วนของกำลังเฉลี่ยต่อกำลังปรากฏ (Apparent power) หรือนิยมเรียกว่าตัวประกอบกำลัง (Power factor : PF) การพิจารณา กำลังไฟฟ้าในวงจรกระแสสลับได้จากสามเหลี่ยมกำลัง (Power triangle) ซึ่งแสดงรูปสามเหลี่ยมมุมฉากที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง (Real power) กำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive power) บางครั้งเรียกว่า กำลังไฟฟ้าแบบไม่มีวัตต์ คือ พลังงานที่ใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่ได้ทำงานที่เป็นประโยชน์ใด ๆ แต่มีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนเฟส (Phase shift) ระหว่างรูปคลื่นแรงดันและกระแส และกำลังปรากฏ เป็นผลคูณจากกระแสและแรงดันซึ่งมีหน่วยเป็น โวลต์ - แอมแปร์ (VA) เป็นที่รู้จักกันทั่วไปว่าเป็นพลังงานที่เห็นได้ชัด เนื่องจากนี่คือพลังงานทั้งหมดที่ใช้โดยวงจรแม้ว่าพลังงานจริงที่ทำงานจะน้อยกว่ามาก ส่วนพลังงานที่ใช้จริง (Real power) ซึ่งเป็นกำลัง

งานเฉลี่ยของความต้านทานเช่นเดียวกันกับกรณีที่มีกระแสไฟตรงไหลผ่านตัวต้านทาน เราสามารถพิจารณากำลังงานแบบต่าง ๆ ได้ดังภาพ 3.17 และ 3.18



ภาพที่ 3.17 ความสัมพันธ์ของสามเหลี่ยมกำลัง

เมื่อ P คือกำลังไฟฟ้าจริงที่ทำงานวัดเป็นวัตต์ (Watts, W)
 Q คือกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มีหน่วยวัดเป็นโวลต์-แอมแปร์รีแอกทีฟ (Volt-amperes reactive, Var)
 S คือกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏมีหน่วยวัดเป็น โวลต์-แอมแปร์ (Volt-amperes, VA)
 Φ คือมุมเฟสเป็นองศา ยิ่งมุมเฟสมีขนาดใหญ่มากเท่าใดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟก็จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น
 ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างความต้านทาน รีแอกแตนซ์ และอิมพีแดนซ์สามารถแสดงได้ด้วยการใช้สามเหลี่ยมอิมพีแดนซ์ดังที่แสดง



ภาพที่ 3.18 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างความต้านทาน รีแอกแตนซ์ และอิมพีแดนซ์

โดยอิมพีแดนซ์ ซึ่งเป็นผลรวมเวกเตอร์ของความต้านทานและรีแอกแตนซ์ ไม่เพียงแต่มีขนาด (Z) แต่ยังมีมุมเฟส (Φ) ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างของเฟสระหว่างค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ โดยรูปสามเหลี่ยมจะเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอกแตนซ์ (X) เมื่อความถี่เปลี่ยนไป โดยค่าความต้านทาน (R) จะคงที่เสมอ

3.4.2 การวิเคราะห์พลาสมาจากลักษณะทางสเปกตรัม

เทคนิคการวัดสเปกตรัมแสงใช้เพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งพีคของสเปกตรัมจากแหล่งกำเนิดแสง เนื่องจากการปล่อยสเปกตรัมสามารถใช้เพื่อศึกษาคุณสมบัติของและองค์ประกอบได้ ด้วยการวัดสเปกตรัมทางแสง (Emission spectroscopy) โดยใช้ความยาวคลื่น ที่ปล่อยออกมาจากพลาสมา จะถูกส่งผ่านเครื่องสเปกโตรมิเตอร์เพื่อวิเคราะห์ สเปกโตรมิเตอร์จะวัดความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมาและแสดงค่าที่ความยาวคลื่นในช่วง 300-1100 nm เพื่อที่จะระบุองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดพลาสมาซึ่งเป็นสถานะของสสารที่แก๊สกลายเป็นไอออน เมื่อพลาสมาถูกกระตุ้นโดยแหล่งพลังงาน สามารถมีความยาวคลื่นได้ตั้งแต่ย่านอัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงอินฟราเรด แสงที่ปล่อยออกมาสามารถให้เพื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิ และองค์ประกอบของพลาสมา ตลอดจนกลไกการถ่ายโอนพลังงาน และกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในพลาสมา เพื่อที่จะวิเคราะห์หรือทำนายการเกิดของอนุภาคลิสรสที่ สามารถเกิดขึ้นได้ในพลาสมาซึ่งทำงานที่ความความดันบรรยากาศ ดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 การตรวจวัดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศที่เกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลแก๊สเป็นพลาสมา

จากภาพโดยการให้พลังงานไฟฟ้าด้วยการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงไปยังขั้วอิเล็กโทรดที่มีแก๊สอยู่ระหว่างขั้วซึ่งเป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงโมเลกุลของแก๊สซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นองค์ประกอบจึงมีการตอบสนองก่บการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าซึ่งแก๊สจะเกิดการชนกันและถ่ายเท

โมเมนต์ให้กับเวเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence electron) ซึ่งมีส่วนร่วมในการสร้างพันธะเคมี หากได้รับพลังงานกระตุ้นที่มากพอที่จะทำให้ลายพันธะได้จึงเกิดการแตกตัวของโมเลกุลแก๊สเป็นอนุภาคลอิสระ

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลแสงพลาสมาด้วยสเปกโตรมิเตอร์ที่ผลิตโดยบริษัท AvaSpec รุ่น ULS4096CL-EVO สเปกโตรมิเตอร์ความละเอียดสูงเนื่องจากการใช้ CMOS แทนเทคโนโลยี CCD แบบเดิม ซึ่งให้ด้วยความละเอียดที่ 4096 พิกเซล สเปกโตรมิเตอร์เหล่านี้ได้รับการปรับแต่งสำหรับการใช้งานที่มีความละเอียดสูงเหมาะสมต่อการวัดคุณสมบัติของพลาสมา และเลนส์สามารถตรวจจับแสง (Detector collection lens) ในช่วง 200 ถึง 1100 นาโนเมตร ซึ่งแสงจะถูกส่งผ่านสายไฟเบอร์ออปติกไปยังอุปกรณ์รับแสง สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB ซึ่งจะทำงานโดยใช้ซอฟต์แวร์ AvaSoft เวอร์ชัน 8 โดยคุณสมบัติตัวเครื่องสรุปได้ดังตาราง

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทางเทคนิค AvaSpec รุ่น ULS4096CL-EVO

Wavelength range	200-1100 nm
Resolution	0.05-20 nm, depending on configuration
Stray light	0.19-1.0%, depending on grating
Sensitivity in counts/ μ W per ms	218,000
integration time	
Detector	CMOS linear image sensor
Integration time	9 μ s-40 sec
Sample speed with on-board averaging	0.70 ms/scan



ภาพที่ 3.20 สเปกโตรมิเตอร์ที่ผลิตโดยบริษัท AvaSpec รุ่น ULS4096CL-EVO

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขและค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

ตัวแปร	ปริมาณ
จำนวนครั้งที่ข้อมูลถูกเก็บแล้วแสดงผลแบบเฉลี่ย	5
เวลาในการเก็บข้อมูลแต่ละครั้ง (ms)	1000
ช่วงความยาวคลื่นสแกน (nm)	200-1100
ความละเอียดสูงสุดในการระบุตำแหน่งพีค (nm)	0.3

โดยทำการตรวจวิเคราะห์พีค (Peak identification) เพื่อระบุชนิดของสปีชีส์ที่คายพลังงานออกมาโดยการนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลออนไลน์ในเว็บไซต์ NIST Atomic Spectra Database Lines Data ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งพีคที่สอดคล้องกับสปีชีส์ที่คายพลังงานออกมาในช่วงความยาวคลื่น 300-1100 nm

สามารถสรุปชนิดสปีชีส์ที่ตรวจพบได้ ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการของโบลทซ์มานน์ (Boltzmann's law) โดยความหนาแน่นของอะตอม N_i ที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงาน E_i ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของอิเล็กตรอน T สามารถหาได้จาก

$$N_i = N \frac{g_i}{U(T)} e^{-E_i/k_B T} \quad (3.19)$$

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

$$U(T) = \sum_i g_i e^{-E_i/k_B T} \quad (3.20)$$

ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนมีการคายพลังงานจากระดับพลังงาน j ไปอยู่ที่ระดับพลังงาน i สัดส่วนความหนาแน่นอะตอมที่สอดคล้องกับระดับพลังงานทั้งสอง คือ

$$\frac{N_j}{N_i} = \frac{g_j}{g_i} e^{-(E_j - E_i)/k_B T} \quad (3.21)$$

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

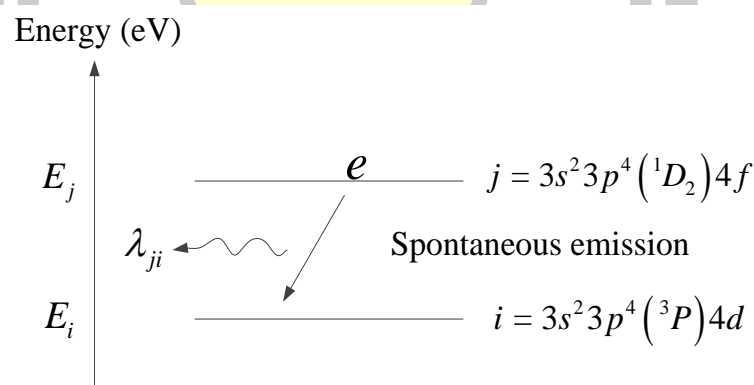
$$\lambda_{\text{detected}} = \frac{hc}{E_j - E_i} \quad (3.22)$$

ในรูปของความเข้มเส้นสเปกตรัม (Line intensity) ที่ตรวจวัดได้เนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงาน j ไปอยู่ที่ระดับพลังงาน i จะหาได้จาก

$$I_{ji} = \frac{N}{U(T)} g_j A_{ji} \frac{hc}{\lambda_{ji}} e^{-E_j/k_b T} \quad (3.23)$$

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

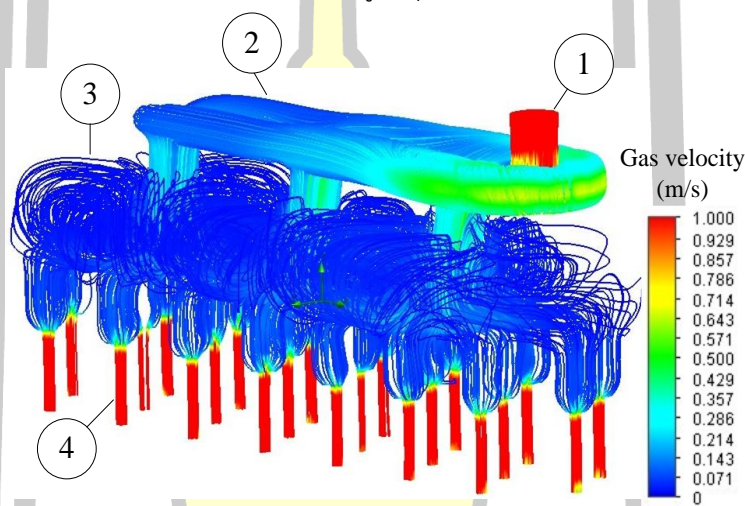
ตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมที่ตรวจพบจากเส้นสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ทแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ พบว่าสามารถตรวจพบข้อมูลสเปกตรัม ทั้ง Ar I Ar II และ O IV ภาพที่ 3.21 แสดงตัวอย่างการเกิดปรากฏการณ์ Spontaneous emission ที่ได้แสดงการปลดปล่อยโฟตอนของ Ar II ที่ความยาวคลื่น 616.85 nm



ภาพที่ 3.21 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมอาร์กอนโดยการปลดปล่อยโฟตอนที่ความยาวคลื่น (Ar II) = 616.85 nm

3.4.3 การจำลองการไหลของแก๊สผ่านหัวพลาสมา

ผลการจำลองการไหลของแก๊สผ่านหัวพลาสมาเจ็ทแบบหลายรู เพื่อทดสอบการทำงานบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Solid work flow simulation ก่อนการสร้างจริงซึ่งเป็นการจำลองหาความเร็วของแก๊สอาร์กอนที่ไหลผ่านรู จากรูจ่ายแก๊สด้านบน 1 รู ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4 mm แล้วกระจายออกตามท่อเล็กที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 mm จำนวนหลายรูที่อยู่ด้านล่าง โดยโปรแกรมจะแสดงแนวโน้มความเร็วด้วยเส้นเฉดสี สีน้ำเงินแทนความเร็วแก๊สมีค่าต่ำสุด และไล่ระดับสีจนถึงเส้นสีแดง ซึ่งแสดงความเร็วแก๊สมีค่าสูงที่สุด ดังแสดงตามภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 จำลองความเร็วของแก๊สอาร์กอนที่ไหลในหัวพลาสมา

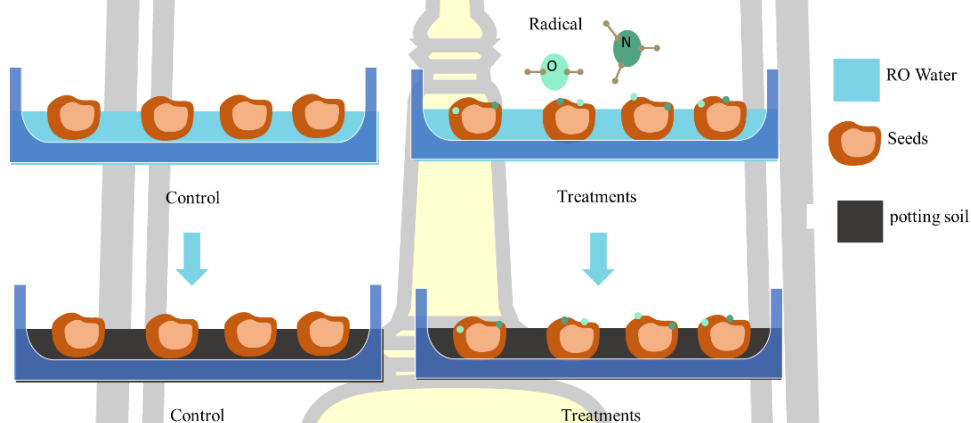
จากภาพที่ 3.22 ลายเส้นจะบ่งบอกถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของแก๊สอาร์กอน ส่วนสีน้ำเงินและสีแดง แทนความเร็วของแก๊สในช่วง 0-1 m/s จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบการไหล เส้นสีแดงหมายถึงมีความเร็วสูง เส้นสีน้ำเงินคือความเร็วต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะแบบไล่ระดับสี ที่มีส่วนสำคัญ 4 ส่วนตามหมายเลขกำกับ คือ

1. ส่วนแก๊สเข้า ① เป็นกล่องที่รองรับแก๊สจากภายนอกเข้ามา 1 รู ก่อนที่จะกระจายไปยังส่วนที่ ②
2. ร่องกระจายแก๊ส ② เป็นห้องแก๊สที่มีลักษณะเป็นร่อง เพื่อกระจายความดันภายในให้สม่ำเสมอมากขึ้น และส่งแก๊สต่อไปยังแผ่นกระจายแก๊ส ③
3. แผ่นกระจายแก๊ส ③ เป็นห้องแก๊สสำหรับกระจายแก๊สไปยังท่อพ่นแก๊ส ④ ซึ่งจะทำให้แก๊สสามารถกระจายตัวอย่างทั่วถึงเข้าสู่และมีความเร็วเท่าๆ กัน

4. ท่อพ่นแก๊ส ④ เป็นชิ้นส่วนชั่วคราวที่ปลายด้านล่างจะถูกกัดขึ้นรูปเป็นท่อแก๊ส ทำให้ความเร็วแก๊สมีความสม่ำเสมอเท่ากันทุกจุด และเพื่อให้ลำของพลาสมาที่เกิดขึ้นมีความสมดุลและพุ่งออกมาได้ยาวเท่าๆ กันทุกจุด

3.5 การทดสอบการเพิ่มเปื่อเชิงการงอกของเมล็ดพันธุ์ฟ้าทลายโจร

การตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์การที่จะทราบว่าเมล็ดพันธุ์มีความเหมาะสมที่จะนำไปเพาะปลูกได้หรือไม่จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความงอกของเมล็ดพันธุ์ ซึ่งเป็นการตรวจสอบให้ทราบถึงการเจริญเติบโตของส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญจากต้นอ่อนในเมล็ดที่สามารถจะเจริญเป็นต้นที่สมบูรณ์



ภาพที่ 3.23 แสดงให้เห็นกระบวนการของการทดลองความงอกที่ดำเนินการกับเมล็ดที่ผ่านการบำบัดด้วยพลาสมาและตัวอย่างควบคุม

สำหรับขั้นตอนการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ ได้นำเมล็ดพันธุ์วางบนจาน จำนวน 30 เมล็ด ทำการจุดพลาสมาและหมุนภาดใส่เมล็ดพันธุ์ด้วยความเร็ว 5 รอบต่อนาที โดยการทดลองโดยใช้เวลาต่างกันในช่วงเวลา 5 ถึง 90 วินาที แล้วทำการสุ่มเมล็ดมาเพาะเป็นต้นอ่อนจำนวน 30 เมล็ด เมื่อได้ต้นอ่อนที่เจริญเป็นเวลา 5 วัน เปรียบเทียบผลงอกหว่างของเมล็ดควบคุม และเมล็ดพันธุ์ที่ผ่านพลาสมา

วัสดุอุปกรณ์

1. วัสดุเพาะที่เป็นดินปลูกต้องเป็นวัสดุเพาะที่สามารถดูดซับน้ำได้ดี และรักษาความชื้นไว้ได้ตลอดระยะเวลาทดสอบ ไม่มีสารเคมีที่เป็นพิษ ไม่เป็นกรดหรือด่างมากเกินไป เพราะอาจจะเป็นอันตรายต่อต้นอ่อนได้
2. จานเพาะเชื้อขนาด 80 mm สำหรับใช้เพาะเมล็ด ควรเป็นแบบมีฝาปิดสนิทเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นระเหยเร็วเกินไปและควรมีความสูงพอที่ต้นอ่อนจะเจริญยึดตัวขึ้นมาได้
3. น้ำสะอาด ที่ปราศจากสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ และมีค่า pH 6-7.5

4. ปากคืบ ปากกา และกระดาษสติ๊กเกอร์
5. เครื่องชั่งดิจิตอล

วิธีการทดสอบการงอก

หลังจากที่เมล็ดพันธุ์ถูกปรับปรุงด้วยพลาสติกที่ความดันบรรยากาศที่เงื่อนไขต่าง ๆ แล้วต่อไปจะเป็นการวัดเปอร์เซ็นต์การงอกและอัตราการเติบโตของเมล็ดพันธุ์ มีขั้นตอน โดยสรุปดังนี้

1. นำเมล็ดพันธุ์ จำนวน 30 เมล็ดต่อ 1 ตัวอย่างการทดลอง 3 ซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ย รวม 90 เมล็ด
2. นำเมล็ดพันธุ์ไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
3. จากนั้นนำเมล็ดพันธุ์ออกมาใส่ในจานเพาะเมล็ดขนาด 80 mm ที่มีดินปลูกรองพื้นอยู่ก้น ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
4. จากนั้นปิดด้วยฝาจานเพาะเชื้อเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำออกจากชุดเพาะเมล็ด
5. จากนั้นนำบ่มในห้องควบคุมแสงและอุณหภูมิ เป็นเวลา 5 วัน แล้วเริ่มบันทึกข้อมูล
6. จากนั้นนำเมล็ดพันธุ์ออกมาจากชุดเพาะเมล็ด แล้วทำการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การงอก ตามสมการที่ 1 คือ

$$\text{Germination rate (\%)} = \frac{N_G}{N_0} \times 100\% \quad \dots(3.24)$$

โดยที่ N_G คือ จำนวนของเมล็ดที่งอกในวันที่ 5

N_0 คือ จำนวนของเมล็ดทั้งหมด

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตารางที่ 3.4 ตารางออกแบบการทดลองการปรับปรุงด้วยพลาสมา โดยใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สพื้นฐานร่วมด้วย โดยระยะห่างงานถึงหัวพลาสมา 1.75 mm ความเร็วของงานหมุนคงที่ 5 RPM

ตอนที่	Code	ตัวแปร			การวิเคราะห์
		Time (s)	Power (W)	Flow (lpm)	Germination rate (%)
1	C	Constant	Constant	-	
	F0	60	30%	-	
	F0.5			0.5	
	F1			1	
2	PL	Constant	Low (25%)	Optimum	
	PM	60	Medium (30%)	flow rate	
	PH		Low (35%)		
3	T5	5	Optimum	Optimum	
	T10	10	power	flow rate	
	T15	15			
	T20	20			
	T25	25			
	T30	30			
	T60	60			
	T90	90			

หมายเหตุ Low (25%) Medium (25%) Low (25%) คือระดับการปรับวอลุ่มคอนโทรล (Volume Control) ของเครื่องการจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งปริมาณกำลังไฟฟ้าเป็นวัตต์จะถูกวิเคราะห์ในภายหลัง



ภาพที่ 3.24 ขั้นตอนการตรวจสอบความงอกของเมล็ดพันธุ์ฟ้าทลายโจร

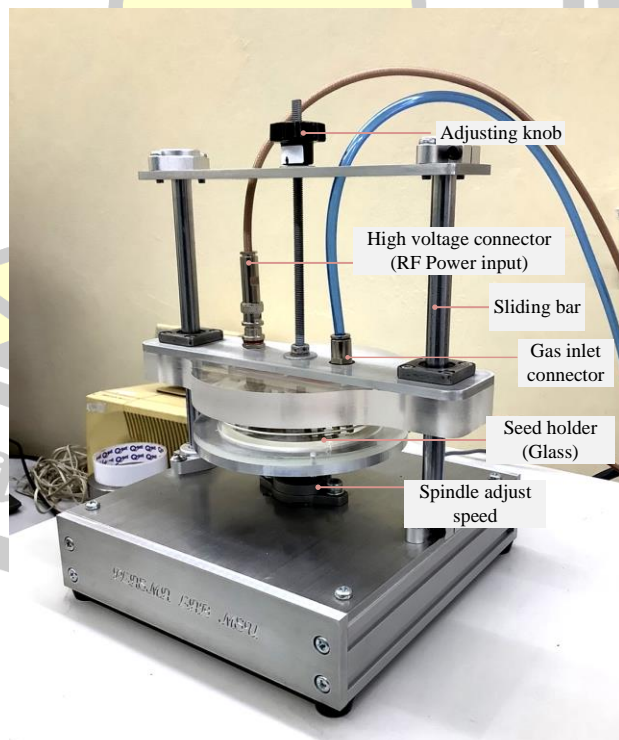
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปราย

4.1 ผลการทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสมา

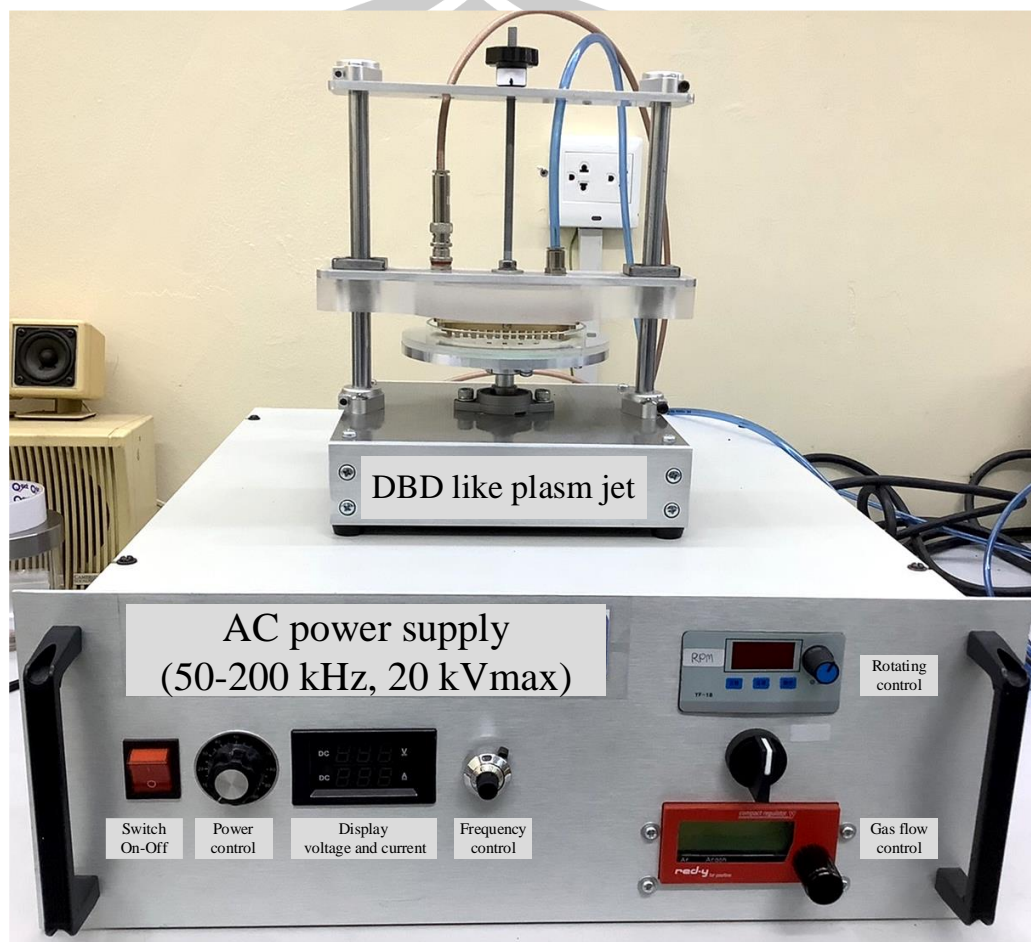
4.1.1 ผลการการพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมา

หัวกำเนิดพลาสมา DBD like plasma jet ได้ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้แนวคิดการเพิ่มพื้นที่ของลำพลาสมาโดยการเพิ่มจำนวนรู โดยในเวอร์ชันนี้มีจำนวนรูที่พ่นลำพลาสมาออกมา 21 รู (จำนวน 3 แถว, แถวละ 7 รู) โดยอาศัยการเจาะรูหัวกำลังที่ทำจากวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอย ขึ้นรูปให้เป็นท่อยื่นออกมาทั้งทางด้านล่าง สามารถรองรับการทำงานเป็นเวลานาน ผลการออกแบบระบบทรีตเมนต์พลาสมาที่พ่นพลาสมาด้วยความดันบรรยากาศ แสดงได้ดังภาพที่ 4.1 และผลการประกอบระบบทรีตเมนต์พลาสมาที่พ่นพลาสมาด้วยความดันบรรยากาศ แสดงได้ดังภาพที่ 4.1 โดยเมล็ดพันธุ์จะถูกใส่ลงในจานเพาะเชื้อที่ทำจากแก้วไพเร็กซ์ (Pyrex) จานเพาะเชื้อจึงทำหน้าที่เป็นชั้นไดอิเล็กตริก ป้องกันการอาร์คระหว่างหัวกำลังและหัวกรวด ได้จานเพาะเชื้อจะมีจานหมุนที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ ทำให้เมล็ดพันธุ์เคลื่อนผ่านลำพลาสมาได้อย่างทั่วถึง ผิวเมล็ดพันธุ์จึงเกิดอันตรกิริยากับพลาสมา และเกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงผิวให้มีความชอบน้ำมากขึ้นได้ในเวลาไม่กี่วินาที



ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายระบบทรีตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศที่ต่อหัวไฟฟ้าและแก๊สเข้าแล้ว

สำหรับแหล่งจ่ายไฟที่ใช้จุดพลาสมา คณะนักวิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นเอง (In-house design) โดยมีรายละเอียดของหน้ากล่องควบคุม ตามภาพที่ 4.2 ดังนี้

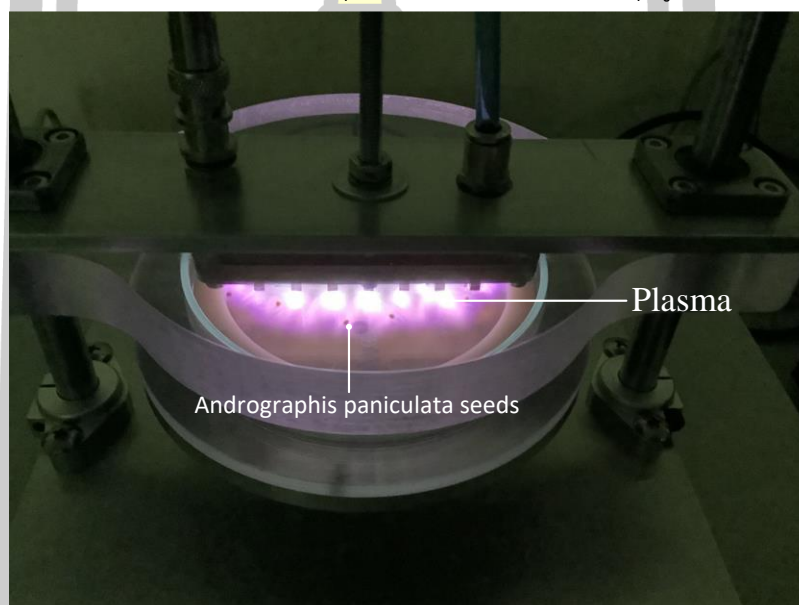


ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายกล่องควบคุมการทำงานของระบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ

- Switch on-off ทำหน้าที่ควบคุมไฟ 220 VAC, 50 Hz
- Power control ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ใช้จุดพลาสมา ซึ่งสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 2 kW
- Frequency control ทำหน้าที่ควบคุมความถี่ ในช่วง 50-200 kHz โดยแรงดันไฟสามารถเพิ่มได้สูงสุดถึง 20 kV
- Gas flow control ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนเข้าหัวกำเนิดพลาสมา ซึ่งช่วงการปรับ คือ 0-20 lpm (ลิตรต่อนาที)
- Rotating control ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบการหมุนของจานเพาะเชื้อที่ใช้ใส่เม็ล็ดพันธุ์ฟ้าทะลายโจร

4.1.2 ผลการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมา

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาแบบหลายรูที่มีความดันบรรยากาศ เพื่อใช้ในการทรีตเมนต์พันธุ์ การคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมในการใช้งานจึงมีความจำเป็น เนื่องจากถ้าใช้กำลังไฟฟ้าต่ำเกินไปพลาสมาอาจจะไม่ติดหรือติดไม่เสถียร แต่ถ้าใช้กำลังไฟฟ้าสูงเกินไป หัวพลาสมาอาจจะร้อนและเสียหายได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของแก๊ส อัตราการไหลแก๊ส การออกแบบขั้วไฟฟ้ากับขั้วกราวด์ ดังนั้นจึงได้ทำการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมา เพื่อศึกษาอัตราการไหลของแก๊สว่ามีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมาอย่างไร โดยการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมาของแก๊สอาร์กอน (Argon) เมื่อทำการจุดพลาสมาและพลาสมาเจ็ทติดอย่างเสถียรจะมีลำพลาสมาพุ่งออกอย่างสม่ำเสมอครบทุกรู ดังภาพที่ 4.3

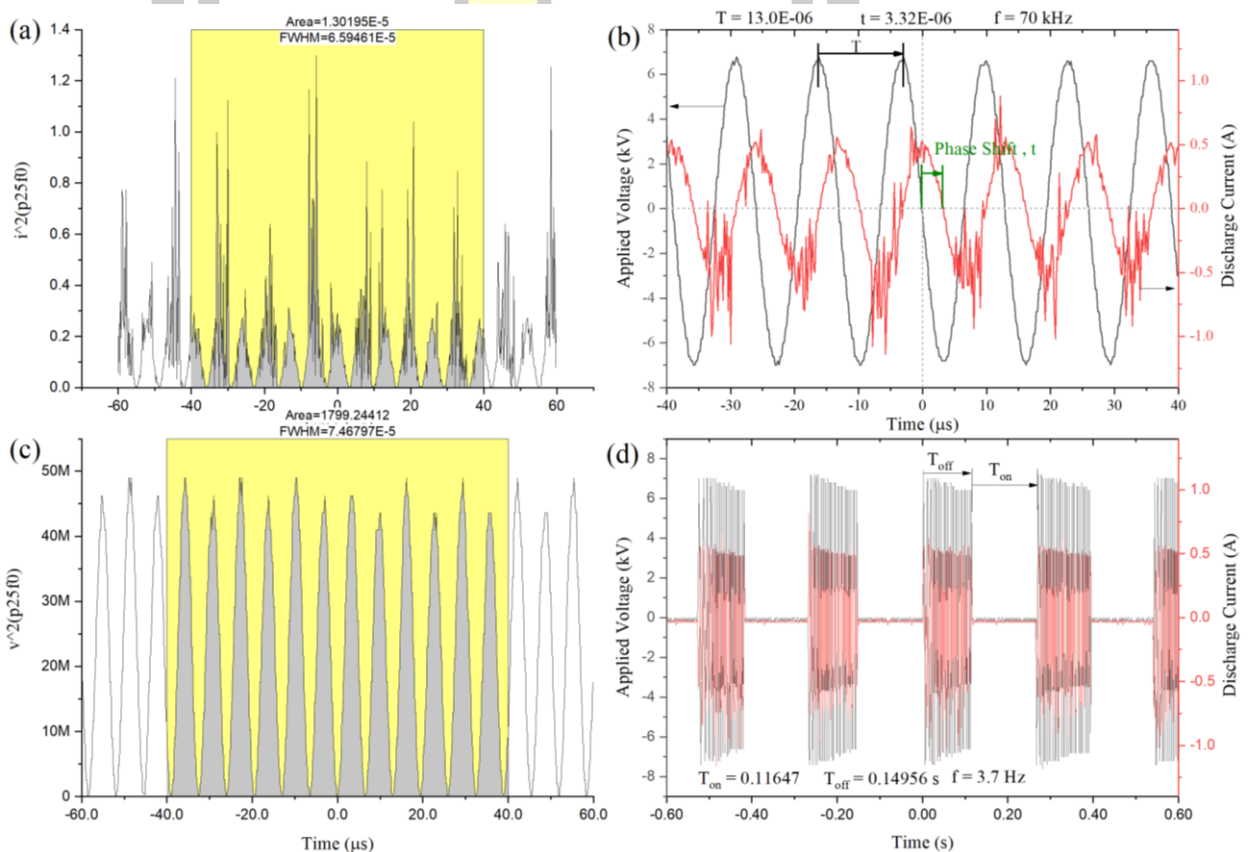


ภาพที่ 4.3 การแตกตัวของแก๊สอาร์กอนโดยใช้หัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศที่อัตราการไหลของแก๊ส 4 lpm

การหา กำลังไฟฟ้าในการจุดพลาสมา สามารถทำได้จากการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วไฟฟ้า โดยใช้ออสซิลโลสโคปแบบ 2 ช่องสัญญาณ ยี่ห้อ Agilent technologies รุ่น DSO1002A ตอบสนองความถี่สูงสุดได้ 60 MHz ซึ่งได้ทำการต่อช่องสัญญาณที่ 1 ของออสซิลโลสโคปเข้ากับหัววัดแรงดันสูง (High voltage probe) ยี่ห้อ Agilent technologies รุ่น 10076B ที่สามารถวัดแรงดันสูงสุด $4,000 V_{rms}$ และช่องสัญญาณที่ 2 ต่อจะต่อเข้ากับหัววัดกระแสแบบแคลมป์มิเตอร์ (Clamp meter current) ยี่ห้อ Pearson รุ่น 4100 ที่สามารถวัดกระแสสูงสุดได้ 500 A ดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 การติดตั้งเครื่องมือวัดเพื่อหาค่าพลังงานในการจุดพลาสมา

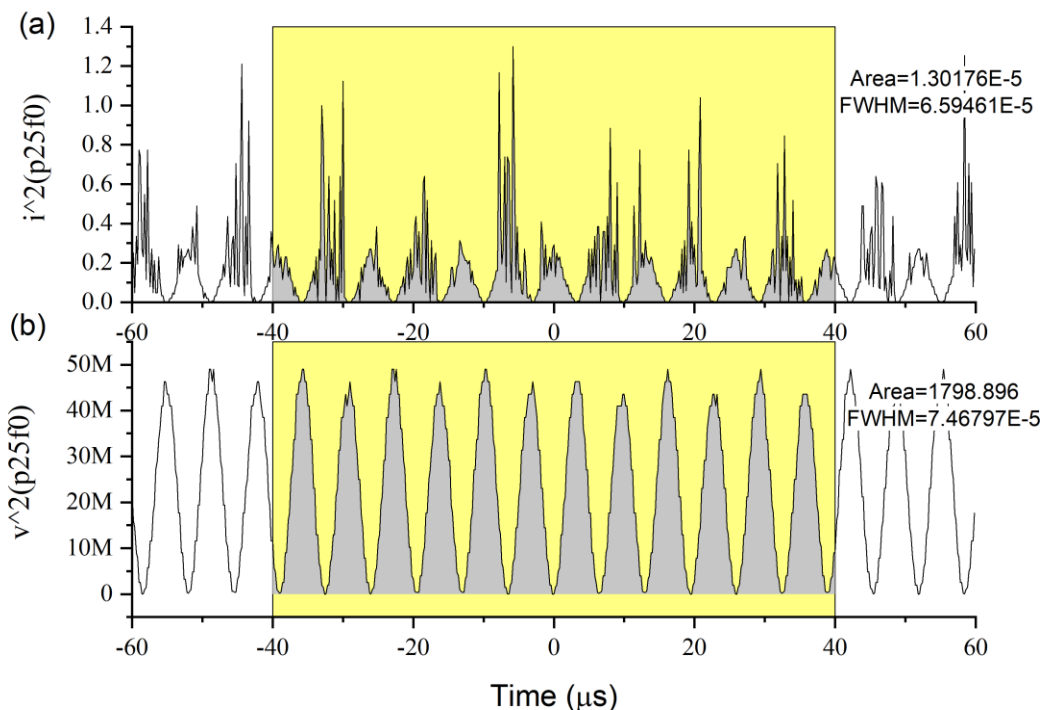


ภาพที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบทางไฟฟ้าทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะจุดพลาสมาสำหรับใช้วิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (a) หาพื้นที่ใต้กราฟของ $i^2(t)$ (c) หาพื้นที่ใต้กราฟของ $v^2(t)$ (b) และ (d) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะจุดพลาสมา (ใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 25% ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0 lpm)

ลักษณะสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของหัวกำเนิดพลาสมาแบบหลายรูที่มีความดันบรรยากาศ แสดงได้ดังภาพที่ 4.5 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงองค์ประกอบทางไฟฟ้าทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะจุดพลาสมาสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า

เพื่อใช้หาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (Average power, \bar{P}) ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่าง ๆ กัน จากสมการ (3.8a) (3.8b) และ (3.9)

ขั้นตอนที่ 1 Area of $v^2 = \int_0^T v^2(t)dt$ และ Area of $i^2 = \int_0^T i^2(t)dt$; T = Time of integrate



ภาพที่ 4.6 ใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 25% ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0 lpm (a) ผลอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟที่ของกระแสยกกำลังสอง $i^2(t)$ (b) ผลอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟที่ของแรงดันยกกำลังสอง $v^2(t)$

ผลที่ได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้เงื่อนไขใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 25% ที่อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน 0 lpm Area of $v^2 = 1798.896$ และ Area of $i^2 = 1.30195E-5$ ในช่วงเวลาการอินทิเกรตคือ $80 \mu s$ โดยตัวแปรทั้งหมดจะถูกใช้ใน**ขั้นตอนที่ 2**

ขั้นตอนที่ 2 นำตัวค่าที่ได้จากการวัดตัวแปรจาก**ขั้นตอนที่ 1** แทนในสมการเพื่อหาค่า V_{rms} และ I_{rms}

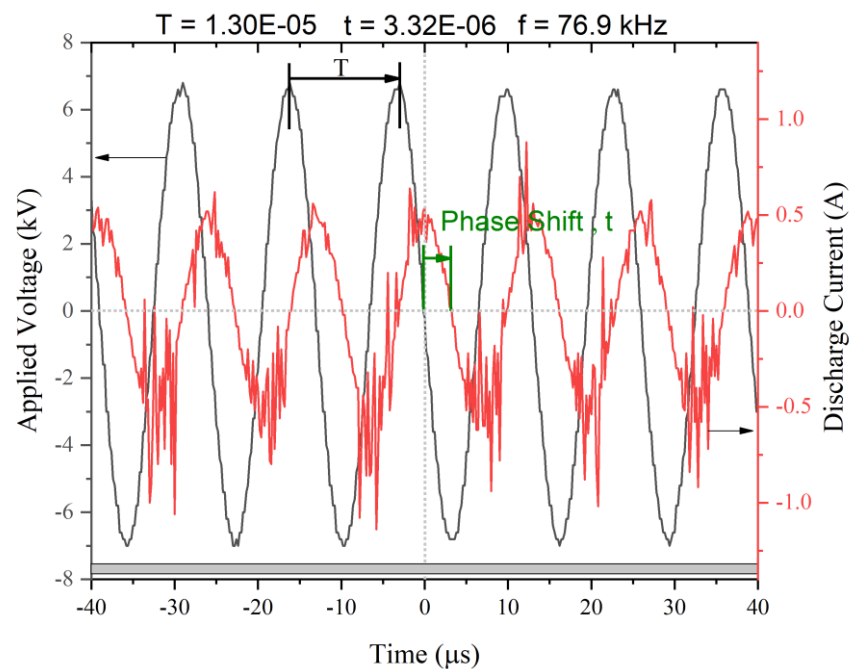
ดังสมการต่อไปนี้ $V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \text{Area of } v^2}$ และ $I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \text{Area of } i^2}$

จากสมการจะได้ว่า

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \text{Area of } v^2} = \sqrt{\frac{1798.896}{80 \times 10^{-6}}} = 4741 \text{ V}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \text{Area of } i^2} = \sqrt{\frac{1.30195 \times 10^{-5}}{80 \times 10^{-6}}} = 0.40 \text{ A}$$

ขั้นตอนที่ 3 การหาค่า $\cos(\Phi)$ เมื่อ $\Phi = \frac{360 \times t}{T}$ เมื่อ t คือเวลาที่เฟสของกระแสตามเฟสของแรงดัน และ T คือคาบเวลา 1 รอบคลื่น



ภาพที่ 4.7 สัญญาณแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของหัวกำเนิดพลาสมา ใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 25% ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0 lpm แสดงความต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า

จากภาพสัญญาณแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของหัวกำเนิดพลาสมาซึ่งสามารถหามุมเฟสได้ดังสมการต่อไปนี้ $\Phi = \frac{360 \times t}{T} = \frac{360 \times 3.32 \times 10^{-6}}{1.30 \times 10^{-5}} = 91.89 [Degrees]$

เมื่อ T คือ คาบเวลา

t คือ ช่วงเวลาที่กระแสและแรงดันเหลื่อมกัน (Overlap)

ขั้นตอนที่ 4 หากำลังไฟฟ้าจากสมการ (3.9) $\bar{P} = V_{rms} I_{rms} \cos(\theta_v - \theta_i) = V_{rms} I_{rms} \cos(\Phi)$

ดังนั้นจะได้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย $\bar{P} = V_{rms} I_{rms} \cos(\Phi) = 4741 \times 0.4 \cos(91.89) = 1349 \text{ W}$

ข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกจากออสซิลโลสโคปแล้วนำมาวิเคราะห์ข้อมูลตามขั้นตอนทั้ง 4 ที่ได้กล่าวมาผลการทดลอง ซึ่งให้ข้อมูลเชิงปริมาณของ ของกำลังไฟฟ้าจริง ค่าแรงดันประสิทธิผล ค่ากระแสประสิทธิผล และกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏที่เกิดขึ้นในระบบขณะนั้นซึ่งเป็นตัวบ่งบอกลักษณะเฉพาะตัวของพลาสมา เมื่อมีการปรับเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าโดยการเพิ่มระดับวอลุ่มควบคุมกำลังของแหล่งจ่ายไฟไปที่ระดับ 25 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ เพื่อวัดปริมาณทางไฟฟ้า และการปรับเงื่อนไขในการจ่ายแก๊สอาร์กอนที่มีอัตราการไหลที่ต่างกันโดยเริ่มจาก 0 0.5 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาทีซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการสิ้นเปลืองที่ต่ำ จากผลการทดลองได้สรุปตัวแปรทางไฟฟ้าในตารางที่ 4.1 ถึง 4.4 ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกจากออสซิลโลสโคปและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม OriginLab

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของกำลังไฟฟ้าจริงที่ทำงานวัดเป็นวัตต์ (Watts, W) แปรเปลี่ยนตามการปรับระดับวอลุ่มกำลังของแหล่งจ่ายไฟที่สัมพันธ์กับอัตราไหลของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น

Flow rate of argon (lpm)	Power volume level (%)		
	25	30	35
0	1350 W	1862 W	2154 W
0.5	938 W	2138 W	1117 W
1	1231 W	1617 W	603 W
1.5	1018 W	1297 W	173 W

ตารางที่ 4.2 แสดงผลกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏมีหน่วยวัดเป็น โวลต์-แอมแปร์ (Volt-amperes, VA) ที่แปรเปลี่ยนตามการปรับระดับวอลุ่มกำลังของแหล่งจ่ายไฟที่สัมพันธ์กับอัตราไหลของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น

Flow rate of argon (lpm)	Power volume level (Vol.%)		
	25	30	35
0	1912 VA	1932 VA	2209 VA
0.5	1635 VA	2144 VA	1709 VA
1	1317 VA	1658 VA	1486 VA
1.5	1172 VA	1640 VA	1400 VA

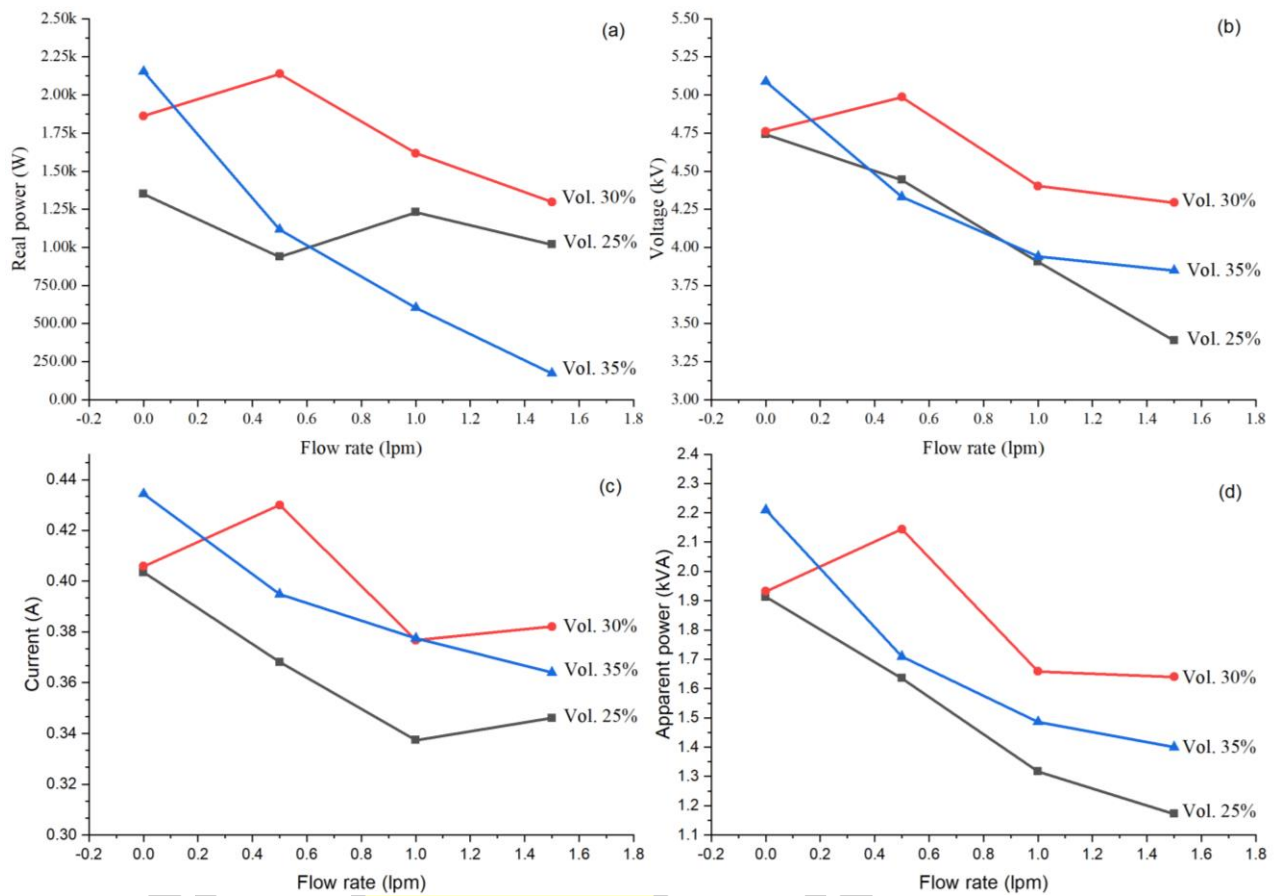
ตารางที่ 4.3 แสดงผลค่าแรงดันประสิทธิผล หน่วยวัดเป็น โวลต์ (Volt, V) ที่แปรเปลี่ยนตามการปรับระดับวอลุ่มกำลังของแสงจ่ายไฟที่สัมพันธ์กับอัตราไหลของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น

Flow rate of argon (lpm)	Power volume level (Vol.%)		
	25	30	35
0	4742 V	4761 V	5087 V
0.5	4442 V	4986 V	4331 V
1	3905 V	4402 V	3938 V
1.5	3388 V	4292 V	3848 V

ตารางที่ 4.4 แสดงผลค่ากระแสประสิทธิผล หน่วยวัดเป็นแอมแปร์ (Amperes, A) ที่แปรเปลี่ยนตามการปรับระดับวอลุ่มกำลังของแสงจ่ายไฟที่สัมพันธ์กับอัตราไหลของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น

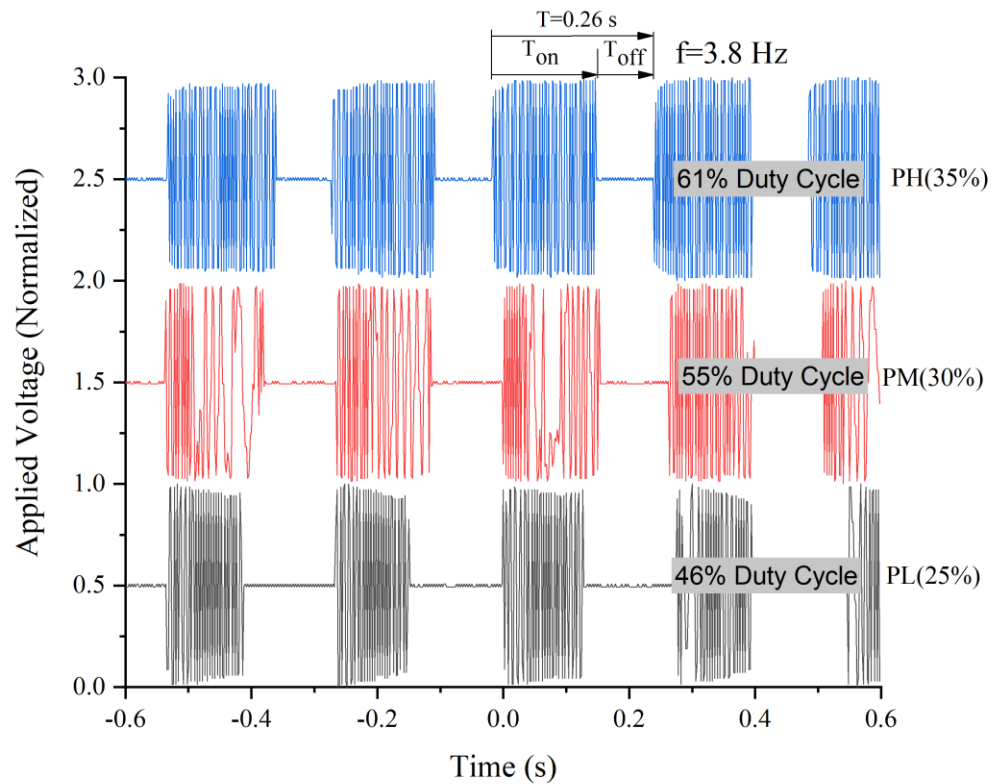
Flow rate of argon (lpm)	Power volume level (Vol.%)		
	25	30	35
0	403 mA	405 mA	434 mA
0.5	368 mA	429 mA	394 mA
1	337 mA	376 mA	377 mA
1.5	346 mA	382 mA	363 mA





ภาพที่ 4.8 ผลจากการวัดหัวกำเนิดพลาสมา DBD-like plasma jet ที่เงื่อนไขวอลุ่มกำลังไฟฟ้าและอัตราไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้น (a) ผลของกำลังไฟฟ้าจริง (b) ค่าแรงดันประสิทธิผล (c) ค่ากระแสประสิทธิผล (d) ผลกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ





ภาพที่ 4.9 แสดงช่วงเวลาในการแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะจุดพลาสมา เมื่อใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 25 30 และ 35% ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0.5 lpm)

จากภาพที่ 4.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) ในคาบเวลา $T=0.26$ s เมื่อทำการปรับวอลุ่มกำลังไฟฟ้า 25 30 และ 35% ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0.5 lpm พบว่าค่าดิวตี้ไซเคิล มีการเพิ่มขึ้น 46 50 และ 61% ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความต่อเนื่องในการจุดพลาสมาหากมีค่า 100% นั้นแสดงว่าพลาสมาติดต่อเนื่องตลอดเวลา นั้น จะส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมอย่างรวดเร็ว การทำให้พลาสมาติดสลับกับดับจึงเป็นวิธีที่ช่วยลดอุณหภูมิสะสม

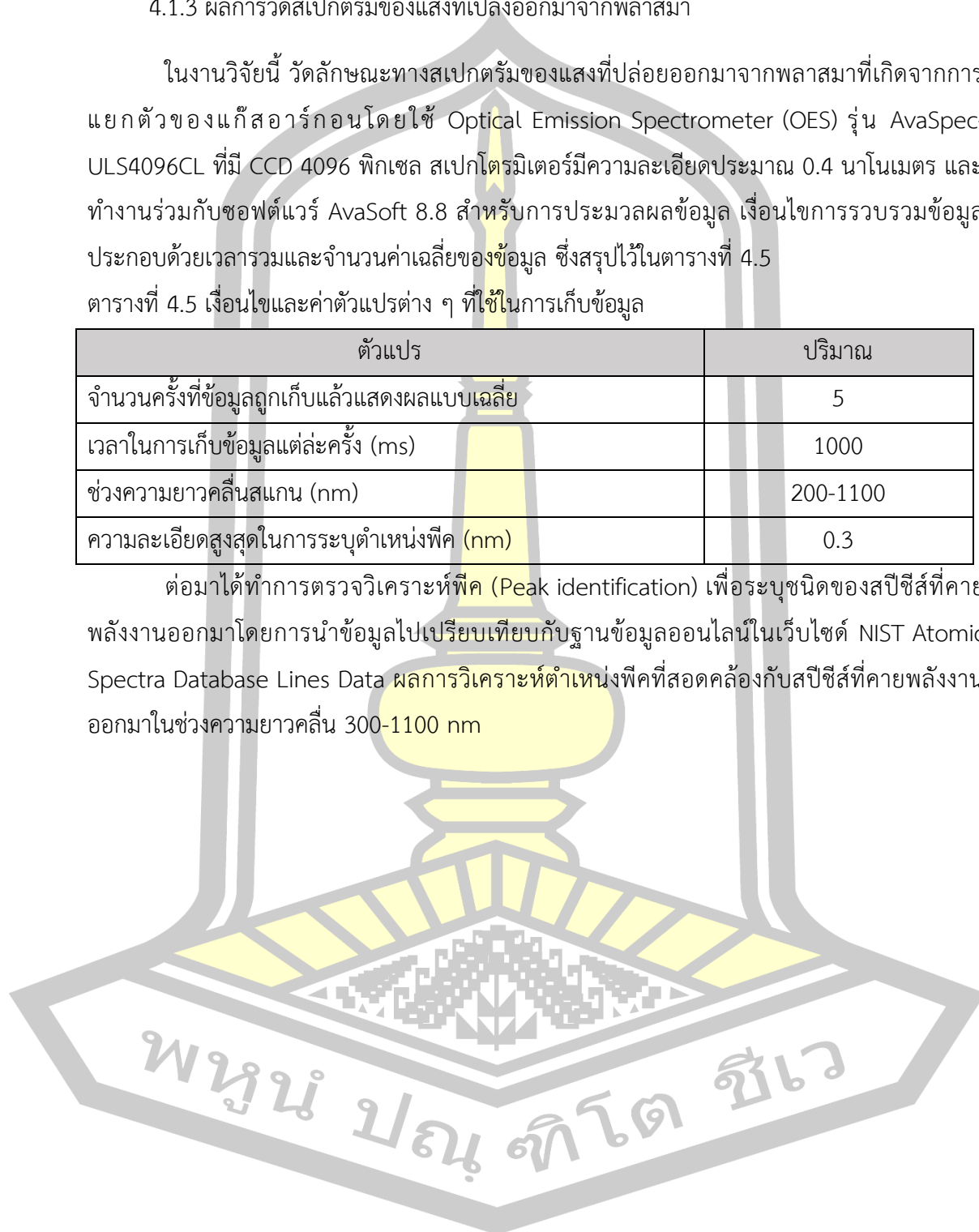
พหุ ประถม โท ชีวะ

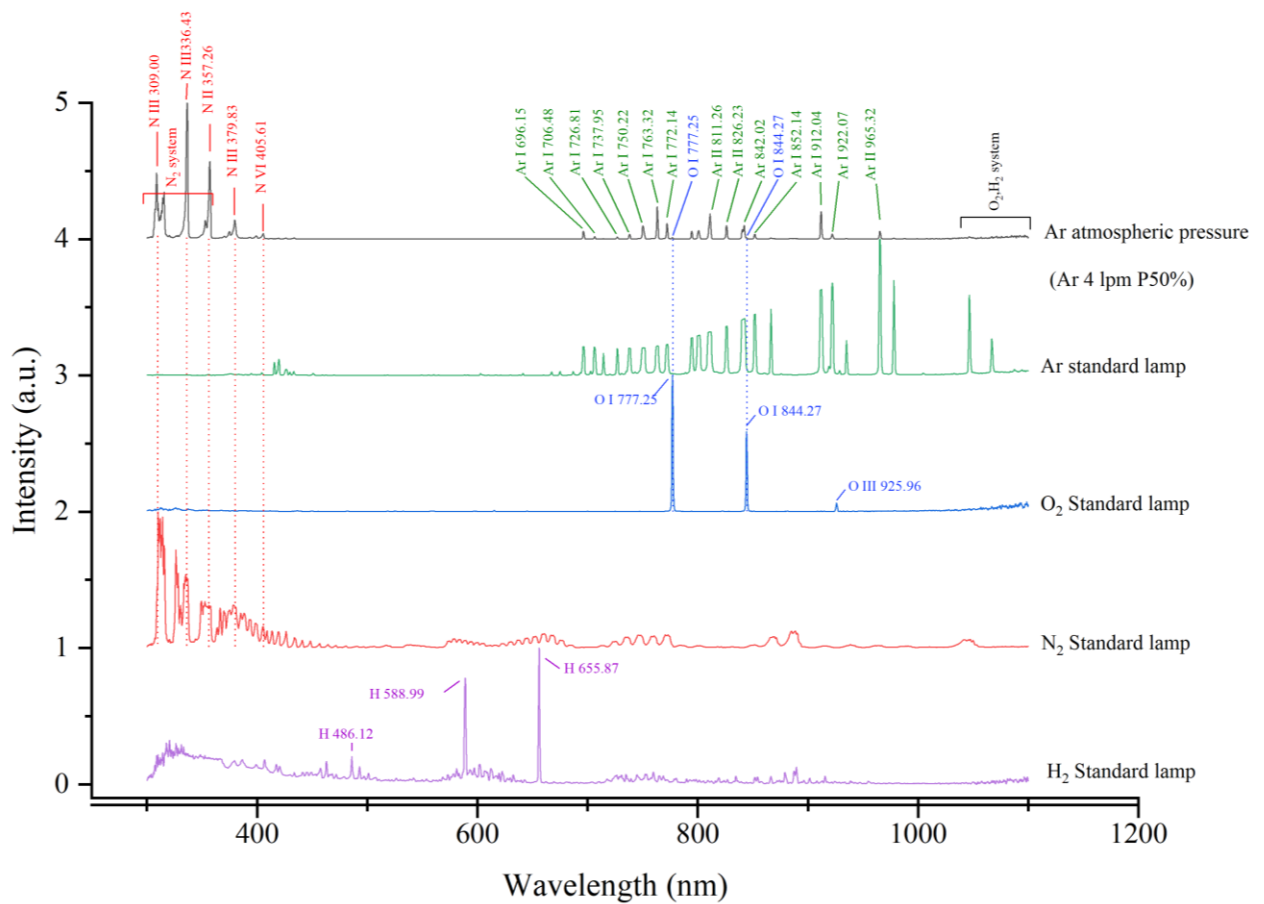
4.1.3 ผลการวัดสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมา

ในงานวิจัยนี้ วัดลักษณะทางสเปกตรัมของแสงที่ปล่อยออกมาจากพลาสมาที่เกิดจากการแยกตัวของแก๊สอาร์กอนโดยใช้ Optical Emission Spectrometer (OES) รุ่น AvaSpec-ULS4096CL ที่มี CCD 4096 พิกเซล สเปกโตรมิเตอร์มีความละเอียดประมาณ 0.4 นาโนเมตร และทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์ AvaSoft 8.8 สำหรับการประมวลผลข้อมูล เงื่อนไขการรวบรวมข้อมูล ประกอบด้วยเวลารวมและจำนวนค่าเฉลี่ยของข้อมูล ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 4.5 ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขและค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

ตัวแปร	ปริมาณ
จำนวนครั้งที่ข้อมูลถูกเก็บแล้วแสดงผลแบบเฉลี่ย	5
เวลาในการเก็บข้อมูลแต่ละครั้ง (ms)	1000
ช่วงความยาวคลื่นสแกน (nm)	200-1100
ความละเอียดสูงสุดในการระบุตำแหน่งพีค (nm)	0.3

ต่อมาได้ทำการตรวจวิเคราะห์พีค (Peak identification) เพื่อระบุชนิดของสปีชีส์ที่คายพลังงานออกมาโดยการนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลออนไลน์ในเว็บไซต์ NIST Atomic Spectra Database Lines Data ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งพีคที่สอดคล้องกับสปีชีส์ที่คายพลังงานออกมาในช่วงความยาวคลื่น 300-1100 nm

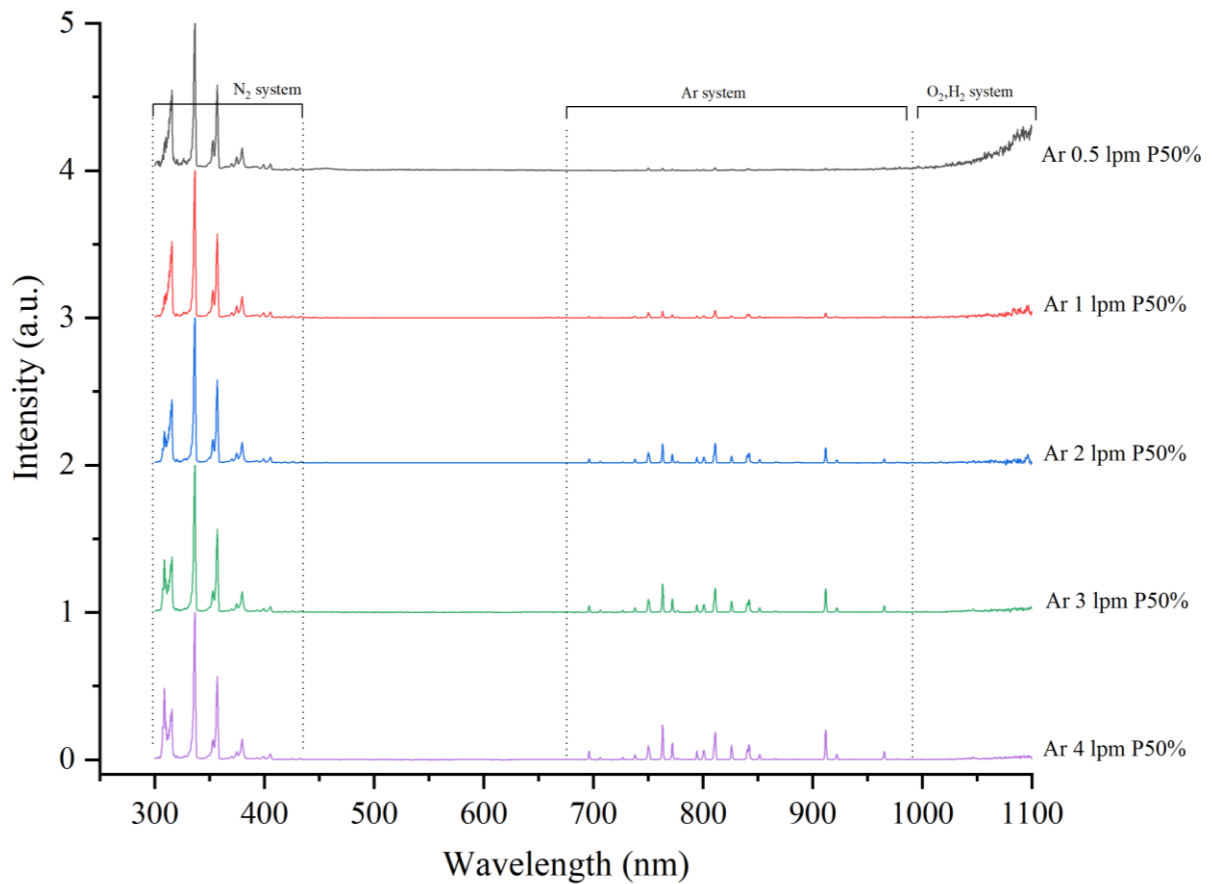




ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากหัวพลาสมา กับแหล่งกำเนิดแสง

มาตรฐาน

เมื่อพิจารณาเส้นสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยจากหัวกำเนิดพลาสมาที่เกิดจากการแตกตัวของพลาสมาอากาศผสมอาร์กอน ที่อัตราการไหล 4 lpm และระดับกำลังไฟฟ้าที่ 50% จากนั้นเทียบกับแสงจากหลอดบรรจุแก๊สที่ใช้สำหรับเทียบเคียงแบบมาตรฐาน ที่บรรจุแก๊สอาร์กอน ออกซิเจน ไนโตรเจน และเมื่อเทียบกับพลาสมาที่ความดันบรรยากาศการตรวจวิเคราะห์ พบว่าชนิดของสปีชีส์ที่คายพลังงานออกมา มีองค์ประกอบของแก๊สอาร์กอน ไนโตรเจน และออกซิเจนตามลำดับ ส่วนแก๊สไฮโดรเจนจะได้จากความชื้นในอากาศ ซึ่งเป็นโมเลกุล ดังนั้นความเข้มของแสงที่ปลดปล่อยออกมาในช่วงที่ตามองเห็นได้ต่ำมาก ซึ่งทำให้เครื่องตรวจวัดไม่สามารถจำแนกกว่าเป็นสัญญาณรบกวน (Noise) หรือสัญญาณจากสปีชีส์ที่เป็นโมเลกุล



ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากหัวพลาสมาเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน

เมื่อทำการเปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 0.5 1 2 3 และ 4 lpm และใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้าที่ 50% จะพบพีคของไนโตรเจนในช่วง 300-450 nm ตรวจพบพีคของอาร์กอนโดยจะได้รับความเข้มเพิ่มขึ้นตามการจ่ายแก๊สที่เพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจน และในช่วง 1000-1100 จะเป็นสเปกตรัมของโมเลกุล และการแปรรังสีอินฟราเรด เนื่องจากความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงจากแหล่งมาตรฐานพบว่าลักษณะการเกิดพีคคล้ายกับออกซิเจนและไฮโดรเจน โดยผลจากการวัดสเปกตรัมที่ตรวจพบจากการวิเคราะห์เส้นสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากพลาสมา ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตารางที่ สปีชีส์ที่ตรวจพบจากการวิเคราะห์เส้นสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมา
จากพลาสมา

$\lambda_{\text{detected}}$ (nm)	Species identify	λ_{ref} (nm)	Transition (j->i)		$g_j A_{ij}$ (S^{-1})	E_i (eV)	E_j (eV)
			i	j			
309.00	N III	308.87	$2s^2p(^3P^o)3p$	$2s^2p(^1P^o)3s$	5.55e+05	39.80	43.82
336.43	N III	336.67	$2s^2p(^3P^o)3s$	$2s^2p(^3P^o)3p$	1.52e+08	35.65	39.33
357.26	N II	359.46	$2s^22p3p$	$2s^22p4s$	1.21e+07	20.93	24.38
379.83	N III	379.40	$2s2p(^3P^o)3p$	$2s2p(^3P^o)3d$	1.03e+07	38.41	41.68
405.61	N VI	405.89	$1s^22s3p$	$1s^22s3d$	6.62e+07	404	429
696.15	Ar I	696.21	$3s^23p^5(^2P^o_{3/2})4p$	$3s^23p^5(^2P^o_{1/2})4d$	2.4e+05	13.17	14.95
706.48	Ar I	706.91	$3s^23p^5(^2P^o_{3/2})4s$	$3s^23p^5(^2P^o_{1/2})4p$	3.8e+06	11.54	13.30
726.81	Ar I	726.71	$3s^23p^5(^2P^o_{3/2})4p$	$3s^23p^5(^2P^o_{3/2})4d$	1.7e+05	13.15	14.85
737.95	Ar I	737.41	$3s^23p^5(^2P^o_{3/2})4p$	$3s^23p^5(^2P^o_{3/2})4d$	1.9e+06	13.07	14.75
750.22	Ar I	750.59	$3s^23p^5(^2P^o_{1/2})4s$	$3s^23p^5(^2P^o_{1/2})4p$	4.5e+07	11.82	13.47
763.32	Ar I	763.72	$3s^23p^5(^2P^o_{3/2})4s$	$3s^23p^5(^2P^o_{3/2})4p$	2.45e+07	11.54	13.17
772.14	Ar I	772.58	$3s^23p^5(^2P^o_{3/2})4s$	$3s^23p^5(^2P^o_{3/2})4p$	5.2e+06	11.54	13.15
811.26	Ar II	811.28	$3s^23p^4(^3P)3d$	$3s^23p^4(^3P)4p$	-	17.69	19.22
826.23	Ar II	826.17	$3s^23p^4(^3P)4d$	$3s^23p^4(^3P)4f$	-	22.81	24.32
842.02	Ar I	842.69	$3s^23p^5(^2P^o_{3/2})4s$	$3s^23p^5(^2P^o_{3/2})4p$	2.15e+07	11.62	13.09
852.14	Ar I	852.37	$3s^23p^5(^2P^o_{1/2})4s$	$3s^23p^5(^2P^o_{1/2})4p$	1.39e+07	11.82	13.28
912.04	Ar I	912.54	$3s^23p^5(^2P^o_{3/2})4s$	$3s^23p^5(^2P^o_{3/2})4p$	1.89e+07	11.54	12.9
922.07	Ar II	922.15	$3s^23p^4(^3P)5p$	$3s^23p^4(^3P)5d$	-	23.61	24.96
965.32	Ar II	965.86	$3s^23p^4(^3P_2)4f$	$3s^23p^4(^3P_2)5g$	-	24.15	25.44

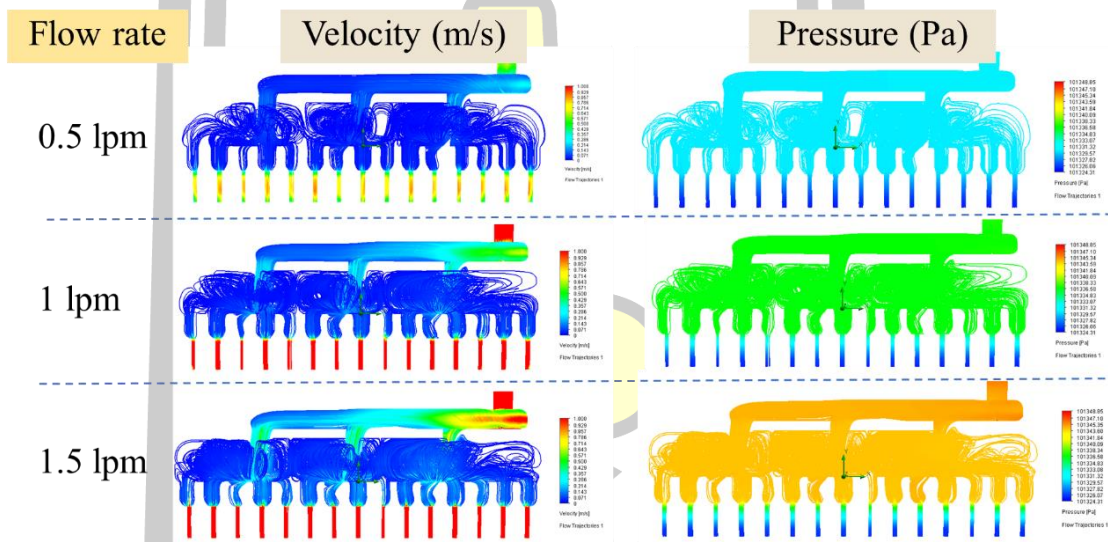
777.25	O I	777.40	$2s^2 2p^3(^4S^o)3s$	$2s^2 2p^3(^4S^o)3p$	3.69e+07	9.14	10.74
844.27	O I	844.85	$2s^2 2p^3(^4S^o)3s$	$2s^2 2p^3(^4S^o)3p$	3.22e+07	9.52	10.98

จากตารางที่ 4.2 เส้นสเปกตรัม (Line intensity) ที่ตรวจวัดได้เนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน สปีชีส์ที่ตรวจพบจึงเป็นพีคที่เป็นของอะตอมเดี่ยวเป็นหลักที่เปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีความเข้มที่สูง จึงสามารถใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมทางแสงวิเคราะห์ได้ ส่วนสปีชีส์ที่เป็นโมเลกุลมีความเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมาในช่วงที่ตามองเห็นได้ต่ำมาก ซึ่งทำให้เครื่องตรวจวัดจำแนกไม่ได้ว่าเป็นสัญญาณรบกวน (Noise) หรือสัญญาณจากสปีชีส์ที่เป็นโมเลกุล



4.1.4 ผลการปรับปรุงแผ่นกระจายแก๊สโดยใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์

ผลการออกแบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการจุพลาสมาการกระจายตัวของแก๊สที่สามารถชี้วัดด้วยความเร็วของแก๊สในช่วง 0-1 m/s เส้นสีแดงคือมีความเร็วสูง เส้นสีน้ำเงินคือมีความเร็วต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะแบบไล่ระดับสี โดยจะสอดคล้องกับความดันภายในความดันภายในช่วง 101324-101348 Pa ที่อยู่ภายในซึ่งเกิดการจำลองการจ่ายแก๊สอาร์กอน โดยกำหนดอัตราการไหลของ 0.5-1.5 lpm ซึ่งผลที่ได้จะเป็นดังภาพที่ 4.12 ที่ได้แสดงผลของการจำลองการไหลของแก๊สอาร์กอนภายในเครื่องกำเนิดพลาสมาเพื่อดูผลกระทบของความเร็วของแก๊สและความดันภายใน เมื่อฉีดแก๊ส 0.5 1 และ 1.5 lpm จะพบว่าแก๊สสามารถกระจายตัวตั้งแต่การให้อัตราการไหลที่ 0.5 lpm ซึ่งสามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองในการใช้งานทั่วไปหรือในอุตสาหกรรม



ภาพที่ 4.12 แสดงผลของการจำลองการไหลของแก๊สอาร์กอนภายในเครื่องกำเนิดพลาสมาเพื่อดูผลกระทบของความเร็วของแก๊สและความดันภายใน เมื่อฉีดแก๊ส 0.5 1 และ 1.5 lpm

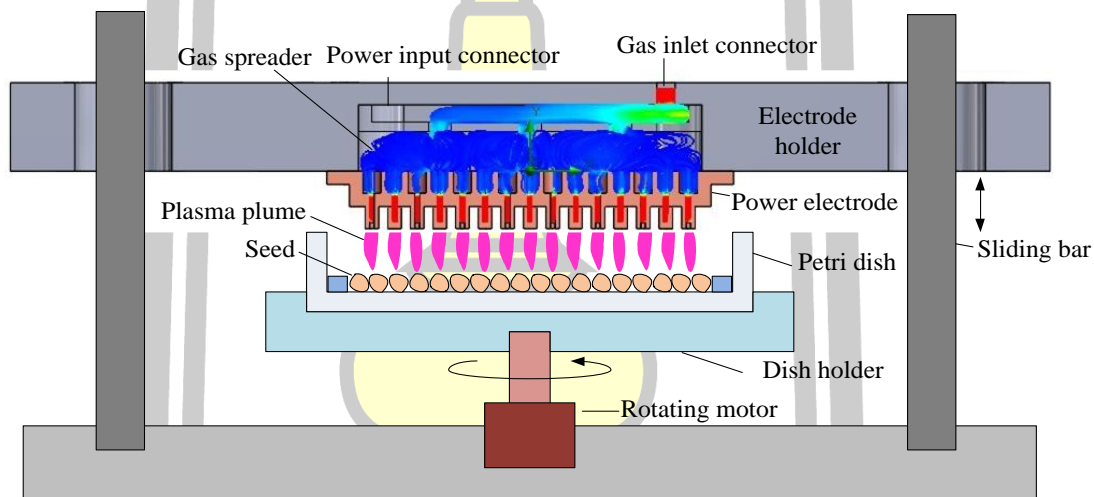
ที่ตำแหน่งแก๊สชะลอตัวและมีความเร็วต่ำ ความดันแก๊สจะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการของแบร์นูลลี ซึ่งกล่าวว่า “ผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในท่อที่ของไหล ไหลผ่าน มีค่าคงตัว” หรือเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

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

4.2 ผลการประยุกต์ใช้พลาสมาทรีตเมนต์พันธุ์

ผลการดำเนินการศึกษากระบวนการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ด้วยระบบพลาสมา DBD like plasma jet ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นเองโดยเน้นให้ระบบให้ความสะดวกในการใช้งานสามารถนำชิ้นงานเข้าออกได้สะดวกทั้งยังสามารถควบคุมตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติของพลาสมา เช่น ระยะห่างของหัวอิเล็กโทรด กำลังไฟฟ้า อัตราการไหลของแก๊ส และความเร็วการหมุนของจานใส่เมล็ดพันธุ์ ซึ่งมีการหมุนรอบแกนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถกำหนดความเร็วได้ขณะดำเนินการทรีต โดยรายละเอียดดังในภาพที่ 4.13 แบบร่างระบบพลาสมา DBD like plasma jet สำหรับทรีตเมนต์พันธุ์ ซึ่งจะแสดงภาพตัดขวางของระบบที่แสดงองค์ประกอบภายในของหัวกำเนิดพลาสมา ที่แสดงการไหลของแก๊สที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และตำแหน่งในการเกิดพลาสมาที่สามารถสัมผัสกับเมล็ดพันธุ์ได้



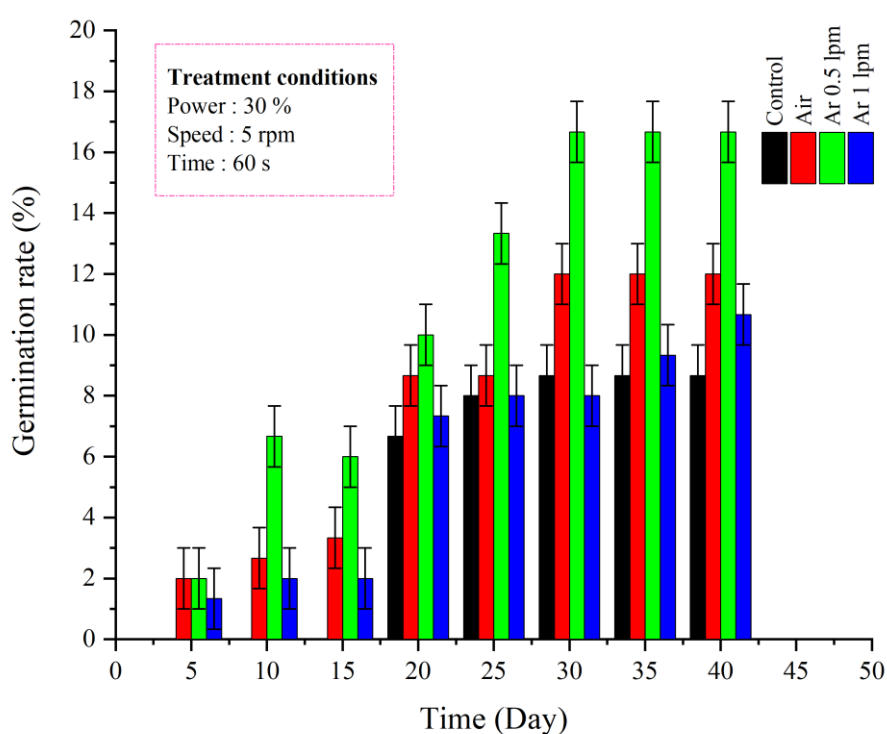
ภาพที่ 4.13 แบบร่างระบบพลาสมา DBD like plasma jet สำหรับทรีตเมนต์พันธุ์

ในกระบวนการบำบัดเมล็ดพันธุ์ มีการใช้พลาสมาใกล้กับผิวเมล็ดเพื่อเพิ่มความสามารถในการชอบน้ำของเมล็ด สิ่งนี้ช่วยอำนวยความสะดวกในการดูดซับน้ำและช่วยให้อากาศซึมผ่านเปลือกหุ้มเมล็ดได้เร็วขึ้น ซึ่งจะส่งเสริมการงอก กลไกของพลาสมานั้นเกี่ยวข้องกับการใช้ไนโตรเจนและออกซิเจนชนิดที่ทำปฏิกิริยา ซึ่งสร้างพันธะรอบเยื่อหุ้มเมล็ด ทำให้เกิดกลุ่มอนุมูลอิสระใหม่บนผิวของเยื่อหุ้มเมล็ด กระบวนการนี้เรียกว่า "การทำงานของพื้นผิว" ซึ่งเพิ่มพลังงานพื้นผิวของเมล็ด

การก่อตัวของกลุ่มอนุมูลอิสระในกลุ่มคาร์บอนิล ($-C=O$) คาร์บอกซิล ($-COOH$) ไฮดรอกซิล ($-OH$) และเอมีน ($-N-$) ทำให้พลังงานที่พื้นผิวของเมล็ดเพิ่มขึ้น พื้นผิวและการยึดเกาะที่ดีขึ้น พลาสมากระทบเยื่อหุ้มเมล็ด กระตุ้นพื้นผิวให้ดูดซับน้ำและออกซิเจนเข้าไปในตัวอ่อน โดยเอนโดสเปิร์มจะป้อนอาหารให้ตัวอ่อนซึ่งประกอบด้วยเซลล์ที่ผลิตอาหารซึ่งเรียงตัวกัน

4.2.1 ผลการงอกของเมล็ดพันธุ์

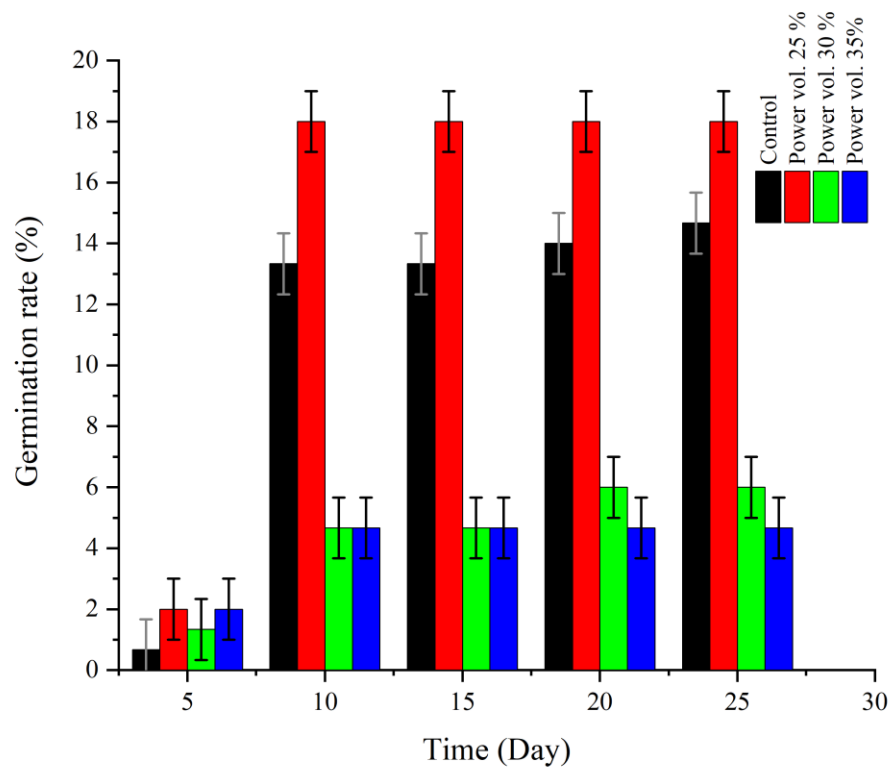
การทดลองตอนที่ 1 ศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของแก๊ส 0 0.5 และ 1 lpm โดยการใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 30% ความเร็วรอบการหมุนของจานใส่เมล็ด 5 rpm ใช้เวลาในการทรีต 60 s ให้ผลดัง ภาพที่ 4.13 ผลการงอกเนื่องจากการปรับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (การเพาะแบบฝังเมล็ดลงในดินปลูก)



ภาพที่ 4.14 ผลการงอกเนื่องจากการปรับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน

ผลจากการทดลองตอนที่ 1 พบว่าอัตราการไหลแก๊สอาร์กอน 0.5 lpm เส้นค่าเฉลี่ยการงอกมีแนวโน้มที่สูงที่สุด ดังนั้นจึงอนุมานได้ว่าที่เงื่อนไขอัตราการไหล 0.5 lpm ทำให้เปอร์เซ็นต์การงอกมีค่าสูงที่สุด ซึ่งจะเป็นตัวแปรคงที่ในการทดลองที่ 2

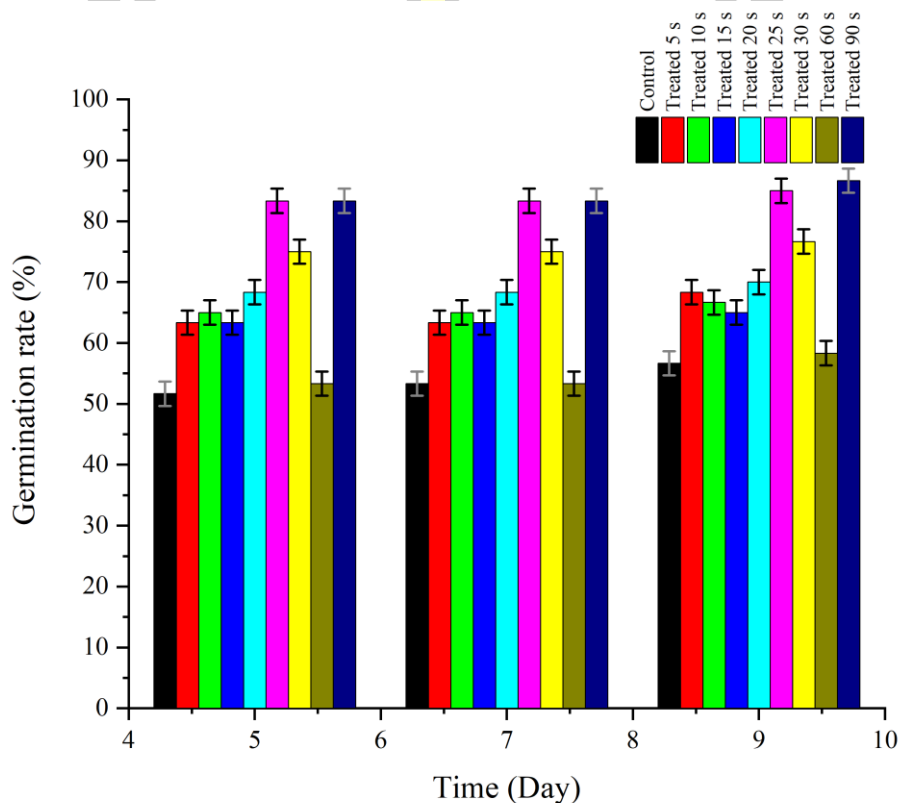
การทดลองตอนที่ 2 ศึกษาผลกระทบของการใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 25 30 และ 35% โดยการใช้อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน 0.5 lpm ความเร็วรอบการหมุนของจานใส่เมล็ด 5 rpm ใช้เวลาในการพรีต 60 s ให้ผลดัง ภาพที่ 4.15 ผลการงอกเนื่องจากการปรับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (การเพาะแบบฝังเมล็ดลงในดินปลูก)



ภาพที่ 4.15 ผลการงอกเนื่องจากการปรับวอลุ่มกำลังไฟฟ้า

ผลจากการทดลองตอนที่ 2 การใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 25% แนวโน้มเส้นค่าเฉลี่ยการงอกมีแนวโน้มที่สูงที่สุด ดังนั้นจึงอนุมานได้ว่าที่เงื่อนไขการใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 25% ทำให้เปอร์เซ็นต์การงอกมีค่าสูงที่สุด ซึ่งจะเป็นตัวแปรคงที่ในการทดลองที่ 3

การทดลองตอนที่ 3 ศึกษาผลกระทบของเวลาในการทรีตพลาสมา 5 10 15 20 25 30 60 และ 90 s โดยการใช้อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน 0.5 lpm ความเร็วรอบการหมุนของจานใส่เมล็ด 5 rpm การใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 25% ให้ผลดัง ภาพที่ 4.15 ผลการงอกเนื่องจากการปรับเวลาในการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมา (การเพาะวางเมล็ดลงบนดินปลูก)



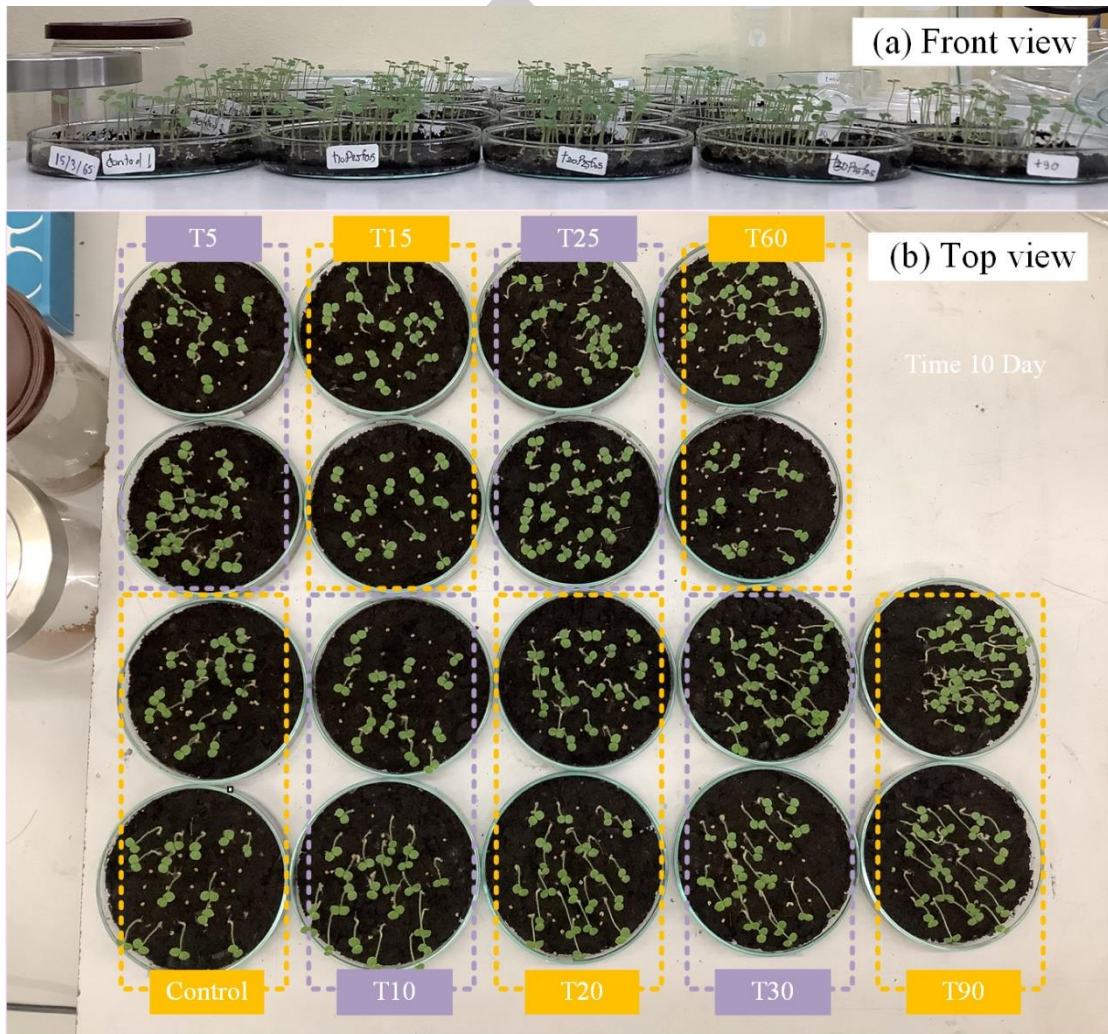
ภาพที่ 4.16 ผลการงอกเนื่องจากการปรับเวลาในการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมา

ผลจากการทดลองตอนที่ 3 พบว่าเวลาในการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมา ที่ใช้เวลา 25 วินาที และ 90 วินาทีให้ค่าเฉลี่ยการงอกมีแนวโน้มที่สูง แต่อย่างไรก็ตามที่เงื่อนไข 90 วินาที มีความเสี่ยงในการเกิดความร้อนสะสมและทำให้เมล็ดพันธุ์เกิดความเสียหายได้และมีอัตราความสิ้นเปลืองแก๊สและกำลังไฟฟ้าสูงดังนั้นการกระตุ้นการงอกด้วยพลาสมาในช่วง 5-30 วินาทีก็เพียงพอสำหรับเพิ่มอัตราการงอกที่มากกว่า 10 % เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม

ตารางที่ 4.7 ผลทดลองเปอร์เซ็นต์การงอกในวันสุดท้ายที่การงอกเริ่มคงตัว ด้วยการทรีทพลาสมาโดยใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สพื้นฐานร่วมด้วย โดยระยะห่างจานถึงหัวพลาสมา 1.75 mm ความเร็วของจานหมุนคงที่ 5 RPM

ตอนที่	Code	ตัวแปร			การวิเคราะห์
		Time (s)	Power (W)	Flow (lpm)	Germination rate (%)
1	C	-	-	-	8
	F0	Constant	Constant	-	12
	F0.5	60	30%	0.5	16.66
	F1			1	10.66
2	C	-	-	-	14.66
	PL	Constant	Low (25%)	Optimum	18
	PM	60	Medium (30%)	flow rate	6
	PH		Low (35%)	(0.5)	4.66
3	C	-	-	-	56.66
	T5	5	Optimum	Optimum	68.33
	T10	10	power low	flow rate	66.66
	T15	15	(25%)	(0.5)	65
	T20	20			70
	T25	25			85
	T30	30			76.66
	T60	60			58.33
	T90	90			86.66

สรุปผลการทดลองจากตาราง 4.7 เงื่อนไขที่ทำให้สามารถเพิ่มอัตราการงอกสูงสุด คือ การใช้ อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0.5 lpm การใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 25% และเวลาในการปรับปรุงด้วยพลาสมา 25 s ซึ่งให้ค่าอัตราการงอกเฉลี่ยที่ 85% ซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุมถึง 29 % ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริงต่อไป

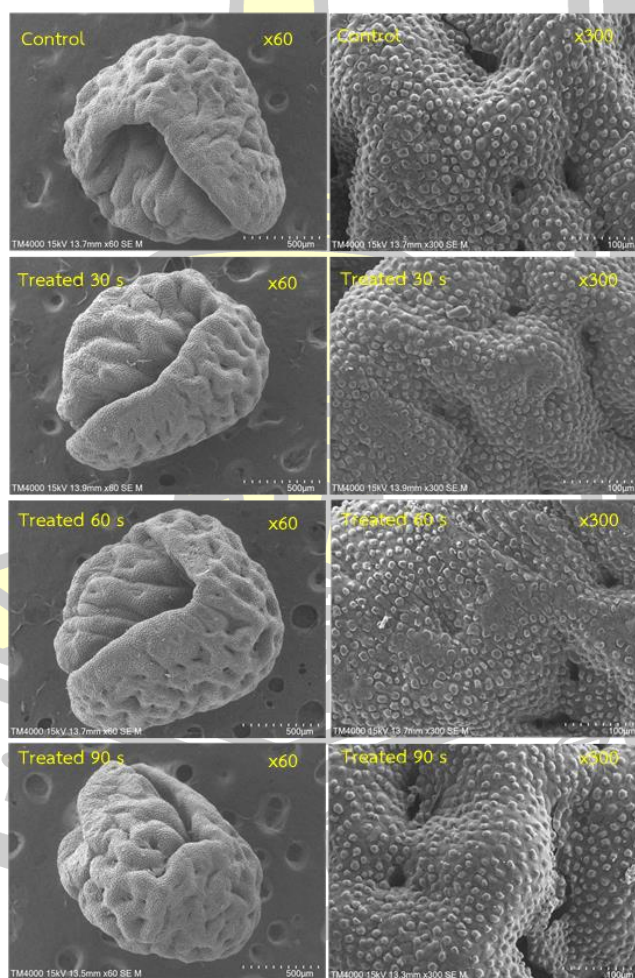


ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบการงอกของเมล็ดในช่วง 10 วัน จากเมล็ดที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุง ด้วยพลาสติกที่เงื่อนไขเวลาต่างกัน (a) ภาพถ่ายด้านหน้า (b) ภาพถ่ายมุมมองด้านบน

พหุ ประถมศึกษา

4.2.2 ผลการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

ผลการใช้เทคนิค SEM เพื่อศึกษาพื้นผิวของเมล็ดและให้ข้อมูลเกี่ยวกับสัณฐานวิทยา บริเวณพื้นผิวสำหรับการระบุลักษณะเฉพาะตัวของพันธุ์เมล็ดพันธุ์ การประเมินคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ โดยภาพถ่ายที่ให้รายละเอียดที่และกำลังขยายถึง 300 เท่าภาพ SEM ของเมล็ดสามารถเปิดเผยข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิว เช่น ขนาด รูปร่าง พื้นผิว และการกระจายของลักษณะบนผิว เช่น หนาม สัน และ ความหยาบของพื้นผิว (Surface Roughness) ข้อมูลนี้สามารถใช้เพื่อประเมินผลกระทบจากพลาสมา และคุณภาพเมล็ดพันธุ์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเชิงผิวที่อาจจะส่งผลต่อการงอกได้และการงอกของเมล็ดพันธุ์ จากภาพถ่ายพบว่าพลาสมาไม่ทำให้เกิดรอยแตกที่จะทำให้เมล็ดพันธุ์เกิดความเสียหายดังแสดงในภาพที่ 4.12

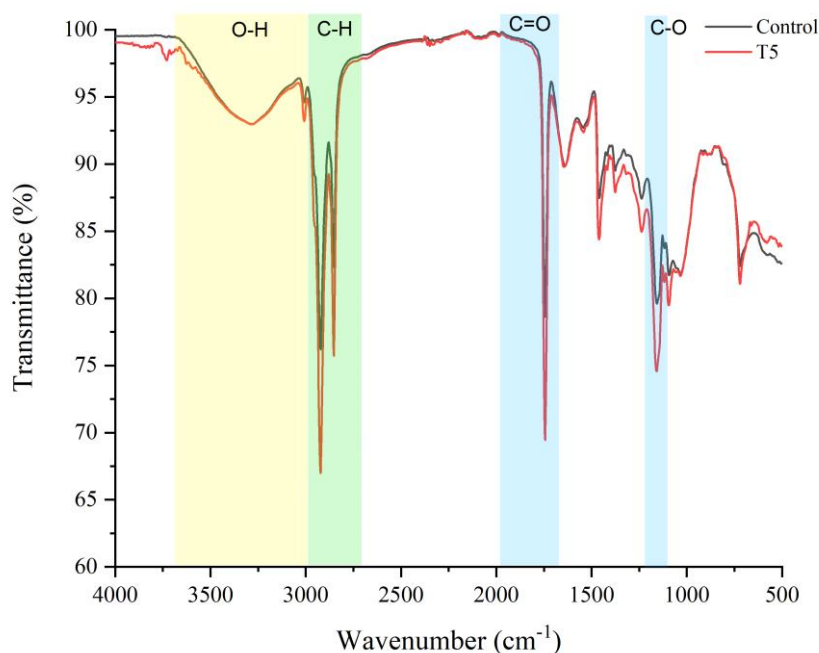


ภาพที่ 4.18 ผลการถ่ายภาพด้วยเทคนิค SEM แสดงพื้นผิวเมล็ดฟ้ายาวที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยพลาสมา ที่เงื่อนไข 30 60 และ 90 วินาทีโดยใช้กำลังขยายภาพที่ 60 และ 300 เท่า

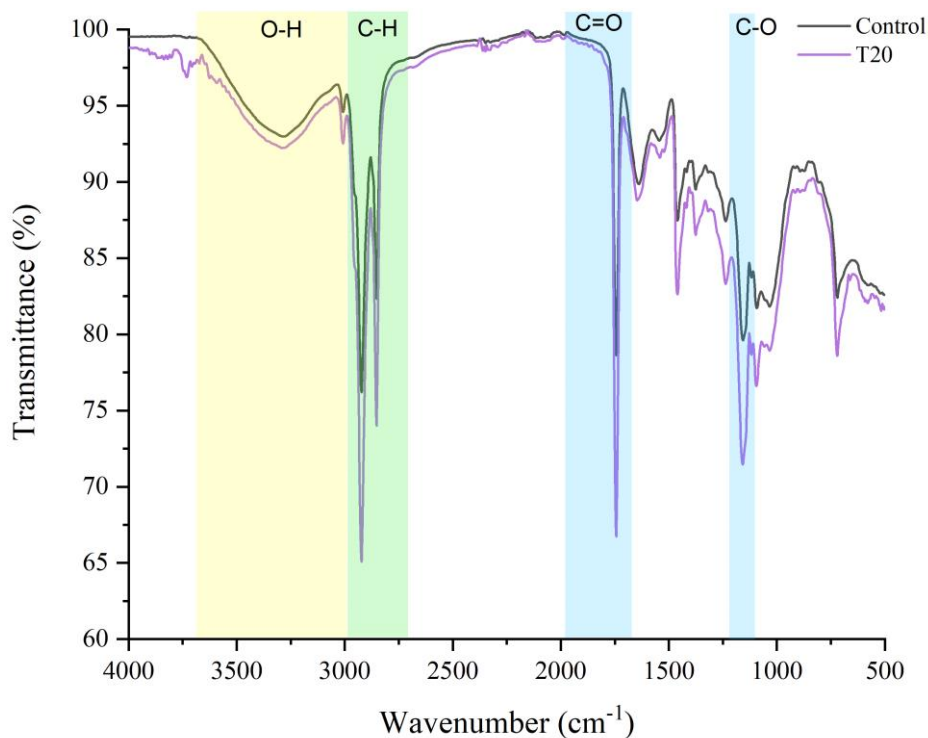
4.2.3 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและสารประกอบด้วยเทคนิค FTIR

FTIR ย่อมาจาก Fourier Transform Infrared Spectroscopy ซึ่งเป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่สามารถระบุองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างโมเลกุลของตัวอย่าง โดยหลักการเมื่อส่งลำแสงอินฟราเรดผ่านตัวอย่างทดสอบ ระบบจะตรวจวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนที่เกิดขึ้นเพื่อนำข้อมูลมากำหนดพันธะเคมีที่มีอยู่และระบุหมู่ฟังก์ชันและสารประกอบ โดยเทคนิค FTIR นั้นจะใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ Fourier Transform เพื่อเปลี่ยนแปลงข้อมูลการสั่นของโมเลกุลมาสร้างเป็นสเปกตรัมที่มีคุณภาพสูงและมีความละเอียดสูงที่สามารถตรวจจับความยาวคลื่นได้หลากหลาย มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายสาขาเพื่อวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีค่าเกี่ยวกับคุณสมบัติของโมเลกุล

โดยในงานวิจัยทำการตรวจวิเคราะห์พิก (Peak identification) ของเมสிடพันธุ์ฟ้าทะเลลายโจรเพื่อระบุชนิดหมู่ฟังก์ชันและสารประกอบบนพื้นผิว โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการวัดไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลออนไลน์ในเว็บไซต์ chem.libretexts.org [28] ในหัวข้อ Infrared Spectroscopy Absorption Table ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งพิกที่สอดคล้องกับสปีซีที่คายพลังงานออกมาในช่วงเลขคลื่น $500-4000\text{ cm}^{-1}$



ภาพที่ 4.19 สเปกตรัม FTIR ของเมสிடพันธุ์ฟ้าทะเลลายโจรที่ปรับปรุงด้วยพลาสมา 5 วินาที โดยใช้วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 25 % ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0.5 lpm เทียบกับตัวอย่างควบคุม



ภาพที่ 4.20 สเปกตรัม FTIR ของเมล็ดพันธุ์พื้ทลายโจรที่ปรับปรุงด้วยพลาสมา 20 วินาที โดยใช้
วอลุ่มกำลังไฟฟ้า 35% ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 0.5 lpm เทียบกับตัวอย่างควบคุม

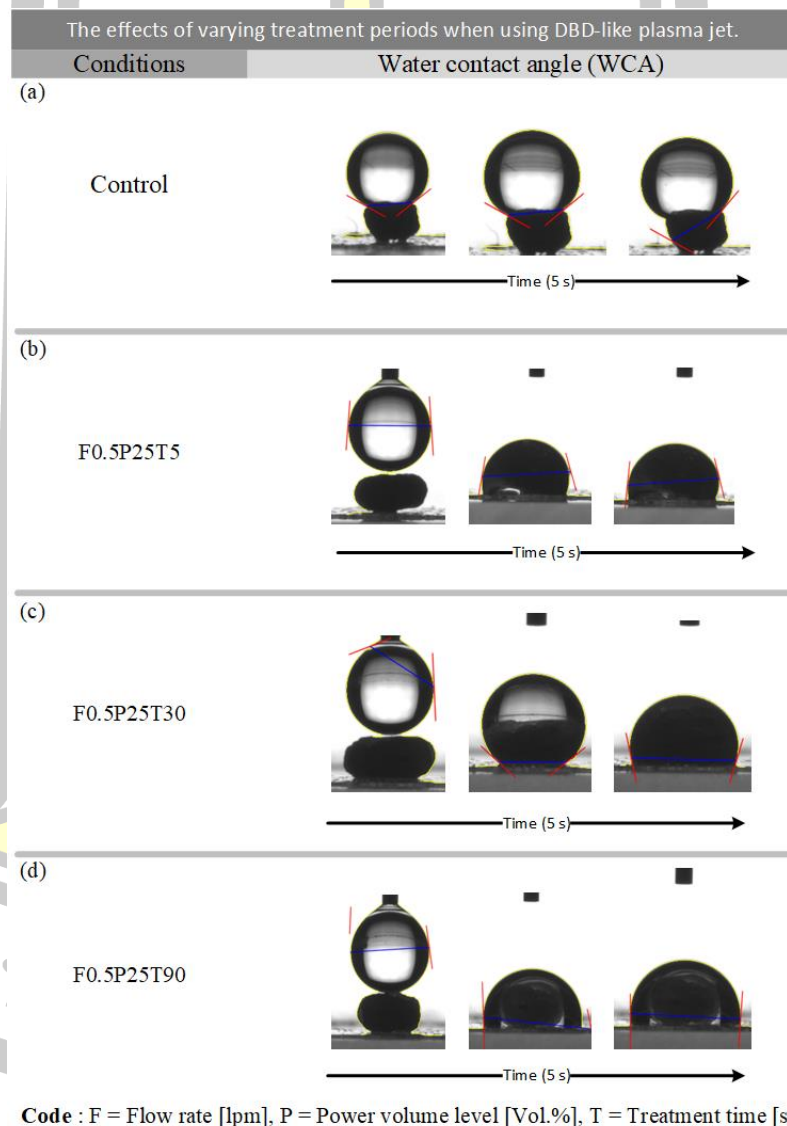
ตารางที่ 4.8 แสดงข้อมูลสเปกตรัมในช่วงความถี่ IR ลักษณะของการสั่นและการดูดซับที่เกิดจากหมู่
ฟังก์ชัน

Wavenumber (cm ⁻¹)	intensity	Group	Compound Class
3200-2700	weak	O-H stretching	Alcohol
3000-2840	medium	C-H stretching	Alkane
1745	Strong	C=O stretching	Cyclopentanone
1205-1124	Strong	C-O stretching	Tertiary alcohol

ข้อมูลจากตารางที่ 4.8 พบหมู่ฟังก์ชันที่มีผลทำให้พื้นผิวเมล็ดพันธุ์มีความชอบน้ำเพิ่มขึ้น
เนื่องจากหมู่ฟังก์ชัน O-H C-H C=O และ C-O ที่เพิ่มขึ้น

4.2.4 ผลการวัดค่ามุมสัมผัสผิวน้ำ (Water contact angle: WCA)

มุมสัมผัสผิวน้ำคือมุมที่หยดน้ำวางบนพื้นผิวของแข็ง โดยวัดระหว่างเส้นสัมผัสกับหยดน้ำ ณ จุดที่สัมผัสกับพื้นผิวและพื้นผิวเอง เป็นการวัดความสามารถในการเปียกน้ำของพื้นผิวและสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับพลังงานพื้นผิว และองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่แสดงมุมสัมผัสสูงแสดงว่าพื้นผิวนั้นไม่ชอบน้ำ (ไม่ซึบน้ำ) ในขณะที่มุมสัมผัสต่ำแสดงว่าพื้นผิวนั้นชอบน้ำ (ดึงดูดน้ำ) การวัดมุมสัมผัสน้ำ ผลการวัดตัวอย่างควบคุมและและปรับปรุงด้วยพลาสมาพบว่าเมล็ดพันธุ์มีความชอบน้ำ

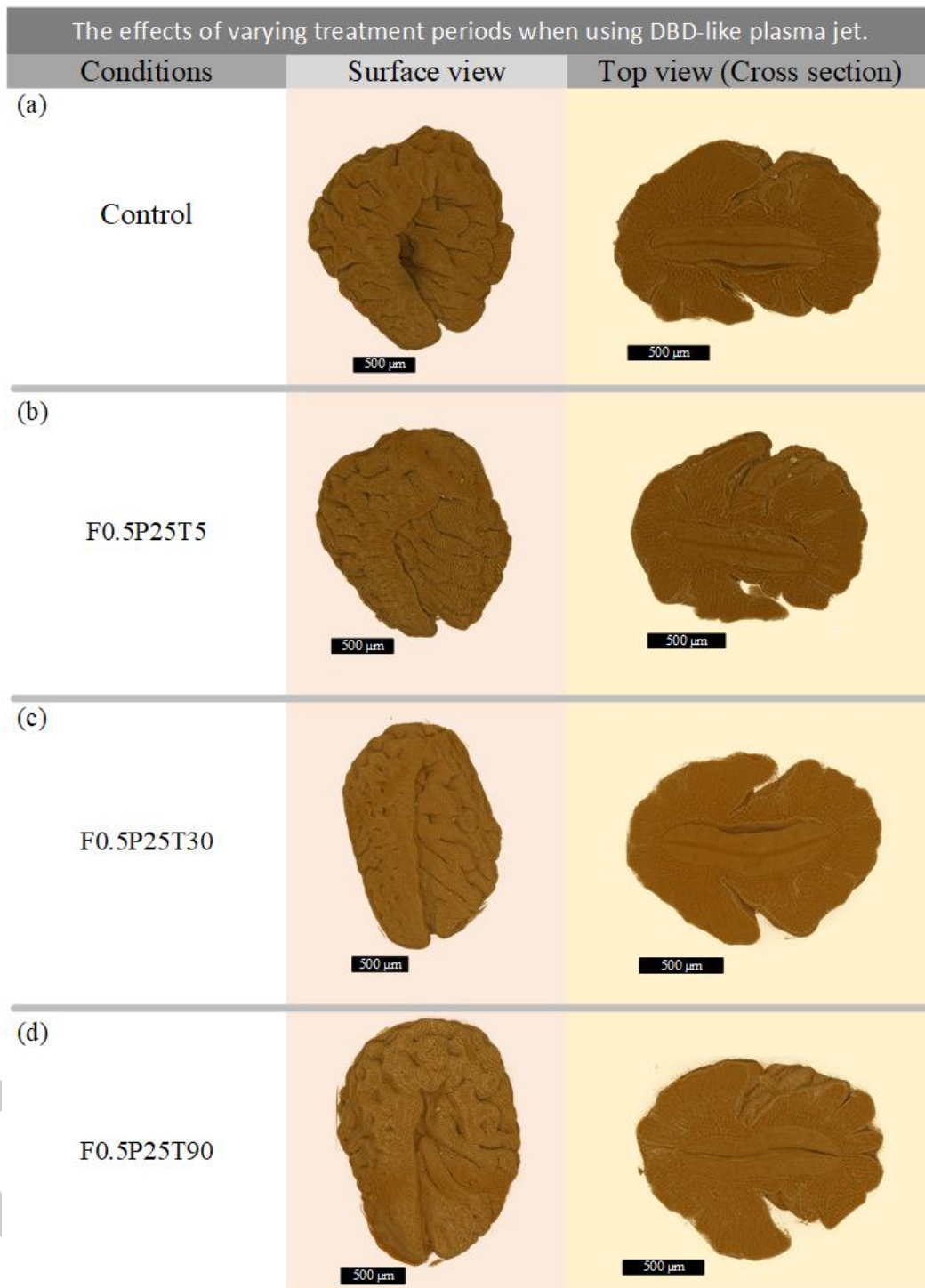


ภาพที่ 4.21 ภาพถ่ายมุมสัมผัสของหยดน้ำก่อนและหลังสัมผัสกับเมล็ดฟ้าทะลายโจร (a) ตัวอย่างควบคุม (b) ปรับปรุงด้วยพลาสมา 5 วินาที (c) ปรับปรุงด้วยพลาสมา 30 วินาที (d) ปรับปรุงด้วยพลาสมา 90 วินาที

4.2.5 ผลการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์เอ็กซ์เรย์ (X-ray Tomography microscopy: XTM)

การถ่ายภาพภายในของวัตถุด้วยการใช้รังสีเอ็กซ์โดยใช้มุมการหมุนตัวอย่างไปทีละ 0.1 องศา แล้วถ่ายภาพในจนครบมุม 180 องศา โดยภาพเหล่านี้จะถูกนำไปสร้างใหม่ด้วยโปรแกรม เพื่อสร้างภาพ 3D ซึ่งคล้ายหลักการทำ CT Scan (Computed Tomography) เมื่อเราใช้ X-Ray ที่ได้มาจากลำแสงซินโครตรอน เทคนิคนี้ก็เลยเรียกว่า Synchrotron Radiation X-ray Tomography microscopy (SRXTM) หรือโดยทั่วไปเรียกว่ากล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์ (XTM) ดำเนินการที่ลำแสง 1.2 W สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ประเทศไทย สำหรับการรวบรวมข้อมูลเอ็กซ์เรย์ ตัวอย่างถูกยึดด้วยการใช้ซีพิ้งพาราฟินตัวยึดตัวอย่างไว้ จากนั้นตัวอย่างจะถูกติดตั้งบนแท่นหมุน แล้วใช้แหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนทำงานอยู่ที่ 1.2 GeV, 150 mA โดยแสงลอดทอนด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ที่มีความหนาหนา 350 ไมครอนทำให้พลังงานเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 11.5 keV จากนั้นรับภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้เลนส์คู่และกล้อง CMOS เซิงวิทยาศาสตร์ (2560 × 2160 พิกเซล 16 บิต) ให้ประสิทธิภาพเชิงแสงขนาดพิกเซล 1.44 ไมครอน สำหรับการสแกนเอ็กซ์เรย์ทั่วไป ตัวอย่างจะถูกรวบรวมด้วยการฉายรังสีเอ็กซ์สำหรับการหมุน 180 องศา โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.1 องศา การประกอบภาพและประมวลผลและการสร้างภาพ CT ใหม่คำนวณโดยใช้ซอฟต์แวร์ Octopus Reconstruction แล้วทำการประมวลผลเป็นภาพ 3 มิติโดยใช้ซอฟต์แวร์ Drishti โดยให้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 4.21 โดยมีการปรับเวลาในการปรับปรุงผิวเมล็ดฟ้าทะลายโจร ที่เวลาต่างกันคือ 5 30 และ 90 วินาที โดยใช้ระดับกำลังไฟฟ้า และอัตราการไหลของแก๊สเท่ากัน เพื่อที่จะตรวจสอบผลของพลาสมาว่ามีการเปลี่ยนแปลงคือผิวด้านนอกสุดโดยพลาสมาไม่ทำให้เกิดร่องรอยที่แสดงถึงการกัดกร่อนของเปลือกหุ้มเมล็ดได้ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 4.21 ถ่ายภาพเมล็ดฟ้าทะลายโจรด้วยกล้องจุลทรรศน์เอ็กซ์เรย์ (XTM) ดำเนินการที่ลำแสง 1.2W สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (Thai synchrotron national lab)

พหุ ปรณ ทิโต ชีเว



Code : F = Flow rate [lpm], P = Power volume level [Vol.%], T = Treatment time [s]

ภาพที่ 4.22 ถ่ายภาพเมล็ดไฟฟ้าละลายโจรด้วยกล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์ (XTM) (a) ตัวอย่างควบคุม (b) ปรับปรุงด้วยพลาสมา 5 วินาที (c) ปรับปรุงด้วยพลาสมา 30 วินาที (d) ปรับปรุงด้วยพลาสมา 90 วินาที

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาสำหรับปรับปรุงเมล็ดพันธุ์เพื่อเพิ่มอัตราการงอกโดยใช้เมล็ดพืชหลายชนิด ที่มีอายุไม่เกิน 1 ปี เป็นตัวอย่างในการศึกษา ซึ่งได้แบ่งงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศและระบบควบคุม และส่วนที่ 2 คือ การนำหัวกำเนิดพลาสมาไปประยุกต์ใช้ปรับปรุงเมล็ดพันธุ์พืชหลายชนิด

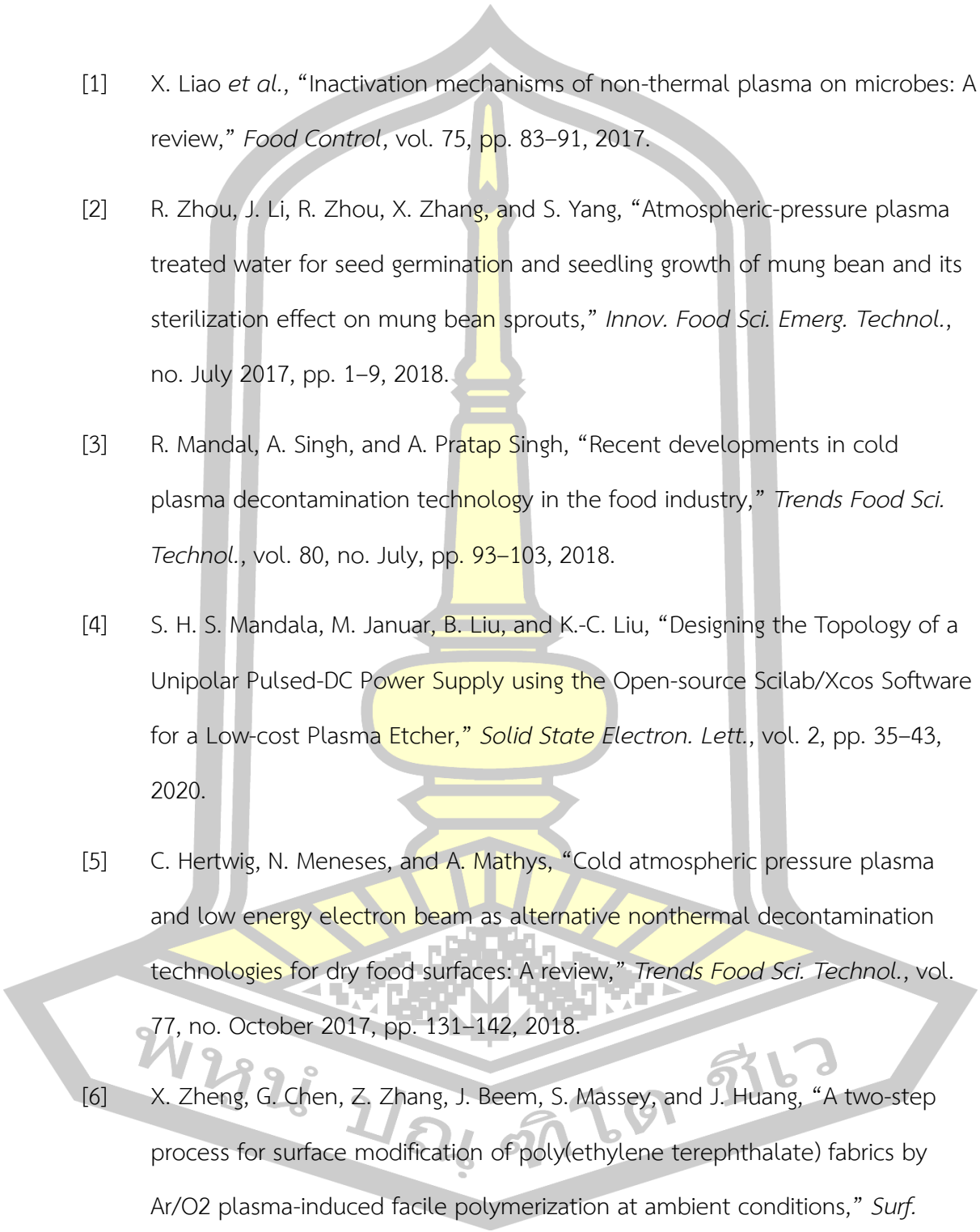
5.1 สรุปผลการวิจัย

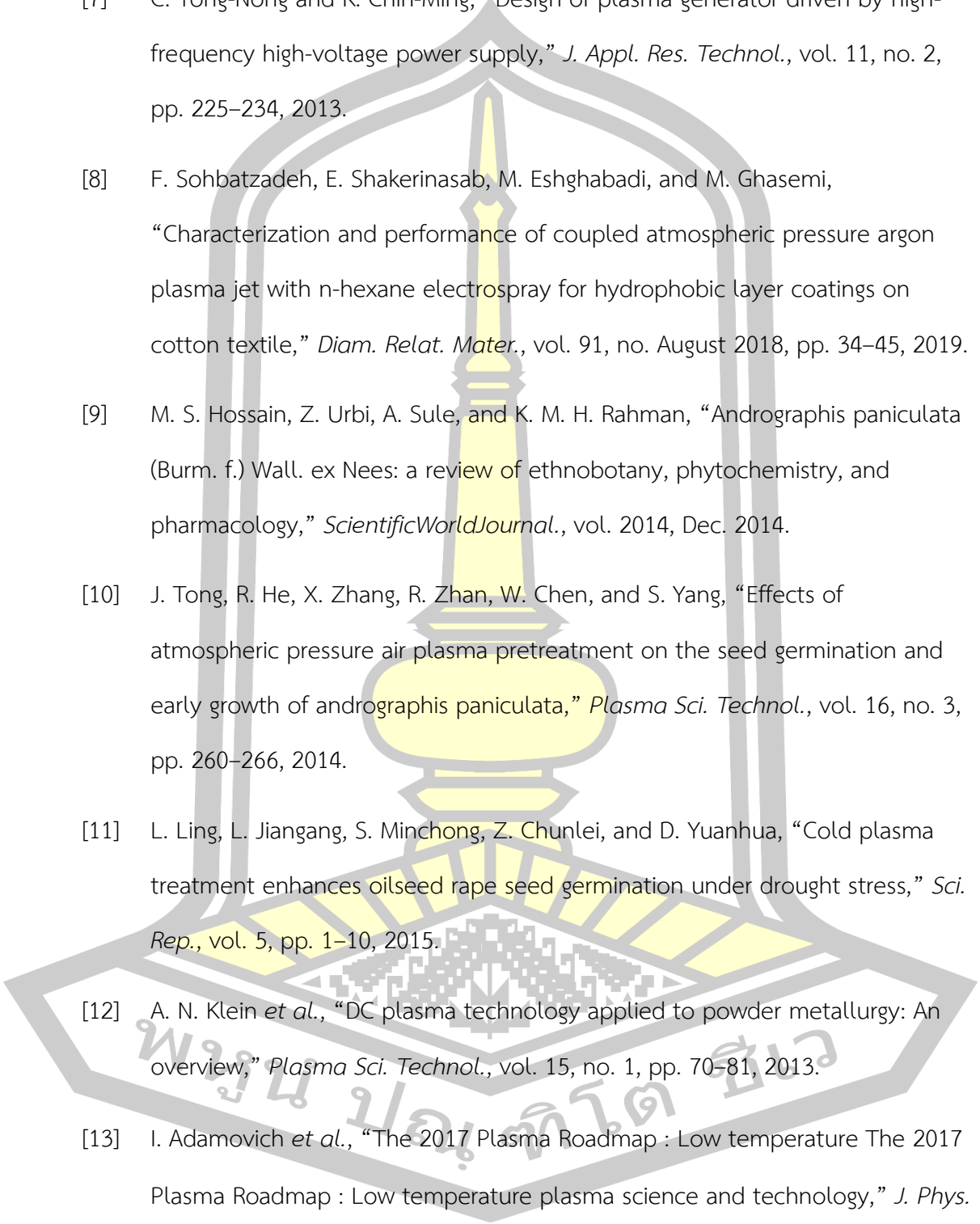
การพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาแบบ DBD-like plasma jet ใช้หลักการจุดพลาสมาแบบพลาสมาเจ็ท คือ การเร่งแก๊สอาร์กอนให้มีความเร็วสูงภายใต้สนามไฟฟ้าความเข้มและความถี่สูง และป้องกันการอาร์คและความร้อนจากกระแสไฟฟ้าพลาสมาโดยใช้ฉนวนกันระหว่างหัวกำเนิดและหัวกรวด สามารถรองรับขนาดฐานรองเมล็ดพืชหลายชนิดได้สูงสุด 10 เซนติเมตร และสามารถใส่เมล็ดพืชหลายชนิดได้สูงสุด 1000 เมล็ดต่อรอบการปรับปรุงด้วยพลาสมา ผลการทดสอบหัวพลาสมาพบว่าพลาสมาติดได้ดีที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ในช่วง 0-4 lpm และกำลังไฟฟ้า 0-2 kW ความถี่ 70-100 kHz พลาสมาพุ่งออกมาทั้งหมด 3 แฉก รวม 22 รูสามารถเปิดหัวพลาสมาทิ้งไว้ติดต่อกันนานกว่า 30 นาที แต่จะเกิดความร้อนสะสมที่แผ่นรองชิ้นงานมากขึ้นตามเวลาการใช้งาน แต่เวลาที่เหมาะสมใช้ในการปรับปรุงเมล็ดพืชหลายชนิดด้วยพลาสมาจะไม่เกิน 1 นาที ซึ่งความร้อนสะสมที่เกิดกับเมล็ดพันธุ์จะไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส ได้ทดสอบการงอกของเมล็ดพืชหลายชนิดหลังวางเมล็ด 5 วัน พบว่า เมล็ดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมา 5-25 วินาที มีอัตราการงอกเพิ่มขึ้น มีความสมบูรณ์แข็งแรงและให้ผลผลิตสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะ เนื่องจากตัวแปรที่ใช้ในการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ด้วยพลาสมานั้นมีหลายตัวแปร ในงานวิจัยต่อไป คณะผู้วิจัยจะศึกษาชนิดและสัดส่วนแก๊สที่เหมาะสมที่ช่วยเพิ่มอัตราการงอกและอัตราการโตได้อย่างมีนัยสำคัญ เพื่อให้สามารถเพิ่มผลผลิตของพืชหลายชนิดได้มากที่สุดต่อไป

บรรณานุกรม

- 
- [1] X. Liao *et al.*, “Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review,” *Food Control*, vol. 75, pp. 83–91, 2017.
- [2] R. Zhou, J. Li, R. Zhou, X. Zhang, and S. Yang, “Atmospheric-pressure plasma treated water for seed germination and seedling growth of mung bean and its sterilization effect on mung bean sprouts,” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, no. July 2017, pp. 1–9, 2018.
- [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] S. H. S. Mandala, M. Januar, B. Liu, and K.-C. Liu, “Designing the Topology of a Unipolar Pulsed-DC Power Supply using the Open-source Scilab/Xcos Software for a Low-cost Plasma Etcher,” *Solid State Electron. Lett.*, vol. 2, pp. 35–43, 2020.
- [5] 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.
- [6] X. Zheng, G. Chen, Z. Zhang, J. Beem, S. Massey, and J. Huang, “A two-step process for surface modification of poly(ethylene terephthalate) fabrics by Ar/O₂ plasma-induced facile polymerization at ambient conditions,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 226, pp. 123–129, 2013.

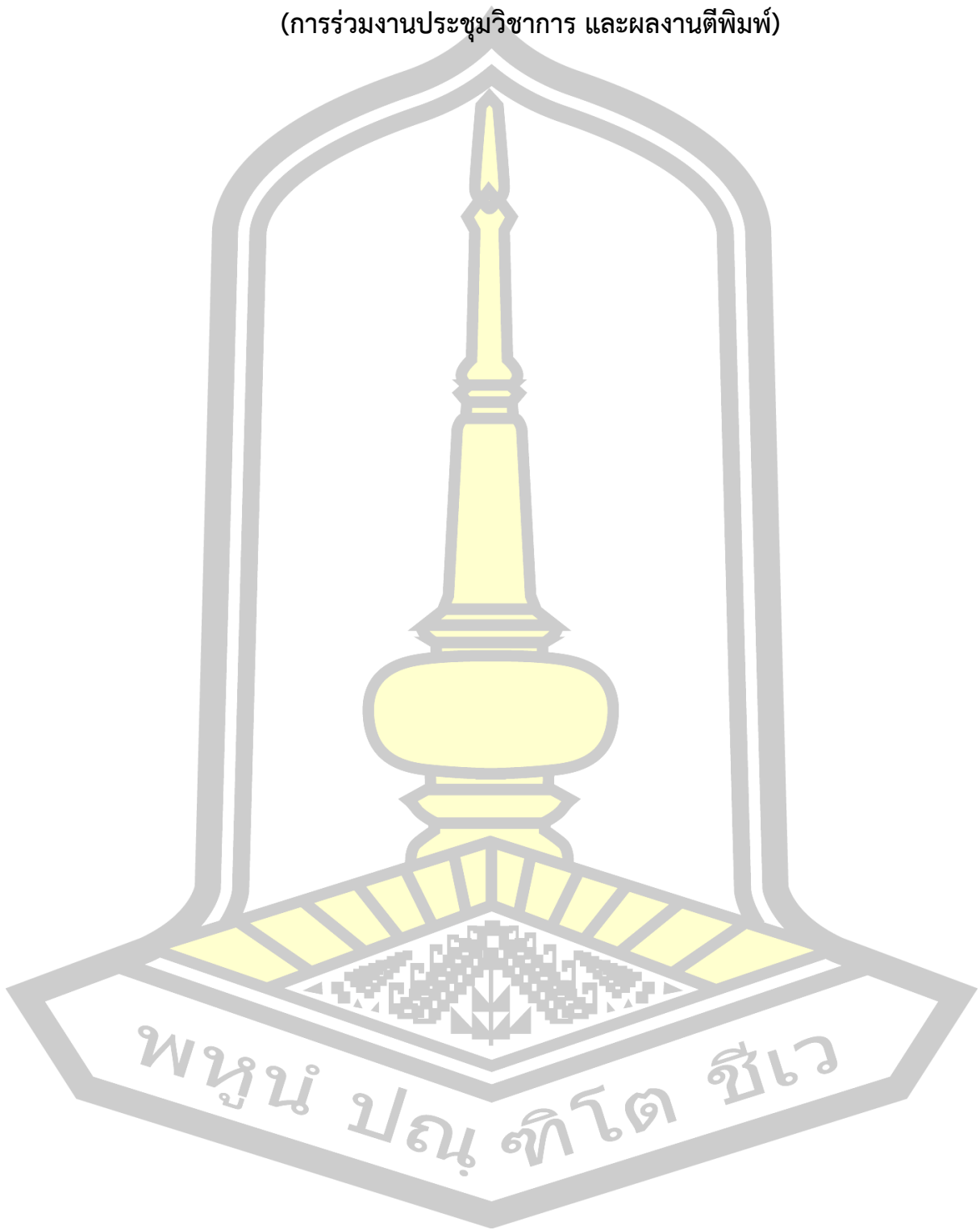
- 
- [7] C. Yong-Nong and K. Chih-Ming, "Design of plasma generator driven by high-frequency high-voltage power supply," *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 225–234, 2013.
- [8] F. Sohbatzadeh, E. Shakerinasab, M. Eshghabadi, and M. Ghasemi, "Characterization and performance of coupled atmospheric pressure argon plasma jet with n-hexane electro spray for hydrophobic layer coatings on cotton textile," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 91, no. August 2018, pp. 34–45, 2019.
- [9] M. S. Hossain, Z. Urbi, A. Sule, and K. M. H. Rahman, "Andrographis paniculata (Burm. f.) Wall. ex Nees: a review of ethnobotany, phytochemistry, and pharmacology," *ScientificWorldJournal.*, vol. 2014, Dec. 2014.
- [10] 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 andrographis paniculata," *Plasma Sci. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 260–266, 2014.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.

- [14] J. Tong, R. He, X. Tang, M. Li, and J. Wan, "Transcriptomic analysis of seed germination improvement of *Andrographis paniculata* responding to air plasma treatment," *PLoS One*, vol. 15, no. 10 October, pp. 1–16, 2020.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.

- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] S. Srisophon, "Tuning Surface Wettability through Hot Carrier Initiated Impact Ionization in Cold Plasma," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 10, no. 13, pp. 11297–11304, 2018.
- [25] X. Gao *et al.*, "Effect of Dielectric Barrier Discharge Cold Plasma on Pea Seed Growth," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 67, no. 39, pp. 10813–10822, 2019.
- [26] T. Wang, J. Wang, S. Wang, L. Lv, M. Li, and L. Shi, "Effect of metal mesh addition on polymer surface etching by an atmospheric pressure plasma jet," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 570, no. September, 2021.
- [27] K. Srakaew *et al.*, "Development of a Multihole Atmospheric Plasma Jet for Growth Rate Enhancement of Broccoli Seeds," *Process. 2021, Vol. 9, Page 1134*, vol. 9, no. 7, p. 1134, Jun. 2021.
- [28] "Infrared Spectroscopy Absorption Table - Chemistry LibreTexts." https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Reference/Reference_Tables/Spectroscopic_Reference_Tables/Infrared_Spectroscopy_Absorption_Table (accessed Mar. 20, 2023).

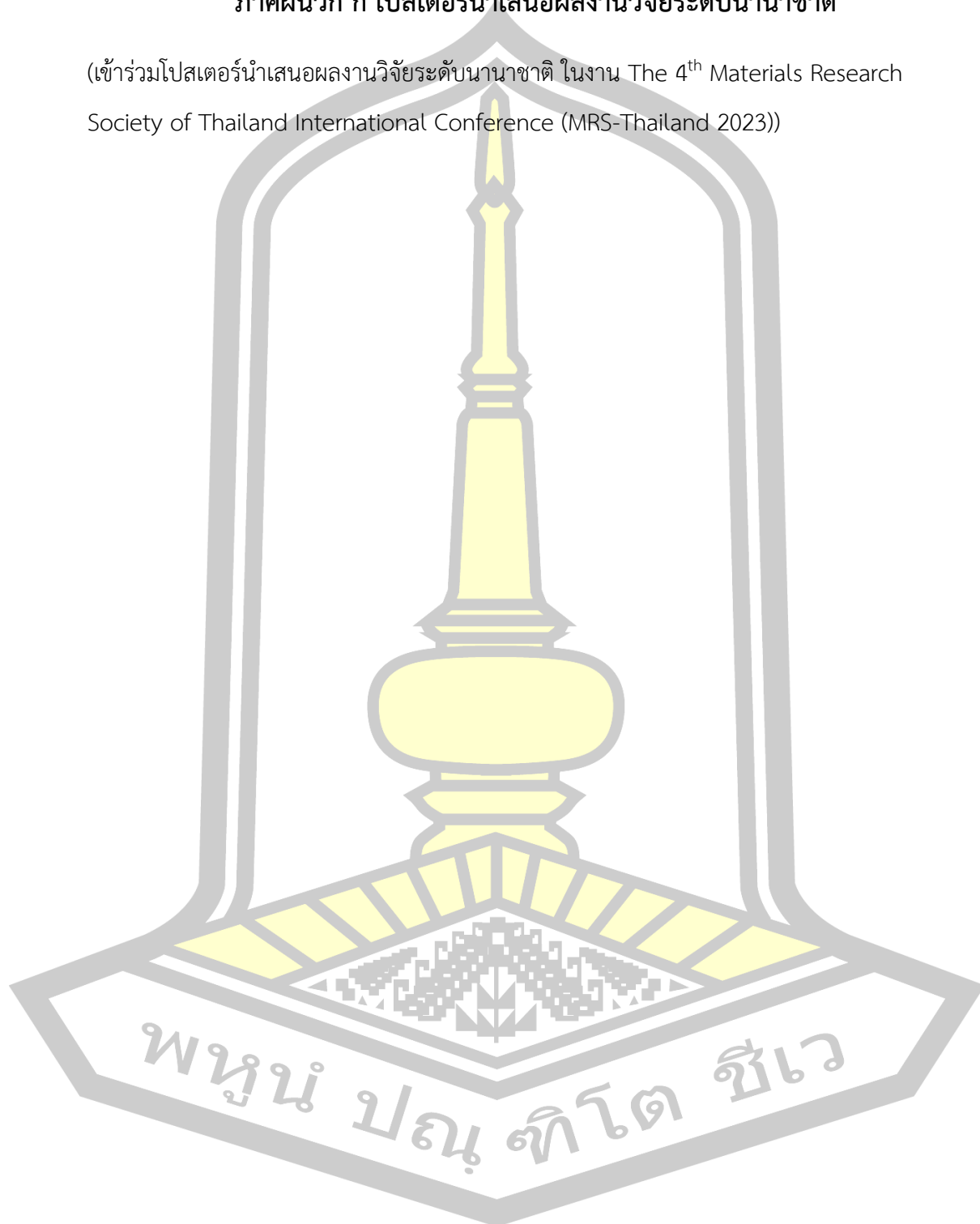
ภาคผนวก

(การร่วมงานประชุมวิชาการ และผลงานตีพิมพ์)



ภาคผนวก ก โปสเตอร์นำเสนอผลงานวิจัยระดับนานาชาติ

(เข้าร่วมโปสเตอร์นำเสนอผลงานวิจัยระดับนานาชาติ ในงาน The 4th Materials Research Society of Thailand International Conference (MRS-Thailand 2023))



DBD-Like Plasma Jet Design for Germination Improvement of *Andrographis paniculata* seeds

Khattiya Srakaew^{a*}, Artit Chingsungnoen^a, and Phitsanu Poolcharuansin^a

^aTechnological Plasma Research Unit, Department of Physics, Faculty of Science, Maharakham University, Maha Sarakham 44150, Thailand

E-mail: Khattiya.ball@gmail.com

Abstract

The objective of this study was to improve seed germination by developing a plasma jet with dielectric barrier discharge at atmospheric pressure. To this end, a plasma source configuration was designed using SOLIDWORKS and flow simulation add-ins to ensure uniform flow. The gas velocity increased as it flowed through the nozzle of the power electrode. The study used a high-voltage source AC that can generate 12-15 kV_r, and whose frequency can be adjusted between 50-200 kHz to break the gas into plasma. The plasma source was tested at different gas flow rates of 0, 0.5 and 1 lpm and was found to be stable and continuous. The highest electrical output was observed at a gas flow rate of 0.5 lpm. *Andrographis paniculata* seeds were treated with the plasma source to improve their germination. The study showed that the germination rate of the treated seeds was 10% higher than that of the control seeds in the first five days. This increase in germination was attributed to the hydrophobicity of the seed surface, which allowed better absorption of oxygen and moisture from the environment.

Introduction

Plasma treatment is a surface modification process that uses ionized gas or plasma to alter the surface properties of materials [1]. In this study, dielectric barrier discharge was used like a plasma jet to increase the surface free energy of *Andrographis paniculata* seeds and the resulting effects on seed germination. The results indicate that a short treatment can improve seed quality, but a longer plasma treatment can cause gene damage and hinder seed germination [2].

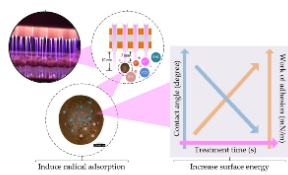


Figure 1. illustrates the plasma treatment process, which increases the surface energy, resulting in a reduction of the water contact angle [3].

Experimental detail

The procedures for developing and producing DBD-like plasma beams to enhance germination are described below.

1. A high-voltage power supply AC was developed for the conversion of gas into plasma, generating 12-15 kV_r with a resonant frequency range of 50-200 kHz.
2. The argon gas can be fine-tuned in the range of 0.5-1.5 lpm to determine the most effective gas state.
3. To ensure uniform distribution of plasma on the seed surface, the rotation of the germ holder can be adjusted between 0-100 RPM.
4. The ideal power setting for this system is 75 kHz, with the frequency range adjustable between 50-200 kHz and the power range adjustable between 0-200 W.

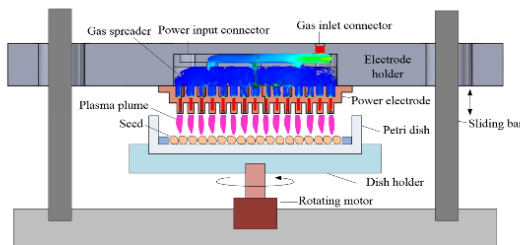
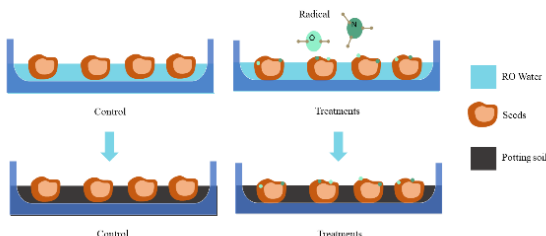


Figure 2. diagram of a DBD-like plasma jet operated at atmospheric pressure.

Germination test

A germination test is a laboratory procedure for determining the viability and quality of seeds. In a germination test, a seed sample is stored under specific conditions such as temperature, light, and humidity that are optimal for seed germination.



$$\text{Germination rate (\%)} = \frac{N_t}{N_0} \times 100\%$$

Where: N_t is the number of germinate seed
 N_0 is the total number of seed

Figure 3. presented to illustrate the process of the germination experiment conducted on plasma-treated seeds and control samples.

Result and discussion

The DBD-like plasma jet was used to enhance germination of *Andrographis paniculata* seeds, as shown in figure 4.

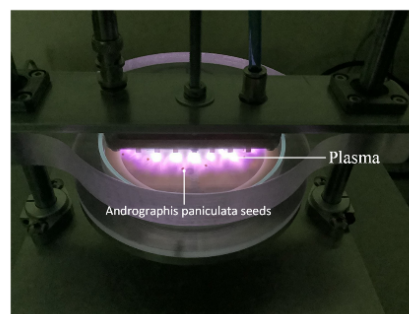


Figure 4. DBD-like plasma jet during seed treatment.

The impact of plasma on the enhancement of the germination rate

The plasma jet impinging on the seed coat and stimulated the surface to absorb water and oxygen into the embryo, with the endosperm feeding the embryo, which is composed of nutrient-producing cells strung together. As a result of the plasma treatment, seed germination rates were higher and seedling maturity was improved, with root length increasing from 3 cm to 4 cm.

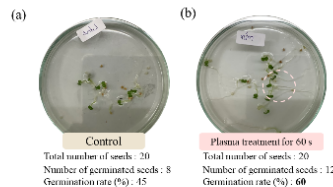


Figure 5. shows a comparison of the growth of *Andrographis paniculata* sprouts after 30 days of cultivation. Panel (a) control, (b) treatment time of 60 s.

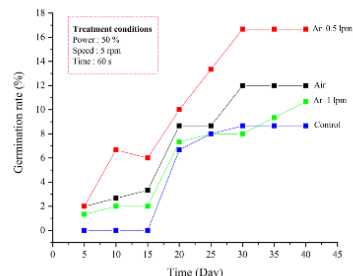


Figure 6. the results of the plasma air test were compared with those of premixed Ar gas at flow rates of 0.5 and 1 lpm.

Conclusions

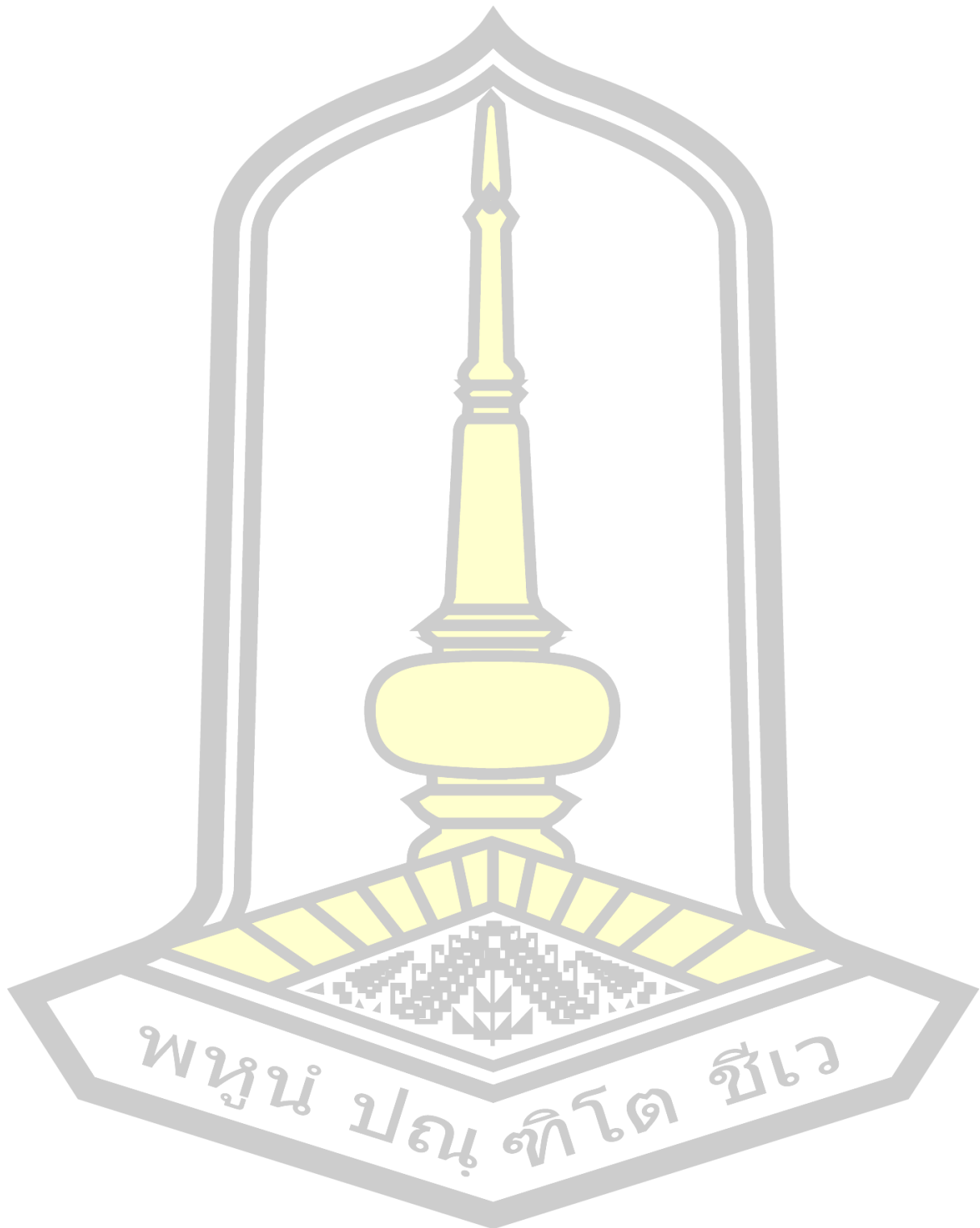
The use of a DBD-like plasma jet at atmospheric pressure has the potential to serve as an alternative to increase agricultural productivity by more than 10% compared to the control group.

Acknowledgments

This research project was financially supported by Maharakham University.

Reference : [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] J. Tong, R. He, X. Tang, M. Li, and J. Wan, "Transcriptomic analysis of seed germination improvement of *Andrographis paniculata* responding to air plasma treatment," PLoS One, vol. 15, no. 10, October, pp. 1–16, 2020.
 [3] K. Srakaew et al., "Development of a Multibore Atmospheric Plasma Jet for Growth Rate Enhancement of Broccoli Seeds," Process, 2021, Vol. 9, Page 1134, vol. 9, no. 7, p. 1134, Jun. 2021.

ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์





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

ชัตติยะ สระแก้ว¹ อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน² ปรมเมษฐ์ จันทร์เพ็ง³ 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 Chingsoongnern² Porameth Janpeng³ 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 พบว่าอัตราการไหลและกำลังไฟฟ้าที่ทำให้พลาสมาติดอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอมากที่สุด คือ 250 L/h ที่กำลังไฟฟ้า 893 W ความถี่ 52 kHz ผลการประยุกต์ใช้หัวกำเนิดพลาสมา ที่ออกแบบและสร้างขึ้นที่รีดเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว 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 ที่เกิดจากการให้พลังงานมากพอกับแก๊สเพื่อทำให้แก๊สแตกตัว (Ionized) โดยพลังงานที่ให้อาจอยู่ในรูปความร้อน แสง หรือ สนามไฟฟ้า สถานะพลาสมาประกอบไปด้วยอนุภาคหลายชนิด เช่น ไอออน อิเล็กตรอน โมเลกุล และเรดิคัล 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) การประยุกต์ใช้พลาสมาเพื่อปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์พืชต่าง ๆ เพื่อช่วยในการงอกและการเจริญเติบโต ถือว่าเป็นเรื่องใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจทั้งจากนักวิชาการเกษตรและนักพลาสมาเทคโนโลยี โดยใน

ปี ค.ศ. 2011 Zhou และคณะ (2011) ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น (Dielectric barrier discharge: DBD) ปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศ โดยศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมาต่ออัตราการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิต พบว่าเมล็ดพันธุ์ที่ถูกทรีตภายใต้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6,120 V มีอัตราการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตสูงสุด ซึ่งอธิบายว่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงเพียงพอจะทำให้การดีสชาร์จเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และรุนแรงพอที่จะทำให้อนุภาคที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Active air particles) และรังสีอัลตราไวโอเล็ต สามารถทะลุผ่านเยื่อหุ้มเมล็ด (Capsule of the seeds) กระตุ้นให้เกิดการส่งผ่านของเหลวที่หล่อเลี้ยงส่วนต่างๆ ของเซลล์ ทำให้เกิดการงอกของรากออกจากเมล็ดได้ดีขึ้น ในปี ค.ศ. 2013 Filatova และคณะ (2013) ได้ใช้แหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุ ทำการจุดพลาสมาจากแก๊สตั้งต้นที่เป็นอากาศภายใต้หัวไฟฟ้าแบบแผ่นคู่ขนานและแบบทรงกระบอก จากนั้นนำพลาสมามาทรีตเมล็ดข้าวโพด ข้าวสาลี และเมล็ดถั่วลูนิน โดยศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าและความดัน ซึ่งพบว่าที่ความดัน 500 mTorr และกำลังไฟฟ้า 0.2 W/cm² และใช้เวลาในการทรีต 5 นาที ผิวเปลือกหุ้มเมล็ดพันธุ์ถูกกัดกร่อนทั้งจากไอออนและเรดิคัลจากพลาสมา 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) ในระหว่างการทรีด ซึ่งไม่ส่งผลต่ออัตราการงอกและการเจริญเติบโต นอกจากนี้ Ling และคณะ (2015) ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันต่ำทรีดเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองเป็นเวลาสั้นๆ เพียง 15 วินาที โดยศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าในการจุดพลาสมาในช่วง 60-120 W ผลการศึกษาพบว่าที่กำลังไฟฟ้า 80 W เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองมีความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น 14% สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การงอกเพิ่มขึ้น 15% และเปอร์เซ็นต์ดัชนีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 63% ขณะที่ Tong และคณะ (2014) ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น เพื่อทำการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ฟักดาเลย์โง ผลการทดลองพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมา 5,950 V และเวลาการทรีด 10 วินาที สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การงอกได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ Ji และคณะ (2016) ได้ใช้แหล่งจ่ายไฟศักย์ไฟฟ้าสูงแบบพัลส์สร้างพลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศแบบฉนวนขวางกั้น เพื่อทำการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ฝักขาม เนื่องจากโดยปกติแล้วเมล็ดพันธุ์ฝักขามจะมีอัตราการงอกต่ำ แต่จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้อากาศเป็นแก๊สตั้งต้นในการจุดพลาสมาแบบพัลส์ เมล็ดพันธุ์ฝักขามที่ผ่านการทรีดมีเปอร์เซ็นต์การงอกเพิ่มขึ้น แต่ถ้าวทรีดเมล็ดพันธุ์มากกว่า 10 ครั้งติดๆ กัน เปอร์เซ็นต์การงอกจะลดลง ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าช่วงเวลาการใช้พลาสมาทรีดเมล็ดพันธุ์จะต้องมีความเหมาะสมหรือจะต้องไม่นานเกินไป เนื่องจากเรติคูลาจากออกซิเจนที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา และแสงยูวีจากพลาสมาอาจทะลุผ่านเยื่อหุ้มเมล็ดเข้าไปทำลายระบบเซลล์ (Cellular damage) ทำให้เมล็ดพันธุ์เสียหายได้ และในปีเดียวกันนี้ Zahoranova และคณะ (2016) ได้ใช้พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศภายใต้ขั้วไฟฟ้าแบบ Diffuse coplanar surface barrier discharge (DCSBD) ทำการทรีดเมล็ดพันธุ์ข้าวสาลี โดยระบบขั้วไฟฟ้าชนิดนี้สามารถสร้างพลาสมาที่กำลังไฟฟ้าสูงถึง 100 W/cm² ผลจากการศึกษาพบว่าเวลาการทรีดในช่วง 20-50 วินาที สามารถให้เปอร์เซ็นต์การงอกและดัชนีความแข็งแรงของเมล็ด (Vigor of seeding) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการจับน้ำ (Wettability) ที่มากขึ้น นอกจากนี้ผลจากการทดสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่เติมลงไป พบว่าการทรีดพลาสมาสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์บนผิวเมล็ดพันธุ์ได้ นอกจากนี้ Butscher และ

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

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่ามีหลายงานวิจัยที่ใช้ระบบ DBD ในการสร้างพลาสมาเพื่อปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ แต่ด้วยธรรมชาติของขั้วไฟฟ้าใน DBD ที่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟศักย์สูงในระดับหลายสิบกิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างขั้วกำลังและขั้วกราวด์ต้องอยู่ชิดมากในระดับ 1-2 mm จึงทำให้ไม่สะดวกในการทรีดเมล็ดพันธุ์ที่มีขนาดใหญ่ อีกทั้งเมื่อต้องการทรีดเมล็ดพันธุ์อย่างต่อเนื่องและปริมาณมากจะทำได้ยาก อีกทางเลือกหนึ่งคือ การสร้างพลาสมาที่ความดันต่ำทรีดเมล็ดพันธุ์ เช่นในงานวิจัยของ Oh และคณะ (Oh et al., 2017) ได้ใช้ไมโครเวฟสร้างพลาสมาเย็นที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สไนโตรเจนที่ความดันต่ำทำการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Salmonella typhimurium* ในต้นอ่อนเรดิซ ผลการทดลองพบว่าที่ กำลังไฟฟ้า 900 W และความดัน 667 Pa ใช้เวลาการทรีด 20 นาที พลาสมาสามารถทำให้เชื้อลดลงได้สูงสุดถึง 2.6 ± 0.4 log CFU/g แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าเวลาที่ใช้ในการทรีดค่อนข้างนาน และการใช้ความดันขณะทำงานที่ค่อนข้างต่ำจะทำให้ต้นอ่อน (Sprout) ที่ผ่านการทรีดเสียความชุ่มชื้นและเหี่ยวง่าย เนื่องจากการระเหยของน้ำในสภาวะสุญญากาศ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure plasma jet: APPJ) สำหรับปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์ เนื่องจากระบบ APPJ ไม่ต้องใช้ปั๊มและแชนเบอร์สุญญากาศ จึงสามารถลดต้นทุนในการสร้างระบบไปได้อย่างมาก อีกทั้งการสร้างหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรู (Multi-hole) จะช่วยเพิ่มพื้นที่ในการทรีดทำให้การทรีดเมล็ดพันธุ์มีความรวดเร็วทั่วถึง และต่อเนื่องมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถทรีดเมล็ดพันธุ์ที่มีขนาดใหญ่ได้ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ปรับปรุงผิวเมล็ดพันธุ์เพื่อกระตุ้นการงอกและอัตราการโค ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อเกษตรกรในอนาคตต่อไป

วิธีการดำเนินการวิจัย

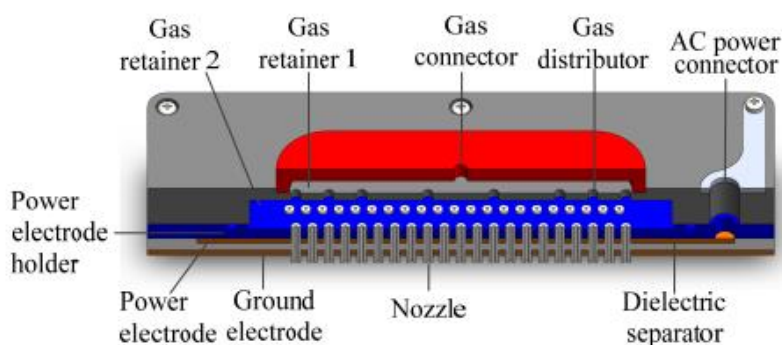
การสร้าง หัวกำเนิดพลาสมาแบบหลายรูที่มีความดันบรรยากาศ หรือเรียกสั้นๆ ว่า Multi-hole-APPJ มีขั้นตอนการทำงานหลักๆ คือ 1) ออกแบบหัวกำเนิดพลาสมา โดยใช้โปรแกรม SolidWorks 2016 2) ทดสอบการไหลของแก๊สภายในหัวกำเนิดพลาสมา โดยใช้ฟังก์ชัน Flow simulation 3) ตรวจสอบและปรับแก้แบบเพื่อให้แก๊สไหลผ่านรูอย่างสม่ำเสมอ 4) ขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้ Computer numerical control (CNC) 5) ประกอบและทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสมา ในงานวิจัยนี้ได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบเพื่อสร้างภาพแบบจำลอง ของหัวกำเนิดพลาสมา ซึ่งสามารถนำแบบที่ได้มาแก้ไขหรือปรับปรุงในภายหลังได้ โดยต้นแบบของชิ้นส่วนที่ถูกนำมาประกอบรวมเป็นหัวกำเนิดพลาสมา ทางคณะผู้วิจัยได้ยื่นขอจดอนุสิทธิบัตรต่อหน่วยจัดการทรัพย์สินทางปัญญามหาวิทยาลัยมหาสารคาม เมื่อวันที่ 11 กันยายน พ.ศ. 2561 หมายเลขคำขอ 1803002042 ส่วนประกอบหัวกำเนิดพลาสมา แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งอธิบายการทำงานของชิ้นส่วนต่าง ได้ดังนี้

1. Gas connector ชิ้นส่วนนี้ทำจากแผ่นอะคริลิก ทำหน้าที่เป็นข้อต่อแก๊สเข้าหัวกำเนิดพลาสมา 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 ชิ้นแผ่นฉนวน ทำจากแผ่นเทฟลอน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ถูกเจาะรูและกัดขึ้นรูปเป็นท่อทั้งสองด้าน ท่อมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1 mm และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 3 mm ทำหน้าที่เป็นทั้งฉนวนไฟฟ้าคั่นระหว่างขั้วกำลังและขั้วกราวด์ (ground electrode) และเป็นท่อส่งผ่านแก๊สจากจากฝั่งขั้วกำลังไปยังปลายหัวฉีด (nozzle)



รูปที่ 1 ภาพจำลองสามมิติของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรู ตามอนุสิทธิบัตรหมายเลขคำขอ 1803002042

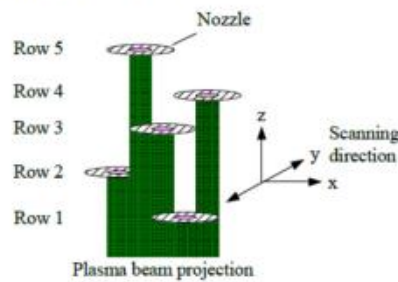
การออกแบบตำแหน่งท่อของ Dielectric separator ทำได้โดยอาศัยแนวคิดที่ว่าเมื่อทำการสแกนหัวกำเนิดพลาสมาในแนวแกน y ตามรูปที่ 2 แนวลำพลาสมาจะต้องเชื่อมต่อกันเพื่อให้เกิดการทรีดอย่างทั่วถึง สำหรับหัวกำเนิดพลาสมาต้นแบบนี้ ได้ออกแบบท่อทั้งหมด 5 แถว แต่ละแถวมีจำนวนรูทั้งหมด 21 รู รวมเป็นจำนวน 105 รู ดังนั้นเมื่อสแกนหัวกำเนิด

พลาสมา ผ่านชิ้นงานแนวลำพลาสมาจะเชื่อมต่อกันเป็นลำที่มีความกว้างถึง 105 mm เป็นการเพิ่มพื้นที่การกวาดไปของแนวลำพลาสมาขณะทำการทรีดเมล็ดพันธุ์

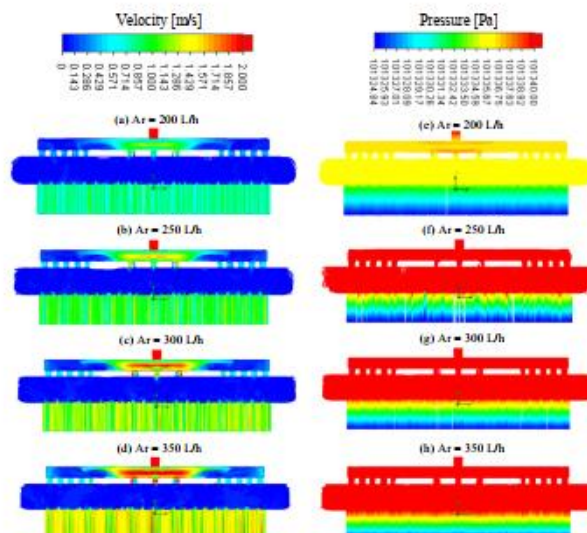
ในการออกแบบและสร้างชิ้นส่วนต่างๆ ของหัวกำเนิดพลาสมา มีหลักการอยู่ 2 ข้อ คือ 1) ต้องสามารถทำให้แก๊สพุ่งออกมาจากหัวฉีดสม่ำเสมอด้วยความเร็วที่เท่าๆ กัน 2) แก๊สที่พุ่ง

ออกมาจากหัวฉีดต้องมีความเร็วมากพอที่จะทำให้พลาสมาเจ็ดติดได้ง่าย 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 ตำแหน่งแก๊สจะล่อตัวและมีความเร็ว น้อย ความดันแก๊สจะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการของแบร์นูลลี ซึ่งกล่าวว่าการรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ

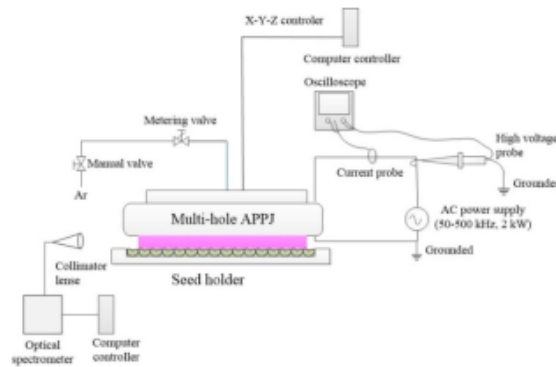
ภายในท่อที่ของไหลไหลผ่าน มีค่าคงตัว จากรูปจะพบว่าความเร็วแก๊สที่ไหลเข้าหัวกำเนิดพลาสมา มีค่าประมาณ 2 m/s ซึ่งเป็นจุดที่ความดันแก๊สมีค่าต่ำสุด จากนั้นแก๊สจะไหลเข้าไปในแผ่นกระจายแก๊สซึ่งจะมีความเร็วลดลงอยู่ในช่วง 1.1-2.0 m/s จากนั้นแก๊สก็จะล่อตัวมีความเร็วลดลงอยู่ในช่วง 0.2-0.7 m/s ก่อนไหลเข้าไปในห้องบรรจุแก๊สชั้นที่ 2 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แก๊สมีความดันสูงสุด เมื่อแก๊สไหลเข้าไปในห้องจะมีความเร็วมากขึ้นตามอัตราการไหลเข้าของแก๊สอาร์กอน นอกจากนั้นผลการออกแบบยังแสดงให้เห็นว่าไม่เกิดจุดสะเทินหรือจุดที่แก๊สไม่ไหลผ่านภายในห้องบรรจุแก๊สชั้นที่ 2 จึงทำให้ความเร็วแก๊สที่ไหลผ่านท่อ มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้ง 105 รู นั่นเอง



รูปที่ 2 ภาพร่างแสดงการเชื่อมต่อกันของแนวลำพลาสมาเจ็ดทั้ง 5 แถว เมื่อทำการสแกนในแนวแกน y



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



รูปที่ 4 โดอะแกรมการทดสอบหัวกำเนิดพลาสมาที่มีความดันบรรยากาศแบบหลายรู

รูปที่ 4 แสดงโดอะแกรมการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบการทำงานของหัวกำเนิดพลาสมา 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 ต่อเข้ากับหัววัดกระแสแบบแคลมป์มิเตอร์ (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)

ในขั้นตอนการทริตเมสตีฟันธุ์ ได้ติดตั้งเครื่องควบคุมตำแหน่ง (X-Y-Z controller) เพื่อกำหนดระดับความสูงของปลายหัวฉีด ซึ่งจะอยู่ที่ ประมาณ 5 mm เหนือเมสตีฟันธุ์ ถ้าปลายหัวฉีดอยู่ใกล้เมสตีฟันธุ์มากเกินไป ลำพลาสมาบางจุดอาจเกิดการอาร์คและทำให้หัวกำเนิดพลาสมาเสียหายได้

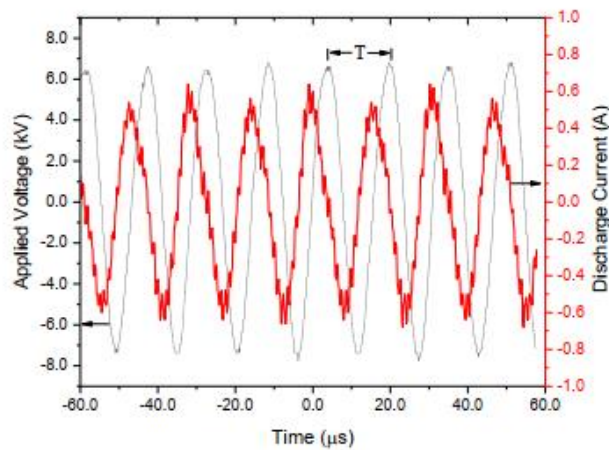
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมา

การหาช่วงกำลังไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมกับหัวกำเนิดพลาสมา ที่ได้ออกแบบไว้แล้วนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากถ้าใช้กำลังไฟฟ้าน่าเกินไป พลาสมาอาจจะไม่ติดหรือติดไม่เสถียร แต่ถ้าใช้กำลังไฟฟ้าสูงเกินไป หัวพลาสมาอาจจะร้อนและเสียหายได้ ค่ากำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส อัตราการไหลของแก๊ส ระยะห่างระหว่างหัวกำลังกับหัวกรวด ดังนั้นจึงได้ทำการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมา เพื่อศึกษาอัตราการไหลของแก๊สว่ามีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดพลาสมาอย่างไร เมื่อทำการจุดพลาสมาและพลาสมาเจ็ตติดอย่างเสถียรจะมีลำพลาสมาพุ่งออกอย่างสม่ำเสมอครบทุกรู ลักษณะสัญญาณแรงดันไฟฟ้า $V(t)$ และกระแสไฟฟ้า $I(t)$ ของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ตแบบหลายรูที่มีความดันบรรยากาศ 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

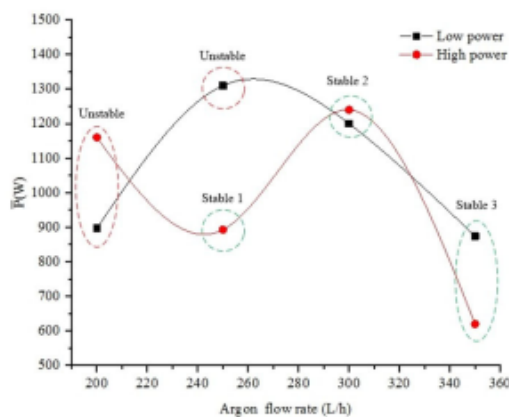
จากการวัดกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้สำหรับจุดพลาสมาที่เงื่อนไขอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ในช่วง 200 250 300 และ 350 L/h พบว่าความยาวของลำพลาสมามีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามค่าอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ดังนั้นในการทดลองจึงได้ทำการตั้งค่ากำลังไฟฟ้าเริ่มต้นออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงกำลังไฟฟ้าต่ำ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

1. ตำแหน่ง Stable 1 หมายถึง เงื่อนไขที่ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำและใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่ำ แล้วทำให้ลำพลาสมาพุ่งออกมาอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ

2. ตำแหน่ง Stable 2 หมายถึง เงื่อนไขที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงและใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนปานกลาง แล้วทำให้ลำพลาสมาพุ่งออกมาอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ

3. ตำแหน่ง Stable 3 หมายถึง เงื่อนไขที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนสูง จึงจำเป็นต้องใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากในขณะที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนสูง ถ้าใช้กำลังไฟฟ้าสูงเกินไป ลำพลาสมาจะมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสถานะ Abnormal glow ไปยัง Arc discharge ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นที่แผ่นเทฟลอนที่ทำหน้าที่เป็นชั้นฉนวนกั้นระหว่างหัวกำเนิดและขั้วกราวด์ และทำให้หัวกำเนิดพลาสมา เสียหายได้ จึงต้องมีการปรับลดกำลังไฟฟ้าลงเพื่อให้ลำพลาสมามีความเสถียรมากขึ้นนั่นเอง

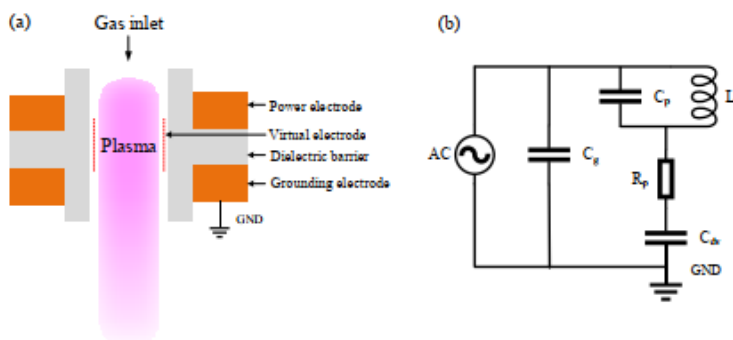
4. ตำแหน่ง Unstable หมายถึง ลำพลาสมาเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่อง หรือไม่มีลำพลาสมาพุ่งออกมา ซึ่งเกิดจากการใช้อัตราการไหลของแก๊สต่ำเกินไปหรือสูงเกินไป และ/หรือการใช้กำลังไฟฟ้าไม่เหมาะสมกับอัตราการไหลของแก๊ส



รูปที่ 6 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในการจุดพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่างๆ กัน

ในแต่ละรูของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ดแบบหลายรูจะมี โครงสร้างของขั้วไฟฟ้าแสดงได้ตามรูปที่ 7 (a) นั่นคือ จะมีชั้น Dielectric barrier ที่มีลักษณะเป็นท่อทั้งสองด้าน และถูก ประกอบด้วยขั้วกำลังและขั้วกราวด์ เมื่อแก๊สไหลผ่านขั้วกำลังและ ขั้วกราวด์ด้วยความเร็วสูง จะเปรียบเสมือนมีขั้ว Virtual electrode ทำหน้าที่จุดพลาสมาภายในท่อ ดังนั้นจึงสามารถ เทียบได้กับวงจรสมมูลที่มีตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัว

ต้านทานในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วย สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าได้ตามรูปที่ 7 (b) โดยที่ C_g คือ ความจุไฟฟ้า ของช่องว่างที่อยู่ระหว่างขั้วกำลังและขั้วกราวด์ก่อนจุดพลาสมา C_p, L_p คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าและตัวเหนี่ยวนำในขณะที่แก๊ส ระหว่างขั้วไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา C_{av} คือ ค่าความจุ ไฟฟ้าระหว่างขั้วเสมือน และขั้วกราวด์ และ R_p คือ ความ ต้านทานไฟฟ้าของพลาสมา



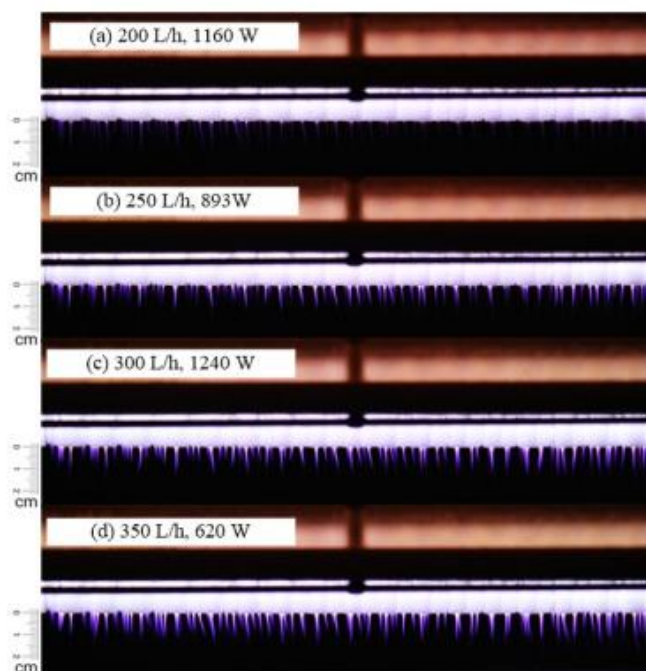
รูปที่ 7 โดอะแกรมของหัวกำเนิดพลาสมา (a) ภาพตัดขวาง เส้นประสีแดงหมายถึงขั้วเสมือนที่อยู่ระหว่างขั้วกำลังและขั้วกราวด์ที่ผิว ด้านในของท่อแก๊ส (b) วงจรสมมูลของหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ดแบบรูเดี่ยว (Joh et al., 2014)

ผลการวัดสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมา
 ในขั้นตอนต่อไปเป็นการทดสอบการทำงานของ หัวกำเนิดพลาสมา ที่กำลังไฟฟ้าและอัตราการไหลของแก๊ส อาร์กอนต่างๆ กัน ตามรูปที่ 8 ภาพถ่ายแสดงลักษณะลำพลาสมา เจ็ดที่ช่วงกำลังไฟฟ้าสูง พบว่าเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊ส

อาร์กอน 200 L/h จะเห็นลำพลาสมาเจ็ดพุ่งออกมาจางๆ และไม่ สม่าเสมอ ยาวประมาณ 0.3-0.6 cm แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหล เป็น 250 300 และ 350 L/h จะสังเกตเห็นลำพลาสมาพุ่งออกมา เข้มและยาวขึ้นเป็น 0.7 0.8 และ 1.0 cm ตามลำดับ และเมื่อใช้ อัตราการไหลของแก๊สมากกว่า 350 L/h จะเกิดการอาร์คที่รูของ

หัวกำเนิดพลาสมา บางรู และถ้าปล่อยให้เกิดการอาร์คนานเกินไปจะส่งผลให้ชั้นเพลอนเสียหายได้ จากการทดลองพบว่า เจ็อนโซที่ ทำให้ลำพลาสมาเจ็ตมีความเสถียรและติดอย่าง

สม่ำเสมอเป็นเวลานาน คือ ใช้กำลังไฟฟ้า ประมาณ 893 W และใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 250 L/h

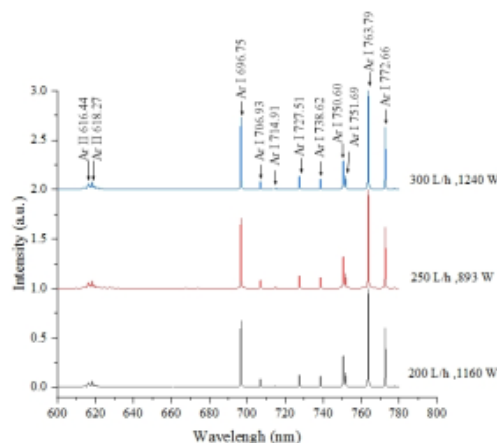


รูปที่ 8 ภาพถ่ายลักษณะลำพลาสมาเจ็ตที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่างกัน เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าสูงในการจุดพลาสมา

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดสเปกตรัมทางแสง (Optical emission spectroscopy) พบตำแหน่งพีคที่สอดคล้องกับสปีชีส์ที่คายพลังงานออกมาในช่วงความยาวคลื่น 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 เส้นสเปกตรัมที่สังเกตเห็นทั้งหมดเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมอาร์กอน

ในขณะที่พีคที่มีความเข้มต่ำๆ ไม่สามารถจำแนกได้ว่าเป็นพีคของอะตอมหรือโมเลกุล เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้วความเข้มเส้นสเปกตรัมที่เกิดจากการคายพลังงานของอะตอมเดี่ยวมีความเข้มสูงมากเมื่อเทียบกับเส้นสเปกตรัมที่เกิดจากการคายพลังงานของโมเลกุล จึงทำให้เครื่องตรวจวัดไม่สามารถจำแนกได้ว่าเป็นสัญญาณรบกวน (Noise) หรือสัญญาณจากหมู่เรดิคอลไฮดรอกซิล (-OH) หรือ เอมีน (-N-)

ศูนย์ ปณฺ ทิโต ขบ๑

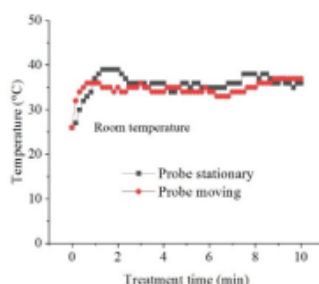


รูปที่ 9 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากหัวกำเนิดพลาสมา เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่างกัน

ผลการประยุกต์ใช้พลาสมาเจ็ตแบบหลายรูทรีดเมสลิคพันธุ

ในปัจจุบันพลาสมาเย็นที่มีความดันบรรยากาศ (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 โดยการทรีดเมสลิคพันธุเพื่อเพิ่มอัตราการงอกและอัตราการโต แต่อย่างไรก็ตามขอบเขตหลักของงานวิจัยนี้ คือการออกแบบและพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมา ให้มีความเสถียร ส่วนการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการทรีดเมสลิคพันธุชนิดต่างๆ นั้น ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้เมล็ดถั่วเขียวและทำการทรีดเพียงบางเงื่อนไขเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้เท่านั้น

ก่อนที่จะนำหัวกำเนิดพลาสมา ไปใช้ทรีดเมล็ดพันธุจะต้องมั่นใจว่าในระหว่างการทรีดอุณหภูมิของลำพลาสมาจะไม่สูงเกิน 55 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สามารถทำลายโครงสร้างภายในของเมล็ดพันธุ ดังนั้นจึงต้องทำการวัดอุณหภูมิของลำพลาสมาที่พุ่งออกจากปลายหัวฉีด โดยตำแหน่งที่ทำการวัดอยู่ห่างจากปลายหัวฉีด 0.5 cm ซึ่งเป็นระยะที่ใช้สำหรับทรีดเมสลิคพันธุ โดยได้ทำการวัดอุณหภูมิทั้งแบบที่หัวกำเนิดพลาสมา เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 10 cm/s และหัวกำเนิดพลาสมา หยุดนิ่ง พบว่าเมื่อทำการทรีดติดต่อกันนาน 10 นาที อุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 26 °C เป็น 35 °C ดังแสดงตามรูปที่ 10 ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ไม่ส่งผลให้เมล็ดพันธุเกิดความเสียหายอันเนื่องจากความร้อนสะสมในกรณีของหัวพลาสมาที่มีการเคลื่อนที่ขณะทำการวัดจะช่วยให้ความร้อนสะสมลดลงประมาณ 1-3 °C ซึ่งค่าของอุณหภูมิจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาการทรีดผ่านไป 2 นาที โดยลักษณะของค่าอุณหภูมิของทั้ง 2 แบบ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายๆ กัน



รูปที่ 10 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ระยะห่างจากปลายหัวฉีด 0.5 cm ในกรณีที่หัวกำเนิดพลาสมาหยุดนิ่งและหัวเคลื่อนที่

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

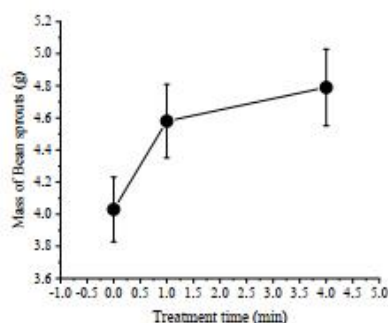
อย่างต่อเนื่อง ไม่เกิดการอาร์ค สอดคล้องกับความถี่แหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสสลับ 52 kHz และใช้เวลาการทรีต 1 และ 4 นาที ใส่ เมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวบนถาดเรียง 1 ชั้น เพื่อให้เมล็ดโดนทรีต พลาสมาอย่างทั่วถึง



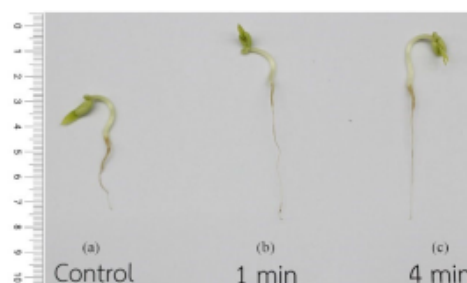
รูปที่ 11 ภาพถ่ายหัวกำเนิดพลาสมา ขณะทรีตเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว

จากนั้นทำการสุ่มเมล็ดมาเพาะจำนวน 30 เมล็ด ทำ 3 ซ้ำ เมื่อได้ต้นถั่วงอกที่เจริญเป็นเวลา 4 วัน จึงทำการวัดมวล และเปรียบเทียบกับมวลของต้นถั่วงอกควบคุม ผลการทดลอง พบว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาที่เวลาการทรีต 1 และ 4 นาที เมื่อนำมาเพาะจะทำให้ได้ต้นถั่วงอกที่มีมวลเพิ่มขึ้น เป็น 4.58 g และ 4.79 g ตามลำดับ ในขณะที่ต้นถั่วงอกควบคุมมี มวล 4.03 g ดังแสดงในรูปที่ 12 นอกจากนี้ยังพบว่าเมล็ดถั่ว เขียวที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาเมื่อนำมาเพาะจะทำให้ได้ต้น ถั่วงอกที่มีความยาวรากและลำต้นมากกว่าต้นถั่วงอกควบคุม ดัง

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



รูปที่ 12 ผลการชั่งมวลต้นถั่วงอกในช่วง 4 วันแรก จากเมล็ดที่ผ่านการทรีตพลาสมาที่เวลาต่างๆ กัน



รูปที่ 13 เปรียบเทียบต้นถั่วงอกในช่วง 4 วันแรก ซึ่งถูกเพาะจากเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวที่ถูกพริตด้วยพลาสมาที่เวลาต่างๆ กัน

สรุปผลการวิจัย

ผลการพัฒนาหัวกำเนิดพลาสมาเจ็ดแบบหลายรูที่ความดันบรรยากาศ เพื่อใช้ในการพริตเมล็ดพันธุ์ พบว่าความยาวของลำพลาสมาเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ที่อัตราการไหล 250 L/h และกำลังไฟฟ้า 893 W ทำให้เกิดลำพลาสมาที่มีความเสถียรและติดอย่างสม่ำเสมอ ผลการประยุกต์ใช้หัวกำเนิดพลาสมา พริตเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว พบว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการพริตด้วยพลาสมาที่อัตราการไหลสูงกว่าเมล็ดควบคุม ซึ่งสามารถยืนยันด้วยผลการวัดมวลที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเมื่อสุมนำต้นถั่วงอกในช่วง 4 วันแรก ซึ่งถูกเพาะจากเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการพริตด้วยพลาสมาที่มีความยาวรากและลำต้นมากกว่าเมล็ดควบคุม ดังนั้นหัวกำเนิดพลาสมา ที่ถูกพัฒนาขึ้นจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้พริตเมล็ดพันธุ์เพื่อเพิ่มอัตราการโตในช่วงต้นอ่อนได้ 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., Medvecka, 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.

□□□□□



Article

Development of a Multihole Atmospheric Plasma Jet for Growth Rate Enhancement of Broccoli Seeds

Khattiya Srakaew ¹, Artit Chingsungnoen ^{1,*}, Waraporn Sutthisa ², Anthika Lakhonchai ¹, Phitsanu Poolcharuansin ¹, Poramate Chungpeng ¹, Catleya Rojviriyia ³, Kanjana Thumanu ³ and Sarayut Tunmee ³

¹ Technological Plasma Research Unit, Department of Physics, Faculty of Science, Maharakham University, Maha Sarakham 44150, Thailand; khattiya.ball@gmail.com (K.S.); Lanthika26@gmail.com (A.L.); phitsanu.p@msu.ac.th (P.P.); poramat.c@msu.ac.th (P.C.)

² Department of Biology, Faculty of Science, Maharakham University, Maha Sarakham 44150, Thailand; waraporn.s@msu.ac.th

³ Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Nakhon Ratchasima 30000, Thailand; catleya@slri.or.th (C.R.); kanjanat@slri.or.th (K.T.); sarayut@slri.or.th (S.T.)

* Correspondence: artit.c@msu.ac.th; Tel.: +66-8971-10157

Abstract: This work aims to develop a multihole atmospheric pressure plasma jet (APPJ) device to increase the plasma area and apply it to a continuous seed treatment system. Broccoli seed was used to study the effects of an atmospheric pressure plasma jet on seed germination and growth rate. An argon flow rate of 4.2 lpm, a plasma power of 412 W, and discharge frequency of 76 kHz were used for seed treatment. The contact angle decreased strongly with the increase in treatment time from 20 s to 80 s. The broccoli seed's outer surface morphology seemed to have been slightly modified to a smoother surface by the plasma treatment during the treatment time of 80 s. However, the cross-sectional images resulted from Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy (SRXTM) confirmed no significant difference between seeds untreated and treated by plasma for 80 s. This result indicates that plasma does not affect the bulk characteristics of the seed but does provide delicate changes to the top thin layer on the seed surface. After seven days of cultivation, the seed treated by plasma for 30 s achieved the highest germination and yield.

Keywords: atmospheric pressure plasma jet; surface treatment; growth rate enhancement



Citation: Srakaew, K.; Chingsungnoen, A.; Sutthisa, W.; Lakhonchai, A.; Poolcharuansin, P.; Chungpeng, P.; Rojviriyia, C.; Thumanu, K.; Tunmee, S. Development of a Multihole Atmospheric Plasma Jet for Growth Rate Enhancement of Broccoli Seeds. *Processes* 2021, 9, 1134. <https://doi.org/10.3390/pr9071134>

Academic Editor: Dariusz Dziki

Received: 13 June 2021

Accepted: 28 June 2021

Published: 29 June 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Under laboratory conditions, plasmas are generated by applying a voltage between two electrodes. At sufficiently high power, the ionized gases consist of equal concentrations of positive and negative charges and many neutral species. In general, plasmas can be classified according to temperature into thermal and nonthermal plasmas, which are also termed cold plasmas [1]. Because it can operate at low temperatures, surface treatment with cold plasma has been used in numerous industries worldwide, such as semiconductor technology, medicine and cosmetics, packaging technology, textiles, and agriculture [2–4]. In atmospheric pressure cold plasma, ion temperature is close to room temperature. In contrast, the electron temperatures can easily be of the order of several eV (1 eV \cong 11,600 K). This electron temperature range (<10 eV) is responsible for rotational and vibrational excitations of molecules [5]. However, the small fraction of tail electrons in the electron energy distribution function (EEDF) with energies of the order 10 eV or even higher can generate many different chemical processes [6]. For example, the steady-state density of radicals in a nitrogen plasma jet (the mole fraction of water molecules in nitrogen gas is 0.01) with an electron temperature of 1 eV have been calculated by Uhm [7]. The results show that most reactive nitrogen species have a density of around 10^{14} – 10^{16} molecules/cm³ [7]. Argon plasma is frequently used for physical process treatment due to an effective energy transfer to the solid surface. The argon ions bombarding the surface can dislodge contamination

from it and roughen it on an atomic scale [8]. Oxygen, nitrogen, or humid air plasmas can be used for surface activation via the gas-phase radicals. When these plasmas are exposed to the surface, different functional groups are created modifying the chemical activity of the surface [9]. The reactive oxygen species (ROS) such as O_2^- , OH^- , and O_3 , reactive nitrogen species (RNS) such as NO, NO_2 , and NO_3 , and other reactive species are important in retaining the quality of seeds and food products [10–12]. These reactive radical species, especially NO, and also ultraviolet radiation can penetrate into the capsule of seeds and decompose the inner nutriment. This effect can accelerate the activities of the root of the seedling and increase seed germination [10,13].

Two methods have been frequently used to generate atmospheric pressure plasmas, an atmospheric pressure plasma jet (APPJ) and dielectric barrier discharge (DBD). These methods have unique features that are suitable for specific applications [11]. The DBD device consists of two plane-parallel metal electrodes and a dielectric layer covers at least one of these electrodes. The gap which separates the electrodes is limited to a few millimeters wide to ensure stable plasma operation [14]. The APPJ device consists of two concentric electrodes through which the working gas flows. By applying alternating current (AC) power to the inner electrode at a voltage high enough, the gas discharge is ignited [15]. Usually, these techniques are combined for generating and stabilizing atmospheric pressure plasmas. When APPJ is used for large-area processing, multiple jets or multihole arrays with a scanning stage are typically essential for continuous roll-to-roll processes [16]. This technique makes the cold APPs treatment a reliable method to improve seed performance and crop yield [17,18]. Seeds are the most basic and significant means of agricultural production, and high-quality seeds can rapidly germinate and grow [19,20].

Recently, the modification of surface properties of seeds by cold atmospheric pressure plasma treatments has been proposed as a helpful technique to improve seed germination [21–25]. Broccoli seed was chosen as the model for the operational testing of a multihole APPJ device. The effects of seed germination and the growth rate of sprouts on the treatment time were studied. Therefore, this work aims to develop the multihole APPJ device to increase the plasma area and apply it to a continuous seed treatment system.

2. Materials and Methods

The experimental set-up is schematically shown in Figure 1. It consisted of a multihole APPJ device with a computer controller for positioning, used for seed treatment, and an alternating current power supply with a discharge voltage range of 0–10 kV and a frequency range of 50–200 kHz used to sustain the plasma. This multihole APPJ device was designed and developed from a laboratory prototype [26]. Argon was used as a carrier gas and injected into the multihole APPJ device with a gas-flow rate range of 1.7–4.2 L per minute (lpm). A high voltage probe (Keysight N2771B, Santa Rosa, CA, USA) with 30 kV_{peak} was used to measure the variable voltages' waveforms at output points of the circuit. The clamp meter current (Pearson 4100, Palo Alto, CA, United States) was used to record the current supplied to the plasma source. The current-voltage waveform was recorded using a two-channel oscilloscope (Agilent technologies DSO1002A, Beijing, China).

The work of adhesion, surface morphology, and cross-sectional images of untreated and treated seeds were examined using contact angle measurement, scanning electron microscopy, and Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy. The SRXTM technique uses X-rays to create cross-sections of a physical object, obtaining three-dimensional (3D) images of samples. In this study, XTM measurement was performed at the end-station of beamline 1.2 W in the Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Nakhon Ratchasima, Thailand. The beamline photon source covered an energy range of 5 to 15 keV. The synchrotron radiation source at the storage ring was generated using a beam energy of 1.2 GeV. The sample was exposed to an incident X-ray beam and rotated through 180° to achieve several projections. These projections were reconstructed to create two-dimensional (2D) slices of the measured volume. The slices could be stacked to recreate the 3D image of

the sample. Broccoli seed was scanned using the XTM technique before and after plasma treatment for comparison of the external surface and internal structure of the seeds.

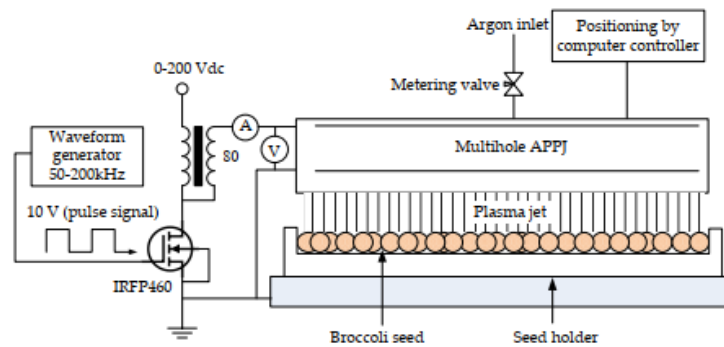


Figure 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

To ensure that the plasma beam temperature did not exceed the limit of seed growth, the temperature of the plasma ejected from the nozzle of multihole APPJ must be measured. The experimental set-up of the plasma temperature measurement and the basic diagram of multihole APPJ are schematically shown in Figure 2. The dielectric plate was designed to have five linear arrays with 21 tubes per array on both sides. It was sandwiched with the power and ground electrodes. After plasma was generated with suitable conditions of argon flow rate and discharge power, the plasma beam was ejected from the nozzle with a maximum length of around 10 mm. The spacing between the thermocouple probe and the nozzle was held at 5 mm. A dielectric film was used to cover the thermocouple's probe tip to prevent the built-up charge during the measurement.

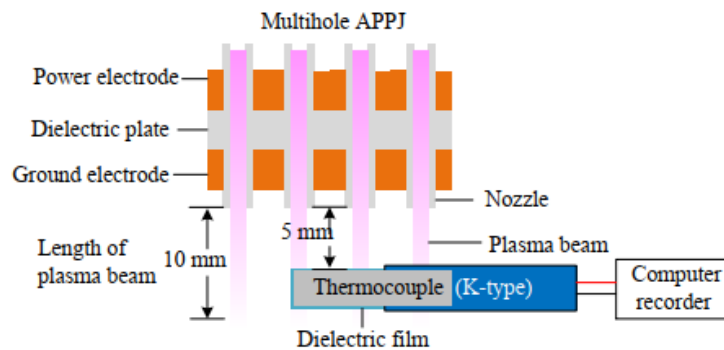


Figure 2. Schematic diagram of the multihole plasma jet with temperature measurement (not to scale).

Broccoli seeds with and without plasma treatment were tested for germination ability under laboratory conditions. Two layers of filter paper were soaked in distilled water before placing them in plastic germination boxes, and then 100 seeds of each treatment were added. The germination boxes were incubated at 20 °C for seven days, and the number of germinated seeds was recorded every day. There were three replications in each treatment. Broccoli seeds that had not been plasma-treated were used as a control.

Germination was considered to have occurred when the radicals were half of the seed length. The germination percentage was calculated as follows:

$$\text{Germination percentage (\%)} = \frac{\text{number of germinated seeds}}{\text{total number of seeds}} \times 100, \quad (1)$$

Seedling growth measurements were of shoot length and root length assessed every day for seven days. One hundred broccoli seeds were sown in sterilized peat moss in a seedling tray and watered with 50 mL of distilled water every day for seven days. The experiment was designed as a completely randomized design (CRD) with three replications. After seven days, broccoli sprouts were harvested, and the fresh weight was measured.

3. Results and Discussion

3.1. Plasma Temperature and Current-Voltage Measurements

Temperature is a crucial factor influencing the germination of seeds [27]. The germination rate increases with rises in temperature up to an optimum value and declines at temperatures exceeding it [28,29]. For most plants, the optimum and maximum germination temperatures are 15–30 °C and 30–40 °C, respectively [30]. High temperatures reduce enzyme efficiency, and eventually, a temperature is reached at which cellular protein is denatured, and the seed is killed [31]. Plasma consists of electrons and ions, which can bombard seed coats, increase the temperature, and affect the germination rate of the seed [32]. Therefore, before seed treatment, it must be ensured that the temperature of plasma does not exceed the upper temperature limits for germination. In this work, the temperature of plasma was measured as a function of exposure time with the sampling rate of 10 Hz, as shown in Figure 3. It found that during 20 min of plasma being exposed to the probe, the maximum temperature was around 36 °C. The temperature did not exceed 27 °C in a 1-min plasma treatment. This result means that the plasma source can be used to treat the seed plant without deteriorated seed populations [24].

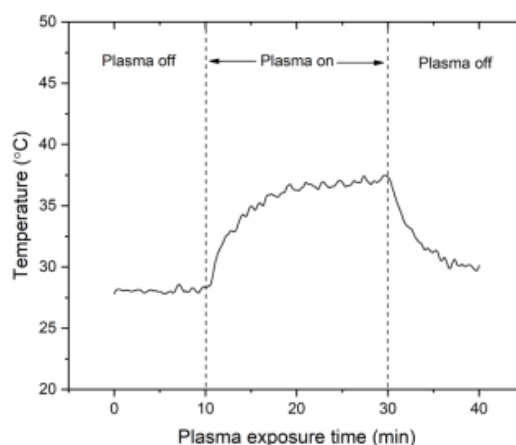


Figure 3. The temperature on the probe as a function of the plasma exposure time.

The current and voltage waveforms during the process of plasma treatment are shown in Figure 4. The phase difference between the voltage and the current was 101°. The impedance was practically capacitive, corresponding to the voltage waveform lags behind the current waveform [33]. The plasma can be easily generated, as seen in Figure 5, by using the frequency of 76 kHz. This frequency is suitable to transfer the electrical energy to the plasma source. The root mean squares of voltage V_{rms} of 4.6 kV and current I_{rms} of 410 mA were observed corresponding to the discharge power of 412 W.

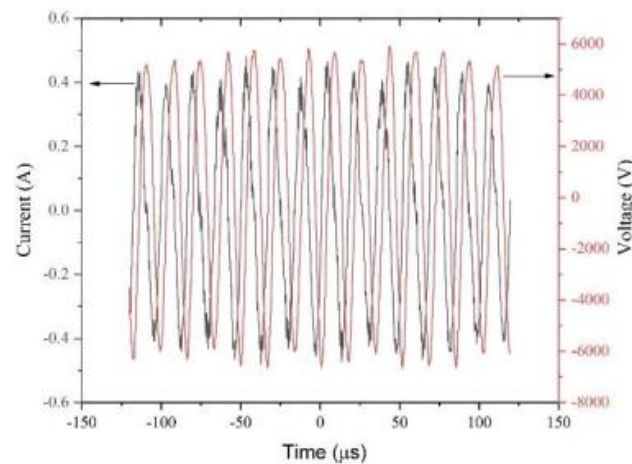


Figure 4. Current-voltage waveforms of the multihole plasma jet during the discharge power and frequency of 412 W and 76 kHz, respectively.

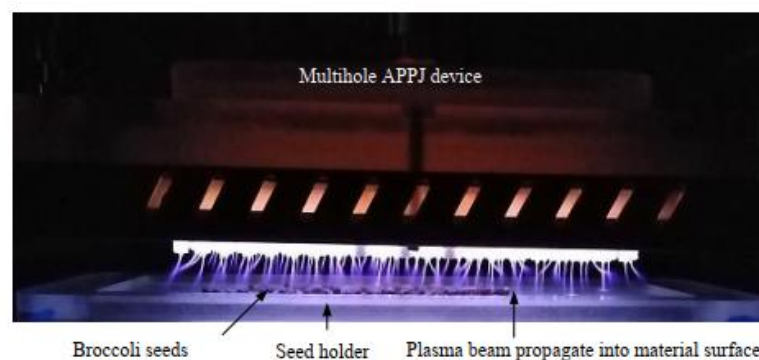


Figure 5. Photograph during the multihole plasma jet exposure of the broccoli seeds.

3.2. Contact Angle Measurement

Contact angle measurements were carried out using deionized water to determine the broccoli surface's hydrophilicity after being treated by the plasma. The results concerning the effect of multihole APPJ treatment on water wettability are shown in Figure 6. Because the broccoli seeds are small in size and naturally non-uniform in shape and surface structure, the contact angle definition should be modified using an arc surface [34]. As seen in Figure 6a, the contact angle of a liquid with a surface as the mechanical equilibrium of a drop resting on a plane solid surface is the angle between the surface tensions at the interface of the liquid and vapor phases (γ_{lv}) and at the interface of the solid and liquid phases (γ_{sl}) [35]. Figure 6b–f shows contact angle images of water droplets adhered to broccoli seeds (b) untreated and (c–f) plasma-treated with treatment times of 20 s, 40 s, 60 s, and 80 s, respectively. For each condition, the mean contact angle was measured using five broccoli seeds. The contact angle and work of adhesion as a function of the treatment time are shown in Figure 7. The contact angle was $130.8 \pm 5.5^\circ$ for the untreated seeds, and the contact angle decreased to $76.4 \pm 7.1^\circ$ when increasing the plasma treatment time. The work of adhesion of a liquid and solid can be calculated directly from the surface tension between liquid and vapor phases and the contact angle [36,37]. A decreasing contact angle

corresponds to increased work of adhesion from 26.0 ± 1.1 to 92.5 ± 8.6 mN/m. The contact angle decreased strongly, which indicates that the atmospheric pressure argon plasma treatment resulted in dramatic hydrophilization of seeds. The multihole APPJ in the air can produce reactive oxygen and nitrogen species, including NO_x , OH, O, and O_3 . These reactive species stimulate the activation processes of the surface [38,39].

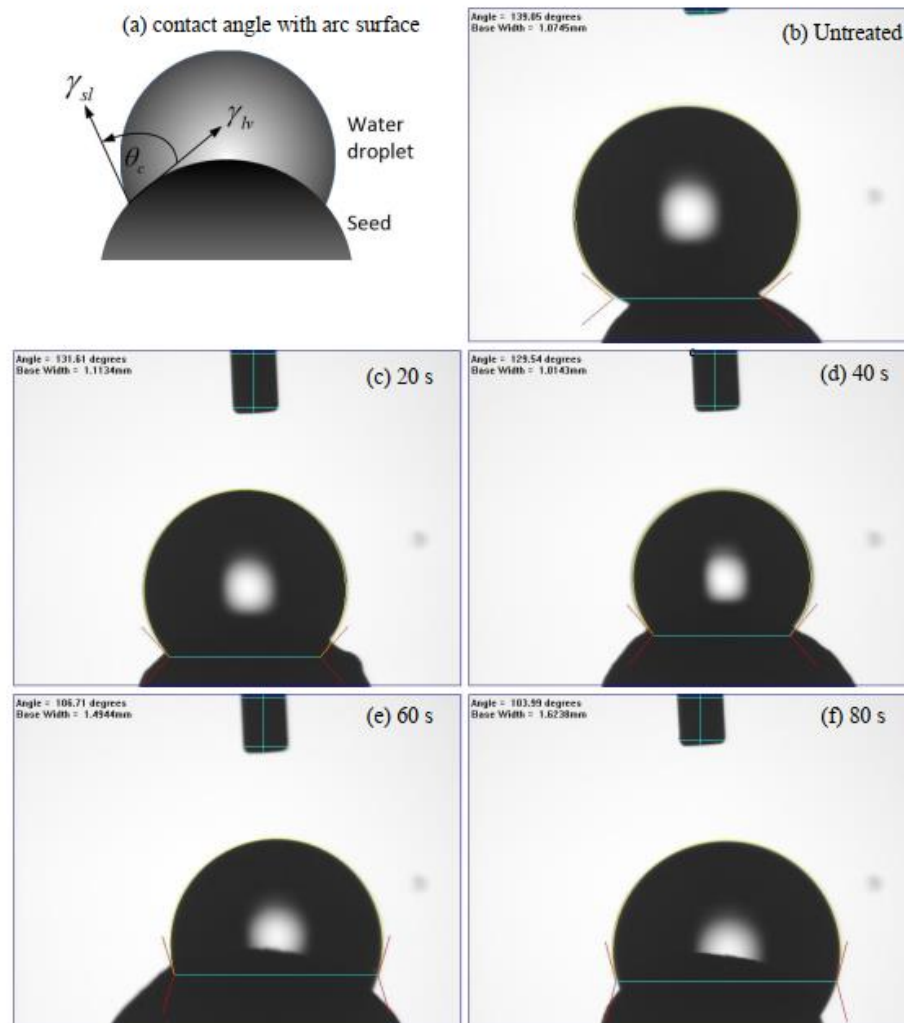


Figure 6. Contact angle measurement (a) schematic diagram of the contact angle with the arc surface, (b–f) contact angle images of the water droplet on broccoli seed with different treatment times.

3.3. SEM and XTM Images

Figure 8 shows the scanning electron images of the appearance of a particular structure on the treated and untreated seed surface. The broccoli seed's outer surface morphology seemed to be slightly modified to a smoother surface by the plasma treatment lasting for

80 s. The plasma electrons and ion bombardment of the seed coat's outer layer can reduce the volcano-like protuberances, making the seed surface appear more granulated [40,41].

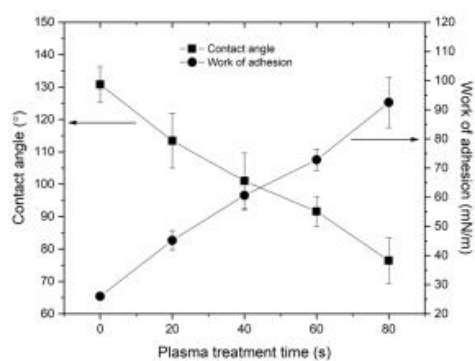


Figure 7. Contact angle and work of adhesion as a function of the plasma treatment time of broccoli seeds.

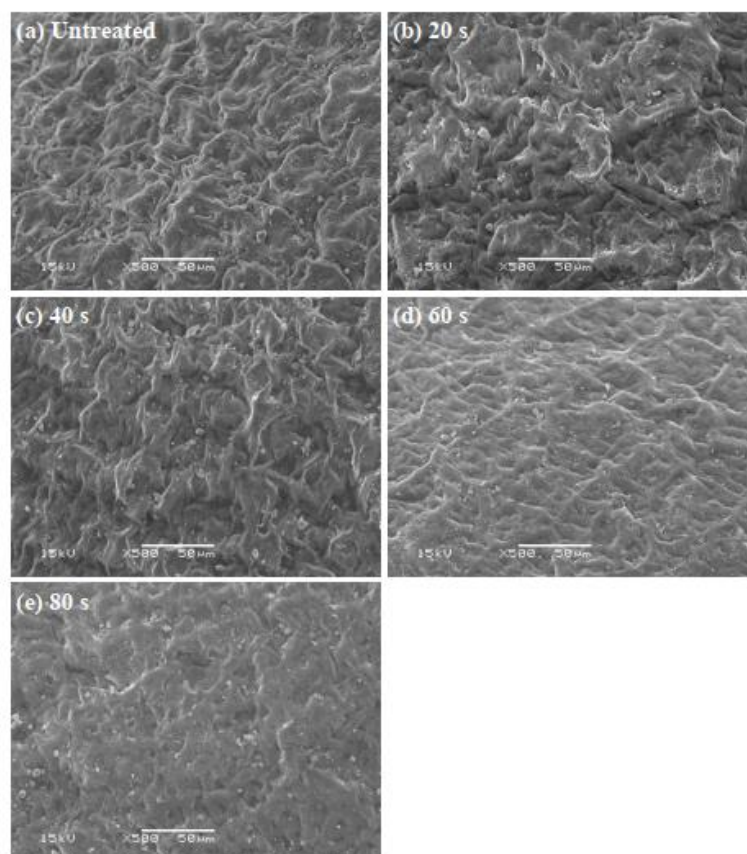


Figure 8. SEM image of broccoli seed (a) untreated, (b–e) plasma-treated for 20 s, 40 s, 60 s, and 80 s, respectively.

Figure 9 shows the XTM images of broccoli seed before and after plasma treatment. The whole seed's external surface is shown in Figure 9a,b, representing untreated and treated conditions. The XTM images show some rendering of the seed coat after being plasma treated for 80 s, resulting in a flatter surface when compared with the untreated sample. Figure 9c,d show the XTM images cross-sectional in the xz plane. This result reveals that the internal structure of the broccoli seed was not changed after the plasma treatment. In the plasma treatment process, the degree of ion energy may affect only the surface of the seed and cannot penetrate the seed coat and embryo. These results are in good agreement with the SEM analysis.

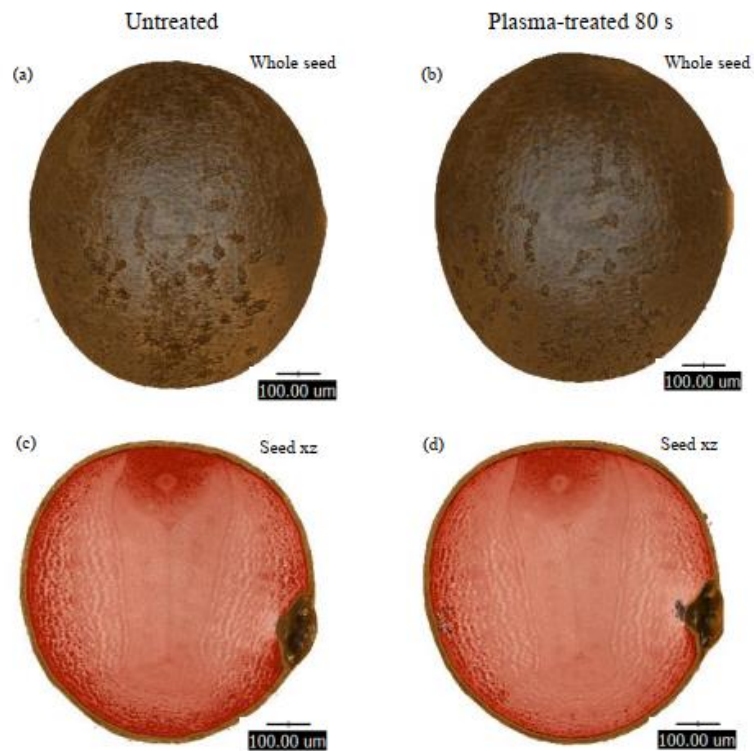


Figure 9. SRXTM image of (a) untreated, (b) plasma-treated, and cross-section in the xz direction of (c) untreated, and (d) plasma.

3.4. Effect of Plasma Treatment on Broccoli Seed Germination

Seeds treated by plasma showed an increased percentage of germination in comparison to the untreated seeds. Seven days after sowing, we found that the 30 s plasma-treated had the highest shoot length of 4.53 ± 0.12 cm, followed by seeds treated by plasma for 60 s (4.47 ± 0.15 cm) and the untreated seeds (4.39 ± 0.11 cm) as shown in Figure 10a. Figure 10b compares the germination percentage on days 1–7 of broccoli seed treated and untreated by plasma. Germination rates began to be stable from two days onwards. The results showed that seeds treated for 30 s had the highest germination rate of $94 \pm 1.6\%$, followed by the untreated seed ($92 \pm 0.9\%$). The germination percentage of seeds treated with plasma for 60 s decreased to $87 \pm 2.9\%$. This result could be due to the effect of ion bombardment of the seed during the plasma exposure.

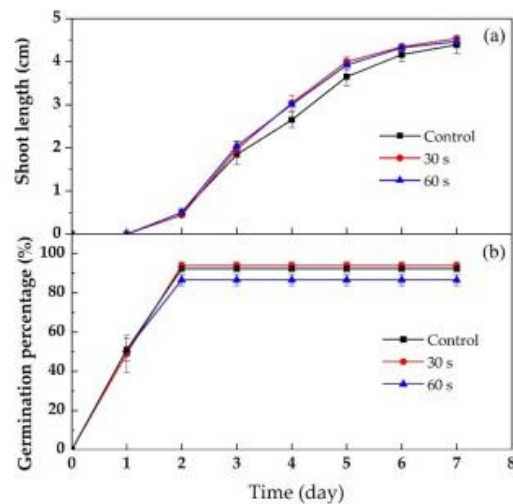


Figure 10. Effect of plasma seed treatment on broccoli cultivation (a) shoot length and (b) germination percentage on days 1–7.

Figure 11 compares the weight of seed, fresh sprouts, and additional weight of treated and untreated broccoli seeds after seven days of cultivation. The results showed that seed treated by plasma for 30 s obtained the highest yield. During plasma treatment, seeds were exposed to electrons, ions, UV, thermal radiation, and reactive species. Heat was the physical factor affecting the seed coats directly depending on the treatment time [32]. This phenomenon was attributed to the momentum transfer and chemical reactivity among radicals and ionic plasma species. Therefore, the increase in plasma treatment time can induce more reactive and energetic plasma active species that would negatively affect germination.

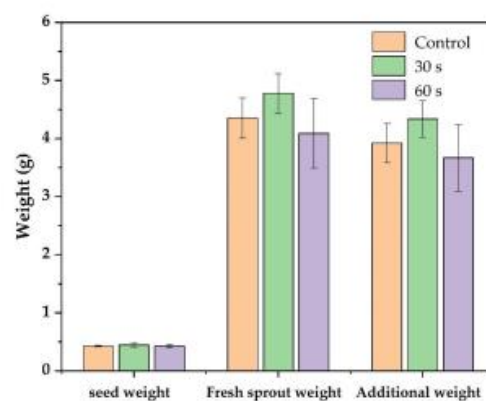


Figure 11. Comparison of the weight of sprouts of treated and untreated broccoli seeds after seven days of cultivation.

4. Conclusions

In this research, a multihole atmospheric pressure plasma jet with a scanning stage was developed to produce low-temperature plasma plumes for high-throughput large-

area treatment. The conditions that gave a stable plasma jet consisted of an argon flow rate of 4.2 lpm, plasma power of 412 W, and discharge frequency of 76 kHz. With 1-min plasma treatment, the plasma temperature did not exceed 27 °C. The surface morphology of seed coats seems to be slightly modified, while the SRXTM cross-sectional images show no significant difference between seeds untreated and seeds treated by plasma. The germination percentage of seeds treated with plasma for 30 s was $94 \pm 1.6\%$. This result is the optimum condition under the argon plasma treatment. Although the germination percentage was higher than that observed for the untreated seed, approximately 2%, a growth enhancement was also improved. After seven days of cultivation of treated broccoli seeds, the additional weight of sprouts was higher than that of untreated seeds by 10.5%. This result indicates that with a short treatment time, the multihole APPJ can modify the seed coats and shows a potential impact on the productivity of sprouts that could be useful in seed processing technologies.

Author Contributions: Each author participated sufficiently in the work to take public responsibility for appropriate portions of the content. Conceptualization, K.S. and A.C.; methodology and formal analysis, K.S., A.C., W.S., A.L., P.P., P.C., C.R., K.T. and S.T.; writing—original draft preparation and review and editing, K.S., A.C., W.S.; visualization, C.R., K.T. and S.T.; project administration, A.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Electricity Generating Authority of Thailand, grant number 62-B602000-11-IO.SS03B3008434.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: All data are fully available.

Acknowledgments: The authors thank Adrian Plant for valuable suggestions and editorial comments on this manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

- Hertwig, C.; Meneses, N.; Mathys, A. Cold atmospheric pressure plasma and low energy electron beam as alternative nonthermal decontamination technologies for dry food surfaces: A review. *Trends Food Sci. Technol.* **2018**, *77*, 131–142. [\[CrossRef\]](#)
- Kogoma, M.; Tanaka, K. Low-temperature atmospheric discharge plasma and its applications for the surface treatment. *Rev. Mod. Plasma Phys.* **2021**, *5*, 3. [\[CrossRef\]](#)
- Domonkos, M.; Tichá, P.; Trejbal, J.; Demo, P. Applications of Cold Atmospheric Pressure Plasma Technology in Medicine, Agriculture and Food Industry. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 4809. [\[CrossRef\]](#)
- Adamovich, I.; Baalrud, S.D.; Bogaerts, A.; Bruggeman, P.J.; Cappelli, M.; Colombo, V.; Czarnetzki, U.; Ebert, U.; Eden, J.G.; Favia, P.; et al. The 2017 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology. *J. Phys. D Appl. Phys.* **2017**, *50*, 323001. [\[CrossRef\]](#)
- Taccogna, F.; Dilecce, G. Non-equilibrium in low-temperature plasmas. *Eur. Phys. J. D* **2016**, *70*, 251. [\[CrossRef\]](#)
- Sugai, H.; Ghanashev, I.; Hosokawa, M.; Mizuno, K.; Nakamura, K.; Toyoda, H.; Yamauchi, K. Electron energy distribution functions and the influence on fluorocarbon plasma chemistry. *Plasma Sources Sci. Technol.* **2001**, *10*, 378–385. [\[CrossRef\]](#)
- Uhm, H.S. Generation of various radicals in nitrogen plasma and their behavior in media. *Phys. Plasma* **2015**, *22*, 123506. [\[CrossRef\]](#)
- Luque-Agudo, V.; Hierro-Oliva, M.; Gallardo-Moreno, A.M.; González-Martín, M.L. Effect of plasma treatment on the surface properties of polylactic acid films. *Polym. Test.* **2021**, *96*, 107097. [\[CrossRef\]](#)
- Peran, J.; Razic, S.E. Application of atmospheric pressure plasma technology for textile surface modification. *Text. Res. J.* **2020**, *90*, 1174–1197. [\[CrossRef\]](#)
- Zhou, Z.; Huang, Y.; Yang, S.; Chen, W. Introduction of a new atmospheric pressure plasma device and application on tomato seeds. *Agric. Sci.* **2011**, *2*, 23–27. [\[CrossRef\]](#)
- Penkov, O.V.; Khadem, M.; Lim, W.S.; Kim, D.E. A review of recent applications of atmospheric pressure plasma jets for materials processing. *J. Coat. Technol. Res.* **2015**, *12*, 225–235. [\[CrossRef\]](#)
- Luan, P.; Oehrlein, G.S. Interaction of long-lived reactive species from cold atmospheric pressure plasma with polymers: Chemical modification by ozone and reactive oxygen-nitrogen species. *J. Vac. Sci. Technol. A* **2019**, *37*, 051303. [\[CrossRef\]](#)

13. Graves, D.B. The emerging role of reactive oxygen and nitrogen species in redox biology and some implications for plasma applications to medicine and biology. *J. Phys. D Appl. Phys.* **2012**, *45*, 263001. [CrossRef]
14. Tendero, C.; Tixier, C.; Tristant, P.; Desmaison, J.; Leprince, P. Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.* **2006**, *61*, 2–30. [CrossRef]
15. Winter, J.; Brandenburg, R.; Weltmann, K.D. Atmospheric pressure plasma jets: An overview of devices and new directions. *Plasma Sources Sci. Technol.* **2015**, *24*, 064001. [CrossRef]
16. Hsu, A.R.; Chien, H.-H.; Liao, C.-Y.; Lee, C.-C.; Tsai, J.-H.; Hsu, C.-C.; Cheng, L.-C.; Chen, J.-Z. Scan-mode atmospheric-pressure plasma jet processed reduced graphene oxides for quasi-solid-state gel-electrolyte supercapacitors. *Coatings* **2018**, *8*, 52. [CrossRef]
17. Jiayun, T.; Rui, H.; Xiaoli, Z.; Ruoting, Z.; Weiwen, C.; Size, Y. Effects of atmospheric pressure air plasma pretreatment on the seed germination and early growth of andrographis paniculata. *Plasma Sci. Technol.* **2014**, *16*, 260–266. [CrossRef]
18. Dhayal, M.; Lee, S.Y.; Park, S.U. Using low-pressure plasma for *Carthamus tinctorium* L. seed surface modification. *Vacuum* **2006**, *80*, 499–506. [CrossRef]
19. Ashrafi, E.; Razmjoo, J. Seed Treatment to Overcome Salt and Drought Stresses During Germination in Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *J. Plant. Nutr.* **2015**, *38*, 2151–2158. [CrossRef]
20. Miano, A.C.; Forti, V.A.; Abud, H.F.; Gomes-Junior, F.G.; Cicero, S.M.; Augusto, P.E.D. Effect of ultrasound technology on barley seed germination and vigour. *Seed Sci. Technol.* **2015**, *43*, 297–302. [CrossRef]
21. Ling, L.; Jiafeng, J.; Jiangang, L.; Minchong, S.; Xin, H.; Hanliang, S.; Yuanhua, D. Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean. *Sci. Rep.* **2014**, *4*, 5859. [CrossRef]
22. Meng, Y.; Qu, G.; Wang, T.; Sun, Q.; Liang, D.; Hu, S. Enhancement of Germination and Seedling Growth of Wheat Seed Using Dielectric Barrier Discharge Plasma with Various Gas Sources. *Plasma Chem. Plasma Process.* **2017**, *37*, 1105–1119. [CrossRef]
23. De Groot, G.J.J.B.; Hundt, A.; Murphy, A.B.; Bange, M.P.; Mai-Prochnow, A. Cold plasma treatment for cotton seed germination improvement. *Sci. Rep.* **2018**, *8*, 14372. [CrossRef]
24. Molina, R.; López-Santos, C.; Gómez-Ramírez, A.; Vilchez, A.; Espinós, J.P.; González-Elipe, A.R. Influence of irrigation conditions in the germination of plasma treated *Nasturtium* seeds. *Sci. Rep.* **2018**, *8*, 16442. [CrossRef] [PubMed]
25. Ahn, C.; Gill, J.; Ruzic, D.N. Growth of Plasma-Treated Corn Seeds under Realistic Conditions. *Sci. Rep.* **2019**, *9*, 4355. [CrossRef]
26. Srakaew, K.; Chingsungnoen, A.; Janpeng, P.; Sutthisa, W. Development of multi-hole atmospheric pressure plasma jet for seed treatment. *KKU Sci. J.* **2020**, *48*, 117–129.
27. Tribouillois, H.; Dürr, C.; Demilly, D.; Wagner, M.H.; Justes, E. Determination of germination response to temperature and water potential for a wide range of cover crop species and related functional groups. *PLoS ONE* **2016**, *11*, e0161185. [CrossRef]
28. Elson, M.K.; Morse, R.D.; Wolf, D.D.; Vaughan, D.H. High-temperature Inhibition of Seed Germination and Seedling Emergence of Broccoli. *Horttechnology* **1992**, *2*, 417–419. [CrossRef]
29. Kebreab, E.; Murdoch, A.J. The effect of water stress on the temperature range for germination of *Orobanchae aegyptiaca* seeds. *Seed Sci Res.* **2000**, *10*, 127–133. [CrossRef]
30. Heidari, Z.; Kamkar, B.; Sinaky, J.M. Influence of Temperature on Seed Germination Response of Fennel. *Adv. Plants Agric. Res.* **2014**, *1*, 00032. [CrossRef]
31. Hatfield, J.L.; Prueger, J.H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather Clim. Extrem.* **2015**, *10*, 4–10. [CrossRef]
32. Waskow, A.; Howling, A.; Furno, I. Mechanisms of Plasma-Seed Treatments as a Potential Seed Processing Technology. *Front. Phys.* **2021**, *9*, 617345. [CrossRef]
33. Puač, N.; Maletić, D.; Lazović, S.; Malović, G.; Đorđević, A.; Petrović, Z. Current–Voltage Characteristics of Atmospheric Pressure Plasma Jet. *Publ. Astron. Obs. Belgrade* **2010**, *89*, 307–310.
34. Sarinont, T.; Amano, T.; Attri, P.; Koga, K.; Hayashi, N.; Shiratani, M. Effects of plasma irradiation using various feeding gases on growth of *Raphanus sativus* L. *Arch. Biochem. Biophys.* **2016**, *605*, 129–140. [CrossRef] [PubMed]
35. Bormashenko, E.; Grynyov, R.; Bormashenko, Y.; Drori, E. Cold radiofrequency plasma treatment modifies wettability and germination speed of plant seeds. *Sci. Rep.* **2012**, *2*, 741. [CrossRef]
36. Ström, G.; Fredriksson, M.; Stenius, P. Contact angles, work of adhesion, and interfacial tensions at a dissolving Hydrocarbon surface. *J. Colloid Interface Sci.* **1987**, *119*, 352–361. [CrossRef]
37. Xiu, Y.; Zhu, L.; Hess, D.W.; Wong, C.P. Relationship between work of adhesion and contact angle hysteresis on superhydrophobic surfaces. *J. Phys. Chem. C* **2008**, *112*, 11403–11407. [CrossRef]
38. Volkov, A.G.; Hairston, J.S.; Patel, D.; Gott, R.P.; Xu, K.G. Cold plasma poration and corrugation of pumpkin seed coats. *Bioelectrochemistry* **2019**, *128*, 175–185. [CrossRef] [PubMed]
39. Breden, D.; Raja, L.L. Computational study of the interaction of cold atmospheric helium plasma jets with surfaces. *Plasma Sources Sci. Technol.* **2014**, *23*, 065020. [CrossRef]
40. Butscher, D.; Loon, H.V.; Waskow, A.; Rudolf von Rohr, P.; Schuppler, M. Plasma inactivation of microorganisms on sprout seeds in a dielectric barrier discharge. *Int. J. Food Microbiol.* **2016**, *238*, 222–232. [CrossRef]
41. Bafail, M.; Jemmat, A.; Martinez, Y.; Merbahi, N.; Eichwald, O.; Dunand, C.; Yousfi, M. Effects of low temperature plasmas and plasma activated waters on *Arabidopsis thaliana* germination and growth. *PLoS ONE* **2018**, *13*, e0195512. [CrossRef] [PubMed]

บรรณานุกรม



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายชัตติยะ สระแก้ว
วันเกิด	24 สิงหาคม พ.ศ. 2537
สถานที่เกิด	อำเภอสุวรรณภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	72 หมู่14 ตำบลทุ่งกุลา อำเภอสุวรรณภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด 45130
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	นักวิจัยหลังปริญญาเอก/ผู้ช่วยนักวิจัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	หน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2553 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นโรงเรียนสุวรรณภูมิวิทยาลัย อำเภอสุวรรณภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด พ.ศ. 2555 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนสุวรรณภูมิวิทยาลัย อำเภอสุวรรณภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด พ.ศ. 2560 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ (อิเล็กทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2562 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2566 สำเร็จการศึกษาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	พ.ศ.2563-2564 ทุนผู้ช่วยวิจัยโครงการศูนย์ความเป็นเลิศทางฟิสิกส์(ThEP-61-EQP-MSU2) แหล่งทุนศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ พ.ศ.2564 ทุนผู้ช่วยวิจัยโครงการ การปรับปรุงคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์โดยการเคลือบฟิล์มคาร์บอนเสมือนเพชร แหล่งทุน สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ.2564 ทุนผู้ช่วยวิจัยโครงการ การพัฒนาเครื่องต้นแบบเคลือบสิ่งทอโดยใช้พลาสมาความดันบรรยากาศ แหล่งทุน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) พ.ศ. 2564 ทุนผู้ช่วยวิจัยโครงการ การใช้พลาสมาและการพ่นเคลือบผ้าเพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและเชื้อไวรัสสำหรับเครื่องนุ่งห่มและผลิตภัณฑ์สิ่งทอ แหล่งทุน บริษัท ไทยวาโก้ จำกัด (มหาชน)

ผลงานวิจัย

K. Srakaew et al., "Development of multi-hole atmospheric pressure plasma jet for seed treatment", *KKU Sci. J.* 48(1) 117 - 129 (2020)

K. Srakaew et al., "Development of a Multihole Atmospheric Plasma Jet for Growth Rate Enhancement of Broccoli Seeds," *Process.* 2021, Vol. 9, Page 1134, vol. 9, no. 7, p. 1134, Jun. 2021.

