



การประยุกต์ใช้พลาสมาอุณหภูมิต่ำ ณ ความดันบรรยากาศในทางการเกษตร

ATMOSPHERIC PRESSURE

NON-THERMAL PLASMA FOR AGRICULTURAL APPLICATIONS



ยศชน ฉนการันย์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2562

การประยุกต์ใช้พลาสมาอุณหภูมิต่ำ ณ ความดันบรรยากาศในทางการเกษตร



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ATMOSPHERIC PRESSURE
NON-THERMAL PLASMA FOR AGRICULTURAL APPLICATIONS



YOTTANA TANAKARAN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF ENGINEERING
(Electrical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2019

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การประยุกต์ใช้พลสมาดูณภูมิตำ ้น ความดันบรรยากาศในทางการเกษตร
ของ
ยศชน ธนการัญย์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก	 ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย เดชธรรมรงค์)
	 กรรมการ
	(รองศาสตราจารย์ ดร.เวดิน ปิยรัตน์)

ชื่อเรื่อง	การประยุกต์ใช้พลาสมาอุณหภูมิต่ำ ณ ความดันบรรยากาศในทางการเกษตร
ผู้วิจัย	ยศธ ธนการณย์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คณิศร มาตรา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาอิทธิพลของพลาสมาอุณหภูมิต่ำ ณ ความดันบรรยากาศที่ถูกสร้างขึ้นจากเครื่องมือต้นแบบชนิดโคโรนาดีสชาร์จแบบหลายเข็มที่มีต่อการปรับปรุงพืชไมโครกรีน (ผักชีหูด) โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการศึกษาผลกระทบจากการจัดวางเข็มแอโนดที่มีต่อลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอ และการศึกษาอิทธิพลของพลาสมาที่สร้างจากเครื่องมือต้นแบบต่อการปรับปรุงการงอกและการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน โดยจากผลการศึกษาการจัดวางเข็มแอโนดที่ระยะห่างระหว่างเข็มแอโนดที่แตกต่างกันที่ 2.5, 5 และ 7.5 มิลลิเมตร บ่งบอกว่าการจัดวางเข็มแอโนดที่ระยะห่างระหว่างเข็มแอโนด 5 มม. สามารถสร้างสนามไฟฟ้าที่เสมือนว่ามีความสม่ำเสมอสูงได้ดีกว่าระยะห่างขนาดอื่น ๆ ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้ดีกว่า จากผลการศึกษาในส่วนแรกนี้จะถูกนำไปสร้างเป็นเครื่องมือต้นแบบเพื่อศึกษาการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนด้วยพลาสมาโดยพลาสมาที่ใช้ในการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนถูกสร้างขึ้นจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 30 กิโลโวลต์ ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 20 มิลลิเมตร การศึกษาในส่วนของการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนด้วยพลาสมาได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนย่อยคือ ส่วนของการศึกษาอิทธิพลของพลาสมาที่สร้างจากชนิดของแคโทดที่แตกต่างกัน (แผ่นทองแดงและน้ำประปา) และเวลาที่ใช้ในการบำบัดเมล็ดด้วยพลาสมาที่มีต่อการปรับปรุงอัตราการงอกและการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน โดยจากผลการทดลองพบว่าการบำบัดเมล็ดไมโครกรีนบนแผ่นทองแดงให้ผลอัตราการงอกและการเจริญเติบโตดีกว่าการบำบัดบนน้ำประปาอยู่ 2% และ 1.54 เท่า ตามลำดับ ด้วยเหตุผลที่ว่าอนุมูลอิสระในพลาสมาที่ถูกสร้างขึ้นจากแคโทดแบบทองแดงมีความเข้มข้นมากกว่าแคโทดแบบน้ำประปา ซึ่งความเข้มข้นของอนุมูลอิสระที่มากจะส่งผลต่อการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนได้ดีมากกว่า นอกจากนี้จากผลการการศึกษาเรื่องเวลาในการบำบัดเมล็ดด้วยพลาสมาทำให้ทราบว่าอัตราการงอก ความยาวลำต้น และน้ำหนักแห้งของกรณีที่ไม่ได้ถูกบำบัดด้วยพลาสมาเป็นเวลา 4 นาที และรดด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นเวลา 10 นาที เป็นกรณีที่ดีที่สุด ซึ่งดีกว่ากลุ่มควบคุมประมาณ 10%, 78.42% และ 21.66% ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่าพลาสมาและน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมามีอิทธิพลต่อการปรับปรุงอัตราการงอกและการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน

คำสำคัญ : เมล็ดผักชีหูด, ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้า, การปรับปรุงอัตราการงอกและอัตราการเจริญเติบโต, การดีสชาร์จแบบหลายเข็ม, การดีสชาร์จแบบโคโรนา

Title	ATMOSPHERIC PRESSURE NON-THERMAL PLASMA FOR AGRICULTURAL APPLICATIONS
Author	YOTTANA TANAKARAN
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2019
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Khanit Matra

This research aims to study the influence of atmospheric pressure non-thermal plasma from the multi-pin model on the microgreen (rat-tailed radish) improvement. This study was divided into two sections, the study of the effect of the pin anode arrangements on electric field distribution characteristics with the finite element method for uniform plasma generation, and the study of the influence of air plasma from the multi-pin model on the enhancement of the germination and growth of microgreen seeds. From the investigation of the pin anode arrangements at gap distances between two adjacent pin anodes (G_p) of 2.5, 5, and 7.5 mm, it indicated that the pin anode arrangement at 5-mm G_p was optimum to generate a high virtual semi-uniform electric field and suitable to sustain uniform plasma. Therefore, the study of the first part was employed to construct the multi-pin model for microgreen seed treatment. In this study, the air plasma was generated from the supplied source voltage of 30 kV at a 20-mm electrode gap. The microgreen seed treatment was divided into two subsections, the influence of air plasma generated by different cathode types (copper and tap water) and the seed treatment time on the enhancement of the germination and growth of microgreen seeds. The experimental results indicated that the germination and growth of seed treatment on the copper cathode were higher than that of the tap water cathode around 2% and 1.54 times, respectively. This was because of the intensity of the radicals in air plasma generated by a copper cathode was higher than the tap water cathode. The high intensity of radicals positively affected microgreen seed treatment. Moreover, the results of seed treatment at various times by air plasma indicated that the germination rate, average stem length, and average dry weight of plasma-treated seeds for 4 min with watering 10-min plasma-activated water (PAW) were the best conditions, which has been higher than that of the control group at around 10%, 78.42%, and 21.66%, respectively. The experimental results confirmed that the air plasma and PAW influenced the enhancement of the germination and growth of microgreen seeds.

Keyword : Rat-tailed radish seeds, Electric field distribution characteristics, Germination and growth improvement, Multi-pin anode, Corona discharge

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน คณะผู้จัดทำโครงการต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.คณิตร์ มาตรา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ ตรวจสอบ และแก้ไขความเรียบร้อย ชี้แนะเพื่อการหาคำตอบในปัญหาต่าง ๆ รวมทั้งสนับสนุนด้านการเงิน ที่อยู่อาศัย และยานพาหนะ ระหว่างการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. วิจิตรา หลวงอินทร์ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่สนับสนุนและอนุญาตให้ข้าพเจ้าได้ใช้เมล็ดไมโครกรีนในการทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณนางสาวจิรัชยา คังตระกูล ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดเตรียมห้องทดลอง และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เช่น เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง และเครื่องอบลมร้อน ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ ดร.ภัทธร บุปผัน ภาควิชาส่งเสริมสุขภาพ คณะกายภาพบำบัด มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ช่วยให้การสนับสนุนทั้งความรู้และอุปกรณ์สำหรับการทดลองในครั้งนี้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ และช่วยเหลือในด้านเงินสนับสนุนและเงินทุนในการศึกษา ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัย ซึ่งทำให้การดำเนินงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าดำเนินไปได้อย่างราบรื่น และข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนและอนุญาตให้ข้าพเจ้าได้ใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อการดำเนินงานวิจัยของข้าพเจ้าจนแล้วเสร็จ ณ ปัจจุบันนี้ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณทุกคนในครอบครัว เพื่อนร่วมวิจัย และบุคคลท่านอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ ที่ให้กำลังใจ และคอยสนับสนุนงานวิจัยของข้าพเจ้าตลอดมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจที่จะนำไปศึกษา ความดีและประโยชน์ใด ๆ จากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาทั้งหมด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
1.5 สมมุติฐานในการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 พลาสมา (Plasma)	5
2.1.1 คุณสมบัติของพลาสมา	6
2.1.1.1 ความยาวเดอบาย (Debye Length)	6
2.1.1.2 ความถี่ในการสั่นของอิเล็กตรอน (Electron plasma frequency)	7
2.2 กระบวนการเกิดพลาสมา	7
2.2.1 ไอออไนเซชัน (Ionization)	7
2.2.2 สภาวะกระตุ้น (Excitation).....	8
2.2.3 การแตกตัว (Dissociation)	8

2.3 ประเภทของพลาสมา	8
2.3.1 พลาสมาอุณหภูมิสูง (Thermal plasma)	8
2.3.2 พลาสมาอุณหภูมิต่ำ (Non-thermal plasma)	9
2.4 การดีสชาร์จและเบรกดาวน์ในแก๊ส.....	9
2.4.1 ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส	9
2.4.1.1 ระยะอิสระเฉลี่ย.....	9
2.4.1.2 พลังงานและความเร็วของไอออน.....	10
2.4.2 ชนิดของการเกิดดีสชาร์จ	10
2.4.2.1 เบรกดาวน์ประเภทสมบูรณ์ (Complete breakdown)	10
2.4.2.1.1 เบรกดาวน์โดยตรง (Direct breakdown)	10
2.4.2.1.2 เบรกดาวน์แบบโคโรนา (Corona breakdown).....	10
2.4.2.2 เบรกดาวน์เพียงบางส่วน (Partial breakdown)	10
2.4.2.2.1 โคโรนาดีสชาร์จ (Corona discharge)	10
2.4.2.2.2 ดีสชาร์จตามผิว (Surface discharge).....	11
2.4.2.2.3 ดีสชาร์จภายใน (Internal discharge)	11
2.4.3 การดีสชาร์จของขั้วอิเล็กโทรด	11
2.4.3.1 ขั้วอิเล็กโทรดแบบแผ่นระนาบ	11
2.4.3.2 ขั้วอิเล็กโทรดแบบทรงกลม	12
2.4.3.3 ขั้วอิเล็กโทรดแบบแท่งกลมและเข็ม	12
2.4.4 การเกิดเบรกดาวน์ในแก๊ส (Gas breakdown).....	13
2.4.4.1 กลไกการเบรกดาวน์ในแก๊สของทาวนด์เซนส์ (Townsend breakdown)	13
2.4.4.1.1 กระบวนการขั้นต้น (Primary process or α Process)	16
2.4.4.1.2 กระบวนการขั้นสอง (Secondary process or γ Process)...	17

2.4.4.2 กฎของพาสเชน (Paschen's law)	18
2.4.4.3 ลักษณะกระแส และแรงดันของการดิสชาร์จในแก๊ส.....	21
2.4.4.3.1 ดิสชาร์จแบบไม่เรืองแสง (Dark discharge).....	21
2.4.4.3.2 ดิสชาร์จแบบเรืองแสง (glow discharge).....	22
2.4.4.3.3 ดิสชาร์จแบบอาร์ก (arc discharges)	23
2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของพลาสมาด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์	23
2.6 พืชไมโครกรีน (microgreens).....	23
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	41
3.1 การออกแบบเครื่องมือต้นแบบ	41
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	43
3.2.1 การจำลองเครื่องมือต้นแบบด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics	43
3.2.2 การสร้างพลาสมาด้วยเครื่องมือต้นแบบ	43
3.2.3 การศึกษาอิทธิพลของน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาที่มีผลต่ออัตราการงอก และอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน	44
3.2.4 การศึกษาอิทธิพลของพลาสมาที่มีผลต่ออัตราการงอก และอัตราการเจริญเติบโต ของเมล็ดไมโครกรีน	44
3.3 วิธีการวัดผลการทดลอง	45
3.3.1 การวัดแรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จ	45
3.3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางแสงของพลาสมา	45
3.3.3 อัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีน	45
3.3.4 อัตราการเจริญเติบโตของไมโครกรีน.....	46
3.3.5 ปริมาณความชื้นของไมโครกรีน	46
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	48

4.1 ผลการจำลองเครื่องมือต้นแบบด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics.....	48
4.2 ลักษณะของเครื่องมือต้นแบบ.....	54
4.3 ผลของการสร้างพลาสมาด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ.....	54
4.4 ผลของแรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จ.....	56
4.5 คุณลักษณะทางแสงของพลาสมา.....	57
4.6 การศึกษาอิทธิพลของน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาที่มีต่อการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีน	59
4.6.1 อัตราการงอก.....	59
4.6.2 อัตราการเจริญเติบโต	60
4.7 การศึกษาอิทธิพลของแคโทดแต่ละชนิดที่มีต่อการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีน	61
4.7.1 อัตราการงอก.....	61
4.7.2 อัตราการเจริญเติบโต	64
4.8 การศึกษาอิทธิพลของเวลาในการฉายพลาสมาที่มีต่อการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีน	65
4.8.1 อัตราการงอก.....	65
4.8.2 อัตราการเจริญเติบโต	68
4.8.2.1 ความยาวลำต้นเฉลี่ย	68
4.8.2.2 น้ำหนักแห้งเฉลี่ย	71
4.8.3 ปริมาณความชื้น.....	72
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	74
5.1 สรุป	74
5.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	76
5.3 ข้อเสนอแนะ	76
บรรณานุกรม	78

ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก	83
ข้อมูลของการศึกษาอิทธิพลของพลาสติกที่สร้างจากลักษณะของแคโทดที่แตกต่างกัน	84
ภาคผนวก ข	86
ข้อมูลของการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนด้วยพลาสติก	87
ภาคผนวก ค	90
ผลงานการเผยแพร่วิจัย	91
ประวัติผู้เขียน.....	92



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนต่ำสุดของแก๊สชนิดต่าง ๆ	20
ตาราง 2 ค่าตำแหน่งเฉพาะตัวของหมู่ฟังก์ชันสามัญทั่วไป	30
ตาราง 3 การปรับปรุงเมล็ดข้าวสาลีที่ระดับกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ หลังจากฉายด้วยพลาสมา 14 วัน (ที่ระดับนัยสำคัญ $p=0.05$).....	32
ตาราง 4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องมือต้นแบบ.....	42
ตาราง 5 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายเข็มของอิเล็กโทรด	49
ตาราง 6 จำนวนเมล็ดไมโครกรีนที่งอกในแต่ละกลุ่มหลังจากการการปลูกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ...	62
ตาราง 7 ผลอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีน	62
ตาราง 8 ผลอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีน	66
ตาราง 9 การเปรียบเทียบความยาวลำต้นของพืชไมโครกรีนในกลุ่มที่ใช้เวลาในการบำบัดเมล็ดพืชเดียวกัน หลังจากได้รับการปลูกเป็นเวลา 7 วัน.....	68
ตาราง 10 การเปรียบเทียบความยาวลำต้นของพืชไมโครกรีนในกลุ่มที่รดด้วยน้ำที่ถูกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นเวลาเดียวกัน หลังจากได้รับการปลูกเป็นเวลา 7 วัน	69
ตาราง 11 ความยาวลำต้นของเมล็ดไมโครกรีนจำนวน 50 เมล็ด (มิลลิเมตร)	84
ตาราง 12 ความยาวลำต้นของเมล็ดไมโครกรีนจำนวน 50 เมล็ด (มิลลิเมตร)	87
ตาราง 13 น้ำหนักของเมล็ดไมโครกรีนก่อนอบและหลังอบจำนวน 50 เมล็ด (กรัม)	89

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 สถานะต่าง ๆ ของสสาร	6
ภาพประกอบ 2 ขั้วอิเล็กโทรดแบบแผ่นระนาบ	12
ภาพประกอบ 3 ขั้วอิเล็กโทรดแบบทรงกลม	12
ภาพประกอบ 4 ขั้วอิเล็กโทรดแบบเข็มและแท่งกลม	13
ภาพประกอบ 5 วงจรการเปลี่ยนแปลงกระแสระหว่างอิเล็กโทรดแบบระนาบวางขนานกัน	14
ภาพประกอบ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสก่อนเกิดการเบรกดาวน	15
ภาพประกอบ 7 การเบรกดาวนของแก๊ส ระยะเริ่มต้น, ระยะปานกลาง และระยะสุดท้าย	16
ภาพประกอบ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนกับผลคูณของความดันและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	19
ภาพประกอบ 9 ลักษณะแรงดัน - กระแสของแก๊สดิสชาร์จ	21
ภาพประกอบ 10 ลักษณะอิเล็กโทรดที่สามารถสร้างสนามไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ โดย (I) สามารถสร้างสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (II) สามารถสร้างสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (III) สามารถสร้างสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง	24
ภาพประกอบ 11 การกระจายสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบต่าง ๆ	25
ภาพประกอบ 12 ขนาดของอิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ โดย (ก) ขนาดของอิเล็กโทรดปลายแหลม (ข) ขนาดของอิเล็กโทรดระนาบ	26
ภาพประกอบ 13 แรงดันและกระแสดิสชาร์จของพลาสมาเจ็ทโดยใช้แก๊สอาร์กอนที่ 1 lpm ช่องว่างระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร ด้วยตัวต้านทานบัลลาสต์และแหล่งจ่ายแรงดันที่แตกต่างกัน	28
ภาพประกอบ 14 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้วยวิธีการวัดแบบต่าง ๆ โดย (ก) แรงดันและกระแสเฉลี่ยสำหรับการดิสชาร์จแก๊สไมโครเจ็ทในสุญญากาศที่วัดด้วยมัลติมิเตอร์ และ (ข) รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่วัดด้วยออสซิลโลสโคป ที่ช่องว่างแคบ 300 ไมโครเมตร ความดัน 140 กิโลพาสคาล แรงดัน 800 โวลต์และแหล่งจ่ายไฟแรงดัน 1,000 โวลต์	29

ภาพประกอบ 15 เปอร์เซ็นต์การงอกของข้าวสาลีเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง	33
ภาพประกอบ 16 ความสามารถในการดูดซับน้ำหลังจากแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ของเมล็ด ทานตะวันที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการต่าง ๆ โดย (a) กระตุ้นด้วยการฉายพลาสมาที่ขนาดแรงดัน แหล่งจ่าย 9 กิโลโวลต์ (b) กระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าที่ขนาดแรงดันแหล่งจ่าย 9 กิโลโวลต์ และ (c) กลุ่มควบคุมซึ่งไม่ได้รับการกระตุ้นใด ๆ	34
ภาพประกอบ 17 เปอร์เซ็นต์การงอกของข้าวกล้องเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง	35
ภาพประกอบ 18 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของข้าวกล้องเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง	35
ภาพประกอบ 19 อัตราการงอกของเมล็ดบรอกโคลีที่เวลาในการฉายด้วยพลาสมาต่าง ๆ	36
ภาพประกอบ 20 น้ำหนักและความยาวของบรอกโคลีที่ปลูกเป็นเวลา 4 วัน	37
ภาพประกอบ 21 (ก) อัตราการงอก (ข) ความยาวลำต้น และ (ค) น้ำหนักของผักกาดเขียว	38
ภาพประกอบ 22 ผลอัตราการงอกของเมล็ดพืชที่ถูกปรับปรุงในแต่ละกรณี	39
ภาพประกอบ 23 ขนาดใบ พื้นที่ใบ จำนวนใบ และจำนวนดอกไม้ทั้งหมดของต้นพืชในกรณีที่ได้รับ การปรับปรุงด้วยน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นและไม่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา	40
ภาพประกอบ 24 รูปวาดวงจรที่ใช้ในการสร้างพลาสมา	42
ภาพประกอบ 25 ลักษณะความเข้มสนามไฟฟ้าของเครื่องมือต้นแบบที่ (ก) 1 เซม และ (ข) 3 เซม	48
ภาพประกอบ 26 กราฟแนวโน้มความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายเข็มอิเล็กโทรดของการจัดวางเข็ม อิเล็กโทรดแต่ละแบบ	50
ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มของความเครียดสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างจาก ปลายเข็มแอโนดที่ขนาดต่าง ๆ จากการคำนวณด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน	51
ภาพประกอบ 28 เส้นสมคักย์ของอิเล็กโทรดขนาด (ก) 1 และ (ข) 5 เซม	54
ภาพประกอบ 29 เครื่องมือต้นแบบชนิดโคโรนาดีสชาร์จแบบหลายเข็ม	54
ภาพประกอบ 30 พลาสมาที่มีความสม่ำเสมอที่แรงดันไฟฟ้าขนาด 30 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่าง อิเล็กโทรด 20 มิลลิเมตร	55

ภาพประกอบ 31 กราฟแรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่แรงดันแหล่งจ่าย 30 กิโลโวลต์ ของ พลาสมาที่ถูกสร้างขึ้นบนแคโทดแบบแผ่นทองแดงและแบบน้ำประปา	57
ภาพประกอบ 32 กราฟความเข้มข้นของอนุมูลอิสระแต่ละชนิดที่วัดได้จากการวิเคราะห์ทางแสง ของพลาสมา.....	59
ภาพประกอบ 33 กราฟแนวโน้มอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีนที่ชั่วโมงต่าง ๆ หลังจากการปลูก	60
ภาพประกอบ 34 กราฟความยาวลำต้นเฉลี่ยของพืชไมโครกรีนหลังจากการปลูกเป็นเวลา 5 วัน	61
ภาพประกอบ 35 กราฟแนวโน้มอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีนที่ชั่วโมงต่าง ๆ หลังจากการปลูก	63
ภาพประกอบ 36 พืชไมโครกรีนแต่ละกลุ่มการทดลองหลังจากการปลูกเป็นเวลา 7 วัน.....	64
ภาพประกอบ 37 กราฟความยาวลำต้นเฉลี่ยของพืชไมโครกรีนหลังจากการปลูกเป็นเวลา 7 วัน	64
ภาพประกอบ 38 กราฟอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีนที่ชั่วโมงต่าง ๆ หลังจากการปลูก	66
ภาพประกอบ 39 กราฟความยาวลำต้นเฉลี่ยของพืชไมโครกรีนหลังจากปลูกเป็นเวลา 7 วัน.....	70
ภาพประกอบ 40 กราฟน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพืชไมโครกรีนหลังจากการปลูกเป็นเวลา 7 วัน.....	71
ภาพประกอบ 41 ปริมาณความชื้นของพืชไมโครกรีนหลังจากการปลูกเป็นเวลา 7 วัน.....	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

พลาสมาอุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ (atmospheric non-thermal plasma) เป็นพลาสมาที่สร้างขึ้นที่สภาวะความดันบรรยากาศ (10^5 Pa) โดยพลาสมาอุณหภูมิห้องคือพลาสมาที่อิเล็กตรอนมีการถ่ายเทพลังงานไปสู่โมเลกุลของแก๊สและไอออนได้ไม่ดีพอ จึงทำให้พลังงานส่วนใหญ่สะสมอยู่ในอิเล็กตรอน ซึ่งทำให้โมเลกุลของแก๊สและไอออนมีอุณหภูมิห้อง โดยพลาสมาอุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศเป็นเทคโนโลยีพลาสมาที่มีความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้งาน มีความเข้มข้นของอนุภาคนิวตรอนที่สูง และดูแลรักษาได้ง่าย ดังนั้นการประยุกต์ใช้พลาสมาอุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศจึงเป็นที่นิยมและมีความหลากหลายอย่างมากในปัจจุบัน เช่น งานด้านการเคลือบและตัดอุปกรณ์ (deposition and erosion) (Randhawa, 1988) งานด้านการแพทย์ (medical) (Lloyd และคนอื่นๆ, 2010) งานด้านการบำบัดน้ำเสีย (wastewater purification) (Wang, Zhou, และ Jin, 2012) และงานด้านการเกษตร (agriculture) (Ling, Jiangang, Minchong, Chunlei, และ Yuanhua, 2015) เป็นต้น ในส่วนของงานด้านการเคลือบวัสดุมีการประยุกต์ใช้กับพลาสมาเพื่อป้องกันการกร่อนของวัสดุเนื่องจากสนิม ในส่วนของการประยุกต์ใช้พลาสมาทางการแพทย์ได้นำไปใช้เพื่อกำจัดเชื้อโรค (disinfection) บำบัดพื้นผิวของเซลล์สิ่งมีชีวิต (surface modification) และการทำให้วัสดุปลอดเชื้อ (sterilization) ในการประยุกต์ใช้พลาสมาด้านการบำบัดน้ำเสียได้นำไปใช้เพื่อบำบัดค่าปริมาณของออกซิเจนที่ถูกใช้โดยจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ (biochemical oxygen demand, BOD) ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (chemical oxygen demand, COD) ค่าของปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (dissolved oxygen, DO) และเพื่อกำจัดเชื้อโรคบางชนิดในน้ำเสีย ในการประยุกต์ใช้พลาสมาด้านการเกษตรได้นำไปใช้เพื่อปรับปรุงการงอกและเจริญเติบโตของเมล็ดพืช ปรับปรุงสารอาหารในเมล็ดพืช และกำจัดเชื้อราบนเมล็ดพืช (มิตราชน, 2555)

เทคนิคที่เป็นที่นิยมในการสร้างพลาสมาอุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศมี 3 รูปแบบ คือ การดิสชาร์จข้ามฉนวน (dielectric barrier discharge, DBD) เจ็ตพลาสมา (plasma jet) และการดิสชาร์จแบบโคโรนา (corona discharge) โดยเทคนิคการดิสชาร์จข้ามฉนวนสามารถสร้างพลาสมาขึ้นได้จากเครื่องมือต้นแบบชนิดแผ่นระนาบคู่ขนานสองแผ่น ซึ่งทั้งสองแผ่นจำเป็นต้องจัดวางให้ขนานกันอย่างแม่นยำ เทคนิคเจ็ตพลาสมามีขนาดของเครื่องมือต้นแบบที่ค่อนข้างเล็ก และพลาสมาที่สร้างขึ้นมีขนาดเล็กเช่นกัน ดังนั้นการใช้งานเจ็ตพลาสมาจึงเหมาะสมกับงานที่มี

ปริมาณวัสดุที่ต้องการบำบัดที่จำกัด โดยลักษณะของแบบจำลองเป็นหลอดกลวงที่มีแก๊สหรือของเหลวไหลอยู่ด้านใน และมีขั้วไฟฟ้า 1 หรือ 2 ขั้ว สุดท้ายคือเทคนิคการดิสชาร์จแบบโคโรนาเป็นเทคนิคที่สามารถสร้างพลาสมาได้ง่ายที่สุด และมีขนาดการใช้งานของพลาสมาที่ยืดหยุ่น ดังนั้นจึงเหมาะสมกับการใช้งานกับวัสดุที่มีขนาดที่หลากหลาย โดยลักษณะของเครื่องมือต้นแบบคือขั้วไฟฟ้าที่เป็นเข็มแหลมและแผ่นระนาบ

ในปัจจุบันการสร้างพลาสมาเพื่อการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์พืชมีอยู่หลากหลาย ทั้งการใช้อาร์กอน-ออกซิเจนพลาสมาในการปรับปรุงเมล็ดข้าว (Sookwong และคนอื่น ๆ, 2014) การใช้พลาสมาเพื่อการปรับปรุงการเจริญเติบโตและผลผลิตของเมล็ดข้าวสาลี (Jiafeng และคนอื่น ๆ, 2014) และการใช้พลาสมาเพื่อกำจัดเชื้อราและกระตุ้นการงอกของเมล็ดข้าว (Khamseen และคนอื่น ๆ, 2016) โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ทำการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์พืชเป็นจำนวนน้อยต่อครั้ง ดังนั้นการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์พืชด้วยเครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบหลายเข็ม ซึ่งสามารถปรับปรุงเมล็ดพันธุ์พืชในปริมาณที่มากต่อครั้งได้ จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดเมล็ดพืชเป็นจำนวนมาก

พืชไมโครกรีนคือพืช ผัก และสมุนไพรชนิดต่าง ๆ ที่ถูกปลูกเป็นเวลา 7-14 วัน ซึ่งยังคงเป็นพืชที่อยู่ในช่วงต้นกล้าหรือต้นอ่อน โดยพืชที่นิยมนำมาปลูกเป็นพืชไมโครกรีนคือ บรอกโคลี พืชตระกูลกะหล่ำ ผักชีหูด ผักชีวน้อย ผักโขม และอื่น ๆ อีกมากมาย โดยในปัจจุบันผู้คนที่สนใจรักสุขภาพตนเองนิยมบริโภคพืชไมโครกรีนเป็นอย่างมาก เนื่องจากพืชไมโครกรีนซึ่งมีคุณค่าทางอาหารที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่โตเต็มที่แล้ว ดังนั้นความต้องการบริโภคของพืชไมโครกรีนจึงมีความต้องการที่มากขึ้น แต่ผลผลิตของพืชไมโครกรีนไม่เพียงพอต่อความต้องการบริโภค ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะปรับปรุงพืชไมโครกรีนด้วยพลาสมา เพื่อให้เป็นประโยชน์ในการเพิ่มผลผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการบริโภคที่มากขึ้นด้วยเครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบหลายเข็ม

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการประยุกต์ใช้พลาสมาอุณหภูมิต่ำ ณ ความดันบรรยากาศจากเครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบหลายเข็มกับเมล็ดไมโครกรีนเพื่อการปรับปรุงอัตราการงอกและอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน ทั้งนี้การสร้างเครื่องมือต้นแบบที่สามารถใช้เทคนิคการดิสชาร์จแบบโคโรนาเพื่อที่สามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้นั้นจำเป็นต้องได้รับการออกแบบอย่างแม่นยำ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการสร้างพลาสมานั้นมีอยู่หลายชนิด เช่น ความชื้น ความดัน ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ลักษณะของขั้วไฟฟ้า ชนิดของขั้วไฟฟ้า ลักษณะของสนามไฟฟ้า และอื่น ๆ อีกมากมาย โดยในงานวิจัยนี้เลือกที่จะศึกษาลักษณะการกระจายของ

สนามไฟฟ้าที่สามารถส่งผลต่อการสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้ ดังนั้นการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าของเครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบโคโรนาจากการจัดวางเข็มอิเล็กโทรดในแบบต่าง ๆ ก่อนการสร้างเครื่องมือต้นแบบของจริงจึงมีความจำเป็น เพื่อให้เครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบโคโรนานั้นสามารถสร้างสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้

โดยผู้วิจัยต้องการจะศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนด้วยน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา โดยสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือการศึกษาการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนขณะที่กำลังแช่น้ำด้วยพลาสมา และศึกษาการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนด้วยการรดด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา โดยการนำน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาลงบนเมล็ดไมโครกรีนที่กำลังปลูก (Bafoil และคนอื่น ๆ, 2018) อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยใดศึกษาการปรับปรุงเมล็ดพืชขณะที่กำลังแช่น้ำด้วยพลาสมา ในครั้งนี้ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการปรับปรุงเมล็ดพืชด้วยวิธีดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีน โดยการเปรียบเทียบการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนแบบแห้ง แบบเปียก และแบบไม่ได้รับการฉายด้วยพลาสมา โดยการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนแบบแห้งคือการฉายพลาสมาลงบนเมล็ดไมโครกรีนที่วางอยู่บนแผ่นทองแดง และการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนแบบเปียกคือการฉายพลาสมาลงบนเมล็ดไมโครกรีนที่วางอยู่บนน้ำประปา ซึ่งการทดลองนี้ทำการศึกษาอัตราการงอกและอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีนที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาในแต่ละกรณี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อสร้างเครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบหลายเข็มที่สามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอ
2. เพื่อศึกษาการจัดวางเข็มอิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้า
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอจากเครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบหลายเข็มที่มีต่ออัตราการงอกและอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าจากการจัดวางเข็มแอโนดที่เหมาะสมต่อการสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics
2. ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการสร้างพลาสมาอุณหภูมิต่ำ ณ ความดันบรรยากาศ
3. ใช้อากาศเป็นสารตั้งต้นในการสร้างพลาสมา

4. ปลูกลี้นไม้โครกรีนในระบบเปิดนอกห้องเพาะเลี้ยง
5. ศึกษาอัตราการงอกและอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดไม้โครกรีนเป็นเวลา 7 วัน
6. อัตราการเจริญเติบโตของพืชไม้โครกรีนอธิบายได้ด้วยความยาวลำต้นและน้ำหนักแห้งของพืชไม้โครกรีน
7. พืชไม้โครกรีนที่ใช้คือผักชีหูด

1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

พลาสมา คือ สถานะที่ 4 ของสสาร ซึ่งเป็นกลุ่มของไอออนที่มีจำนวนของประจุบวกและประจุลบที่เท่า ๆ กัน (F. F. Chen, 1984; Matra, 2013)

1.5 สมมุติฐานในการวิจัย

1. เครื่องมือต้นแบบชนิดดีสชาร์จแบบหลายเข็มสามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้
2. พลาสมาที่มีความสม่ำเสมอจากเครื่องมือต้นแบบชนิดดีสชาร์จแบบหลายเข็มสามารถปรับปรุงอัตราการงอกและอัตราการเจริญเติบโตของพืชไม้โครกรีนได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้กล่าวถึงเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีพลาสมา โดยหัวข้อที่นำเสนอในบทนี้คือ

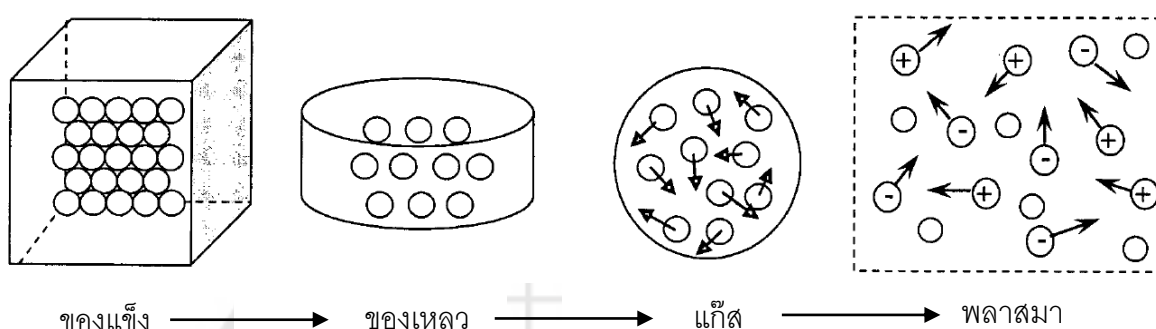
1. พลาสมา
2. กระบวนการเกิดพลาสมา
3. ประเภทของพลาสมา
4. การดิสชาร์จและการเบรกดาวน์ในแก๊ส
5. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของพลาสมาด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์
6. พืชไมโครกรีน
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสมา (Plasma)

สสารโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 3 สถานะ คือ ของแข็ง (solid) ของเหลว (liquid) และแก๊ส (gas) โดยพลาสมาเป็น สถานะที่ 4 ของสสาร ดังแสดงในภาพประกอบ 1 โดยพลาสมาเป็นสถานะแก๊สที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่สูงมาก ๆ จนเกิดการแตกตัวเป็นกลุ่มของไอออนและอิเล็กตรอนที่มีจำนวนเท่า ๆ กัน ทำให้ประจุสุทธิของกลุ่มไอออนและอิเล็กตรอนมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นการอยู่ร่วมกันของอนุภาคเหล่านี้จึงเสมือนว่าเป็นกลาง (quasi-neutral) นอกจากนี้กลุ่มไอออนและอิเล็กตรอนเหล่านี้จะแสดงพฤติกรรมรวมต่อกัน (collective behavior) โดยพฤติกรรมรวมนี้บ่งบอกถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในบริเวณนั้น ๆ เท่านั้น ยังรวมไปถึงผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่และผลเหล่านี้มีอิทธิพลมากกว่าการชนกันของอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอนุภาคในพลาสมาที่สถานะสมดุลจะมีการสั่นด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่ในการชนกันของอนุภาค 2 ตัวที่อยู่ใกล้กัน โดยความถี่ในการสั่นของอิเล็กตรอนสามารถหาได้ดังสมการ (2.1) (F. F. Chen, 1984)

$$\omega_{pe} = \left(\frac{n_o e^2}{m \epsilon_o} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

- เมื่อ ω_{pe} คือความถี่ในการสั่นของพลาสมา (rad/s)
 n_0 คือปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (m^{-3})
 e คือค่าประจุของอิเล็กตรอนมีค่า 1.6×10^{-19} C
 m คือมวลของอิเล็กตรอนมีค่า 9.11×10^{-31} kg
 ϵ_0 คือค่าสภาพยอมในอวกาศว่างมีค่า 8.8542×10^{-12} F/m



ภาพประกอบ 1 สถานะต่าง ๆ ของสสาร

พลาสมาสามารถเกิดได้โดยการให้พลังงานที่มากเพียงพอแก๊สสารในสถานะแก๊สจนทำให้แก๊สเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ตัวอย่างเช่น การสร้างสนามไฟฟ้าความเข้มสูงให้แก๊สซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าและเคลื่อนที่ชนกับอะตอม หากพลังงานที่อิเล็กตรอนอิสระมีมากเพียงพอ ก็จะทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมของแก๊สหลุดออกมา กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระและอะตอมของแก๊สจะกลายเป็นไอออนโดยกระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งจะทำให้จำนวนอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมาก และกระบวนการนี้จะเกิดต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนในที่สุดสถานะแก๊สจะกลายเป็นสถานะพลาสมา

2.1.1 คุณสมบัติของพลาสมา

2.1.1.1 ความยาวเดอบาย (Debye Length)

ความยาวเดอบาย (Debye Length; λ_D) เป็นคุณสมบัติหนึ่งของพลาสมา โดยพลาสมาประกอบไปด้วยไอออนบวก และไอออนลบเป็นจำนวนเท่า ๆ กัน ซึ่งจับกลุ่มกันเป็นกลุ่มหมอก ดังนั้นกลุ่มหมอกของพลาสมาจะไม่แสดงสมบัติทางสนามไฟฟ้าสู่ภายนอก และศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกจะไม่สามารถรบกวนกลุ่มหมอกพลาสมาได้ โดยกลุ่มหมอกพลาสมา

จะด้านการรบกวนจากภายนอก ด้วยการนำประจุไฟฟ้าชนิดตรงข้ามไปห่อหุ้มล้อมสิ่งรบกวนนั้น ๆ โดยวิธีที่ใช้ด้านการรบกวนของศักย์ไฟฟ้าภายนอกนี้เรียกว่า ความยาวเดอบาย

2.1.1.2 ความถี่ในการสั่นของอิเล็กตรอน (Electron plasma frequency)

ในกลุ่มพลาสมาจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของไอออนบวก และไอออนลบในจำนวนที่เท่า ๆ กัน โดยอนุภาคแต่ละชนิดจะเคลื่อนที่กันเป็นชั้น ๆ ประจุลบหรืออิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เร็วกว่าประจุบวกอย่างมาก เนื่องจากมีมวลน้อยกว่า ซึ่งหมายความว่าผลของพลังงานจลน์มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของพลาสมามากกว่าผลของพลังงานศักย์

โดยทั่วไปสามารถพิจารณาการสั่นอิเล็กตรอนภายใต้สนามไฟฟ้าได้จากสมการ (2.2) และความถี่ในการสั่นของพลาสมาสามารถหาได้จากสมการ (2.1)

$$ma = qE \quad (2.2)$$

ซึ่งในทางทฤษฎีพลาสมายังคงอยู่ได้เนื่องจากการสั่นของพลาสมาต้องมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ของแหล่งรบกวน

$$\omega_{pe} > \omega \quad (2.3)$$

เมื่อ ω_{pe} คือความถี่ในการสั่นของพลาสมา

ω คือความถี่ของแหล่งรบกวน

ดังนั้นการที่ทำให้พลาสมาคงอยู่ได้จำเป็นต้องเกิดการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สอย่างต่อเนื่อง หมายความว่าเวลาที่ใช้ในการชนกันระหว่างไอออนและอนุภาคของแก๊ส จะต้องมากกว่าความถี่ในการสั่นของอิเล็กตรอนในพลาสมาดังสมการ (2.4)

$$\omega_e \tau \gg 1 \quad (2.4)$$

2.2 กระบวนการเกิดพลาสมา

2.2.1 ไอออไนเซชัน (Ionization)

ขั้นตอนแรกคือการไอออไนเซชัน โดยโมเลกุลของแก๊สและอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจนกระทั่งมีพลังงานจลน์สูง หลังจากนั้นอิเล็กตรอนและโมเลกุล

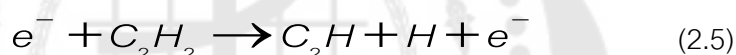
ของแก๊สจะเกิดการชนกัน ซึ่งถ้าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนมากพอจะทำให้แก๊สเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนและไอออน

2.2.2 สภาวะกระตุ้น (Excitation)

สภาวะนี้เกิดหลังจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนและโมเลกุลของแก๊ส โดยพลังงานที่โมเลกุลของแก๊สได้รับการชนจะส่งผลให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลแก๊สเคลื่อนตัวไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้น ทำให้อะตอมของโมเลกุลแก๊สอยู่ในสภาวะกระตุ้น ซึ่งในสภาวะนี้เกิดขึ้นก็ต่อเมื่อพลังงานที่โมเลกุลแก๊สได้รับการชนมีไม่เพียงพอต่อการเกิดไอออไนเซชัน ในที่นี้สภาวะกระตุ้นโดยทั่วไปของโมเลกุลแก๊สสามารถอยู่ได้ประมาณ 10^{-18} s หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะกลับสู่สภาวะพื้น และทำการปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของแสงเรียกว่า โฟตอน

2.2.3 การแตกตัว (Dissociation)

สภาวะนี้เกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อพลังงานที่โมเลกุลแก๊สได้รับการชนของอิเล็กตรอนมีค่ามากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน ซึ่งลักษณะการแตกตัวแสดงดังตัวอย่างสมการ (2.5)



2.3 ประเภทของพลาสมา

พลาสมาสามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดได้ออกเป็น 2 ชนิดคือ พลาสมาที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (nature plasma) เช่น ดาวหรือ สสารระหว่างดาวเคราะห์ (interstellar matter) และพลาสมาที่สามารถสร้างขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งแบ่งตามอุณหภูมิออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

2.3.1 พลาสมาอุณหภูมิสูง (Thermal plasma)

พลาสมาอุณหภูมิสูง คือ แก๊สดิสชาร์จแบบพลาสมาสภาพสมดุลของเทอร์โมไดนามิกแบบเฉพาะ (local thermodynamic equilibrium, LTE) มีการปล่อยประจุแบบอาร์คดิสชาร์จ (arc discharge) ซึ่งจากการเกิดกระบวนการดิสชาร์จนั้นเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรด ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่สูงจนกระตุ้นให้แก๊สบางส่วนเกิดการแตกตัวอย่างรุนแรงจนกลายเป็นประจุบวกและอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นสูง อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่อยู่ข้างหน้าขั้วลบ และเคลื่อนที่ไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สด้วยความถี่สูงและรุนแรง เกิดการปล่อยประจุในลักษณะ สปาร์ค (spark) ของประจุเป็นเส้นเล็ก ๆ จำนวนมาก (filament) ทำให้เกิดสถานะของพลาสมาที่มีความดันและพลังงานสูง โดยพลาสมา

ร้อนนี้จะถูกสร้างที่ความดันใกล้เคียงความดันบรรยากาศหรือมากกว่านั้น ใช้ในการผลิตพลาสมาสเปร์ย์ หรือใช้ในการหลอม เชื่อม และตัดโลหะ

2.3.2 พลาสมาอุณหภูมิต่ำ (Non-thermal plasma)

พลาสมาอุณหภูมิต่ำ คือ แก๊สดิซชาร์จแบบพลาสมาสภาพสมดุลเทอร์โมไดนามิกแบบไม่เฉพาะ (non-local thermodynamic equilibrium, non-LTE) มีลักษณะการปล่อยประจุแบบโกลว์ดิซชาร์จ (glow discharges) เป็นการสร้างพลาสมาที่พัฒนามาจากพลาสมาร้อน เป็นการลดความดันในการเกิดพลาสมาให้ต่ำลง โดยเกิดอยู่ที่ประมาณ 0.001-10 ทอร์ หรือที่สภาวะความดันบรรยากาศก็สามารถเกิดได้ โดยอุณหภูมิของอนุภาคนักจะมีค่าต่ำและมักจะไม่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง แต่สำหรับอิเล็กตรอนจะมีอุณหภูมิสูงมาก การที่อิเล็กตรอนมีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น จากกระบวนการดิซชาร์จเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรดทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่สูงพอจนกระตุ้นให้แก๊สบางส่วนชนกันจนแตกตัวกลายเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าไปยังขั้วบวก และเคลื่อนที่ไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊ส ทำให้เกิดการกระตุ้นและแตกตัวเป็นไอออน อนุภาคที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นจะปลดปล่อยโฟตอนออกมาและกลับมาสู่สภาวะพื้น โดยโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจะทำให้เกิดแสงสว่าง ทั้งนี้พลาสมาอุณหภูมิต่ำนิยมใช้ในงานที่ไม่ต้องการความร้อน เช่น การกัด (etching) หรือการทำฟิล์มบาง (thin film) เป็นต้น (อัจฉราภรณ์ บุญมา. 2556)

2.4 การดิซชาร์จและเบรกดาวน์ในแก๊ส

2.4.1 ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส

โดยทั่วไปการเกิดดิซชาร์จและเบรกดาวน์ในแก๊สสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีของทาว์นเซนด์ ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวต้องอาศัยทฤษฎีจลน์ของแก๊สเป็นพื้นฐาน

2.4.1.1 ระยะอิสระเฉลี่ย

ระยะอิสระเฉลี่ยคือ ระยะห่างระหว่างการชนกันครั้งที่หนึ่งของอนุภาค และการชนกันครั้งที่สองของอนุภาค ที่ความเร็ว v ใด ๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.6)

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{N\pi(r_1 + r_2)^2} \quad (2.6)$$

โดย N คือ ความหนาแน่นของโมเลกุลแก๊ส

r_1 และ r_2 คือ รัศมีของสองอนุภาค

2.4.1.2 พลังงานและความเร็วของไอออน

โดยปกติเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ในพื้นที่หนึ่ง ๆ จะทำให้มีพลังงานในรูปของพลังงานจลน์ ซึ่งเมื่ออนุภาคทั้งสองเกิดการชนกันพลังงานจะถูกถ่ายทอดซึ่งกันและกัน ในสภาวะสมดุล อนุภาคทั้งหมดจะมีพลังงานจลน์เฉลี่ยดังสมการ (2.7)

$$\overline{W} = \frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} m \overline{v^2} \quad (2.7)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงตัวของโบลทซ์มัน เท่ากับ 1.37×10^{-23} Ws/°K

T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

m คือ มวลของอนุภาค

$\overline{v^2}$ คือ ค่าเฉลี่ยของความเร็วกำลังสอง

2.4.2 ชนิดของการเกิดดิสชาร์จ

การเบรกดาวนระหว่างขั้วอิเล็กโทรดสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ

2.4.2.1 เบรกดาวนประเภทสมบูรณ์ (Complete breakdown)

คือการเกิดเบรกดาวนตลอดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

2.4.2.1.1 เบรกดาวนโดยตรง (Direct breakdown)

สามารถเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเมื่อสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่งจะเกิดการเบรกดาวนทันที

2.4.2.1.2 เบรกดาวนแบบโคโรนา (Corona breakdown)

สามารถเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง โดยจะมีโคโรนาหรือดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นก่อนเบรกดาวน

2.4.2.2 เบรกดาวนเพียงบางส่วน (Partial breakdown)

เบรกดาวนเพียงบางส่วนหรือเบรกดาวนไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นในฉนวนที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ

2.4.2.2.1 โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge)

คือการดิสชาร์จในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอรอบปลายอิเล็กโทรดแหลม หรือขอบวัตถุที่คมในความดันแก๊สปกติ เมื่อเกิดโคโรนาในอากาศอาจสังเกตหรือรับรู้ได้ด้วยร่างกายคน

โคโรนาดีสชาร์จเกิดขึ้นในรูปพัลส์สั้น ๆ ซึ่งมีสเปกตรัมความถี่สูงที่สามารถรบกวนระบบการสื่อสารได้

2.4.2.2.2 ดิสชาร์จตามผิว (Surface discharge)

การดิสชาร์จตามผิวสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวของฉนวนมีค่าสูงถึงค่าวิกฤต

2.4.2.2.3 ดิสชาร์จภายใน (Internal discharge)

ดิสชาร์จภายในจะเกิดขึ้นภายในฉนวนแข็ง หรือฉนวนเหลวที่ซึ่งมีฟองอากาศอยู่ภายใน การเกิดดิสชาร์จภายในขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าของแก๊สที่แฝงอยู่ภายใน การมีฟองแก๊สอยู่ภายในฉนวนจะเป็นต้นเหตุนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนในที่สุด ฉนวนใดที่มีดิสชาร์จภายในจะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนนั้นสั้นลง เพราะฉะนั้นการตรวจสอบการเกิดดิสชาร์จภายในจึงเป็นเรื่องสำคัญประการหนึ่ง

2.4.3 การดิสชาร์จของข้อวิเล็คโทรด

การเกิดการดิสชาร์จแต่ละแบบขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อวิเล็คโทรด โดยข้อวิเล็คโทรดสามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะหลักดังนี้

2.4.3.1 ข้อวิเล็คโทรดแบบแผ่นระนาบ

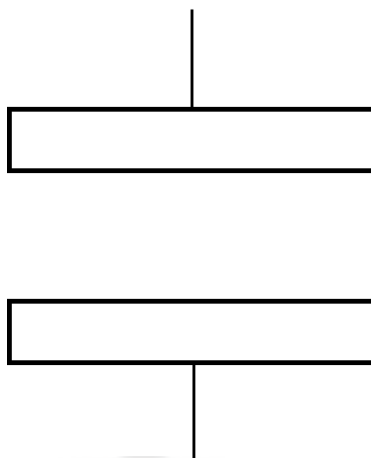
ข้อวิเล็คโทรดชนิดนี้มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ 2 แผ่นขนานกัน โดยมีฉนวนไฟฟ้ากั้นระหว่างกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 2 สนามไฟฟ้าที่ได้จากข้อวิเล็คโทรดลักษณะนี้คือสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ เมื่อความต่างศักย์ระหว่างข้อวิเล็คโทรดทั้งสองเพิ่มมากขึ้น ค่าสนามไฟฟ้าก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน โดยเมื่อค่าสนามไฟฟ้าถึงจุดที่ฉนวนไม่สามารถทนทานค่าสนามไฟฟ้าได้จะส่งผลให้เกิดการเบรกดาวนระหว่างข้อไฟฟ้าทั้งสอง โดยสนามไฟฟ้าระหว่างข้อไฟฟ้าทั้งสองสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.8)

$$E = \frac{V}{d} \quad (2.8)$$

เมื่อ E คือความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า

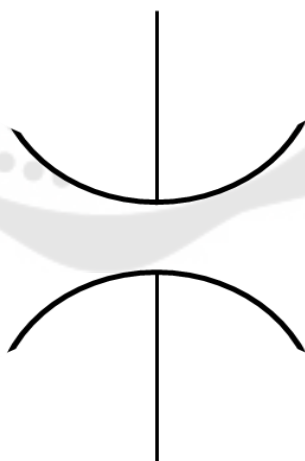
d คือ ระยะห่างระหว่างข้อไฟฟ้า



ภาพประกอบ 2 ขั้วอิเล็กโทรดแบบแผ่นระนาบ

2.4.3.2 ขั้วอิเล็กโทรดแบบทรงกลม

ขั้วอิเล็กโทรดชนิดนี้มีลักษณะเป็นผิวโค้งดังแสดงในภาพประกอบ 3 โดยสนามไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กโทรดชนิดนี้คือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ซึ่งแตกต่างจากอิเล็กโทรดแบบระนาบ แต่ถ้าช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าน้อยมาก ๆ ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กโทรดชนิดนี้จะมีความใกล้เคียงกับสนามไฟฟ้าที่ได้จากอิเล็กโทรดแบบระนาบ

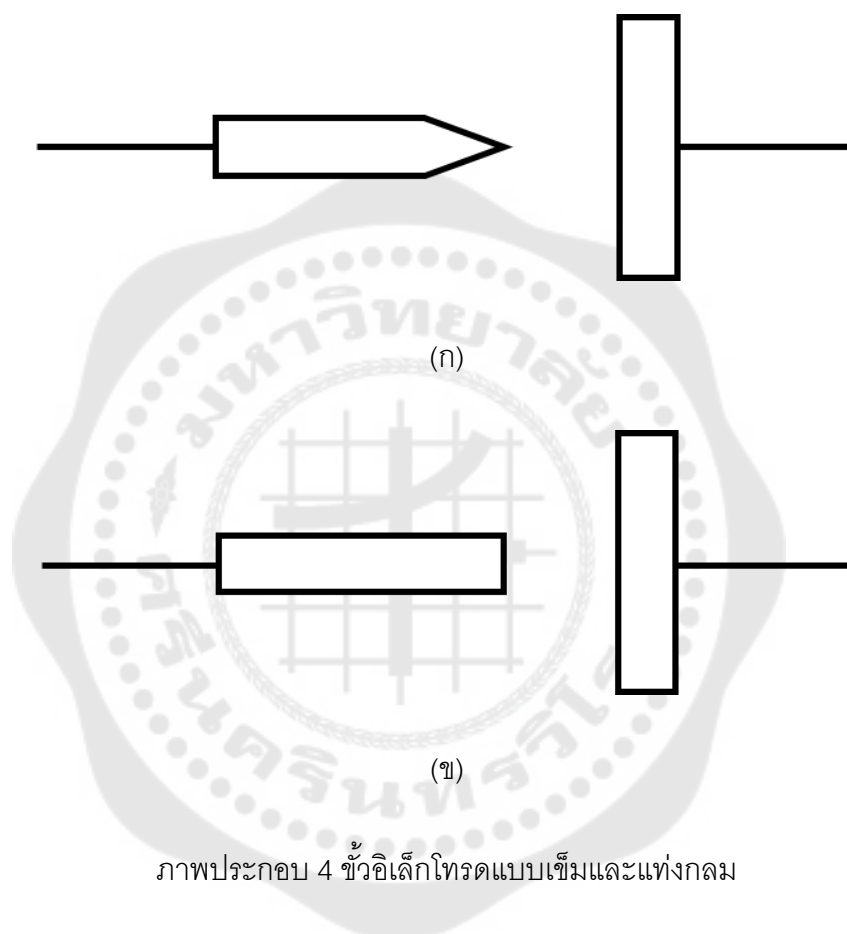


ภาพประกอบ 3 ขั้วอิเล็กโทรดแบบทรงกลม

2.4.3.3 ขั้วอิเล็กโทรดแบบแท่งกลมและเข็ม

ขั้วอิเล็กโทรดชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นแท่งกลมหรือเข็มแหลมดังแสดงในภาพประกอบ 4 โดยจะมีการกระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง เมื่อความต่างศักย์

ระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความคงทนของฉนวนไฟฟ้าจะเกิดการเรืองแสงขึ้นที่บริเวณที่มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่สุดคือบริเวณปลายเข็มหรือมุมแหลม โดยการเรืองแสงที่เกิดขึ้นเรียกว่า โคโรนา โดยหลังจากเกิดโคโรนาแล้วถ้าความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะเกิดการเบรกดาวนระหว่างขั้วอิเล็กโทรดขึ้น

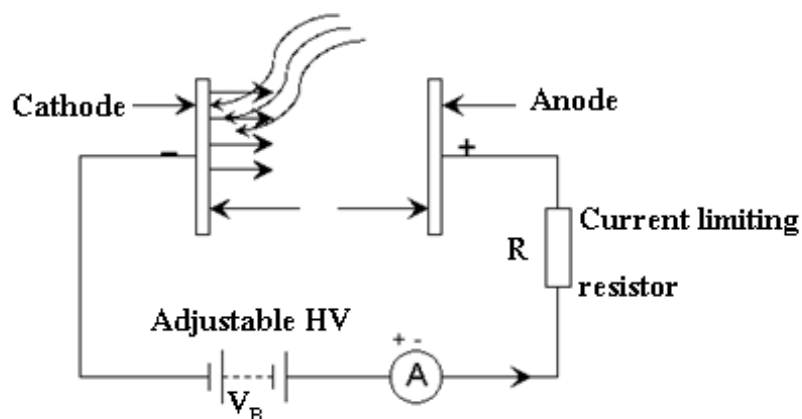


2.4.4 การเกิดเบรกดาวนในแก๊ส (Gas breakdown)

พลาสมาสามารถเกิดขึ้นได้โดยการกระตุ้นให้อะตอมเกิดการแตกตัวจากการได้รับพลังงานต่าง ๆ ทำให้แก๊สเปลี่ยนเป็นตัวนำไฟฟ้าและกระแสจะสามารถไหลผ่านแก๊สได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ เช่น ชนิดของแก๊ส ลักษณะทางสนามไฟฟ้า ความดันบรรยากาศ ล้วนแต่มีผลต่อการเกิดเบรกดาวนในแก๊สและลักษณะของพลาสมา ซึ่งได้ศึกษาจากทฤษฎีดังนี้

2.4.4.1 กลไกการเบรกดาวนในแก๊สของทาว์นเซนด์ (Townsend breakdown)

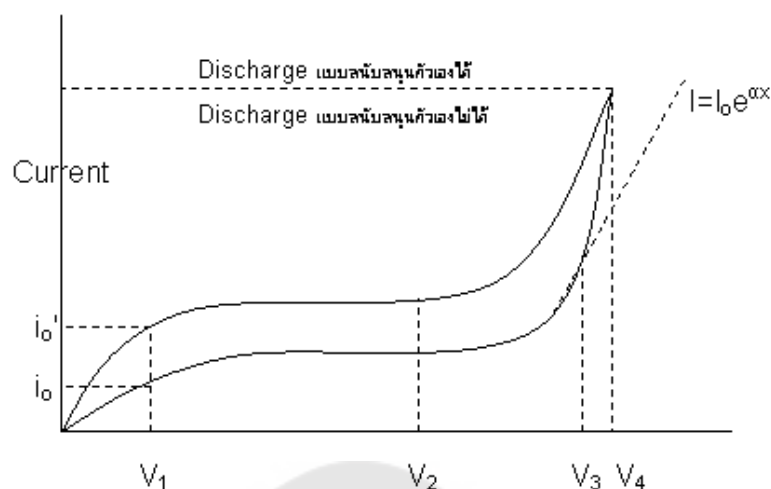
ทาว์นเซนด์ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสระหว่างอิเล็กโทรดแบบระนาบวางขนานกัน ดังภาพประกอบ 5 (สระเงินสิงห์ และ แก้วตาปี, 2548)



ภาพประกอบ 5 วงจรการเปลี่ยนแปลงกระแสระหว่างอิเล็กโทรดแบบระนาบวางขนานกัน

ที่มา: (สระเงินสิงห์ และ แก้วตาปี, 2548)

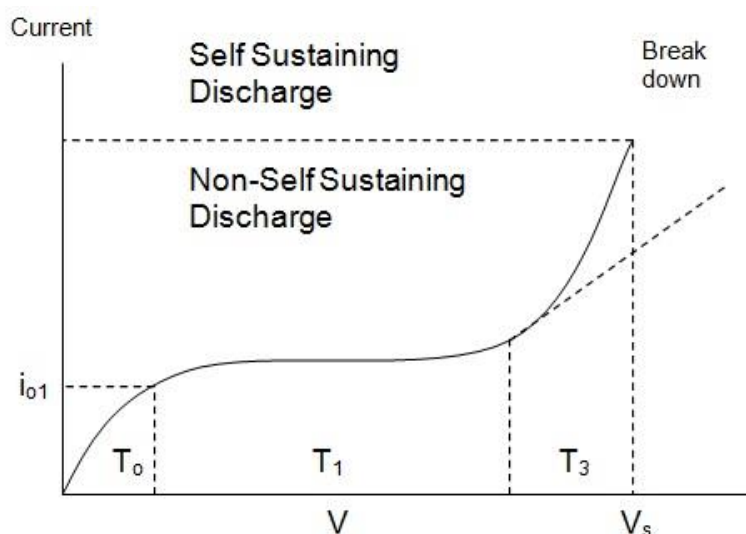
เมื่อทำการเพิ่มแรงดันที่ตกคร่อมอิเล็กโทรดทั้งสองจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า สมมติให้จำนวนอิเล็กตรอนเกิดขึ้นที่ขั้วลบ เนื่องจากการส่องแสงอัลตราไวโอเล็ตไปยังแคโทด และ ขณะนั้นจะมีกระแสเริ่มต้น ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนจากขั้วลบ ไปยังขั้วบวกเกิดการชนกับมวลของ แก๊สทำให้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้กระแสเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตาม เป็นเหตุให้เกิดการเบรกดาวนใน ที่สุด ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับการสะสมพลังงานของอิเล็กตรอน ค่าพลังงานสะสมนี้ขึ้นอยู่กั E/P เมื่อ E เป็นสนามไฟฟ้า และ P เป็นความดันของแก๊ส ค่าพลังงานสะสมจะมีค่าคงที่เมื่อสนามไฟฟ้าและความดันแก๊สมีค่าคงที่ จากการทดลองของทาวน์เซนด์พบว่า กระแสในช่องว่างตอนแรกเพิ่มขึ้น เป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้า V_B เนื่องจากว่าอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากแคโทดเคลื่อนผ่าน แก๊สด้วยความเร็วที่ขึ้นอยู่กั V_B เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นจนเกือบมีค่าคงที่เท่ากับ I_0 กระแส I_0 นี้จะขึ้นอยู่กัความเข้มของการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ต ถ้าเพิ่มระดับความเข้มของแสงมากขึ้น อีกระดับกระแสจะเพิ่มขึ้นและคงที่เป็น I_0 ดังแสดงในภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสก่อนเกิดการเบรกดาวน

ที่มา: (สระเงินสิงห์ และ แก้วตาปี, 2548)

เมื่อเพิ่ม V_B เป็น V_1 และ V_2 กระแสก็ยังคงมีค่าคงที่ ต่อมาเพิ่ม V_B ขึ้นอีกจนถึง V_3 กระแสจะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเพิ่ม V_B ขึ้นอีกจนถึง V_4 กระแสก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน ทาวน์เซนด์ได้อธิบายว่า อิเล็กตรอนเกิดการไอออนในเซชันของแก๊สที่ชนกันจึงเป็นเหตุให้กระแสเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งช่วงนี้จะอยู่ในกระบวนการขั้นต้น เรียกว่า primary process or α Process แต่หลังจากที่ทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้ามากกว่า V_3 กระแสจะเพิ่มขึ้นมากกว่าแบบเอกซ์โพเนนเชียล จนเกิดเบรกดาวนที่ V_4 การเพิ่มขึ้นของกระแสในช่วงหลังนี้เกิดจากกระบวนการขั้นสอง (secondary process or γ Process) ซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นนอกเหนือจากการชนกันของอิเล็กตรอน ที่จุดเบรกดาวน V_3 นี้ แรงดันไฟฟ้าจะยังคงไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่าจะเปลี่ยนความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเลต แต่ที่จุด V_3 นี้จะเปลี่ยนไปได้ถ้ามีประจุอิสระที่ได้รับจากไอออนคงที่มาทำให้สนามไฟฟ้าเปลี่ยนไป การเบรกดาวนที่แก๊สความดันต่ำและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่แคบนั้น แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนของทาวน์เซนด์ที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีจะมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพประกอบ 7 การเบรกดาวนของแก๊ส ระยะเริ่มต้น, ระยะปานกลาง และระยะสุดท้าย

ที่มา: (สระเงินสิงห์ และ แก้วตาปี, 2548)

จากภาพประกอบ 7 เป็นการเบรกดาวนของแก๊สซึ่งเกิดขึ้น 3 ระยะคือ ระยะเริ่มต้น ระยะปานกลาง และระยะสุดท้าย ที่ระยะเริ่มต้น (T_0) กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เพราะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลที่ระยะปานกลาง (T_1) กระแสจะไหลค่อนข้างคงที่ เพราะทำให้เกิดกระบวนการแตกตัวของแก๊สกับกระบวนการรวมตัวของอิเล็กตรอน (T_2) สมดุลกัน ที่ระยะสุดท้าย (T_3) กระแสจะไหลอย่างรวดเร็วและมากมาย และในที่สุดก็จะเกิดการเบรกดาวนอย่างสมบูรณ์ (completely breakdown) ตามทฤษฎีกลไกการเบรกดาวนของทาวน์เซนด์ เกิดขึ้นจากจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเป็นลำดับต่อเนื่องที่ระหว่างอิเล็กโทรด และเชื่อว่ากระบวนการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนเกิดจาก 2 กระบวนการคือ

2.4.4.1.1 กระบวนการขั้นต้น (Primary process or α Process)

อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้วิ่งไปหาขั้วแอโนด เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และพลังงานจลน์จะสูงขึ้นจนเกิดการไอออไนเซชัน เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลของแก๊สจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโมเลกุลที่เป็นกลาง และที่เหลือเป็นไอออนบวก จนเกิดเป็นกลุ่มก้อนประจุ (avalanche electron) ดังแสดงในสมการ (2.9)

$$n_x = n_0 e^{\alpha x} \quad (2.9)$$

เมื่อ n_0 คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งออกจากขั้วแคโทดต่อวินาที (s)

n_x คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งออกจากขั้วแคโทดที่ระยะทาง

โดยอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากขั้วแคโทดนั้นจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีจำนวนเท่ากับไอออนบวกที่เกิดขึ้นจากการไหลของอิเล็กตรอนจากกระบวนการไอออไนเซชันนำไปสู่การไหลของกระแสไฟฟ้าตามสมการ (2.10)

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (2.10)$$

เมื่อ I_0 คือ กระแสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจากอิเล็กตรอนตัวแรก (A)

d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (m)

$e^{\alpha d}$ คือ อิเล็กตรอนที่เกิดระหว่างการเคลื่อนที่จากแคโทดไปยังแอโนด เรียกว่า อิเล็กตรอนอะวาเลนซ์ (avalanche electron)

2.4.4.1.2 กระบวนการขั้นสอง (Secondary process or γ Process)

กระบวนการขั้นสองทำให้เกิดการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากไอออนบวกวิ่งชนขั้วแคโทด ดังสมการ (2.11)

$$n_d = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.11)$$

จากนั้นจะหาความสัมพันธ์ของกระแสได้จากสมการ (2.12)

$$\frac{N_d}{N_0} = \frac{I}{I_0} = \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.12)$$

เมื่อเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์คือ $\gamma(e^{\alpha x} - 1) = 1$ ซึ่งกระแสจะมีค่าเป็นอนันต์

2.4.4.2 กฎของพาสเชน (Paschen's law)

กฎของพาสเชนเป็นผลสืบเนื่องจากการเกิดเบรกดาวน์ในแก๊สของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยนำเงื่อนไขที่จะเกิดการเบรกดาวน์ในแก๊สมาใช้ดังนี้ (สระเจินสิงห์ และ แก้วตาปี, 2548)

$$\gamma(e^{\alpha x} - 1) = 1 \quad (2.13)$$

หรือเขียนเป็นสมการ (2.14)

$$\gamma e^{\alpha x} = 1 \quad (2.14)$$

จากความสัมพันธ์ของ α, γ และสนามไฟฟ้าต่อความดันแก๊ส E/p สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.15)

$$\alpha / p = \frac{f(E)}{p} \quad (2.15)$$

และสมการ (2.16)

$$\gamma = \frac{g(E)}{p} \quad (2.16)$$

โดยสนามไฟฟ้ามีค่าดังสมการ (2.17)

$$E = \frac{V}{d} \quad (2.17)$$

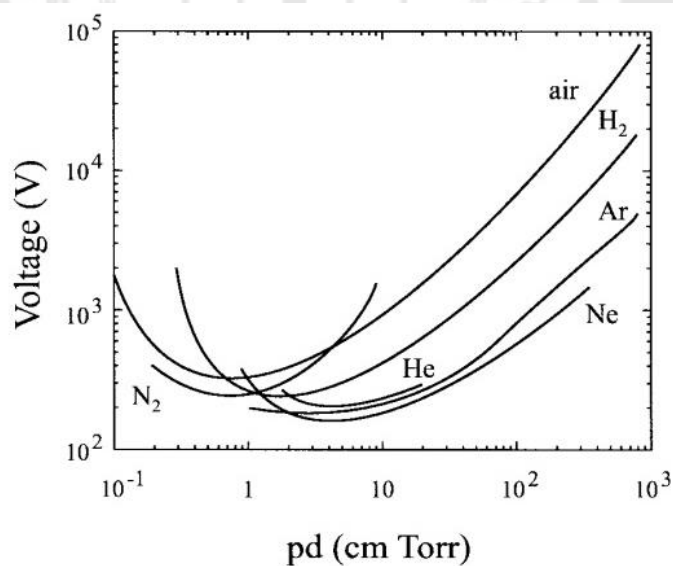
โดยสมการสนามไฟฟ้าใช้ในกรณีที่สนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอ โดยนำค่า E ในสมการดังกล่าวแทนในสมการ α/p และ γ และแทนในสมการ $\gamma e^{\alpha x}$ จะได้สมการ (2.18)

$$g \left[\frac{V}{pd} \right] e^{(f(V/pd)pd)} = 1 \quad (2.18)$$

จากสมการข้างต้นสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ (2.19)

$$V_s = f(pd) \quad (2.19)$$

จากกฎของพาสเซนการหาแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์สำหรับช่วงที่มีสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอ สำหรับอากาศ ไนโตรเจน ฮีเลียม นีออน อาร์กอนและไฮโดรเจน แสดงไว้ในภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์กับผลคูณของความดันและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

ที่มา: (สระเงินสิงห์ และ แก้วตาปี, 2548)

แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนสำหรับช่วงที่มีสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอ (V_b) ในแก๊สจะขึ้นอยู่กับผลคูณของความดันกับระยะห่างขั้วไฟฟ้า $p \times d$ ดังสมการ (2.20) (Schutze และคนอื่น ๆ, 1998)

$$V_b = \frac{B(p \times d)}{\ln[A(p \times d)] - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right]} \quad (2.20)$$

โดยค่า A และ B คือค่าคงที่ของชนิดขั้วอิเล็กโทรด และ γ คือค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยอิเล็กตรอนขั้นที่สองของแคโทด จากกราฟของพาสเสนจะเห็นว่าเมื่อผลคูณของความดันกับระยะห่างขั้วไฟฟ้า $p \times d$ มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน (V_b) มีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยแสดงดังตารางที่ 1

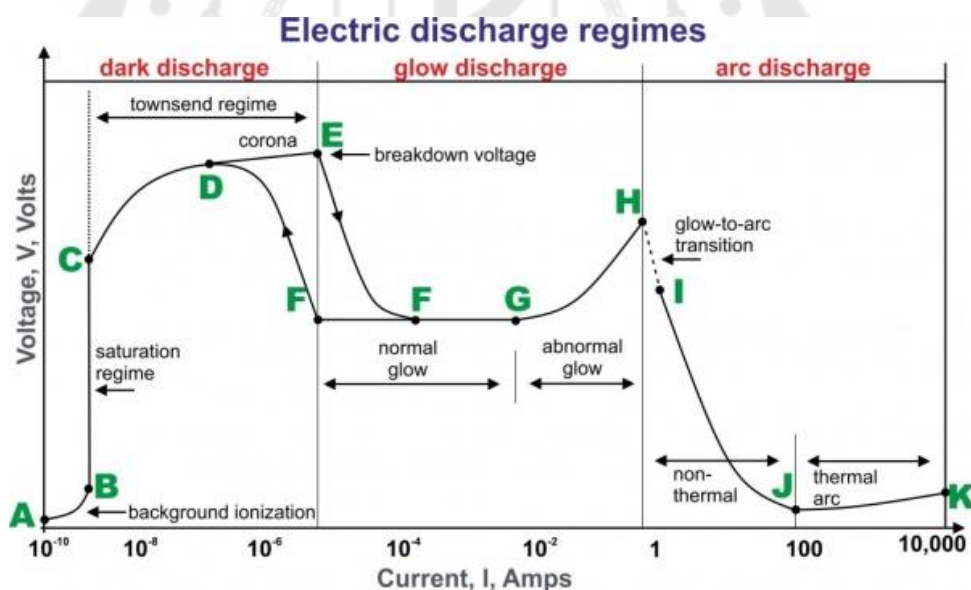
ตาราง 1 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนต่ำสุดของแก๊สชนิดต่าง ๆ

แก๊ส	แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน (V_b) (โวลต์)	ผลคูณของความดันกับระยะห่างขั้วไฟฟ้า $p \times d$ (มิลลิเมตรปรอท เซนติเมตร)
อากาศ	327	0.567
อาร์กอน	137	0.9
ไฮโดรเจน	273	1.15
ฮีเลียม	156	4.0
คาร์บอนไดออกไซด์	420	0.51
ไนโตรเจนไดออกไซด์	418	0.5
ออกซิเจน	450	0.7
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	457	0.33
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	414	0.6

ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยจะเกิดขึ้นที่แรงดันไฟฟ้าสูง ๆ ลักษณะของแก๊สที่ได้นั้นจะมีขนาดที่สั้น ค่าความหนาแน่นของแก๊สสูง ส่งผลให้เกิดอัตราการชนที่สูงด้วยเช่นกัน โดยอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนั้นเคลื่อนที่ไปทางขั้วแอโนดและมีการชนกันเกิดขึ้น ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างของเครื่องกำเนิดพลาสมาได้ศึกษาและนำหลักการทฤษฎีของพาสเซอวมไปถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแก๊สดิสชาร์จมาช่วยในการออกแบบเพื่อให้ได้แรงดันเบรกดาวน์ที่เหมาะสมคือการทำหนดระยะห่างของขั้วแอโนดกับขั้วแคโทดรวมไปถึงความดันแก๊สที่ใช้ในการทดลองให้มีความเหมาะสม (ภพลภ, 2555)

2.4.4.3 ลักษณะกระแส และแรงดันของการดิสชาร์จในแก๊ส

การดิสชาร์จ เป็นจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงสภาพจากฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าในลักษณะการเบรกดาวน์หรืออาร์ค ซึ่งแก๊สได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น หลอดไฟบรรจุแก๊ส หลอดเรืองแสง หลอดป้องกันแรงดันเกิน หลอดไดโอด เป็นต้น



ภาพประกอบ 9 ลักษณะแรงดัน - กระแสของแก๊สดิสชาร์จ

ที่มา: ("Plasma Universe," 2562a)

2.4.4.3.1 ดิสชาร์จแบบไม่เรืองแสง (Dark discharge)

ย่าน A-B ดิสชาร์จแบบประทุตัวเองไม่ได้ (non-self-sustaining discharge) กระบวนการนี้นำไปใช้ในสนามไฟฟ้าตามแนวแกนของหลอดปล่อยไอออนและ

อิเล็กตรอน รังสีจากแร่ธาตุกัมมันตรังสีหรือแหล่งอื่น ๆ ผลิตในระดับคงที่และสามารถวัดผลการไอออไนเซชันในอากาศที่ความดันบรรยากาศได้ ไอออนและอิเล็กตรอนจะเคลื่อนย้ายไปยังขั้วไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าต่ำ ๆ ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น

ย่าน B-C ย่านไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มสะสมขึ้นเรื่อย ๆ จึงทำให้ไอออนและอิเล็กตรอนอึดตัว ในขณะที่สถานะอึดตัวนั้นแรงดันไฟฟ้าก็มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยเช่นกัน

ย่าน C-E ถ้าแรงดันไฟฟ้าในท่อปล่อยความดันมีค่าเพิ่มมากขึ้น จุด C จะมีลักษณะกราฟเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ขณะที่สนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจึงทำให้อิเล็กตรอนตัวแรกของสถานะแก๊สได้รับพลังงานมากพอก่อนที่จะเคลื่อนย้ายไปขั้วแอโนด ซึ่งในย่านนี้เรียกว่า ทาวนด์เซนต์ดิสชาร์จ (townsend discharge)

ย่าน D-E สนามไฟฟ้าอยู่ใกล้จุดที่แก๊สเกิดการเบรกดาวน์ ทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สำหรับที่กระแสต่ำ ๆ จะส่งผลให้โคโรนามีสีเข้ม ย่าน E จุดเบรกดาวน์ทางไฟฟ้า อิเล็กตรอนออกจากขั้วแคโทด เนื่องจากผลกระทบไอออนหรือโฟตอนเสียหายหรือเกิดประกายไฟที่ V_b ซึ่ง ค่าเพกเตอร์จะอยู่ในช่วง $10^4 - 10^8$ และมักจะถูกจำกัดโดยความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายไฟ ถ้าความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายไฟมีค่าสูง ท่อปล่อยแก๊ส (discharge tube) จะยังคงอยู่ในจุดของโคโรนา ซึ่งเห็นได้ชัดบนขั้วไฟฟ้า แต่ถ้าความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายไฟมีค่าต่ำ แก๊สจะเกิดการเบรกดาวน์ที่แรงดัน V_b และเข้าไปอยู่ในย่านดิสชาร์จแบบเรืองแสง (glow discharge)

2.4.4.3.2 ดิสชาร์จแบบเรืองแสง (glow discharge)

ย่าน F-G หลังจากการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องจาก E ถึง F แก๊สเข้าสู่ย่านการเรืองแสงแบบปกติ (normal glow) แรงดันไฟฟ้าและกระแสอิเล็กโทรดเป็นอิสระ หมายความว่าพลาสมาอยู่ติดกับส่วนเล็ก ๆ ของพื้นผิวขั้วแคโทดที่กระแสต่ำ โดยส่วนของขั้วแคโทดจะถูกครอบคลุมไปด้วยการเพิ่มขึ้นของพลาสมาจนถึงจุด G

ย่าน G-H ในย่านการเรืองแสงแบบไม่ปกติ (abnormal glow) ที่จุด G แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นที่ขั้วแคโทด โดยเมื่อเริ่มต้นจากจุด G และมองไปทางซ้ายของรูปกราฟจะเป็นรูปแบบคุณสมบัติของแรงดันและกระแสฮิสเทอรีซิส (hysteresis)

2.4.4.3.3 ดิสชาร์จแบบอาร์ก (arc discharges)

ย่าน H-K ที่จุด H ขั้วไฟฟ้ามีความร้อนมากพอที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาจากขั้วแคโทด ถ้าแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงมีความต้านทานภายในต่ำการดิสชาร์จจะได้รับการเปลี่ยนแปลง เรืองแสงเป็นอาร์ก (glow-to-arc) จาก I-K เป็นหนึ่งในแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงตามการเพิ่มของกระแสจนกระทั่งมาถึงจุด J แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ อีกครั้ง ("Plasma Universe," 2562b)

2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของพลาสมาด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

Optical Emission Spectrometer เป็นเครื่องมือวัดคุณสมบัติทางแสงของพลาสมา ซึ่งมีวิธีการวัดโดยอาศัยการทำให้โมเลกุลของแก๊สอยู่ในสภาวะกระตุ้น หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นมาในระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่าจะกลับเข้าสู่สภาวะพื้นหรือระดับพลังงานปกติ ซึ่งในสภาวะนี้อิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมาในรูปของสเปกตรัม ซึ่งอะตอมต่างชนิดกันจะส่งผลให้เกิดสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและมีสีที่แตกต่างกัน ดังนั้นเครื่อง Optical Emission Spectrometer จึงอาศัยการวัดสเปกตรัมนี้เพื่อบ่งบอกชนิดของธาตุและสารประกอบที่ทำให้เกิดพลาสมา

2.6 พืชไมโครกรีน (microgreens)

พืชไมโครกรีน คือ พืช ผัก สมุนไพร และเมล็ดพืชอื่น ๆ ที่มีอายุตั้งแต่ 7-14 วัน ซึ่งอยู่ระยะที่เป็นต้นกล้าขนาดเล็ก โดยมีความยาวของลำต้นอยู่ที่ประมาณ 3 – 7 เซนติเมตร และมีใบจริงอยู่ประมาณ 2-3 ใบ พืชไมโครกรีนสามารถเก็บเกี่ยวได้โดยการตัดเฉพาะส่วนลำต้นขึ้นไปมาบริโภค โดยพืชไมโครกรีนต่างจาก ต้นถั่วงอก (sprouts) ตรงที่พืชไมโครกรีนคือพืชที่ต้องอาศัยแสงในการเจริญเติบโตและสร้างสารอาหารที่มีประโยชน์ ในขณะที่ต้นถั่วงอกเป็นเมล็ดที่เพิ่งงอกออกมา โดยไม่จำเป็นต้องใช้แสงเพื่อการเจริญเติบโตก็สามารถบริโภคได้ ในปัจจุบันผู้ที่ใส่ใจในสุขภาพนิยมบริโภคกันอย่างมาก เนื่องจากพืชไมโครกรีนเป็นผักที่สะอาด รสชาติดี ปลูกง่าย ใช้พื้นที่ในการปลูกน้อย และมีคุณค่าทางอาหารสูง ทั้งแคลเซียม สังกะสี โมลิบดีนัม แมงกานีส เหล็ก และแมกนีเซียม รวมทั้งมีสารต้านอนุมูลอิสระ วิตามิน เอ็มไซม์ และแร่ธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย ซึ่งสามารถช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดโรคหัวใจ โรคอัลไซเมอร์ และโรคมะเร็งได้ (Roe, 2006; Tucker, 2003; Willett, 2002; Wright และ Rowell, 2010; Xiao, Nou, Luo, และ Wang, 2014; มัจฉาชีฟ และคนอื่น ๆ, 2557; หาระโคตร, จิระเกียรติกุล, และ ฤทธิไชย, 2019)

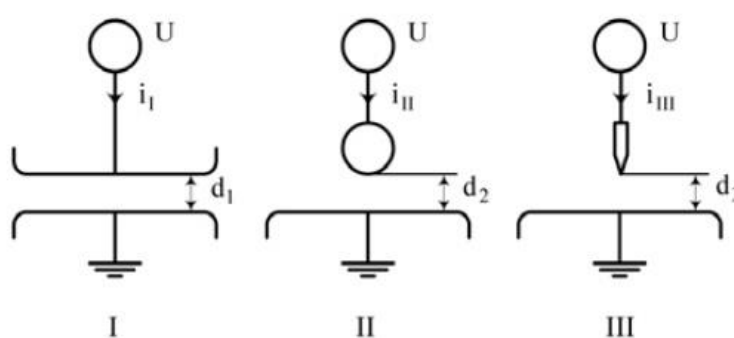
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสำรวจพบว่าการใช้พลาสมาในการเร่งการเจริญเติบโตของพืชทำได้ในพืชหลายชนิด เช่น ห้วไชเท้า มะเขือเทศ มันฝรั่ง แตงกวา ฯลฯ สามารถยับยั้งแบคทีเรียและฆ่าเชื้อโรคได้อีกด้วย พลาสมาจึงถูกนำมาใช้กับงานในอีกหลาย ๆ ด้าน เช่น ด้านการแพทย์ บำบัดน้ำเสีย กระบวนการใช้พลาสมาจึงได้รับการพัฒนาและคิดค้นมาเรื่อยมา ซึ่งเป็นนวัตกรรมที่สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ไม่เพียงที่กล่าวมา และการใช้พลาสมาจะกลายเป็นนวัตกรรมที่ได้รับความสนใจ และนำมาใช้ได้อย่างแพร่หลายแน่นอน (Jiafeng และคนอื่น ๆ, 2014)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดพลาสมา

(1) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด มีผลต่อการเกิดพลาสมาเนื่องจากหากจัดช่องว่างไว้สูงหรือต่ำเกินไปอาจมีผลต่อการไหลของแก๊ส ทำให้การไหลของแก๊สไหลไปไม่ทั่วทั้งระบบ หรืออาจไหลวนอยู่เฉพาะจุดส่งผลให้การเกิดพลาสมาไม่สม่ำเสมอ (Lee และ Kim, 2012)

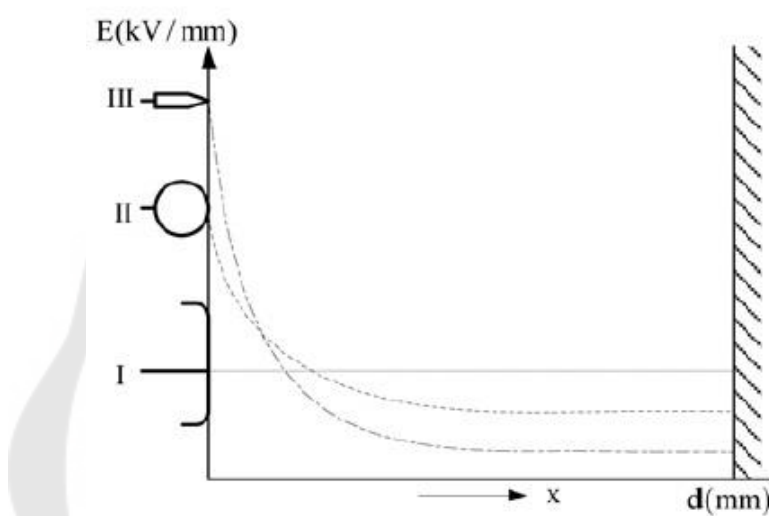
(2) ความเครียดหรือสนามไฟฟ้า มีผลต่อการเกิดพลาสมาโดยทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนเรียกว่ากระบวนการไอออไนเซชัน ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสมโดยแต่ละแก๊สมีค่าสนามไฟฟ้าที่ต่างกันไป โดยลักษณะรูปแบบของสนามไฟฟ้าโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยชนิดไม่สม่ำเสมอสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและแบบไม่สม่ำเสมอสูง (Lee และ Kim, 2012) ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะของอิเล็กโทรด ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 ลักษณะอิเล็กโทรดที่สามารถสร้างสนามไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ โดย (I) สามารถสร้างสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (II) สามารถสร้างสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (III) สามารถสร้างสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

ที่มา: (น้าหอมจันทร์, 2555)

ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนส่วนใหญ่จะเป็นค่าทางสถิติหรือเป็นค่าโดยประมาณ มักกำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงที่สุด ($E_{\max}$) ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโทรดในขณะที่เบรกดาวนเริ่มเกิดขึ้น ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ในบริเวณผิวอิเล็กโทรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 การกระจายสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบต่าง ๆ

ที่มา: (น้ำหอมจันทร์, 2555)

จากความสัมพันธ์ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับลักษณะสนามไฟฟ้าจะส่งผลต่อการเกิดเบรกดาวน ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.21

$$U_b = E_{\max} \times d \times \eta^* \quad (2.21)$$

โดยที่ $E_{\max}$ คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/cm)

U_b คือ แรงดันไฟฟ้า (kV)

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (cm)

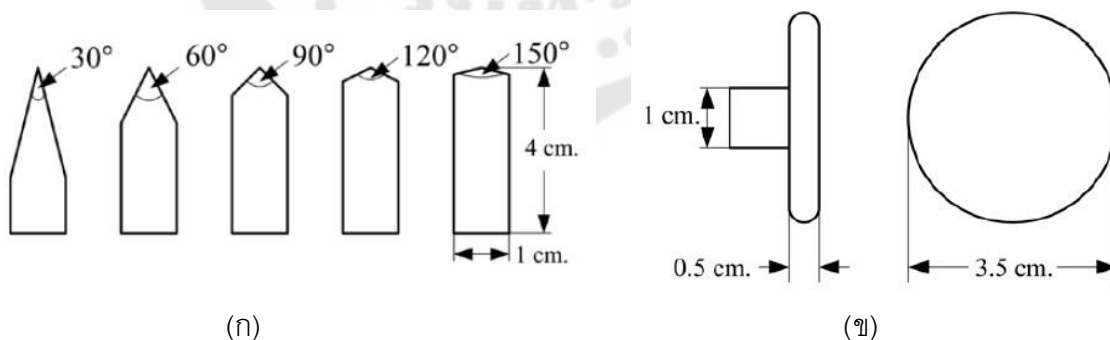
η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า $\eta^* \leq 1$

แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) ส่วนใหญ่ใช้ค่าโดยประมาณ หากประมาณค่าต่ำกว่าความเป็นจริงแล้วอาจส่งผลกระทบต่อขนาดที่ได้ออกแบบและในทางตรงกันข้าม ถ้าประมาณค่าสูงกว่าความเป็นจริงแล้วจะส่งผลกระทบต่อขนาดและราคาของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ออกแบบโดยสามารถแบ่งแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

(1) แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ เกิดจากอิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ ดังภาพประกอบ 10(I) ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (η') จากอิเล็กโตรดชนิดนี้มีค่าสูงที่สุด โดยมากในการออกแบบจะประมาณค่าที่ $\eta' \cong 1$

(2) แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย เกิดจากอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม หรือ ทรงกลม-ระนาบ ดังภาพประกอบ 10(II) ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดชนิดนี้จะอยู่ในช่วง $0.3 \leq \eta' \leq 0.9$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโตรดและระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดด้วย

(3) แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง เกิดจากอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ ค่าของแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดชนิดนี้อยู่ในช่วง $\eta' \leq 0.3$ ดังภาพประกอบ 10(III) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับมุมของอิเล็กโตรดและระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดด้วย โดยแสดงตัวอย่างค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ ดังภาพประกอบ 12 ในฉนวนอากาศและฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่ทำการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสลับที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด 1 ถึง 3 มิลลิเมตร

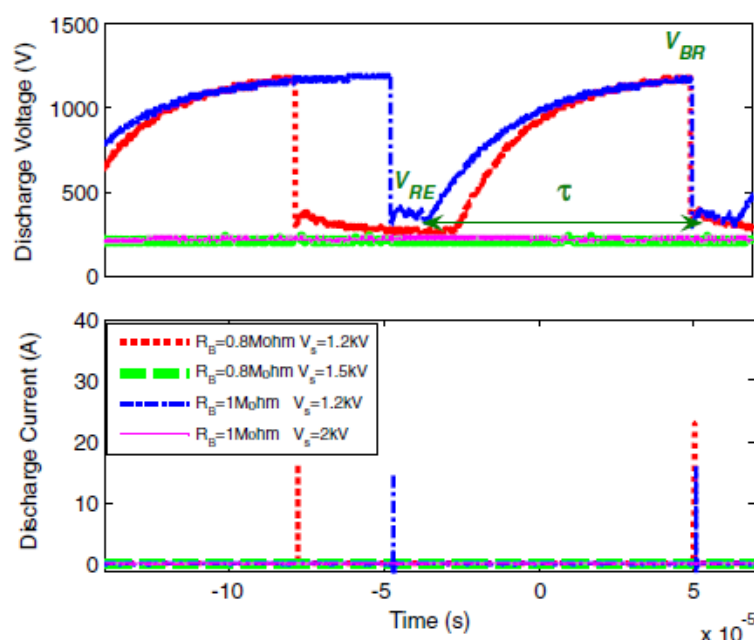


ภาพประกอบ 12 ขนาดของอิเล็กโตรดปลายแหลม-ระนาบ โดย (ก) ขนาดของอิเล็กโตรดปลายแหลม (ข) ขนาดของอิเล็กโตรดระนาบ

ที่มา: (น้ำหอมจันทร์, 2555)

แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงหรืออิเล็กโทรดแบบปลายแหลม-ระนาบ มีค่าต่ำเมื่อมุมของอิเล็กโทรดปลายแหลมมีค่าต่ำและจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมุมของอิเล็กโทรดมีค่ามากขึ้น ซึ่งแสดงถึงความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมุมของอิเล็กโทรดเข้าใกล้ระนาบ และค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าจะสูงขึ้นเมื่อระยะแยกเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกันทั้งในฉนวนอากาศและฉนวนน้ำมันหม้อแปลง กล่าวคือเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้นค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์สูงขึ้นและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะสูงขึ้นเช่นกันในทุกชนิดของวัสดุฉนวนซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 2.21

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดพลาสมาที่กล่าวมานั้น คือ ช่องว่างอากาศ และความเครียดหรือสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการสร้างพลาสมาขึ้นได้ โดยสามารถหากระแสดิสชาร์จของการเกิดพลาสมา ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ การดิสชาร์จแบบ self-pulsing และการดิสชาร์จแบบต่อเนื่อง โดยการดิสชาร์จแบบ self-pulsing จะเกิดการแกว่งระหว่างแรงดันฟื้นคืนสภาพปกติ (recovery voltage, V_{RE}) และแรงดันเบรกดาวน์ (breakdown voltage, V_{BR}) ในขณะที่กระแสดิสชาร์จของโหมดต่อเนื่องถูกแสดงเป็นค่าคงที่ ความแตกต่างของทั้งสองโหมดคือ กระแสที่ออกมาจากแหล่งจ่ายผ่านตัวต้านทานบัลลาสต์ ถ้ากระแสที่คงอยู่ไม่เป็นไปตามกฎของทาวน์เซนด์ พลาสมาจะดิสชาร์จในโหมดการทำงานแบบ self-pulsing ซึ่งแรงดันแหล่งจ่ายจะมีค่ามากกว่าแรงดันเบรกดาวน์เล็กน้อย การแกว่งของกระแสและแรงดันดิสชาร์จเกิดจากตัวเก็บประจุย่อย (stray capacitance) และตัวต้านทานบัลลาสต์ ดังภาพประกอบ 13 โดยในโหมดนี้กระแสดิสชาร์จจะเพิ่มขึ้นอย่างมากต่อความกว้างของคลื่นสั้นระหว่างการดิสชาร์จของแก๊ส ดังนั้นจะได้พัลส์ที่กระแสสูง สามารถสังเกตได้ระหว่างการลดลงของแรงดันดิสชาร์จ (V_d) จาก V_{BR} ไปสู่ V_{RE} ซึ่งมีลักษณะกระแสพัลส์สูงสุด กระแสดิสชาร์จจากแก๊สและตัวเก็บประจุย่อยในโหมด self-pulsing จะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน และจะค่อย ๆ ลดลงโดยจะแสดงออกทางการแกว่งของกระแสดิสชาร์จขณะที่เฟสลดลง ทำให้สามารถหาความเข้มของไอออนในพลาสมาได้ เมื่อแรงดันแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น ความถี่ในโหมด self-pulsing จะเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากกระแสที่จ่ายผ่านความต้านทานบัลลาสต์ เป็นสาเหตุให้การฟื้นคืนสภาพปกติเป็นไปอย่างฉับพลัน หมายความว่าเมื่อแรงดันแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น V_{RE} จะเพิ่มขึ้นขณะที่ V_{BR} จะคงที่ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ V_{RE} จะทำให้เวลาในการชาร์จประจุสั้นลง (มาตรา, 2559)



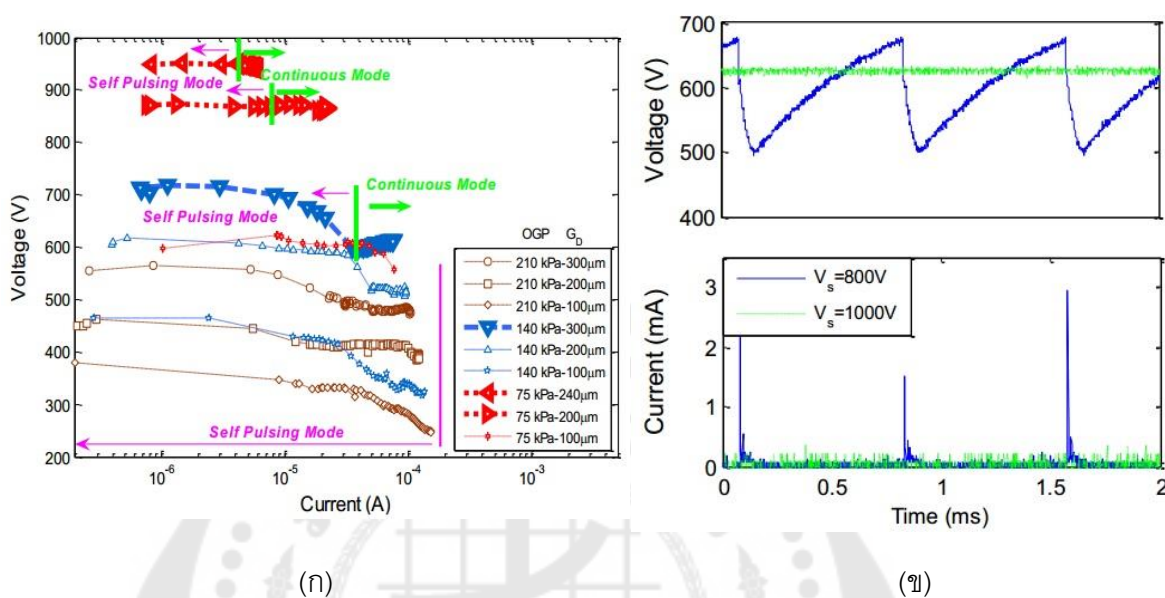
ภาพประกอบ 13 แรงดันและกระแสดีสชาร์จของพลาสมาเจ็ทโดยใช้แก๊สอาร์กอนที่ 1 lpm ช่องว่างระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร ด้วยตัวต้านทานบัลลาสต์และแหล่งจ่ายแรงดันที่แตกต่างกัน

ที่มา: (มาตรา, 2559)

การดีสชาร์จแบบ self-pulsating ที่ศึกษาลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแก๊สดีสชาร์จแบบไมโครเจ็ทกับสุญญากาศ (Matra, Furuta, และ Hatta, 2013) ใช้วิธีการหากระแสดีสชาร์จในรูปแบบที่คล้ายคลึงกันกับงานวิจัยที่กล่าวมาก่อนหน้านี้เช่นกัน โดยงานวิจัยนี้ได้นำมาใช้กับวงจร RC ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุย่อย และตัวต้านทานบัลลาสต์ขนาดใหญ่ การพล็อตค่าแรงดันและกระแสที่วัดด้วยมัลติมิเตอร์ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดค่าต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 14(ก) พบว่าเส้นโค้ง V-I เป็นไปตามเส้นโค้งของการดีสชาร์จแบบเรืองแสง ค่าแรงดันดีสชาร์จเพิ่มขึ้นตามแหล่งจ่ายแรงดัน ขณะที่กระแสดีสชาร์จถูกจำกัดด้วยตัวต้านทานบัลลาสต์ซึ่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

รูปคลื่นทั่วไปของแรงดันและกระแส ซึ่งวัดด้วยออสซิลโลสโคปที่ระยะแก๊ป 300 ไมโครเมตร ความดัน 140 กิโลพาสคาล ดังภาพประกอบ 14(ข) จะสังเกตในโหมดการทำงานดีสชาร์จทั้งแบบ self-pulsing และแบบต่อเนื่อง โดยแรงดันแหล่งจ่ายเริ่มเกิดการสั่นอย่างอัตโนมัติที่ 800 โวลต์ เมื่อแรงดันดีสชาร์จคงที่เท่ากับ 1,000 โวลต์ จะเกิดความเสถียรภาพและต่อเนื่องที่

แรงดันและกระแสที่ จากงานวิจัยได้กล่าวว่าการดิสชาร์จแบบใหม่ต่อเนื่องเหมาะกับการฉายพลาสมาเฉพาะจุด เช่น การกัดกร่อนแบบไมโครสปัตเตอร์ (micro sputter etching)



ภาพประกอบ 14 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้วยวิธีการวัดแบบต่าง ๆ โดย (ก) แรงดันและกระแสเฉลี่ยสำหรับการดิสชาร์จแก๊สไมโครเจ็ทในสูญญากาศที่วัดด้วยมัลติมิเตอร์ และ (ข) รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่วัดด้วยออสซิลโลสโคป ที่ช่องว่างแกป 300 ไมโครเมตร ความดัน 140 กิโลพาสคาล แรงดัน 800 โวลต์และแหล่งจ่ายไฟแรงดัน 1,000 โวลต์

ที่มา: (Matra และคนอื่น ๆ, 2013)

ในช่วงเวลาของการดิสชาร์จ ตัวเก็บประจุย่อยถูกชาร์จประจุผ่านตัวต้านทานบัลลาสต์ขนาดใหญ่ จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวนของแก๊ส เมื่อแรงดันไฟฟ้าเกินที่แรงดันเบรกดาวน กระแสแก๊สดิสชาร์จเริ่มไหลด้วยกระแสการคายประจุจากตัวเก็บประจุย่อย เมื่อกระแสไฟฟ้าที่จ่ายผ่านตัวต้านทานบัลลาสต์เพียงพอให้กระแสคงอยู่ต่อการดิสชาร์จต่อเนื่อง ส่งผลให้โหมดการดิสชาร์จต่อเนื่องเกิดขึ้น ($I_d \geq I_{min}$) ถ้ากระแสจากแหล่งจ่ายผ่านตัวต้านทานบัลลาสต์ไม่เพียงพอต่อการคงอยู่ของการดิสชาร์จต่อเนื่อง ($I_d < I_{min}$) การดิสชาร์จจะสิ้นสุดลง และตัวเก็บประจุจะชาร์จประจุอีกครั้ง จนกระทั่งถึงแรงดันเบรกดาวน ดังนั้นกระแสที่น้อยที่สุด (I_{min}) ของการดิสชาร์จต่อเนื่อง เป็นเกณฑ์วัดระหว่างการดิสชาร์จแบบ self-pulsing และแบบต่อเนื่อง จะเห็นว่าการดิสชาร์จต่อเนื่องเหมาะกับการกระบวนการผลิต ส่วนการดิสชาร์จแบบ self-pulsing เหมาะกับการปรับปรุงเนื้อเยื่อของ

สิ่งมีชีวิต หรือร่างกาย และเป็นแหล่งของสารมากมายระหว่างที่พัลส์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากให้กำลังไฟฟ้าสูง พร้อมด้วยมีการควบคุม ความถี่พัลส์ ทำให้การทำงานแบบ self-pulsating สามารถประยุกต์ใช้ในงานพลาสติกคุณภาพดีได้ (Matra และคนอื่น ๆ, 2013)

พลาสติกคุณภาพดีมีประโยชน์มากมายหลายด้าน เช่น เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของ เมล็ดพืช ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ การบำบัดน้ำเสีย และการผ่าตัดโดยไม่ทำให้เนื้อเยื่อของเซลล์ สิ่งมีชีวิตเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถตรวจสอบคุณสมบัติพลาสติกได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ทาง อินฟราเรด (infrared spectroscopic method for analysis) การวิเคราะห์ทางคุณภาพ (infrared for qualitative analysis) สเปกตรัมอินฟราเรด (infrared spectrum) ของสารประกอบต่าง ๆ โดย จะแสดงค่าร้อยละการยอมให้แสงผ่าน (% transmittance) กับค่าเลขคลื่น (wave number) ซึ่งจะ เห็นเป็นพีก (peak) ที่คมชัด โดยพีกเหล่านี้จะแสดงชนิดของหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบ ซึ่งหมู่ ฟังก์ชันเหล่านี้จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นสั้นของอินฟราเรด (ประมาณ $2.5\text{-}8.5\ \mu\text{m}$) โดย ตำแหน่งพีกของหมู่ฟังก์ชันจะได้รับผลกระทบจากกลุ่มข้างเคียงบ้างเล็กน้อย (ศรีสรนัทร, 2546)

ในการจำแนกหมู่ฟังก์ชันโมเลกุลหนึ่ง ๆ จะต้องพิจารณาพีกทั้งหมดภายในสเปกตรัม ตั้งแต่ $2.5\text{-}15\ \mu\text{m}$ โดยนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสารที่ทราบชนิดแล้ว และนำมาพิจารณา รวมกับข้อมูลจาก UV-visible spectrophotometer และ nuclear magnetic resonance (NMR) จึงจะทำให้ทราบว่าสารบริสุทธิ์นั้นคือสารประกอบชนิดใด โดยค่าตำแหน่งเฉพาะตัวของหมู่ฟังก์ชัน สามัญทั่วไปแสดงไว้ดังตารางที่ 2

ตาราง 2 ค่าตำแหน่งเฉพาะตัวของหมู่ฟังก์ชันสามัญทั่วไป

หมู่ฟังก์ชัน		แสดงพีกการดูดกลืนแสง	
		เลขคลื่น (cm^{-1})	ความยาวคลื่น (μm)
$\text{O}-\text{H}$	Aliphatic and aromatic	3600-3000	2.8-3.3
NH_3	Also secondary and tertiary	3600-3100	2.8-3.2
$\text{C}-\text{H}$	Aromatic	3150-3000	3.2-3.3
$\text{C}-\text{N}$	Aliphatic	3000-2850	3.3-3.5
$\text{C}\equiv\text{N}$	Nitrile	2400-2200	4.2-4.6
$\text{C}\equiv\text{C}^-$	Alkyne	2260-2100	4.4-4.8
COOR	Ester	1750-1700	5.7-5.9

ตาราง 2 (ต่อ)

หมู่ฟังก์ชัน		แสดงพีการดูดกลืนแสง	
		เลขคลื่น (cm^{-1})	ความยาวคลื่น (μm)
$COOH$	Carboxylic acid	1740-1670	5.7-6.0
$C=O$	Aldehydes and ketones	1740-1660	5.7-6.0
$CONH_2$	Amides	1720-1640	5.8-6.1
$C=C$	Alkene	1670-1610	6.0-6.2
$\phi-O-R$	Aromatic	1300-1180	7.7-8.5
$R-R-R$	Aliphatic	1160-1060	8.6-9.4

พลาสมาที่ฉายออกมาขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแก๊สสามารถวิเคราะห์สารที่อยู่ในพลาสมาได้โดยการวัดด้วยเครื่องตรวจวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมี (optical emission spectroscopy, OES) พลาสมาที่ฉายออกมาวัดเพียบสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ วัดจำนวนโปรตอนต่อความยาวคลื่น และปริมาตรที่ปล่อยออกมาจากพลาสมา ขณะที่การกระตุ้นของอะตอม และโมเลกุลในพลาสมาขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่อยู่ในพลาสมา เช่น อุณหภูมิของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน โดยเครื่องสามารถตรวจจับสารต้านอนุมูลอิสระ (radicals) และระบุงค์ประกอบต่าง ๆ ในพลาสมาได้ (ing Peter Awakowicz)

พลาสมาอุณหภูมิต่ำกับการเกษตรถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงการเจริญเติบโตและการออกของเมล็ดพันธุ์พืช เช่น เมล็ดข้าว เมล็ดทานตะวัน เมล็ดข้าวสาลี เมล็ดไมโครกรีน เป็นต้น (Khamsen และคนอื่น ๆ, 2016) เมล็ดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาสามารถเพิ่มอัตราการงอกได้ถึง 98% และเมล็ดปกติที่ไม่ได้รับพลาสมามีอัตราการงอกอยู่ที่ 90% การใช้พลาสมานั้นใช้ต้นทุนที่ไม่มากนัก ใช้พลังงานค่อนข้างน้อยและมีผลฆ่าเชื้อโรคจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนบนเมล็ดข้าว เช่น สายพันธุ์ *Aspergillus* และ *Penicillium* ซึ่งเป็นตัวสร้างความเสียหายแก่เมล็ด ทำให้คุณภาพของข้าวต่ำลงหรือสายพันธุ์ *Aflaxius* ซึ่งเป็นตัวก่อมะเร็ง เป็นต้น

ปัจจัยการงอกของเมล็ดนั้นประกอบด้วย น้ำ แสง อุณหภูมิ ซึ่งน้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดเนื่องจากเป็นตัวทำละลายอาหารสะสมภายในเมล็ด ทำให้จุดเจริญของเมล็ดนำไปใช้ได้ แสงนั้นยังไม่สำคัญมากเนื่องจากยังเป็นเมล็ดอยู่ แต่จะส่งผลมากเมื่อเมล็ดงอกแล้ว เพราะต้องใช้ในการสังเคราะห์แสงเพื่อเจริญเติบโต อุณหภูมินั้นส่งผลกับการดูดน้ำของพืช ซึ่งพืชแต่ละชนิดจะต้องการ

ไม่เท่ากัน เป็นที่รู้กันว่าพลาสติกมีคุณสมบัติหลายประการ เช่น การปรับปรุงคุณสมบัติของผิว เมล็ด และการกระตุ้นให้เมล็ดสามารถงอกได้เร็ว ซึ่งการที่เมล็ดนั้นสามารถงอกได้เร็วขึ้นนั้น มีสาเหตุมาจากการที่พลาสติกนั้นจะไปกำจัดชั้นผิวไขมันที่เคลือบอยู่บนตัวเมล็ด ซึ่งจะทำให้เมล็ดนั้นสามารถดูดซับน้ำได้ดีขึ้น ทำให้อัตราการงอกของเมล็ดนั้นเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 3

ตาราง 3 การปรับปรุงเมล็ดข้าวสาลีที่ระดับกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ หลังจากฉายด้วยพลาสติก 14 วัน (ที่ระดับนัยสำคัญ $p=0.05$)

การใช้พลาสติก	อัตราการงอก (%)	ความสามารถในการงอก (%)	ดัชนีการงอก
กลุ่มควบคุม	$84.0 \pm 2.0a$	$83.3 \pm 1.2a$	$20.9 \pm 1.7a$
60 W	$84.4 \pm 2.1a$	$82.7 \pm 2.3a$	$20.3 \pm 0.7a$
80 W	$90.7 \pm 3.0b$	$88.3 \pm 2.9b$	$21.6 \pm 1.2a$
100 W	$84.0 \pm 3.4a$	$84.3 \pm 0.6a$	$21.6 \pm 1.2a$

จากงานวิจัยทดลองฉายพลาสติกลงบนเมล็ดข้าวสาลี โดยใช้กำลังไฟฟ้า 60, 80 และ 100 วัตต์ เป็นเวลา 15 วินาที พบว่าที่กำลังไฟฟ้า 60, 100 วัตต์ และกลุ่มควบคุม มีความสามารถในการงอกและอัตราการงอกประมาณ 83.3 และ 84 เปอร์เซ็นต์ โดยทั้งสองไม่มีความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และที่กำลังไฟฟ้า 80 วัตต์ พบว่าความสามารถในการงอกเพิ่มขึ้น 6 และ 6.7 เปอร์เซ็นต์ โดยวัดความสูงและความยาวรากของข้าวสาลีที่ถูกฉายพลาสติกเท่ากับ 14.8 และ 8.5 เซนติเมตร ซึ่งสูงกว่ากลุ่มควบคุมที่ 12.3 และ 7.8 เซนติเมตร ตามลำดับ (Jiafeng และคนอื่น ๆ, 2014)

นอกจากนี้ยังพบงานวิจัยที่ฉายพลาสติกลงบนเมล็ดข้าวสาลี โดยได้ทำการฉายพลาสติกเป็นเวลา 5, 15 และ 30 นาที ที่แรงดันไฟฟ้า 1-3 กิโลโวลต์ ศึกษาผลการทดลองหลังจากเมล็ดข้าวสาลีงอกผ่านไป 4 วัน พบว่าความยาวรากเฉลี่ย ความยาวต้นอ่อนเฉลี่ย น้ำหนักแห้งของราก น้ำหนักแห้งของต้นอ่อน ผลปรากฏว่าอัตราส่วนของรากและต้นอ่อนเพิ่มสูงขึ้นกว่าแบบที่ไม่ได้รับการฉายพลาสติกดังแสดงในภาพประกอบ 15

Table 1

Growth parameters of wheat seeds (control and 15 min plasma treated) measured in the fourth day after plasma treatment.

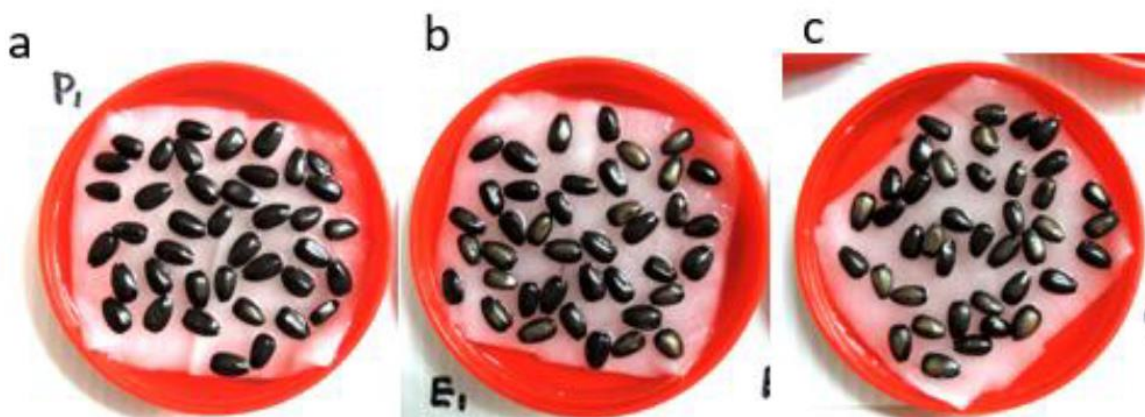
Parameters	Control seeds	Plasma treated seeds (15 min)
Mean root length (cm)	32.89 ± 0.269	36.49 ± 0.459
Mean sprout length (cm)	4.26 ± 0.053	4.34 ± 0.020
Root weight – dry (g)	0.78 ± 0.056	1.06 ± 0.043
Sprout weight – dry (g)	0.89 ± 0.048	0.88 ± 0.029
Root-to-shoot ratio	0.88 ± 0.016	1.2 ± 0.005

ภาพประกอบ 15 เปอร์เซ็นต์การงอกของข้าวสาลีเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง

ที่มา: (Dobrin, Magureanu, Mandache, และ Ionita, 2015)

เมล็ดข้าวสาลีหลังจากฉายพลาสมาเป็นเวลา 15 นาที ส่งผลดีอย่างเห็นได้ชัดทั้งความยาวรากเฉลี่ย ความยาวต้นอ่อนเฉลี่ย น้ำหนักแห้งของราก อัตราส่วนของรากและต้นอ่อนมีค่าสูงกว่ากลุ่มควบคุม และน้ำหนักแห้งของต้นอ่อนที่ใกล้เคียงกับกลุ่มควบคุมเล็กน้อย นอกจากนี้พบว่าพลาสมาสามารถดูดซึมน้ำได้มากกว่ากลุ่มควบคุม เนื่องจากความแตกต่างพื้นผิวของเมล็ดมีลักษณะเฉพาะระหว่างมุมสัมผัส tangent กับ liquid-air interface (Dobrin และคนอื่น ๆ, 2015)

จะเห็นว่าการกระตุ้นอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดพันธุ์พืชด้วยพลาสมาให้ผลได้ดี และยังให้ผลได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้วิธีการทางไฟฟ้าอีกด้วย ซึ่งได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบการกระตุ้นการงอกของเมล็ดทานตะวันด้วยวิธีสนามไฟฟ้าและวิธีการฉายด้วยพลาสมา (มาตรา, 2559) โดยใช้แรงดัน 9, 11, 13 และ 15 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 90 วินาที ในกรณีของพลาสมาจะทำการจ่ายแก๊สผสมระหว่างอาร์กอนและออกซิเจนที่อัตราส่วน 5 ต่อ 5 ลิตรต่อนาที เข้าไปในระบบด้วย พบว่าการกระตุ้นด้วยพลาสมาสามารถเพิ่มอัตราการงอกของเมล็ดทานตะวันได้ 14 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม และยังมีค่าสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าเล็กน้อยประมาณ 2.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งกรณีที่กระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าที่แรงดันแหล่งจ่ายสูง ๆ ทำให้เกิดการอาร์คระหว่างการฉายพลาสมาและเกิดความเสียหาย ซึ่งส่งผลต่ออัตราการงอกของเมล็ดทานตะวัน

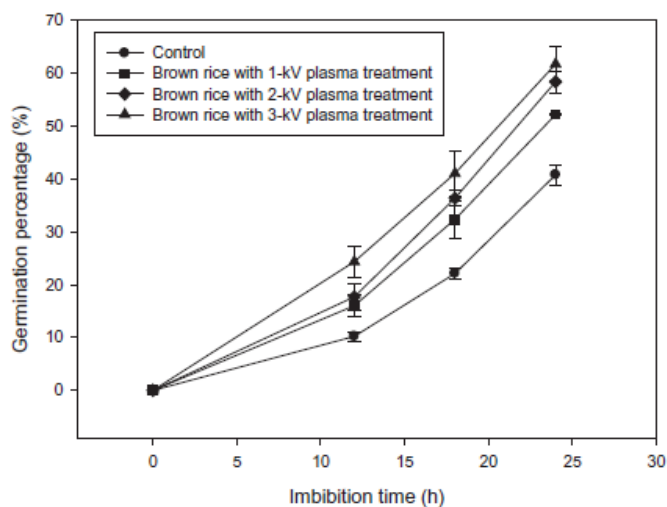


ภาพประกอบ 16 ความสามารถในการดูดซับน้ำหลังจากแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ของเมลิดทานตะวันที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการต่าง ๆ โดย (a) กระตุ้นด้วยการฉายพลาสมาที่ขนาดแรงดันแหล่งจ่าย 9 กิโลโวลต์ (b) กระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าที่ขนาดแรงดันแหล่งจ่าย 9 กิโลโวลต์ และ (c) กลุ่มควบคุมซึ่งไม่ได้รับการกระตุ้นใด ๆ

ที่มา: (มาตรา, 2559)

เมลิดทานตะวันที่ถูกปรับปรุงด้วยพลาสมา สนามไฟฟ้า และกลุ่มควบคุม ดังภาพประกอบ 16 จะเห็นว่า กรณียของเมลิดทานตะวันที่ผ่านการปรับปรุงด้วยพลาสมาจะมีสีเปลือกเป็นสีน้ำตาลเข้มกว่าในกรณีอื่น ๆ เนื่องจากสารอนุมูลอิสระพลังงานสูงที่เกิดในพลาสมา ทำให้เกิดการสเปตเตอริง (sputtering) กับ ผิวเปลือกของเมลิดทานตะวัน และช่วยในการดูดซับน้ำมากขึ้น ส่งผลต่อการกระตุ้นการงอกและการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน (มาตรา, 2559)

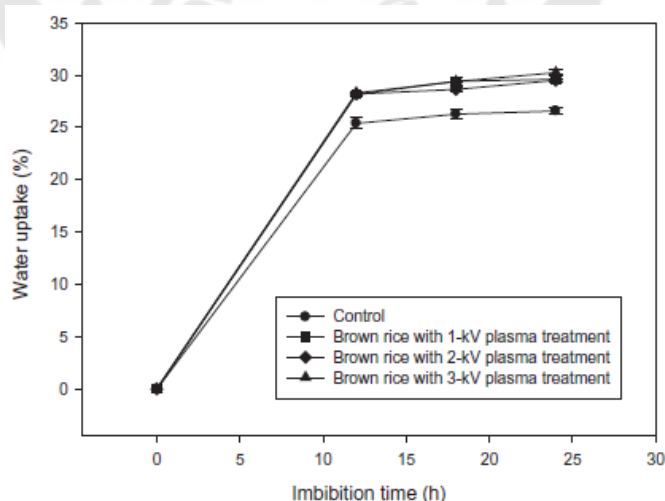
พลาสมาอุณหภูมิต่ำไม่เพียงแต่จะช่วยเรื่องการเจริญเติบโตในข้าวสาลีหรือเมลิดทานตะวันเท่านั้น พบว่าสามารถเพิ่มการเจริญเติบโตให้ข้าวกล้องได้ด้วยโดยแสดงเปอร์เซ็นต์การงอกของข้าวกล้องที่ได้รับการฉายพลาสมาในภาพประกอบ 17 จะเห็นว่าหลังจากฉายพลาสมาทำให้มีเปอร์เซ็นต์การงอกเพิ่มขึ้นมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ฉายพลาสมา เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง มีอัตราการงอกสูงสุดอยู่ที่ 62 เปอร์เซ็นต์ ที่แรงดัน 3 กิโลโวลต์



ภาพประกอบ 17 เปอร์เซ็นต์การงอกของข้าวกล้องเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง

ที่มา: (H. H. Chen และคนอื่น ๆ, 2016)

การเพิ่มขึ้นของความชื้นในเมล็ดข้าวกล้องที่ได้รับการฉายพลาสม่าช่วยเพิ่มการดูดซึมน้ำของข้าวกล้องงอกเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในภาพประกอบ 18 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง การดูดซึมน้ำของข้าวกล้องที่ได้รับการฉายพลาสมามีการดูดซึมน้ำดีกว่ากลุ่มควบคุม 30.2 เปอร์เซ็นต์ ที่ 3 กิโลโวลต์

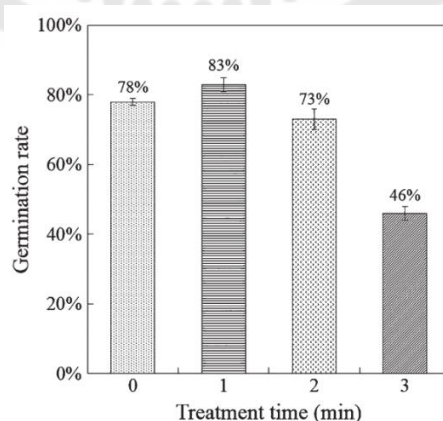


ภาพประกอบ 18 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของข้าวกล้องเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง

ที่มา: (H. H. Chen และคนอื่น ๆ, 2016)

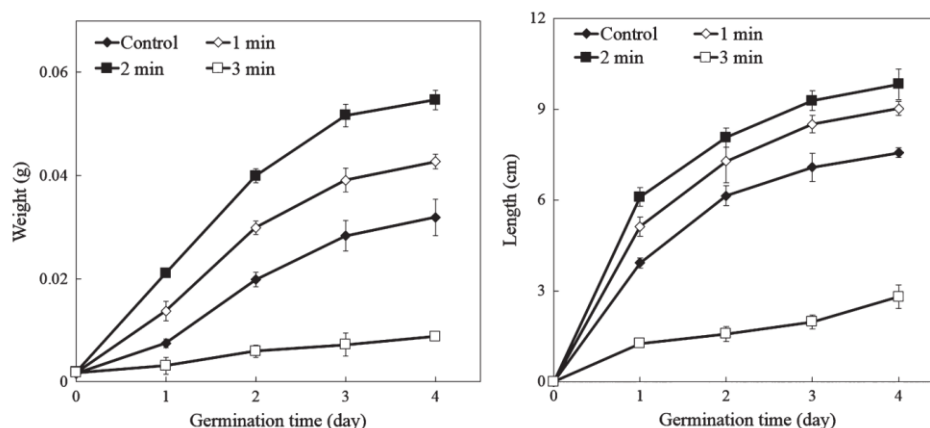
นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้พลาสมากับเมล็ดไมโครรีนอีกหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น บรอกโคลี ผักกาดเขียว และอื่น ๆ อีกมากมาย โดยงานที่ประยุกต์ใช้พลาสมากับเมล็ดบรอกโคลี ได้ทำการสร้างพลาสมาด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ขนาด 20 กิโลโวลต์ ที่ กระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงเมล็ดบรอกโคลี ด้วยพลาสมาที่มีต่ออัตราการงอกและอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดบรอกโคลี ที่เวลา 1, 2, และ 3 นาที โดยได้ทำการปลูกเมล็ดบรอกโคลีเป็นเวลา 5 วัน จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การฉาย พลาสมาลงบนเมล็ดบรอกโคลีเป็นเวลา 1 นาที ส่งผลให้อัตราการงอกของเมล็ดบรอกโคลีมากกว่า กลุ่มควบคุมประมาณ 5% ในขณะที่การปรับปรุงเมล็ดบรอกโคลีด้วยพลาสมาเป็นเวลามากกว่า 1 นาที ส่งผลให้อัตราการงอกของเมล็ดบรอกโคลีลดลงน้อยกว่ากลุ่มควบคุม ดังแสดงใน ภาพประกอบ 19 นอกจากนี้ อัตราการเจริญเติบโตของบรอกโคลีหลังจากปลูกเป็นเวลา 4 วัน บ่ง บอกว่า น้ำหนักและความยาวของบรอกโคลีที่ถูกปรับปรุงด้วยพลาสมาเป็นเวลา 1 และ 2 นาที ให้ผลที่ดีกว่ากลุ่มควบคุม ในขณะที่เวลาในการปรับปรุงเมล็ดบรอกโคลี 3 นาที ให้ผลของอัตรา การเจริญเติบโตของบรอกโคลีที่น้อยกว่ากลุ่มควบคุม ดังแสดงในภาพประกอบ 20 (J. W. Kim, Puligundla, และ Mok, 2017)

จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่า การปรับปรุงเมล็ดบรอกโคลีเป็นเวลานาน ด้วยพลาสมาที่มีพลังงานสูง ส่งผลในทางลบต่อการปรับปรุงเมล็ดบรอกโคลี ดังนั้นการสร้าง พลาสมาให้มีพลังงานที่ต่ำลง เช่น พลาสมาอุณหภูมิต่ำ ณ ความดันบรรยากาศจากเทคนิคการ ดิสชาร์จแบบโคโรนา จึงเป็นทางออกที่ดีที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยของข้าพเจ้าต่อไป



ภาพประกอบ 19 อัตราการงอกของเมล็ดบรอกโคลีที่เวลาในการฉายด้วยพลาสมาต่าง ๆ

ที่มา: (J. W. Kim และคนอื่น ๆ, 2017)

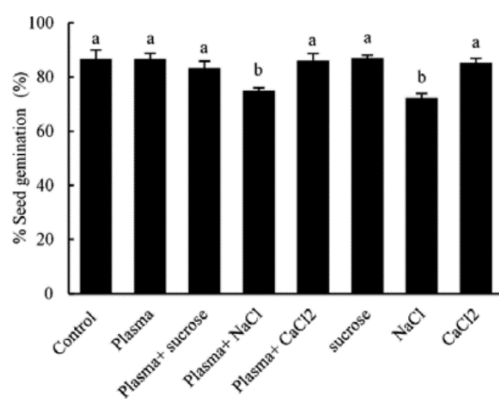


ภาพประกอบ 20 น้ำหนักและความยาวของบรอกโคลีที่ปลูกเป็นเวลา 4 วัน

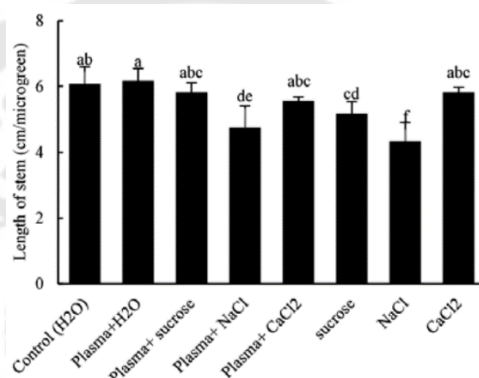
ที่มา: (J. W. Kim และคนอื่น ๆ, 2017)

ในส่วนของการที่ประยุกต์ใช้พลาสมากับผักกาดเขียว ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบหลายเข็ม ซึ่งเป็นเครื่องมือต้นแบบที่ข้าพเจ้าได้นำมาเป็นตัวอย่างในการพัฒนา จนได้มาเป็นเครื่องมือต้นแบบที่แสดงในวิทยานิพนธ์นี้ โดยในงานวิจัยนี้ได้สร้างพลาสมาด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 19 กิโลโวลต์ และใช้พลาสมาในการปรับปรุงเมล็ดผักกาดเขียวเป็นเวลา 5 นาที โดยในงานนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงผักกาดเขียวด้วยพลาสมาควบคู่ไปกับการรอดเมล็ดผักกาดเขียวด้วยสารชนิดต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการงอกและอัตราการเจริญเติบโตของผักกาดเขียว ซึ่งเมล็ดผักกาดเขียวจะถูกปลูกเพื่อศึกษาเป็นเวลา 7 วัน จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าพลาสมาไม่ส่งผลต่อการปรับปรุงอัตราการงอกและความยาวลำต้นของผักกาดเขียว แต่พลาสมาส่งผลต่อการปรับปรุงน้ำหนักของผักกาดเขียวเป็นอย่างมาก ดังแสดงในภาพประกอบ 21 (Saengha และคนอื่น ๆ, 2019)

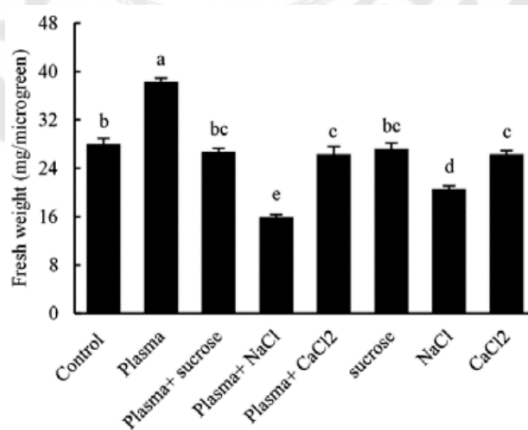
จากผลการวิจัยดังกล่าวทำให้ทราบว่า การปรับปรุงเมล็ดผักกาดเขียวด้วยพลาสมาอุณหภูมิต่ำ ณ สภาวะบรรยากาศ ด้วยเครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบหลายเข็ม ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 19 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 5 นาที นั้นไม่ส่งผลต่อการปรับปรุงอัตราการงอกและความยาวลำต้นของผักกาดเขียว ดังนั้นการใช้แรงดันไฟฟ้าที่มากขึ้น ซึ่งจะเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับพลาสมา หรือการเปลี่ยนเวลาในการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีน อาจจะสามารถส่งผลต่อการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนได้



(ก)



(ข)

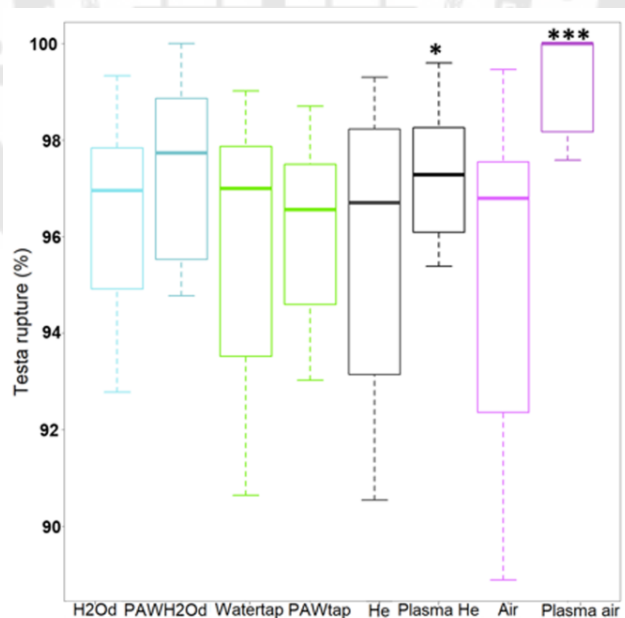


(ค)

ภาพประกอบ 21 (ก)อัตราการงอก (ข)ความยาวลำต้น และ(ค)น้ำหนักของผักกาดเขียว

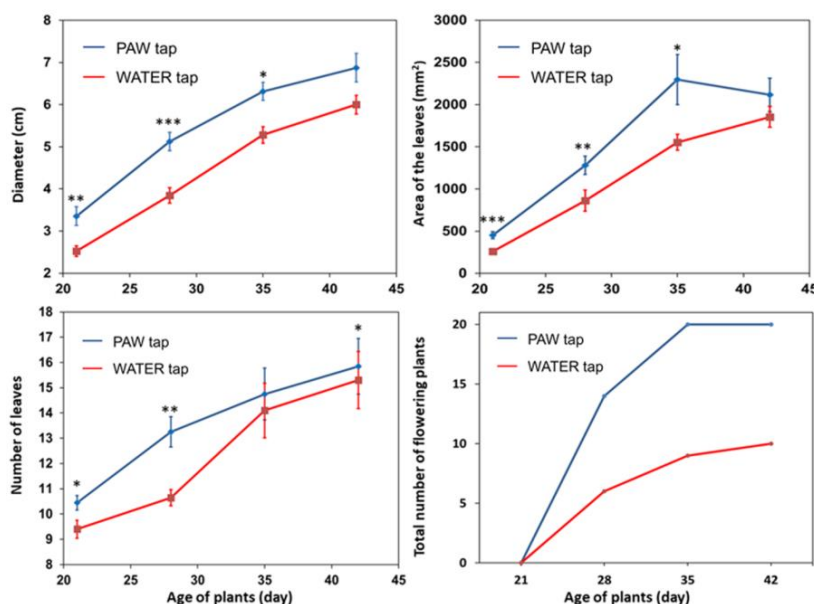
ที่มา: (Saengha และคนอื่น ๆ, 2019)

นอกจากการใช้พลาสมาในการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์พืชแล้ว ในปัจจุบันยังคงนิยมใช้น้ำที่ถูกระตุ้นด้วยพลาสมา (plasma-activated water, PAW) ซึ่งมีสารประกอบที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์พืชมากมาย นำมาแช่หรือรดเมล็ดพันธุ์พืชขณะปลูกเพื่อใช้ประโยชน์ของสารประกอบในน้ำที่ถูกระตุ้นด้วยพลาสมาในการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์พืช เช่น งานที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นงานที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของพลาสมาที่สร้างจากแก๊สที่แตกต่างกันและน้ำต่างชนิดกันที่ถูกระตุ้นด้วยพลาสมาที่มีต่ออัตราการงอกและอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดพืช โดยพลาสมาจะถูกสร้างขึ้นด้วยอากาศหรืออาร์กอน ส่วนน้ำที่ถูกระตุ้นด้วยพลาสมาจะใช้น้ำประปาหรือน้ำดีมัน ซึ่งจากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การปรับปรุงเมล็ดพืชด้วยน้ำดีมันที่ถูกระตุ้นด้วยพลาสมาและพลาสมาอากาศส่งผลต่อการปรับปรุงอัตราการงอกของเมล็ดพืช โดยการปรับปรุงด้วยพลาสมาอากาศให้ผลการงอกที่ดีที่สุด ดังแสดงในภาพประกอบ 22 นอกจากนี้ในส่วนของผลการเจริญเติบโตของเมล็ดพืชจะเป็นการเปรียบเทียบการใช้น้ำที่ถูกระตุ้นและไม่ถูกระตุ้นด้วยพลาสมาในแต่ละแบบที่มีต่อขนาดใบ พื้นที่ใบ จำนวนใบ และจำนวนดอกไม้ทั้งหมดของต้นพืช โดยจากผลการทดลองบ่งบอกว่าพืชที่ได้รับการรดด้วยน้ำประปาที่ถูกระตุ้นด้วยพลาสมาให้ผลดีที่สุด ดังแสดงในภาพประกอบ 23 (Bafoil และคนอื่น ๆ, 2018)



ภาพประกอบ 22 ผลอัตราการงอกของเมล็ดพืชที่ถูกปรับปรุงในแต่ละกรณี

ที่มา: (Bafoil และคนอื่น ๆ, 2018)



ภาพประกอบ 23 ขนาดใบ พื้นที่ใบ จำนวนใบ และจำนวนดอกไม้ทั้งหมดของต้นพืชในกรณีที่ได้รับ การปรับปรุงด้วยน้ำประปาที่ถูกระตุ้นและไม่ถูกระตุ้นด้วยพลาสติก

ที่มา: (Bafail และคนอื่น ๆ, 2018)

จากการศึกษาวิจัยทั้งหมด จะเห็นว่าพลาสติกส่งผลต่ออัตราการงอก และ เจริญเติบโตของเมล็ดพันธุ์พืชได้จริง จึงนำมาสู่การศึกษานี้ ซึ่งต้องการที่จะศึกษา อิทธิพลของแคโทด เวลาในการบำบัดเมล็ดพืช และเวลาในการกระตุ้นน้ำประปา ที่มีต่อการ กระตุ้นการงอกและการเจริญเติบโตของเมล็ดพันธุ์พืช ซึ่งแบ่งการศึกษออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก ได้นำเมล็ดไมโครกรีนมาปรับปรุงด้วยพลาสติกที่ถูกสร้างขึ้นด้วยแคโทดที่แตกต่างกันคือ แผ่น ทองแดงและน้ำประปา โดยทำการวัดผลการทดลองจากอัตราการงอกและความยาวลำต้นของพืช ไมโครกรีน ส่วนที่สอง ได้นำเมล็ดไมโครกรีนมาปรับปรุงด้วยพลาสติกเช่นกัน แต่ในส่วนนี้จะทำการ ปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนบนแผ่นทองแดงเท่านั้น โดยได้ศึกษาอิทธิพลของเวลาในการปรับปรุง เมล็ดไมโครกรีน และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำประปาเพื่อนำมาแช่และรดเมล็ดไมโครกรีนที่มีต่อ อัตราการงอกและอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน ซึ่งในงานวิจัยนี้มีข้อดีและข้อแตกต่าง กับงานวิจัยอื่นหลายอย่าง เช่น ใช้วัสดุที่เรียบง่ายและราคาประหยัดมาสร้างเครื่องกำเนิดพลาสติก โดยเครื่องกำเนิดพลาสติกสามารถรองรับเมล็ดพันธุ์พืชได้มากกว่า 100 เมล็ด อีกทั้งใช้อากาศเป็น สารตั้งต้นในการสร้างพลาสติก ซึ่งช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้แก๊สชนิด อื่น ๆ อีกด้วย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบเครื่องมือต้นแบบ

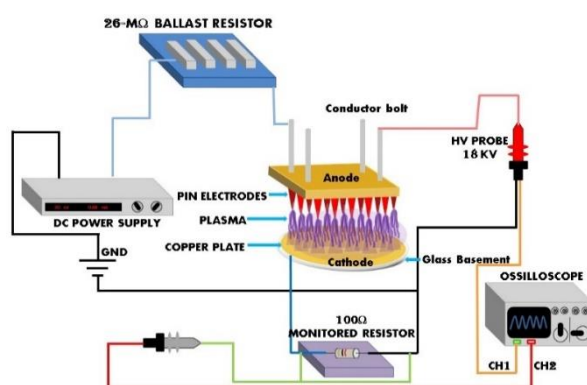
วิธีการที่จะสร้างพลาสมาขึ้นมาได้นั้น เกิดจากการกระตุ้นแก๊สให้เกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนและไอออน ซึ่งเรียกว่ากระบวนการไอออไนเซชัน (ionization) จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์ (breakdown) โดยสิ่งที่ใช้กระตุ้นแก๊สให้เกิดกระบวนการเบรกดาวน์ คือ สนามไฟฟ้า ซึ่งสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงทางไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนและไอออนเกิดการชนกันจนกระทั่งเกิดการแตกตัว โดยสามารถสร้างสนามไฟฟ้าได้โดยการใช้แหล่งจ่ายพลังงานในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องมือต้นแบบเพื่อให้เครื่องมือต้นแบบสามารถสร้างสนามไฟฟ้าขึ้นมาได้ ซึ่งแหล่งจ่ายพลังงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยโมเลกุลแก๊สที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์คืออากาศ ณ ความดันบรรยากาศ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่ได้ต้องมีความเข้มข้นสูงจึงจะสามารถทำให้เกิดการเบรกดาวน์ในอากาศ ณ ความดันบรรยากาศได้ ดังนั้นลักษณะโครงสร้างของเครื่องมือต้นแบบที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุปลายแหลมเป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยขั้วอิเล็กโทรดแบบวัสดุปลายแหลมสามารถสร้างสนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูงได้ แต่สนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูงนั้นไม่สามารถสร้างพลาสมาที่มีความเสถียรและสม่ำเสมอได้ ดังนั้นลักษณะการจัดวางวัสดุปลายแหลมเพื่อให้เหมาะสมต่อการสร้างลักษณะสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอและความเครียดสูง จึงจะส่งผลให้สามารถสร้างพลาสมาที่มีความเสถียรและสม่ำเสมอได้ที่ความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดต่ำกว่าลักษณะอิเล็กโทรดแบบอื่น ๆ

แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ขนาด 0 ถึง 30 กิโลโวลต์ กำลังไฟฟ้าขนาด 150 วัตต์ ซึ่งเป็นขนาดแรงดันและกระแสที่เพียงพอต่อการสร้างพลาสมาด้วยเครื่องมือต้นแบบดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น ในส่วนของลักษณะอิเล็กโทรดของเครื่องมือต้นแบบ อิเล็กโทรดที่ใช้จะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดี มีค่าสูญเสียกำลังไฟฟ้าน้อย เช่น อะลูมิเนียม และทองแดง เป็นต้น

การวัดขนาดกระแสและแรงดันที่เกิดการดีสชาร์จในเครื่องมือต้นแบบสามารถทำได้โดยใช้ออสซิลโลสโคปในการหาลักษณะและขนาดของกระแสและแรงดันของวงจรที่ใช้สร้างพลาสมา โดยต่อออสซิลโลสโคปคร่อมเครื่องมือต้นแบบเพื่อวัดแรงดันดีสชาร์จขณะเกิดพลาสมา ดังภาพประกอบ 24

ในส่วนของเครื่องต้นแบบสามารถออกแบบได้โดยใช้ตัวนำแบบเติมปลายแหลมและแผ่นทองแดง เป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยเครื่องมือต้นแบบจะมีลักษณะเป็นระบบเปิด ซึ่งในส่วนแอโนดจะ

ใช้แผ่นปรินไพล่า 3 แผ่นซ้อนทับกัน จากนั้นยึดเข็มปลายแหลมเข้ากับแผ่นปรินไพล่าโดยใช้วิธีการบัดกรีด้วยตะกั่ว โดยวางเข็มรูนี้ไว้เพื่อไม่ให้ลักษณะของอิเล็กโทรดมีความห่างหรือแคบจนเกินไป เนื่องจากจะส่งผลต่อลักษณะของสนามไฟฟ้าที่จะถูกสร้างขึ้นนั้นไม่เหมาะสมต่อการสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้ ส่วนของแคโทดใช้แผ่นทองแดงตัดเป็นวงกลม โดยใช้จานเพาะเชื้อรูปวงกลมเป็นฐานสำหรับวางแผ่นทองแดง ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 4



ภาพประกอบ 24 รูปวาดวงจรที่ใช้ในการสร้างพลาสมา

ตาราง 4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องมือต้นแบบ

อุปกรณ์	ชนิด
แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)	High voltage power supply (0-30 กิโลโวลต์) รุ่น Matsusada
ตัวนำไฟฟ้า (Conductor)	แผ่นทองแดงวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร เข็มหมุดจากวัสดุ निकเกิล ซึ่งมีความยาว 2 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร จำนวน 600 เล่ม ยึดติดกับแผ่นปรินไพล่า
ตัวต้านทาน (Resistor)	ตัวต้านทานแบบกระเบื้อง 10 เมกกะโอห์ม แบบ 2 วัตต์ จำนวน 2 ตัว และ 3 เมกกะโอห์ม จำนวน 2 ตัว ตัวต้านทานมอเนเตอร์ 100 โอห์ม 1 ตัว
ออสซิลโลสโคป (oscilloscope)	SIGLENT SDS 2304

ตาราง 4 (ต่อ)

อุปกรณ์	ชนิด
หัววัดแรงดันสูง	PINTEK HVP-18HF 18 กิโลโวลต์ 150 เมกะเฮิร์ตซ์ ออสซิลโลสโคปโพรบ 600 โวลต์
ถาดแก้ววงกลม	ชนิดใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยต้องการสร้างเครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบหลายเข็มเพื่อใช้ในการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีน โดยได้ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

3.2.1 การจำลองเครื่องมือต้นแบบด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics

การจำลองเครื่องมือต้นแบบด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อศึกษาการจัดวางเข็มแอโนดของเครื่องมือต้นแบบที่เหมาะสมต่อการสร้างสนามไฟฟ้าที่จะสามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้ โดยในการจำลองนี้ได้ศึกษาอยู่ 2 ส่วนคือ

- (1) อิทธิพลของจำนวนเข็มแอโนดที่มีต่อลักษณะของสนามไฟฟ้าและสมศักย์ โดยได้ทำการศึกษาการจัดวางจำนวนเข็มอิเล็กโทรดที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 เข็ม
- (2) อิทธิพลของระยะห่างเข็มที่มีต่อลักษณะของสนามไฟฟ้าและสมศักย์ โดยได้ทำการศึกษาระยะห่างระหว่างเข็มที่อยู่ติดกันที่ 2.5, 5 และ 7.5 มิลลิเมตร

3.2.2 การสร้างพลาสมาด้วยเครื่องมือต้นแบบ

ในส่วนนี้จะทำการทดลองสร้างพลาสมาด้วยเครื่องมือต้นแบบที่ได้ทำการออกแบบมาจากส่วนแรก เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างพลาสมาดังนี้

- (1) ศึกษาอิทธิพลของขนาดของตัวต้านทานบัลลาสต์ (Ballast resistor) ที่มีต่อการสร้างพลาสมา โดยเปลี่ยนขนาดของตัวต้านทานบัลลาสต์ที่ 5, 10 และ 26 เมกะโอห์ม โดยมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดคงที่
- (2) ศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่มีต่อการสร้างพลาสมา โดยเปลี่ยนระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 14, 16, 18 และ 20 มิลลิเมตร โดยมีขนาดของตัวต้านทานบัลลาสต์คงที่

3.2.3 การศึกษาอิทธิพลของน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาที่มีผลต่ออัตราการงอก และอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน

ในส่วนนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาที่มีต่อการกระตุ้นการงอก และการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน โดยน้ำประปาจะถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาจากเครื่องมือต้นแบบชนิดพลาสมาเจ็ทที่แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 7.5 กิโลโวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 10 นาที เนื่องจากเครื่องมือต้นแบบชนิดนี้ง่ายต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำ ดังนั้นในส่วนนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาจากเครื่องมือต้นแบบชนิดพลาสมาเจ็ทก่อนจะทำการศึกษาอิทธิพลของน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาจากเครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบหลายเข็ม โดยการทดลองในส่วนนี้ได้้นำน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมามาแช่และรดเมล็ดไมโครกรีนจำนวน 50 เมล็ด ในแต่ละกลุ่ม โดยทำการแช่เมล็ดไมโครกรีนก่อนการปลูกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ต่อจากนั้นเมล็ดไมโครกรีนในแต่ละกลุ่มจะนำไปปลูกบนกระดาษชำระในถาดเพาะเชื้อ และทำการวัดผลอัตราการงอกและอัตราการเจริญเติบโตต่อไป โดยการทดลองในส่วนนี้จะทำการศึกษาอยู่ 2 พารามิเตอร์คือ

- (1) ศึกษาการกระตุ้นน้ำประปาด้วยพลาสมาที่ระยะห่างระหว่างปลายแอโนดกับผิวน้ำประปาที่ 0, 2 และ 4 มิลลิเมตร
- (2) ศึกษาการกระตุ้นน้ำประปาด้วยพลาสมาที่ถูกสร้างขึ้นจากอากาศ และอากาศผสมอาร์กอน

3.2.4 การศึกษาอิทธิพลของพลาสมาที่มีผลต่ออัตราการงอก และอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน

ในส่วนนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของพลาสมาที่มีผลต่อการกระตุ้นการงอก และการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน โดยในหนึ่งกลุ่มการทดลองจะใช้เมล็ดไมโครกรีนจำนวน 50 เมล็ด หลังจากเมล็ดไมโครกรีนได้รับการบำบัดด้วยพลาสมาจะถูกนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ต่อจากนั้นเมล็ดไมโครกรีนในแต่ละกลุ่มจะนำไปปลูกบนกระดาษชำระในถาดเพาะเชื้อ และทำการวัดผลอัตราการงอกและอัตราการเจริญเติบโตต่อไป โดยในการทดลองนี้สามารถแบ่งการทดลองออกได้เป็น 2 ส่วนคือ

- (1) อิทธิพลของพลาสมาที่สร้างจากลักษณะของแคโทดที่แตกต่างกัน คือ แผ่นทองแดง และ น้ำประปา
- (2) อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนด้วยพลาสมา ดังนี้
 - เวลาที่ใช้พลาสมาในการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีน คือ 2 และ 4 นาที

- เวลาที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำประปาสำหรับการนำมาแช่และรดเมล็ดไมโครกรีน คือ 0, 1, 5 และ 10 นาที

3.3 วิธีการวัดผลการทดลอง

3.3.1 การวัดแรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จ

การวัดในส่วนนี้เพื่อศึกษาแรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จของพลาสมาที่สร้างจากวัสดุของแคโทดที่แตกต่างกัน คือ แผ่นทองแดง และน้ำประปา เพื่อช่วยในการอธิบายลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้น โดยมีวิธีการวัดดังนี้

(1) การวัดแรงดันดิสชาร์จสามารถทำได้โดยการใช้หัววัดแรงดันสูงต่อคร่อมกับเครื่องมือต้นแบบ จากนั้นทำการเชื่อมหัววัดแรงดันสูงกับออสซิลโลสโคปเพื่ออ่านสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นจากเครื่องมือต้นแบบ

(2) การวัดกระแสดิสชาร์จสามารถทำได้โดยการใช้หัววัดต่อคร่อมกับตัวต้านทานมอโนเตอร์ จากนั้นทำการเชื่อมหัววัดกับออสซิลโลสโคปเพื่ออ่านสัญญาณแรงดันที่วัดได้ ซึ่งสามารถหากระแสดิสชาร์จได้ด้วยการนำสัญญาณแรงดันที่วัดได้หารด้วยขนาดของความต้านทานมอโนเตอร์

3.3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางแสงของพลาสมา

วิเคราะห์คุณลักษณะทางแสงของพลาสมาเพื่อศึกษาอนุภาคนิวตรอนของธาตุและสารประกอบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการแตกตัว และการเกิดปฏิกิริยาระหว่างธาตุและสารประกอบแต่ละชนิด โดยอนุภาคนิวตรอนแต่ละชนิดมีประโยชน์ที่แตกต่างกันมากมาย ซึ่งสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นจากการประยุกต์ใช้พลาสมากับวัสดุต่าง ๆ

วิธีการวัดคุณลักษณะทางแสงของพลาสมาสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะทางแสง (optical emission spectrometer) ชนิด Thorlabs CCS200 จ่อไปที่พลาสมาที่เกิดขึ้นในเครื่องมือต้นแบบ โดยค่าที่วัดได้จะเป็นความเข้มข้นสัมพัทธ์ (relative intensity) ของอนุภาคนิวตรอนแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นในพลาสมา

3.3.3 อัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีน

การวัดอัตราการงอก (germination rate) ของเมล็ดไมโครกรีนสามารถวัดได้โดยการนับเมล็ดที่มีหน่อสีขาวงอกออกมาจากเมล็ดพันธุ์พืช ซึ่งจำนวนเมล็ดที่งอกในแต่ละกลุ่ม (N_g) ถูกนำมาคำนวณกับจำนวนเมล็ดไมโครกรีนทั้งหมด (N_T) ในแต่ละกลุ่มการทดลองเพื่อหาอัตราการงอกดังสมการที่ 3.1 โดยอัตราการงอกในแต่ละกลุ่มได้นำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับอัตราการงอกของกลุ่มควบคุม

$$\text{Germination rate} = \frac{N_G}{N_T} \times 100 \quad (3.1)$$

3.3.4 อัตราการเจริญเติบโตของไมโครกรีน

อัตราการเจริญเติบโตของไมโครกรีนสามารถอธิบายได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ชนิด ดังนี้

(1) การวัดความยาวลำต้นของไมโครกรีนสามารถทำได้โดยการวัดความยาวตั้งแต่ฐานของลำต้น ซึ่งไม่รวมส่วนรากของไมโครกรีน จนถึงปลายของไมโครกรีนด้วยไม้บรรทัด โดยผลรวมความยาวลำต้นไมโครกรีนทุกต้นในแต่ละกลุ่ม (L) ถูกนำมาคำนวณกับจำนวนเมล็ดไมโครกรีนทั้งหมด (N_T) ดังสมการที่ 3.2 เพื่อหาค่าความยาวลำต้นเฉลี่ย (average stem length) ของพืชไมโครกรีนในแต่ละกลุ่ม

$$\text{Average stem length} = \frac{L}{N_T} \quad (3.2)$$

(2) การวัดน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของไมโครกรีนสามารถทำได้โดยการนำไมโครกรีนทั้งหมดในแต่ละกลุ่มมาอบแห้งด้วยเครื่องอบ Memmert Germany รุ่น UN,UF ด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไมโครกรีนที่อบแล้วไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งสี่ตำแหน่ง ซึ่งน้ำหนักที่ได้จะเป็นน้ำหนักแห้งรวมของไมโครกรีนในแต่ละกลุ่ม (W_D) โดยน้ำหนักแห้งดังกล่าวจะถูกนำมาหารด้วยจำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่ปลูกในแต่ละกลุ่ม (N_T) ดังสมการที่ 3.3 ซึ่งจะได้ค่าน้ำหนักแห้งเฉลี่ย (average dry weight) ของแต่ละกลุ่ม

$$\text{Average dry weight} = \frac{W_D}{N_T} \quad (3.3)$$

3.3.5 ปริมาณความชื้นของไมโครกรีน

ปริมาณความชื้นสามารถวัดได้โดยการนำไมโครกรีนไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งสี่ตำแหน่งก่อนจะนำไปอบแห้ง ซึ่งน้ำหนักที่ได้จะเป็นน้ำหนักเปียกรวมของพืชไมโครกรีนในแต่ละ

กลุ่ม (W_F) จากนั้นนำน้ำหนักเปียกของพืชไมโครกรีนที่ได้นำมาคำนวณต่อดังสมการที่ 3.4 ก็จะได้เปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้น (moisture content) ของพืชไมโครกรีนในแต่ละกลุ่ม

$$\text{Moisture content} = \frac{W_F - W_D}{W_F} \times 100 \quad (3.4)$$



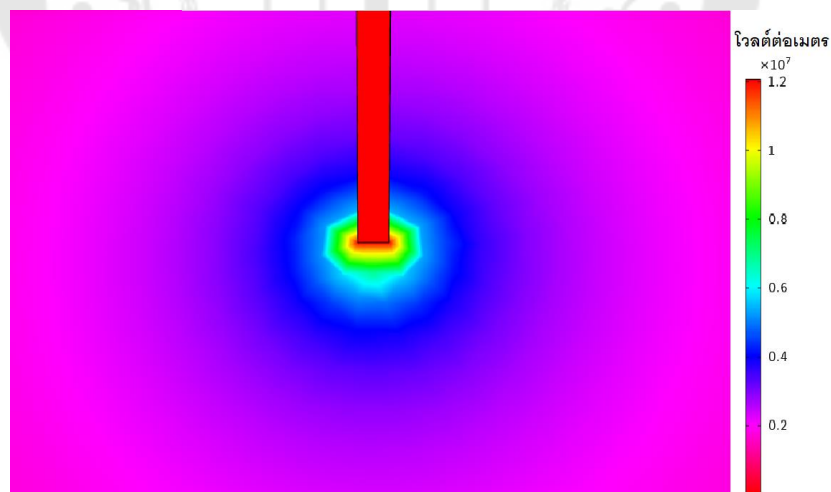
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการจำลองเครื่องมือต้นแบบด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics

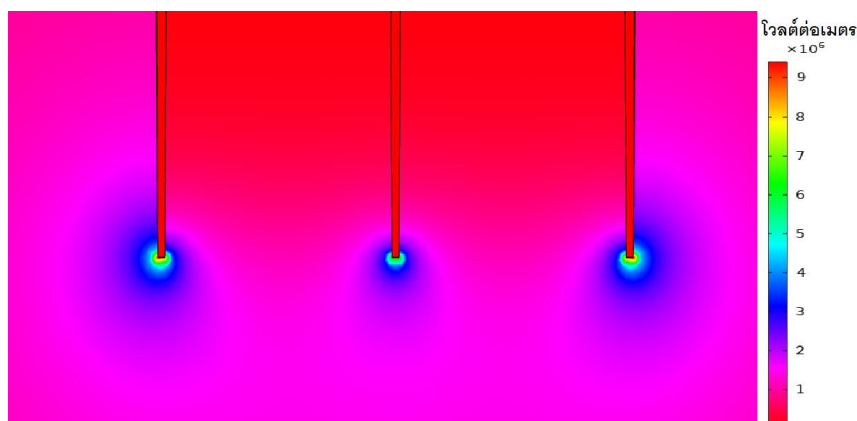
สนามไฟฟ้าสามารถถูกสร้างขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดสองชนิดที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยในการทดลองนี้คือการจำลองสถานการณ์การสร้างสนามไฟฟ้าจากลักษณะการจัดวางอิเล็กโทรดที่แตกต่างกันด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics

จากภาพประกอบ 25 แสดงลักษณะของความเข้มสนามไฟฟ้าที่จำลองได้จากจำนวนเข็มอิเล็กโทรดแบบต่าง ๆ จากภาพประกอบจะสังเกตเห็นว่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณปลายเข็มของอิเล็กโทรด โดยความเครียดสนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อห่างจากพื้นผิวของเข็มอิเล็กโทรดมากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนเข็มอิเล็กโทรดยังส่งผลให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในระบบจำลองมีค่าลดลง แต่พื้นที่ในการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น โดยความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายเข็มแอนด์ของ 1 เข็ม คือ 56.690 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร (Altamimi, Illias, Mokhtar, Mokhlis, และ Bakar, 2014)



(ก)

ภาพประกอบ 25 ลักษณะความเข้มสนามไฟฟ้าของเครื่องมือต้นแบบที่ (ก) 1 เข็ม และ (ข) 3 เข็ม



(ข)

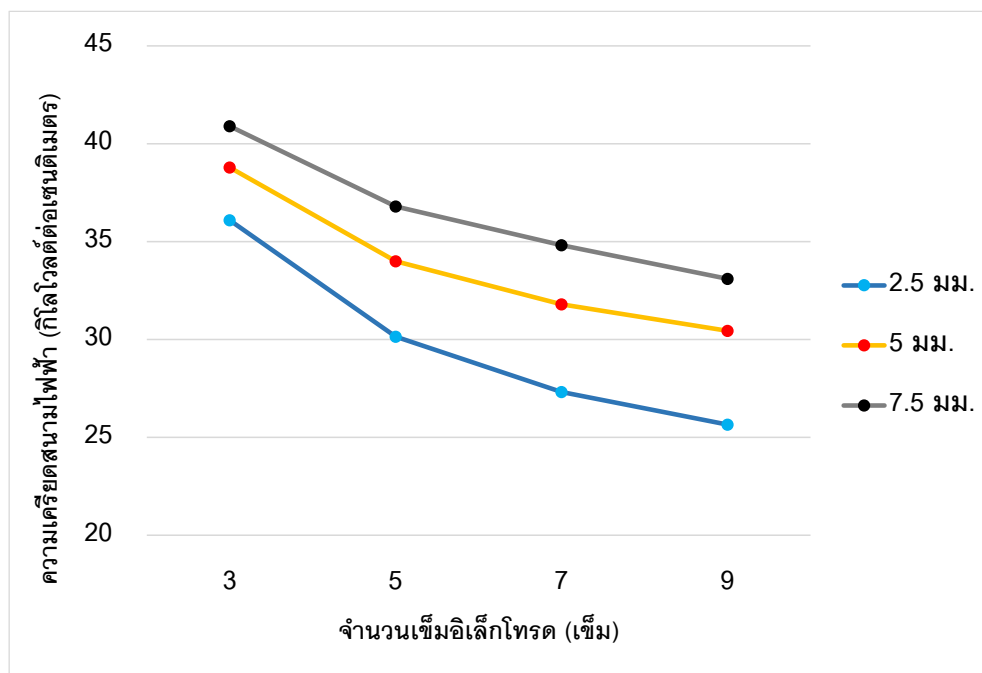
ภาพประกอบ 25 (ต่อ)

ตาราง 5 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายเข็มของอิเล็กโทรด

จำนวนเข็ม อิเล็กโทรด (เข็ม)	ความเครียดสนามไฟฟ้าของแต่ละระยะห่างระหว่างเข็ม อิเล็กโทรด (กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร)		
	2.5 มิลลิเมตร	5.0 มิลลิเมตร	7.5 มิลลิเมตร
3	36.087	38.791	40.890
5	30.144	34.000	36.789
7	27.316	31.801	34.817
9	25.647	30.443	33.101

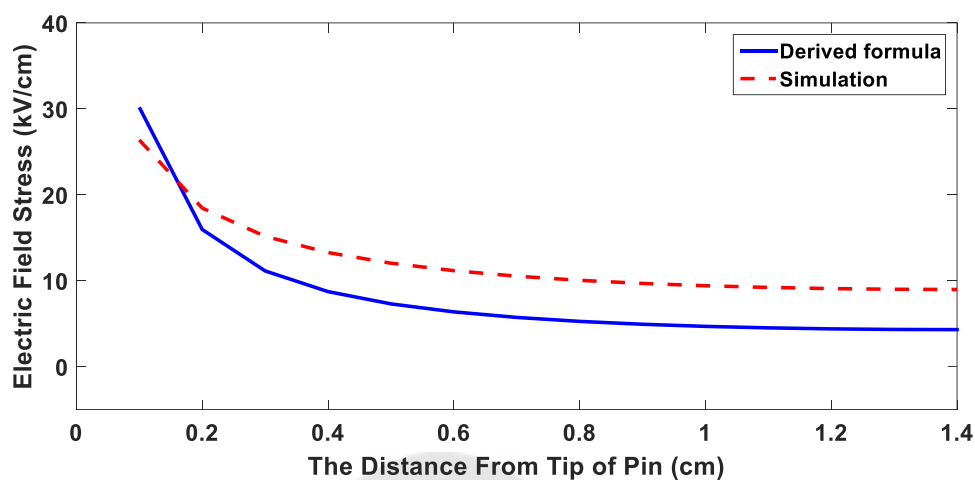
ตารางที่ 5 แสดงให้เห็นถึงความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายเข็มของอิเล็กโทรดของแต่ละวิธีในการจัดวางเข็มอิเล็กโทรด จากตารางทำให้ทราบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายเข็มจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเข็มอิเล็กโทรด ในขณะที่การเพิ่มจำนวนเข็มทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายเข็มอิเล็กโทรดลดลง นอกจากนี้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้างดกล่าวสามารถทำให้เกิดการเบรกดาวนในอากาศได้ที่ประมาณ 30 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจากตารางส่วนใหญ่สามารถทำให้เกิดการเบรกดาวนในอากาศ แต่สนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูงจะส่งผลต่อการสร้างโคโรนาดีสชาร์จได้ดีกว่าการสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอ ในขณะที่สนามไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอจะสามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้ แต่ต้องการพลังงานในการสร้างพลาสมาที่สูง ดังนั้นการออกแบบการจัดวางเข็มแอโนดให้สามารถ

สร้างสนามไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอและมีความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงจึงจะสามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้ที่พลังงานต่ำ



ภาพประกอบ 26 กราฟแนวโน้มความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายเข็มอิเล็กโทรดของการจัดวางเข็มอิเล็กโทรดแต่ละแบบ

จากภาพประกอบ 26 แสดงแนวโน้มของความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายเข็มอิเล็กโทรดของการจัดวางเข็มอิเล็กโทรดในแต่ละแบบ ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าในขณะที่จำนวนเข็มอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายเข็มอิเล็กโทรดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายเข็มอิเล็กโทรดมีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างมากเมื่อระยะห่างระหว่างเข็มอิเล็กโทรดมีค่าน้อยลง



ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มของความเครียดสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างจากปลายเข็มแฉกไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ จากการคำนวณด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน

จากภาพประกอบ 27 แสดงลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ปลายเข็มของแฉกไฟฟ้าจนถึงหัวแคโทดที่ระยะ 1.4 เซนติเมตร โดยสามารถคำนวณได้จากวิธีการที่แตกต่างกัน เส้นทึบสีน้ำเงินแสดงแนวโน้มความเครียดสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้ด้วยสมการที่ได้จากการพิสูจน์สูตร (derived formula) ด้วยการทบทวนวรรณกรรมดังสมการที่ 4.1 (Matra และคนอื่น ๆ, 2019) และเส้นประสีแดงแสดงแนวโน้มความเครียดสนามไฟฟ้าที่คำนวณจากวิธีการจำลองสนามไฟฟ้า (simulation) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม COMSOL Multiphysics

$$E_{\max} = \frac{2V_s}{\ln(4d/r)} \cdot \frac{1}{2x + r - (x^2/d)} \quad (4.1)$$

เมื่อ $E_{\max}$ คือ สนามไฟฟ้าสูงสุดที่ปลายเข็มของอิเล็กโทรด (kV/cm)

V_s คือ แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (kV)

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (cm)

r คือ รัศมีของปลายเข็มอิเล็กโทรด

จากการศึกษาลักษณะความเครียดสนามไฟฟ้าสามารถบ่งบอกได้ว่าสมการที่ได้จากการพิสูจน์สูตรด้วยการทบทวนวรรณกรรมดังสมการที่ 4.1 เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณความเครียด

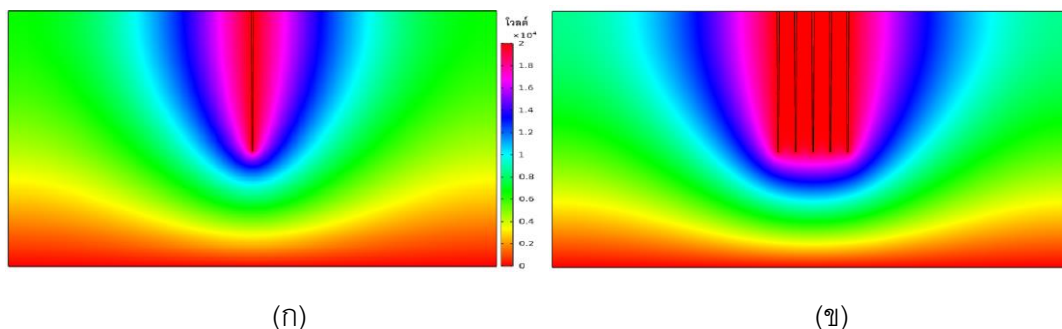
สนามไฟฟ้าในหนึ่งมิติ ดังนั้นการคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยวิธีนี้จึงเป็นการคำนวณโดยประมาณ ซึ่งอาจจะทำให้ผลการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนได้ แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการคำนวณแบบสองมิติ ซึ่งการแก้ไขปัญหาคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะมีการแบ่งเมชในการคำนวณอย่างละเอียด ดังนั้นจึงทำให้ผลการคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความละเอียดมากกว่า ทั้งนี้แนวโน้มความเครียดสนามไฟฟ้าจากการคำนวณด้วยวิธีทั้งสองนั้นมีลักษณะที่เหมือนกัน ซึ่งจากกราฟพบว่าที่ปลายเข็มจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูง จากนั้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งระยะห่างจากปลายเข็มแอนโอดมีค่ามากกว่า 0.8 เซนติเมตร จนถึง 1.4 เซนติเมตร ลักษณะความเครียดสนามไฟฟ้าจะค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ตามปัญหาของการสร้างพลาสมาด้วยเครื่องมือต้นแบบชนิดเข็มแอนโอดคือสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องมือต้นแบบชนิดนี้มีความไม่สม่ำเสมอสูงที่บริเวณปลายเข็มแอนโอด ซึ่งส่งผลต่อการรักษาสภาพของพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้ยากและเกิดล้าพลาสมาขนาดเล็ก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะใช้เครื่องมือต้นแบบชนิดหลายเข็ม ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลายเข็มมีค่าน้อยลง และทำให้เกิดลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เสมือนว่ามีความสม่ำเสมอที่บริเวณห่างจากปลายเข็มแอนโอดเล็กน้อย โดยจะทำให้สามารถสร้างพลาสมาและรักษาสภาพของพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอสูงที่ชั่วแคโทดได้ โดยสามารถแสดงได้จากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังภาพประกอบ 28(ก-ข) โดย ภาพประกอบ (ก) เป็นลักษณะแอนโอดที่มีปลายเข็มแหลมเพียง 1 เข็ม ซึ่งแอนโอดลักษณะนี้จะทำให้ลักษณะของเส้นสมศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มแอนโอดและแผ่นแคโทดมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอโดยสามารถคำนวณโดยประมาณได้ด้วยการใช้สมการที่ 2.21 และ 4.1 ซึ่งจะส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูง และภาพประกอบ 28(ข) เมื่อทำการเพิ่มเข็มแอนโอดจะทำให้ลักษณะของเส้นสมศักย์ไฟฟ้าที่ปลายเข็มแอนโอดแบบหลายเข็มมีลักษณะที่กว้างขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เสมือนว่ามีความสม่ำเสมอ (virtual semi-uniform electric field) ที่มีลักษณะคล้ายกับลักษณะอิเล็กโตรดแบบระนาบ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดภายใต้อิเล็กโตรดแบบหลายเข็มและอิเล็กโตรดแบบระนาบจึงมีความสม่ำเสมอสูงกว่าเมื่อเทียบกับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอิเล็กโตรดแบบเข็มเดียว ดังนั้นการใช้อิเล็กโตรดแบบหลายเข็มจึงสามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอสูงกว่าแบบเข็มเดียว

เส้นสมศักย์คือศักย์ไฟฟ้าที่เกิดรอบ ๆ เข็มอิเล็กโตรด ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากผิวของเข็มอิเล็กโตรดมากขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มจำนวนเข็มอิเล็กโตรดจะส่งผลให้เส้นสมศักย์ของแต่ละ

เข็มเกิดการรวมกันเป็นอันเดียว จนกระทั่งเส้นสมคัยมีขนาดที่กว้างขึ้น ซึ่งทำให้มีลักษณะคล้ายกับเส้นสมคัยของอิเล็กโทรดระนาบดังแสดงในภาพประกอบ 27 โดยเส้นสมคัยลักษณะนี้ส่งผลให้มีการสร้างสนามไฟฟ้าที่ค่อนข้างสม่ำเสมอมากกว่าเส้นสมคัยที่เกิดจากเข็มเดียว ดังนั้นการเพิ่มจำนวนเข็มนอกจากจะช่วยเพิ่มพื้นที่ในการกระจายของสนามไฟฟ้าแล้ว ยังคงช่วยให้สามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอที่พลังงานต่ำได้ง่ายขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้การเพิ่มระยะห่างระหว่างเข็มอิเล็กโทรดมากเกินไปจะส่งผลให้การรวมกันของเส้นสมคัยมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้เส้นสมคัยคล้ายกับเส้นสมคัยของอิเล็กโทรดแบบ 1 เข็ม มากขึ้น จึงทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับการสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอ เนื่องจากมีความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าที่สูงมากขึ้น จึงเหมาะกับการสร้างดิสชาร์จแบบโคโรนามากกว่า (Matra และคนอื่น ๆ, 2019)

จากผลการจำลองทำให้สังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนเข็มจะส่งผลให้เส้นสมคัยกว้างมากขึ้น ในขณะที่ฟลักซ์ไฟฟ้าซึ่งมีทิศตั้งฉากกับเส้นสมคัยมีความหนาแน่นคงที่ ดังนั้นจึงส่งผลให้ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าต่อเส้นสมคัยมีค่าลดลง จึงทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนเข็มแอโนด ในทางตรงกันข้ามกรณีที่เข็มแอโนดจำนวน 1 เข็ม ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าต่อเส้นสมคัยมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้นเมื่อลดจำนวนเข็มแอโนด (Al-Hamouz, 1999; Bousiou, Mikropoulos, และ Zagkanas, 2017; Matra และคนอื่น ๆ, 2019)

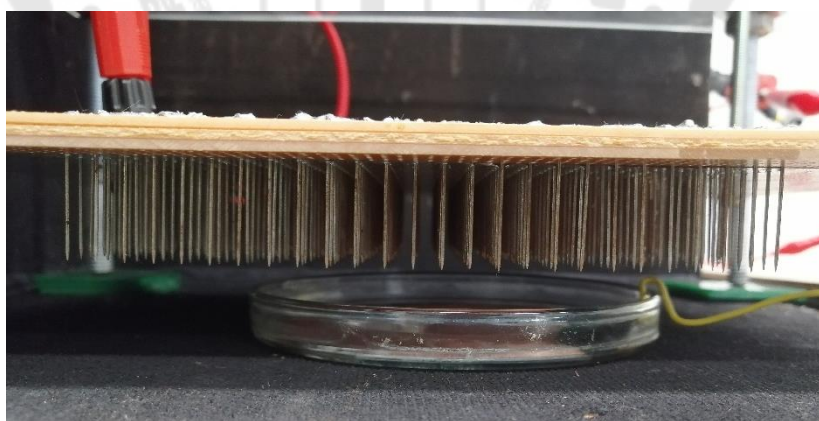
อย่างไรก็ตามความเครียดสนามไฟฟ้าที่สร้างจากอิเล็กโทรดแบบ 1 เข็ม และอิเล็กโทรดแบบระยะห่างระหว่างเข็มมาก ๆ สนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากกรณีดังกล่าวมีความไม่สม่ำเสมอที่สูงซึ่งสามารถสร้างดิสชาร์จแบบโคโรนาได้ง่าย แต่สร้างพลาสมาที่เสถียรและสมบูรณ์ได้ยาก ในทางกลับกันลักษณะอิเล็กโทรดชนิดหลายเข็มและมีระยะห่างระหว่างเข็มน้อย ๆ สนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจะมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ถึงแม้ความเครียดสนามไฟฟ้าจะน้อยกว่าอีกกรณีหนึ่งแต่ก็ยังคงเป็นความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูง ซึ่งจะเป็นลักษณะของสนามไฟฟ้าสูงที่เสมือนว่าเป็นแบบสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงคาดว่าลักษณะของสนามไฟฟ้าจากการจัดวางเข็มแอโนดแบบดังกล่าวจะสามารถสร้างพลาสมาที่เสถียรได้ (Matra และคนอื่น ๆ, 2019) เพราะฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าจำนวนเข็มที่มากและระยะห่างระหว่างเข็มที่ 5 มิลลิเมตร คาดว่าจะเหมาะสมสำหรับการสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้ดีกว่าการจัดวางเข็มแอโนดแบบอื่น ๆ



ภาพประกอบ 28 เส้นสมศักย์ของอิเล็กโทรดขนาด (ก) 1 และ (ข) 5 เข็ม

4.2 ลักษณะของเครื่องมือต้นแบบ

ภาพประกอบ 28 แสดงเครื่องมือต้นแบบชนิดโคโรนาดีสชาร์จแบบหลายเข็ม ซึ่งถูกออกแบบโดยให้ระยะห่างระหว่างเข็มอิเล็กโทรดที่อยู่ติดกันห่างกัน 5 มิลลิเมตร โดยจำนวนเข็มทั้งหมด 600 เข็ม เข็มทั้งหมดถูกเชื่อมด้วยตะกั่วบัดกรีบนแผ่นปริ้นไช้ปลา ซึ่งเข็มจะทำหน้าที่เป็นแอโนดของเครื่องมือต้นแบบ ในขณะที่แคโทดคือ แผ่นทองแดงหรือน้ำ ขั้วแอโนดจะถูกต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ในขณะที่แคโทดจะถูกต่อเข้ากับกราวด์

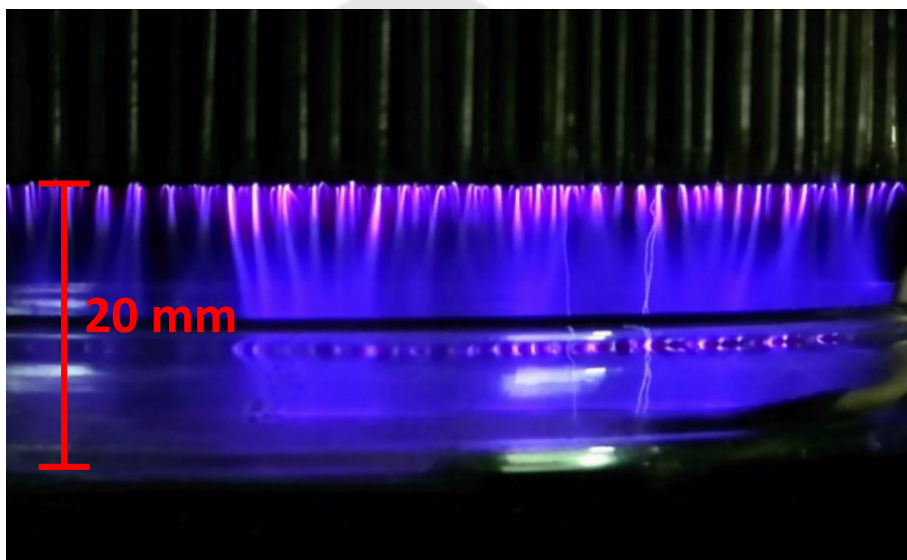


ภาพประกอบ 29 เครื่องมือต้นแบบชนิดโคโรนาดีสชาร์จแบบหลายเข็ม

4.3 ผลของการสร้างพลาสมาด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ

จากการศึกษาอิทธิพลของการสร้างพลาสมาที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดขนาดต่าง ๆ ทำให้ทราบว่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 20 มิลลิเมตร มีช่วงของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายในการสร้างพลาสมามากที่สุด โดยระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 14 มิลลิเมตร สามารถสร้างพลาสมาได้

ในช่วง 10-16 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 16 มิลลิเมตร สามารถสร้างพลาสมาได้
 ในช่วง 12-18 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 18 มิลลิเมตร สามารถสร้างพลาสมาได้
 ในช่วง 14-22 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 20 มิลลิเมตร สามารถสร้างพลาสมาได้
 ในช่วง 16-30 กิโลโวลต์ ดังนั้นการสร้างพลาสมาโดยการใช้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 20 มิลลิเมตร จึงเหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการสร้างพลาสมาด้วยเครื่องมือต้นแบบนี้ โดยภาพประกอบ 29 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอและมีขนาดพื้นที่ในการเกิดพลาสมาที่กว้างจากการใช้แรงดันจากแหล่งจ่าย 30 กิโลโวลต์ ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 20 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 30 พลาสมาที่มีความสม่ำเสมอที่แรงดันไฟฟ้าขนาด 30 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 20 มิลลิเมตร

จากการศึกษาการสร้างพลาสมาที่ตัวต้านบัลลาสต์ขนาดต่าง ๆ โดยระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดคงที่ที่ 20 มิลลิเมตร ทำให้ทราบว่า การเพิ่มขนาดของตัวต้านทานบัลลาสต์ช่วยเพิ่มช่วงของขนาดแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างพลาสมาที่สม่ำเสมอให้มากขึ้น และยังช่วยลดการเกิดอาร์คระหว่างการสร้างพลาสมาได้ด้วย โดยตัวต้านบัลลาสต์ขนาด 5 เมกะโอห์มสามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายตั้งแต่ 12-17 กิโลโวลต์ ตัวต้านบัลลาสต์ขนาด 10 เมกะโอห์ม สามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายตั้งแต่ 14-24 กิโลโวลต์ และตัวต้านบัลลาสต์ขนาด 26 เมกะโอห์มสามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายตั้งแต่ 14-30 กิโล

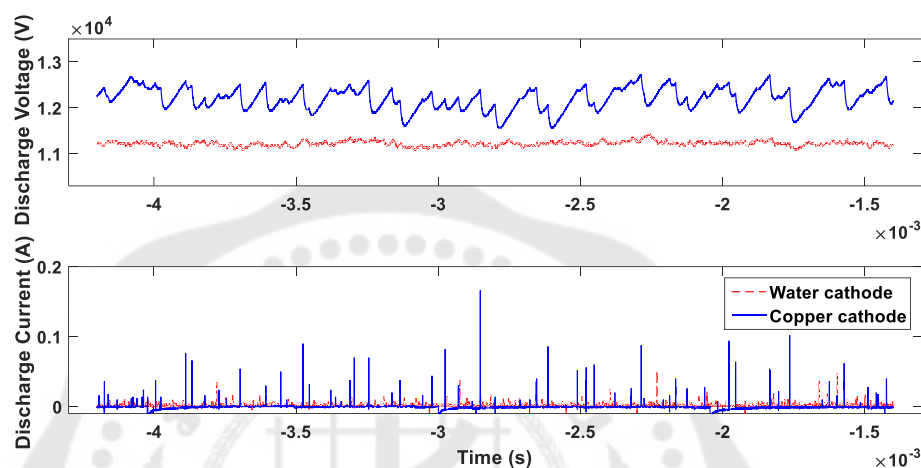
โวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถจ่ายได้ ดังนั้นการสร้างพลาสมาโดยใช้ตัวต้านทานบัลลาสต์ขนาด 26 เมกะโอห์ม จึงเหมาะสมสำหรับการสร้างพลาสมาด้วยเครื่องมือต้นแบบนี้ โดยทั่วไปตัวต้านทานบัลลาสต์มีส่วนช่วยในการจำกัดกระแสของวงจรที่ใช้ในการสร้างพลาสมาเพื่อไม่ให้กระแสของพลาสมาสูงจนเกินไป เนื่องจากถ้ากระแสของวงจรสูงเกินไปอาจจะทำให้เครื่องมือที่ใช้เกิดความเสียหาย นอกจากนี้กระแสที่มากเกินไปยังส่งผลให้กระบวนการสร้างพลาสมาเกิดอาร์คง่ายขึ้น ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้กับเมล็ดพันธุ์พืช ประกอบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ของข้าพเจ้าที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลาสมาในการปรับปรุงเมล็ดข้าวหอมมะลิ โดยในงานวิจัยดังกล่าวเครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบหลายเข็มสามารถสร้างพลาสมาได้ดีและมีช่วงของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่กว้างในการสร้างพลาสมา ด้วยการใช้ตัวต้านทานบัลลาสต์ขนาด 30 เมกะโอห์ม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะใช้ตัวต้านทานบัลลาสต์ขนาด 26 เมกะโอห์ม ในวงจรสำหรับการสร้างพลาสมา (มาตรา, แซ่เอี้ย, ธนินทรานุโคตร, และ ธนการักษ์, 2559)

4.4 ผลของแรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จ

จากภาพประกอบ 30 กราฟแรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่ได้จากเครื่องมือต้นแบบที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 20 มิลลิเมตร พร้อมกับแคโทดแบบแผ่นทองแดงและแคโทดแบบน้ำประปา ทำให้ทราบว่าพลาสมาสามารถสร้างขึ้นได้ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 30 กิโลโวลต์ ทั้งแคโทดแบบทองแดงและแคโทดแบบน้ำประปา และกราฟที่ได้เป็นคลื่นพัลส์แบบไม่เป็นคาบ (non-periodic pulsing waveform)

จากภาพประกอบ แรงดันดิสชาร์จจะเกิดการชาร์จเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ คล้ายกับการชาร์จประจุในตัวเก็บประจุ จนกระทั่งถึงจุดเบรกดาว์น แรงดันดิสชาร์จจะตกลงทันทีในขณะที่กระแสดิสชาร์จจะพุ่งขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นตัวต้านทานบัลลาสต์จึงทำหน้าที่ในการตัดกระแสที่พุ่งเกินให้กลับสู่กระแสพื้นฐาน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะเกิดขึ้นซ้ำไปเรื่อย ๆ จนทำให้เกิดกราฟคลื่นพัลส์ที่ไม่เป็นคาบ นอกจากนี้ความถี่โดยเฉลี่ยของลักษณะทางไฟฟ้าของแคโทดแบบทองแดงและแคโทดแบบน้ำคือ 13.5 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 250 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ ค่าความถี่ที่วัดได้สามารถบ่งบอกได้ถึงจำนวนเข็มแอโนดที่ใช้ในการสร้างพลาสมา ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าเครื่องมือต้นแบบชนิดนี้สามารถสร้างพลาสมาได้หลายเข็มและมีพื้นที่ในการใช้งานที่กว้าง นอกจากนี้จากภาพประกอบจะสังเกตเห็นได้ว่ากระแสดิสชาร์จของแผ่นแคโทดแบบทองแดงมีค่ามากกว่ากระแสดิสชาร์จของแคโทดแบบน้ำ เนื่องจากแคโทดแบบแผ่นทองแดงมีค่านำไฟฟ้ามากกว่าน้ำประปา คือ 5.95×10^8 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และ 2.34 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้น

สามารถกล่าวได้ว่าแผ่นทองแดงมีการปล่อยอิเล็กตรอนที่มากกว่า จึงส่งผลต่อการเกิดการแตกตัวของแก๊ส (ionization) ได้ดีกว่า ซึ่งอาจจะมีผลต่อการเกิดอนุมูลอิสระที่มากกว่าแคโทดแบบน้ำ ด้วยเหตุนี้ลักษณะของกระแสดิสชาร์จที่สูงสามารถอธิบายได้ถึงปริมาณความเข้มข้นของอนุมูลอิสระที่อาจจะสูงเช่นกัน



ภาพประกอบ 31 กราฟแรงดันดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จที่แรงดันแหล่งจ่าย 30 กิโลโวลต์ ของพลาสมาที่ถูกสร้างขึ้นบนแคโทดแบบแผ่นทองแดงและแบบน้ำประปา

จากผลการทดลองในการสร้างพลาสมาด้วยเครื่องมือต้นแบบสามารถสรุปได้ว่าการใช้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 20 มิลลิเมตร สามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้ดีที่ 16 - 30 กิโลโวลต์ ทั้งกรณีแคโทดแบบทองแดงและแบบน้ำ ซึ่งพลาสมาที่ถูกสร้างขึ้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 30 กิโลโวลต์ บนแคโทดแบบแผ่นทองแดงและแบบน้ำประปาจะถูกนำไปฉายลงบนเมล็ดพันธุ์พืชต่อไป

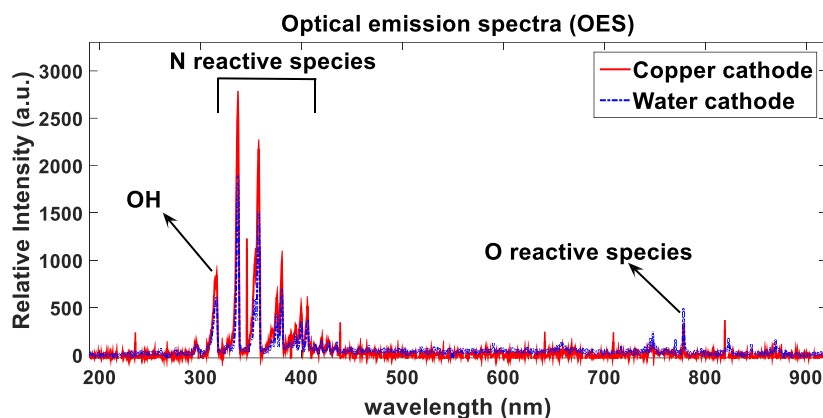
4.5 คุณลักษณะทางแสงของพลาสมา

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางแสงของพลาสมาทำให้ทราบความเข้มข้นของอนุมูลอิสระแต่ละชนิดในพลาสมา ซึ่งสามารถช่วยให้วิเคราะห์ผลจากอิทธิพลของพลาสมาที่มีต่อการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนได้ดียิ่งขึ้น โดยในการวิเคราะห์คุณลักษณะทางแสงของพลาสมาในการทดลองนี้จะถูกวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางแสงรุ่น Thorlabs CCS200 ที่ความยาวคลื่นของแสงตั้งแต่ 200 ถึง 900 นาโนเมตร โดยหัววัดจะถูกจัดวางอยู่ที่ปลายเข็มแอโนด เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีความเข้มของแสงพลาสมามากที่สุด ซึ่งเป็นจุดที่วัดง่ายที่สุด

ภาพประกอบ 31 แสดงความเข้มข้นของอนุมูลอิสระแต่ละชนิดจากพลาสมาอุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ ที่สร้างขึ้นจากแคโทดชนิดแผ่นทองแดงและน้ำประปา โดยอนุมูลอิสระที่สามารถวัดได้ประกอบด้วย อนุมูลอิสระชนิดไฮดรอกไซด์ ($\text{OH}^\cdot$) ซึ่งสามารถวัดได้ที่ช่วงความยาวคลื่น 306 - 315 นาโนเมตร อนุมูลอิสระชนิดไนโตรเจนสามารถวัดได้ที่ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 - 400 นาโนเมตร เช่น โมเลกุลไนโตรเจนที่อยู่ในสภาวะกระตุ้น (N_2^+) ที่ 300 - 390 นาโนเมตร และไนโตรเจนไอออน (N_2^+) ที่ 390 - 480 นาโนเมตร อนุมูลอิสระชนิดออกซิเจนสามารถวัดได้ที่ช่วงความยาวคลื่น 776.7 นาโนเมตร โดยอนุมูลอิสระเหล่านี้มีประโยชน์ในทางการเกษตรอย่างหลากหลาย เช่น $\text{OH}^\cdot$ และสารประกอบออกซิเจนอื่น ๆ มีประโยชน์ในการกำจัดเชื้อราและจุลินทรีย์ที่มีส่วนในการยับยั้งการงอกและการเจริญเติบโตของเมล็ดพันธุ์พืช นอกจากนี้อนุมูลอิสระชนิด N_2^+ และสารประกอบไนโตรเจนอื่น ๆ มีประโยชน์ในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของเมล็ดพืช เนื่องจากสารประกอบไนโตรเจนส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบของปุ๋ยซึ่งมีส่วนสำคัญในการเร่งการเจริญเติบโตของพันธุ์พืช (Ahn และคนอื่น ๆ, 2014; Khamsen และคนอื่น ๆ, 2016; Matra, 2017; Wu และคนอื่น ๆ, 2018)

ทั้งนี้ประโยชน์ของน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมามีอยู่หลากหลาย เนื่องจากพลาสมาส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในน้ำจนกระทั่งเกิดสารประกอบที่มีประโยชน์มากมาย ยกตัวอย่างเช่น NO_2^- ไนเตรท (NO_3^-) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และโอโซน สารประกอบเหล่านี้มีประโยชน์ในการกำจัดเชื้อราและจุลินทรีย์ที่ส่งผลต่อการเกิดโรคต่าง ๆ ในพืช นอกจากนี้งานวิจัยบางเล่มได้กล่าวว่าการที่น้ำประปาถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาส่งผลให้ความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสารประกอบไนโตรเจนดังกล่าวมีประโยชน์ในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพันธุ์พืช (Bafail และคนอื่น ๆ, 2018; Shin, Yiacoumi, Tsouris, และ Dai, 2000; Wang และคนอื่น ๆ, 2012; Wu และคนอื่น ๆ, 2018)

นอกจากนี้จากกราฟสามารถสังเกตเห็นได้ว่าความเข้มข้นของอนุมูลอิสระแต่ละชนิดจากพลาสมาที่สร้างขึ้นด้วยแคโทดแบบแผ่นทองแดงมีค่ามากกว่าความเข้มข้นของอนุมูลอิสระแต่ละชนิดจากพลาสมาที่สร้างขึ้นด้วยแคโทดแบบน้ำประปา เนื่องจากแคโทดชนิดแผ่นทองแดงมีความนำไฟฟ้าที่มากกว่าแคโทดชนิดน้ำประปา ดังนั้นพลาสมาจึงสามารถสร้างบนแคโทดแบบแผ่นทองแดงได้ดีกว่าแบบน้ำประปาทำให้ความเข้มข้นของอนุมูลอิสระมีมากกว่า



ภาพประกอบ 32 กราฟความเข้มของอนุภาคลิสงแต่ละชนิดที่วัดได้จากการวิเคราะห์ทางแสงของพลาสมา

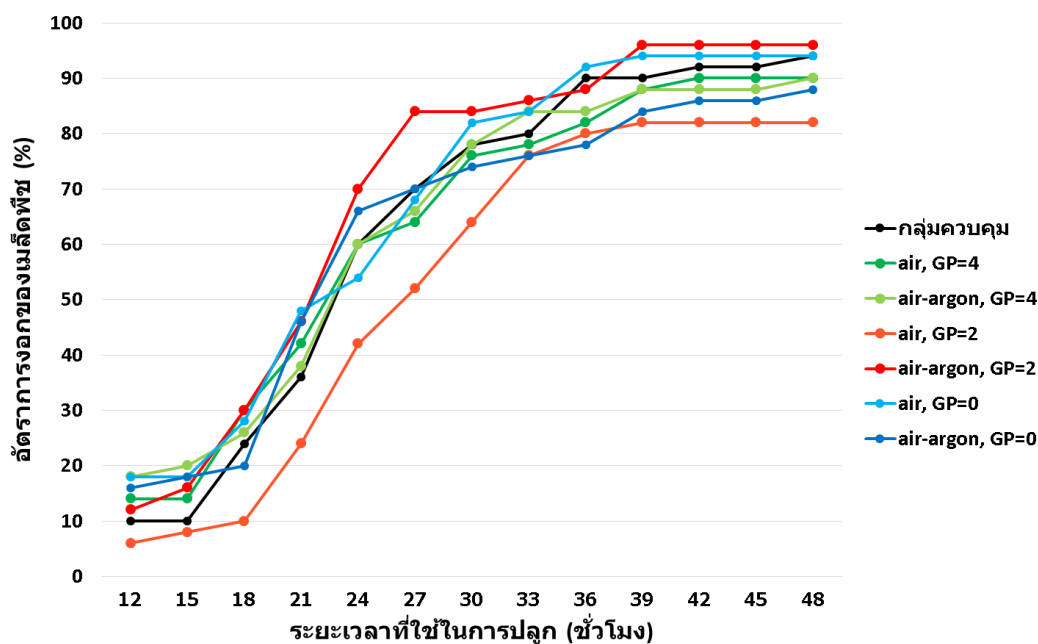
4.6 การศึกษาอิทธิพลของน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาที่มีต่อการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีน

ในการทดลองนี้คือการศึกษอิทธิพลของน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาจากเครื่องมือต้นแบบชนิดพลาสมาเจ็ท โดยได้ทำการศึกษการฉายพลาสมาลงบนน้ำประปาที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 0, 2 และ 4 มิลลิเมตร และศึกษาการฉายพลาสมาที่ถูกสร้างขึ้นด้วยอากาศ (Air) และอากาศผสมอาร์กอน (Air-Ar) ลงบนน้ำประปา

4.6.1 อัตราการงอก

อัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีนในการทดลองนี้จะถูกวัดหลังจากปลูก 12 ชั่วโมง ทุก ๆ 3 ชั่วโมง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยลักษณะของเมล็ดที่ถูกนับว่างอกคือเมล็ดที่มีหน่อสีขาวงอกออกมาจากเมล็ด หลังจากนั้นจำนวนเมล็ดที่งอกทั้งหมดในแต่ละกลุ่มจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับจำนวนเมล็ดทั้งหมดในกลุ่มนั้น ๆ เพื่อหาอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีน

ผลการวัดอัตราการงอกแสดงดังภาพประกอบ 32 จะสังเกตเห็นได้ว่ากลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลองที่ถูกรดด้วยน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมามีอัตราการงอกในช่วงแรกของการปลูก 12-15 ชั่วโมง ที่ค่อนข้างจะคงที่ ยกเว้นกลุ่มที่ถูกรดด้วยน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เท่ากับ 4 มิลลิเมตร โดยใช้สารตั้งต้นเป็นอากาศผสมอาร์กอน ที่จะมีอัตราการงอกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในช่วงแรกของการปลูก ต่อจากนั้นในช่วง 18-39 ชั่วโมง อัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีนของทุก ๆ กลุ่มการทดลองจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมาถึงในช่วงสุดท้ายของการวัดอัตราการงอกคือ 39-48 ชั่วโมง ที่อัตราการงอกของทุก ๆ กลุ่มการทดลองจะช้าลงจนกระทั่งไม่มีเมล็ดไมโครกรีนงอกเพิ่มขึ้นมาอีก

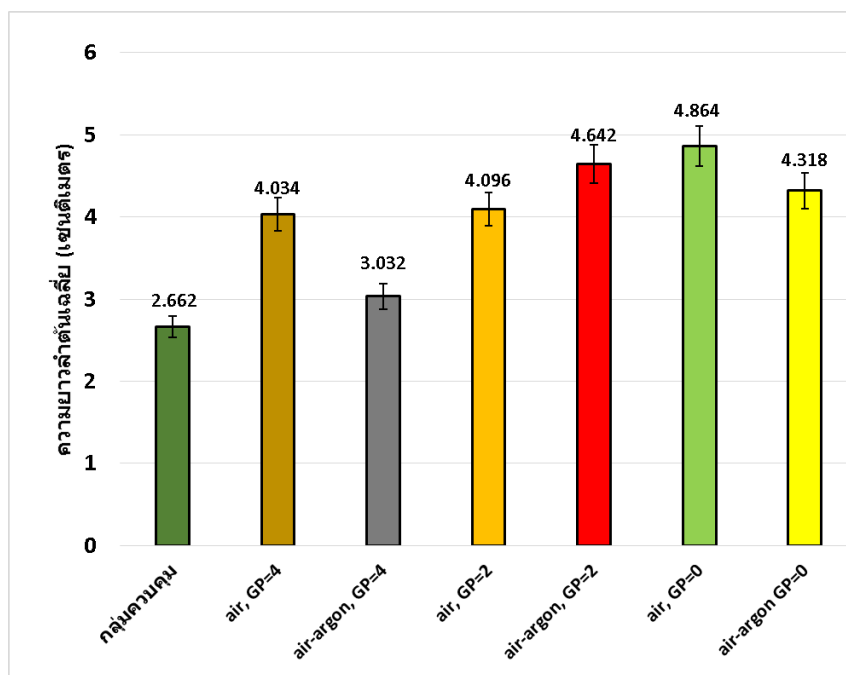


ภาพประกอบ 33 กราฟแนวโน้มอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีนที่ชั่วโมงต่าง ๆ หลังจากการปลูก

จากผลการวัดอัตราการงอกของทั้ง 6 กลุ่มที่ถูกแช่และรดด้วยน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาทำให้สามารถทราบผลการทดลองได้ว่าอัตราการงอกของกลุ่มดังกล่าวค่อนข้างใกล้เคียงกับกลุ่มควบคุมในทุก ๆ ช่วงของการปลูก ยกเว้นในกลุ่มการทดลองที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และใช้สารตั้งต้นเป็นอากาศ ที่ค่อนข้างจะแตกต่างจากผลการทดลองในกลุ่มอื่น ๆ ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดลองที่ไม่สามารถควบคุมพารามิเตอร์บางชนิดได้ เช่น แสง อุณหภูมิ เวลาในการวัดที่ไม่พร้อมกันทันทีในแต่ละกลุ่ม และแหล่งศัตรูพืช ดังนั้นจากผลอัตราการงอกที่ได้กล่าวไปข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาที่นำมาแช่และรดเมล็ดไมโครกรีน อาจจะส่งผลน้อยมากหรือไม่ส่งผลต่ออัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีน เนื่องจากทุกเงื่อนไขการทดลองมีอัตราการงอกที่ใกล้เคียงกัน

4.6.2 อัตราการเจริญเติบโต

ผลการวัดอัตราการเจริญเติบโตแสดงดังภาพประกอบ 33 ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่ากรณีของน้ำประปาที่ได้รับการกระตุ้นด้วยพลาสมาเจ็ด เมื่อนำไปรดผักขึ้นหูดส่งผลให้ผักขึ้นหูดมีความยาวเฉลี่ยของลำต้นมากกว่ากลุ่มควบคุม และกลุ่มที่ส่งผลต่อความยาวลำต้นเฉลี่ยของผักขึ้นหูดมากที่สุดคือกลุ่มที่รดด้วยน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาที่สร้างจากแบบจำลองที่ใช้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 0 มิลลิเมตร โดยใช้อากาศ ในการสร้างพลาสมา



ภาพประกอบ 34 กราฟความยาวลำต้นเฉลี่ยของพืชไมโครกรีนหลังจากการปลูกเป็นเวลา 5 วัน

ดังนั้นจากผลการทดลองในส่วนนี้ทำให้ทราบว่าน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของพืชไมโครกรีนแต่ส่งผลน้อยต่ออัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีน อาจจะเนื่องมาจากสารประกอบไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบของปุ๋ย ซึ่งกระตุ้นการเจริญเติบโตของต้นพืช ซึ่งส่งผลน้อยต่ออัตราการงอก นอกจากนี้การใช้สารตั้งต้นในการสร้างพลาสมาเป็นอากาศส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของผักขึ้นหูดดีที่สุด เพราะว่าการใช้สารตั้งต้นดังกล่าวส่งผลต่อการสร้างสารประกอบไนโตรเจนในน้ำประปาได้ดีกว่า ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าการสร้างพลาสมาด้วยอากาศ และที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแคบส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของพืชไมโครกรีนได้ดีที่สุด (Y. H. Kim และคนอื่น ๆ, 2014)

4.7 การศึกษาอิทธิพลของแคโทดแต่ละชนิดที่มีต่อการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีน

ในการทดลองนี้คือการศึกษอิทธิพลของพลาสมาที่สร้างขึ้นจากแคโทดที่แตกต่างกันที่มีต่อการปรับปรุงการงอก และการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน โดยแคโทดที่ใช้ในการทดลองคือ แผ่นทองแดง และน้ำประปา

4.7.1 อัตราการงอก

อัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีนในการทดลองนี้จะถูกวัดหลังจากปลูก 12 ชั่วโมง ทุก ๆ 3 ชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยลักษณะของเมล็ดที่ถูกนับว่างอกคือเมล็ดที่มีหน่อสีขาว

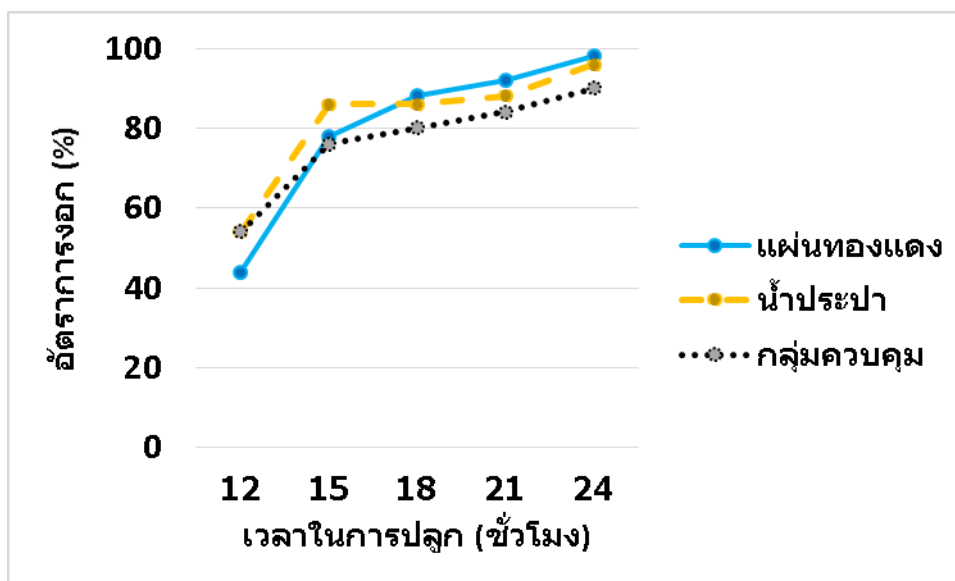
งอกออกมาจากเมล็ด หลังจากนั้นจำนวนเมล็ดที่งอกทั้งหมดในแต่ละกลุ่มจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับจำนวนเมล็ดทั้งหมดในกลุ่มนั้น ๆ เพื่อหาอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีน

ตาราง 6 จำนวนเมล็ดไมโครกรีนที่งอกในแต่ละกลุ่มหลังจากการปลูกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

กลุ่มแคโทดแผ่นทองแดง	กลุ่มแคโทดน้ำประปา	กลุ่มควบคุม
		
49 เมล็ด	48 เมล็ด	45 เมล็ด

ตาราง 7 ผลอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีน

กลุ่มการทดลอง	เวลาที่ใช้ในการปลูกเมล็ดไมโครกรีน (ชั่วโมง)				
	12	15	18	21	24
แผ่นทองแดง	44%	78%	88%	92%	98%
น้ำประปา	54%	86%	86%	88%	96%
กลุ่มควบคุม	54%	76%	80%	84%	90%



ภาพประกอบ 35 กราฟแนวโน้มอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีนที่ชั่วโมงต่าง ๆ หลังจากการปลูก

จากผลการวัดอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีนที่ชั่วโมงต่าง ๆ หลังจากการปลูกทำให้ทราบว่าในช่วงแรกของการปลูกกลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสติกที่สร้างบนน้ำประปาและกลุ่มควบคุมมีอัตราการงอกที่ดีกว่ากลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสติกที่สร้างบนแผ่นทองแดง ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 15 อัตราการงอกของกลุ่มที่ได้รับการบำบัดบนแผ่นทองแดงมีความเร่งมากขึ้นจนสูงกว่าอัตราการงอกของอีกสองกลุ่ม จนกระทั่งชั่วโมงที่ 24 อัตราการงอกของกลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยแผ่นทองมีค่าสูงที่สุดคือ 98% ในขณะที่อัตราการงอกของกลุ่มที่ได้รับการบำบัดบนน้ำประปาและกลุ่มควบคุมคือ 96% และ 90% ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการบำบัดเมล็ดไมโครกรีนด้วยพลาสติกส่งผลต่ออัตราการงอก และการบำบัดเมล็ดไมโครกรีนบนแผ่นทองแดงให้ผลอัตราการงอกดีที่สุด

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การบำบัดเมล็ดไมโครกรีนบนแผ่นทองแดงส่งผลต่ออัตราการงอกได้ดีกว่ากลุ่มอื่น ๆ เนื่องจากการบำบัดเมล็ดพืชบนแผ่นทองแดงส่งผลให้ผิวของเมล็ดมีพื้นที่สัมผัสต่อพลาสติกมากกว่าการบำบัดเมล็ดด้วยพลาสติกบนน้ำประปาที่ซึ่งเมล็ดจมในน้ำมากกว่าครึ่งหนึ่งของตัวเมล็ด ดังนั้นจึงส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสของเมล็ดที่วางบนน้ำต่อพลาสติกมีพื้นที่ลดลง นอกจากนี้แคโทดแบบแผ่นทองแดงมีความนำไฟฟ้ามากกว่าแคโทดแบบน้ำ ซึ่งการนำไฟฟ้าที่มากของแคโทดแบบแผ่นทองแดงส่งผลให้จำนวนอิเล็กตรอน จำนวนไอออน การเกิดไอออนไนเซชัน และอนุมูลอิสระ มีมากขึ้น โดยอนุมูลอิสระของพลาสติกชนิด OH^- มีส่วนช่วยในการกัดกร่อนผิวเมล็ดพืชให้เรียบยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการดูดซึมน้ำของเมล็ดพืชได้ดียิ่งขึ้น ในขณะที่อนุมูล

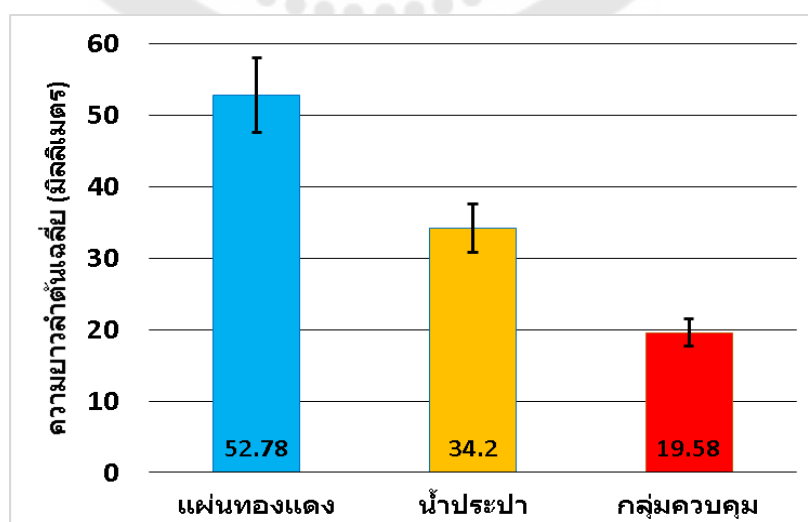
อิสระชนิดโอโซนมีส่วนช่วยในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและจุลินทรีย์บางชนิดที่มีส่วนในการยับยั้งการงอกของเมล็ดพืช ซึ่งอนุมูลอิสระทั้งสองชนิดนี้สามารถช่วยให้เมล็ดพืชมีอัตราการงอกที่ดีขึ้นได้ (Khamseen และคนอื่น ๆ, 2016; J. W. Kim และคนอื่น ๆ, 2017; Matra, 2017; Wu และคนอื่น ๆ, 2018)

4.7.2 อัตราการเจริญเติบโต

อัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีนในการทดลองนี้จะถูกวิเคราะห์ด้วยความยาวลำต้นของพืชไมโครกรีนหลังจากการปลูกเป็นเวลา 7 วัน โดยความยาวลำต้นของพืชไมโครกรีนทุกต้นในแต่ละกลุ่มจะถูกนำมาเฉลี่ยเพื่อหาความยาวลำต้นเฉลี่ยของพืชไมโครกรีนในแต่ละกลุ่ม



ภาพประกอบ 36 พืชไมโครกรีนแต่ละกลุ่มการทดลองหลังจากการปลูกเป็นเวลา 7 วัน



ภาพประกอบ 37 กราฟความยาวลำต้นเฉลี่ยของพืชไมโครกรีนหลังจากการปลูกเป็นเวลา 7 วัน

จากผลความยาวลำต้นเฉลี่ยของพืชไมโครกรีนหลังจากการปลูกเป็นเวลา 7 วันทำให้ทราบถึงความยาวลำต้นเฉลี่ยของกลุ่มที่ได้รับการบำบัดบนแผ่นทองแดง น้ำประปา และกลุ่มควบคุมมีค่า 52.78 34.20 และ 19.58 มิลลิเมตร ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ากลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสติกมีความยาวลำต้นเฉลี่ยมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสติกอย่างชัดเจน โดยกลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสติกบนแผ่นทองแดงมีผลความยาวลำต้นเฉลี่ยที่ดีกว่ากลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสติกบนน้ำประปาประมาณ 1.543 เท่า ในขณะที่มากกว่ากลุ่มควบคุมประมาณ 2.696 เท่า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่ากลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสติกบนแผ่นทองแดงมีผลความยาวลำต้นเฉลี่ยดีที่สุด

จากผลความยาวลำต้นเฉลี่ยดังกล่าวสามารถบ่งบอกได้ว่ากลุ่มที่มีความยาวลำต้นเฉลี่ยมากที่สุดคือกลุ่มที่มีอัตราการเจริญเติบโตดีที่สุด ดังนั้นการบำบัดเมล็ดไมโครกรีนด้วยพลาสติกบนแผ่นทองแดงส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตได้ดีที่สุด เนื่องจากพลาสติกที่ถูกสร้างขึ้นบนแผ่นทองแดงมีความเข้มข้นของอนุมูลอิสระมากกว่าพลาสติกที่ถูกสร้างขึ้นบนน้ำประปา เนื่องจากความนำไฟฟ้าของแคโทดแบบแผ่นทองแดงมีมากกว่าแคโทดแบบน้ำประปา ดังนั้นการปรับปรุงเมล็ดพืชด้วยพลาสติกที่ถูกสร้างบนแผ่นทองแดงจึงให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า

นอกเหนือจากอัตราการงอกและการดูดซึมน้ำที่ดีจะส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของพืชไมโครกรีนแล้ว อนุมูลอิสระชนิดไนโตรเจนทั้งหลายที่ตรวจพบซึ่งเป็นส่วนประกอบของปุ๋ยยังสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของเมล็ดพืชได้เช่นกัน ดังนั้นการบำบัดเมล็ดไมโครกรีนด้วยพลาสติกบนแผ่นทองแดงที่ซึ่งมีความเข้มข้นของอนุมูลอิสระมากกว่าแคโทดอีกชนิดหนึ่งจึงส่งผลต่อการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชไมโครกรีนได้ดีกว่า (Bafoil และคนอื่น ๆ, 2018; Khamseen และคนอื่น ๆ, 2016; J. W. Kim และคนอื่น ๆ, 2017; Matra, 2017; Wu และคนอื่น ๆ, 2018)

4.8 การศึกษาอิทธิพลของเวลาในการฉายพลาสติกที่มีต่อการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีน

การทดลองนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการบำบัดเมล็ดไมโครกรีนด้วยพลาสติกที่มีต่อการกระตุ้นการงอกและการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน และอิทธิพลของน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกเป็นเวลาต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการงอกและอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน โดยทำการบำบัดเมล็ดไมโครกรีนเป็นเวลา 2 และ 4 นาที และน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกเป็นเวลา 0 1 5 และ 10 นาที จะถูกนำมารดและแช่เมล็ดไมโครกรีน

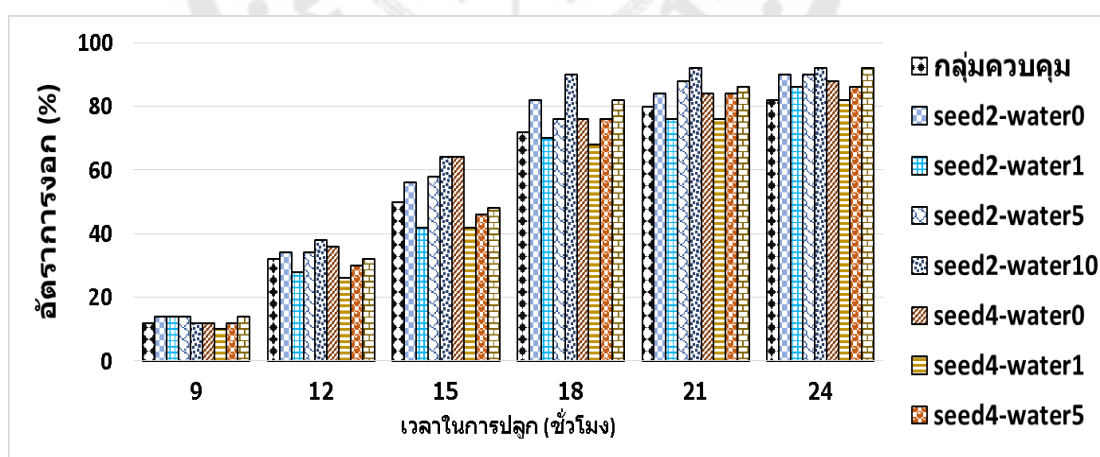
4.8.1 อัตราการงอก

อัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีนในการทดลองนี้จะถูกวัดหลังจากปลูก 9 ชั่วโมง ทุก ๆ 3 ชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยลักษณะของเมล็ดที่ถูกนับว่างอกคือเมล็ดที่มีหน่อสีขาว

งอกออกมาจากเมล็ด หลังจากนั้นจำนวนเมล็ดที่งอกทั้งหมดในแต่ละกลุ่มจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับจำนวนเมล็ดทั้งหมดในกลุ่มนั้น ๆ เพื่อหาอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีน

ตาราง 8 ผลอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีน

กลุ่มการ ทดลอง	เวลาที่ใช้ในการปลูกเมล็ดไมโครกรีน (ชั่วโมง)					
	9	12	15	18	21	24
Seed2-water0	14%	34%	56%	82%	84%	90%
Seed2-water1	14%	28%	42%	70%	76%	86%
Seed2-water5	14%	34%	58%	76%	88%	90%
Seed2-water10	12%	38%	64%	90%	92%	92%
Seed4-water0	12%	36%	64%	76%	84%	88%
Seed4-water1	10%	26%	42%	68%	76%	82%
Seed4-water5	12%	30%	46%	76%	84%	86%
Seed4-water10	14%	32%	48%	82%	86%	92%
กลุ่มควบคุม	12%	32%	50%	72%	80%	82%



ภาพประกอบ 38 กราฟอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีนที่ชั่วโมงต่าง ๆ หลังจากการปลูก

จากตารางที่ 8 และภาพประกอบ 35 กำหนดให้ seed2 และ seed4 คือกรณีที่เมล็ดไมโครกรีนถูกบำบัดด้วยพลาสติกเป็นเวลา 2 และ 4 นาที ตามลำดับ และ water0 water1 water5

และ water10 คือกรณีที่ไม่ผลิตไมโครกรีนฤดูร้อนและแช่ด้วยน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นเวลา 0 1 5 และ 10 นาที ตามลำดับ

จากผลอัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีนที่ชั่วโมงต่าง ๆ หลังจากการปลูกทำให้ทราบว่าในช่วงแรกของการปลูกตั้งแต่ 9 ถึง 15 ชั่วโมงหลังจากการปลูก กลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสมาเป็นเวลา 2 นาที และแช่ด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นเวลา 0 5 และ 10 นาที มีแนวโน้มที่อัตราการงอกนั้นดีกว่ากลุ่มควบคุม ในขณะที่กลุ่มอื่น ๆ มีอัตราการงอกที่น้อยกว่ากลุ่มควบคุม หลังจากการปลูกเป็นเวลา 18 ถึง 21 ชั่วโมง อัตราการงอกของกลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสมาแทบทุกกลุ่มมีค่ามากกว่ากลุ่มควบคุม ยกเว้นกลุ่มที่ได้รับการแช่ด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นเวลา 1 นาที จนกระทั่งในชั่วโมงที่ 24 อัตราการงอกของกลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสมาทุกกลุ่มมีค่ามากกว่ากลุ่มควบคุม ทั้งนี้กลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสมาเป็นเวลา 2 นาที มีอัตราการงอกที่ดีกว่ากลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสมาเป็นเวลา 4 นาที นอกจากนี้การแช่เมล็ดไมโครกรีนด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นเวลา 10 นาที ส่งผลต่ออัตราการงอกดีกว่ากลุ่มที่ไม่ผลิตไมโครกรีนที่ได้รับการแช่ด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาที่เวลาอื่น ๆ ดังนั้นกลุ่มที่มีอัตราการงอกดีที่สุดคือกลุ่มที่ไม่ผลิตไมโครกรีนที่ได้รับการแช่ด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นเวลา 10 นาที ทั้งกรณีที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมาเป็นเวลา 2 และ 4 นาที ซึ่งทั้งสองกรณีมีอัตราการงอก 92% ในขณะที่กลุ่มควบคุมมีอัตราการงอก 82%

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถบ่งบอกได้ว่ากลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสมาทุกกลุ่มมีอัตราการงอกที่ดีกว่ากลุ่มควบคุม เนื่องจากอิทธิพลของอนุมูลอิสระในพลาสมาที่หลากหลาย เช่น $\text{OH}^{\cdot}$ สารประกอบออกซิเจน และสารประกอบไนโตรเจน โดยอนุมูลอิสระดังกล่าวมีส่วนช่วยในการกัดกร่อนผิวของเมล็ดพันธุ์พืช เพื่อให้ผิวของเมล็ดพันธุ์พืชเรียบขึ้นซึ่งส่งผลต่อการดูดซึมน้ำได้ดีขึ้น ดังนั้นอัตราการงอกของเมล็ดพืชจึงดีขึ้น นอกจากนี้อนุมูลอิสระบางชนิดสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราบางชนิดที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการงอกของเมล็ดพืชที่ลดลง ดังนั้นอัตราการงอกของเมล็ดพืชที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสมาจึงมากขึ้น (Khamseen และคนอื่น ๆ, 2016; Matra, 2017; Shaw และคนอื่น ๆ, 2018)

นอกจากนี้อัตราการงอกของกลุ่มที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมาเป็นเวลา 2 นาทีดีกว่ากลุ่มที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมาเป็นเวลา 4 นาที เพราะว่าการประยุกต์ใช้พลาสมา ณ ความดันบรรยากาศ ด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงจะส่งผลให้เกิดการสะสมความร้อนในอุปกรณ์ในระบบเครื่องมือต้นแบบ รวมไปถึงเมล็ดพันธุ์พืชที่อยู่ในกระบวนการบำบัดด้วยพลาสมา ดังนั้นการบำบัดเมล็ดพันธุ์พืชด้วยพลาสมาเป็นเวลานานจึงทำให้อัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์พืชมีค่าลดลง

เนื่องจากความร้อนที่สะสมเริ่มส่งผลเสียต่อเมล็ดพันธุ์พืช (Matra, 2017) และอาจจะเป็นไปได้ว่า การบำบัดเมล็ดไมโครกรีนเป็นเวลานานส่งผลให้การดูดซึมน้ำของเมล็ดไมโครกรีนดีเกินกว่าความต้องการน้ำของเมล็ด ซึ่งก็อาจจะเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้อัตราการงอกของเมล็ดไมโครกรีนที่ได้รับการบำบัดเป็นเวลา 2 นาที ดีกว่าเมล็ดไมโครกรีนที่ได้รับการบำบัดเป็นเวลา 4 นาที

จากผลการทดลองสามารถสังเกตได้ว่ากลุ่มที่ได้รับการแช่ด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นเวลา 10 นาที มีอัตราการงอกที่ดีกว่ากลุ่มที่แช่ด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาในเวลานอื่น ๆ เนื่องจากการกระตุ้นน้ำประปาด้วยพลาสมาเป็นเวลานานส่งผลให้ความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนและออกซิเจนมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสารประกอบดังกล่าวบางชนิดสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราที่ส่งผลต่อการลดอัตราการงอกและการเกิดโรคในเมล็ดพันธุ์พืช ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้เมล็ดพันธุ์พืชที่ถูกแช่และรดด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาดังกล่าวมีอัตราการงอกที่ดีขึ้น (Bafoil และคนอื่น ๆ, 2018; Shaw และคนอื่น ๆ, 2018)

4.8.2 อัตราการเจริญเติบโต

อัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีนในการทดลองนี้จะถูกวิเคราะห์ด้วยความยาวลำต้นของพืชไมโครกรีนและน้ำหนักแห้งของพืชไมโครกรีนหลังจากการปลูกเป็นเวลา 7 วัน โดยความยาวลำต้นของพืชไมโครกรีนทุกต้นในแต่ละกลุ่มจะถูกนำมาเฉลี่ยเพื่อหาความยาวลำต้นเฉลี่ยของพืชไมโครกรีนในแต่ละกลุ่ม ในส่วนของน้ำหนักแห้ง น้ำหนักของพืชไมโครกรีนแต่ละกลุ่มจะถูกวัดหลังจากอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักรวมในแต่ละกลุ่มจะนำมาหารด้วยจำนวนพืชไมโครกรีนในแต่ละกลุ่มเพื่อหาค่าน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพืชไมโครกรีน แล้วนำมาเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (control)

4.8.2.1 ความยาวลำต้นเฉลี่ย

ตาราง 9 การเปรียบเทียบความยาวลำต้นของพืชไมโครกรีนในกลุ่มที่ใช้เวลาในการบำบัดเมล็ดพืชเดียวกัน หลังจากได้รับการปลูกเป็นเวลา 7 วัน

กลุ่มที่เมล็ดถูกบำบัด
เป็นเวลา 2 นาที



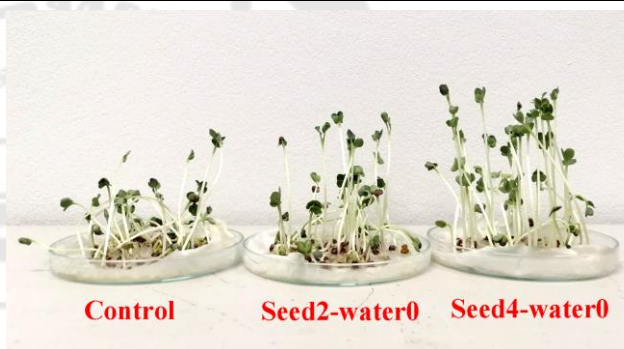
ตาราง 9 (ต่อ)

กลุ่มที่เมล็ดถูกบำบัด
เป็นเวลา 4 นาที

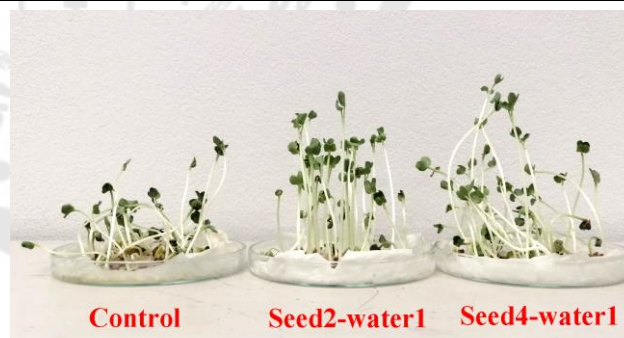


ตาราง 10 การเปรียบเทียบความยาวลำต้นของพืชไมโครกรีนในกลุ่มที่รดด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นเวลาเดียวกัน หลังจากได้รับการปลูกเป็นเวลา 7 วัน

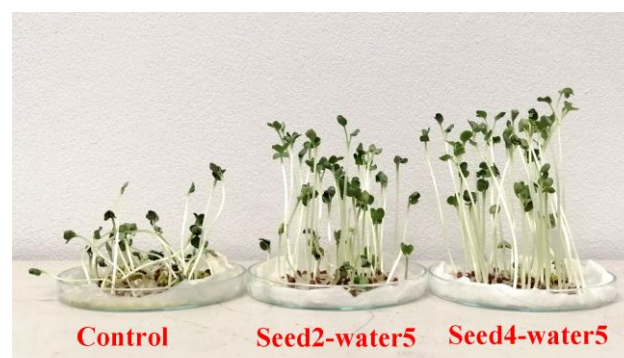
กลุ่มที่น้ำถูกกระตุ้นด้วย
พลาสมาเป็นเวลา 0 นาที



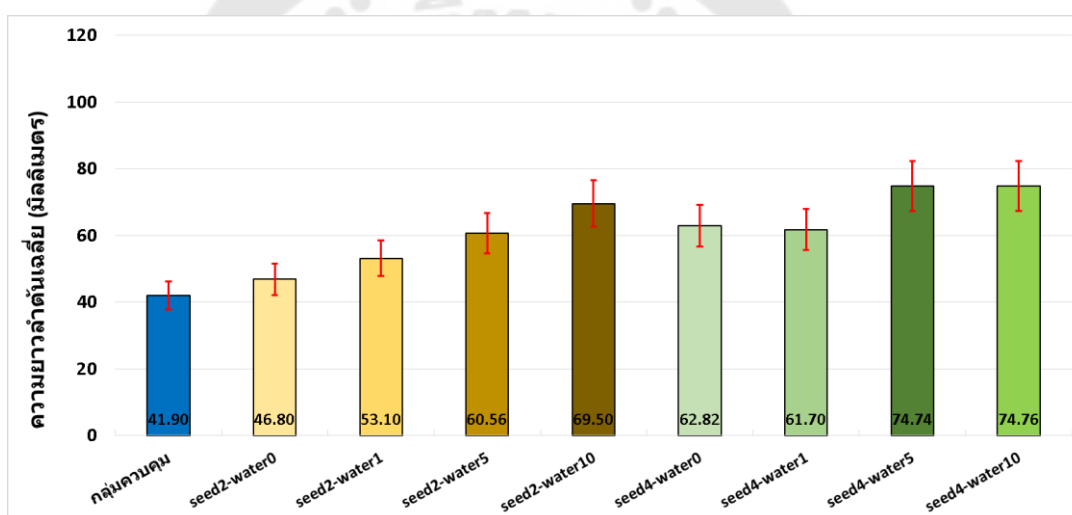
กลุ่มที่น้ำถูกกระตุ้นด้วย
พลาสมาเป็นเวลา 1 นาที



กลุ่มที่น้ำถูกกระตุ้นด้วย
พลาสมาเป็นเวลา 5 นาที



ตาราง 10 (ต่อ)

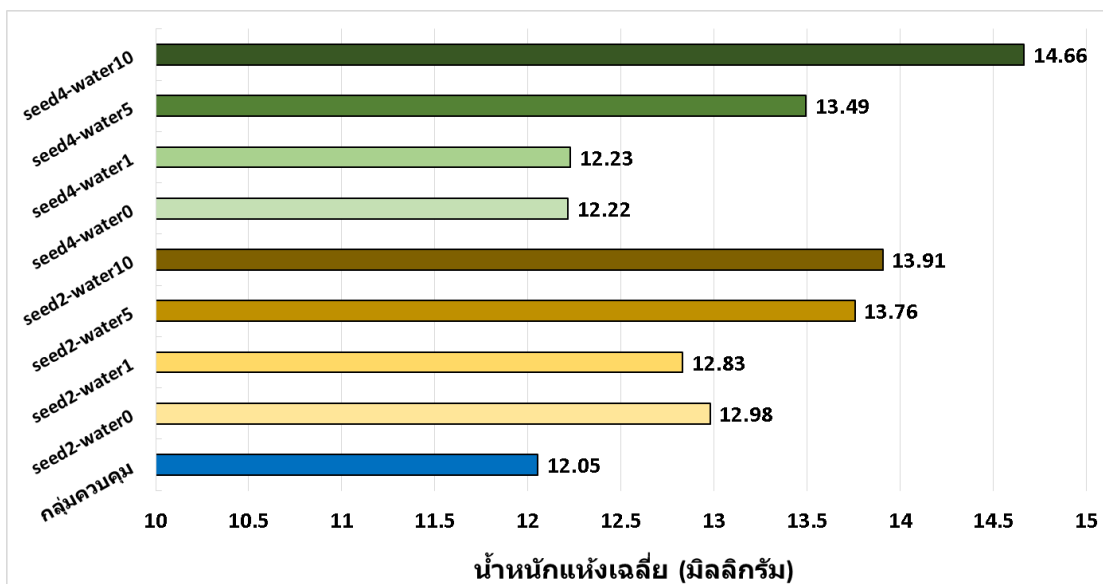


ภาพประกอบ 39 กราฟความยาวลำต้นเฉลี่ยของพืชไมโครกรีนหลังจากปลูกเป็นเวลา 7 วัน

จากผลความยาวลำต้นเฉลี่ยของพืชไมโครกรีนหลังจากการปลูกเป็นเวลา 7 วัน ทำให้ทราบว่ากลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสมาทุกกลุ่มมีความยาวลำต้นเฉลี่ยมากกว่ากลุ่มควบคุม โดยความยาวลำต้นเฉลี่ยของกลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสมาเป็นเวลา 4 นาที มีค่ามากกว่ากลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสมาเป็นเวลา 2 นาที นอกจากนี้กลุ่มที่ได้รับการรดน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นเวลานาน ๆ จะส่งผลต่อความยาวลำต้นเฉลี่ยได้ดีกว่ากลุ่มที่ได้รับการรดน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นเวลาน้อย ๆ ดังนั้นกลุ่มที่มีความยาวลำต้นเฉลี่ยมากที่สุดคือกลุ่มที่บำบัดด้วยพลาสมาเป็นเวลา 4 นาที และรดด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นเวลา 10 นาที

โดยมีความยาวลำต้นเฉลี่ยอยู่ที่ 74.76 มิลลิเมตร ซึ่งมากกว่ากลุ่มควบคุมที่มีความยาวลำต้นเฉลี่ย 41.90 มิลลิเมตร ประมาณ 1.784 เท่า

4.8.2.2 น้ำหนักแห้งเฉลี่ย



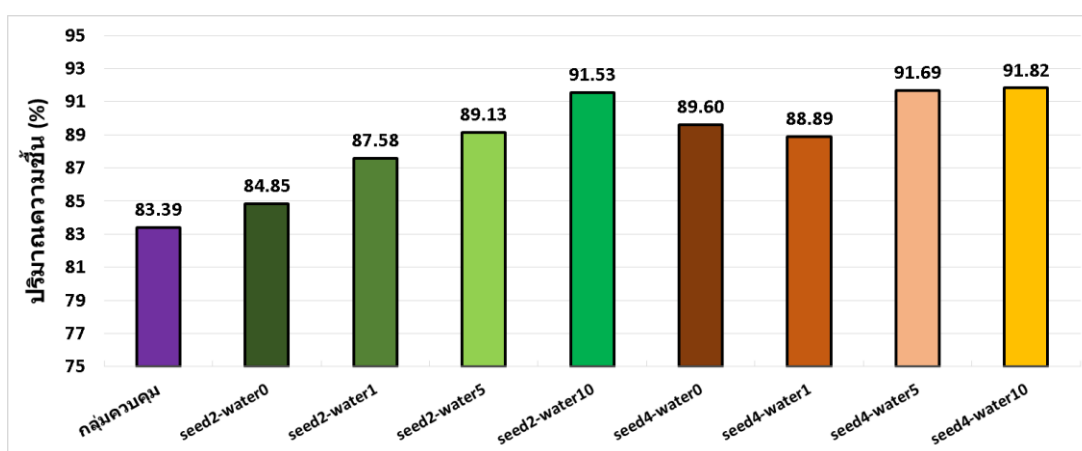
ภาพประกอบ 40 กราฟน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของพืชไมโครรีนหลังจากการปลูกเป็นเวลา 7 วัน

จากผลน้ำหนักแห้งเฉลี่ยทำให้ทราบว่าทุกกลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสติกมีน้ำหนักแห้งเฉลี่ยมากกว่ากลุ่มควบคุม โดยพืชไมโครรีนที่ได้รับการรดด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกเป็นเวลา 0 1 และ 5 นาที จะมีน้ำหนักแห้งเฉลี่ยที่ดีกว่าเมื่อกลุ่มดังกล่าวถูกบำบัดด้วยพลาสติกเป็นเวลา 2 นาที นอกจากนี้กลุ่มที่ได้รับการรดน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกเป็นเวลา 4 นาที จะส่งผลต่อน้ำหนักแห้งเฉลี่ยได้ดีกว่ากลุ่มที่ได้รับการรดน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกเป็นเวลา น้อย ๆ ดังนั้นกลุ่มที่มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ยมากที่สุดคือกลุ่มที่ถูกบำบัดด้วยพลาสติกเป็นเวลา 4 นาที และรดด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกเป็นเวลา 10 นาที โดยมีน้ำหนักแห้งเฉลี่ยอยู่ที่ 14.66 มิลลิกรัม ซึ่งมากกว่ากลุ่มควบคุมที่มีความยาวลำต้นเฉลี่ย 12.05 มิลลิเมตร ประมาณ 21.66%

จากผลการวัดความยาวลำต้นเฉลี่ยและน้ำหนักแห้งเฉลี่ยสามารถบ่งบอกได้ว่ากลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสติกเป็นเวลา 4 นาที และได้รับการรดด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกเป็นเวลา 10 นาที มีอัตราการเจริญเติบโตที่ดีที่สุด อันเนื่องมาจากผลของอัตราการงอกที่ดี การดูดซึมน้ำและสารอาหารที่สำคัญต่อการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชที่ดี และที่สำคัญคือ อิทธิพลของอนุมูลอิสระในพลาสติกและในน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกที่ส่งผลต่อการเร่งการเจริญเติบโตของพืชไมโครรีน โดยสารประกอบไนโตรเจนที่มีอยู่ในพลาสติกและน้ำที่ถูกกระตุ้น

ด้วยพลาสติกเป็นหนึ่งในอนุมูลิสรที่สำคัญที่เป็นส่วนประกอบของปุ๋ยซึ่งสามารถช่วยเร่งการเจริญเติบโตของต้นไมโครกรีนได้ส่วนหนึ่ง นอกจากนี้สารประกอบออกซิเจนก็มีส่วนช่วยในการยับยั้งเชื้อราและจุลินทรีย์ที่มีผลทำให้เกิดโรคในพืช ซึ่งโรคบางชนิดในพืชทำให้พืชเจริญเติบโตช้า ดังนั้นการบำบัดด้วยพลาสติกและการรดน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกจึงเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้เกิดการยับยั้งเชื้อราและจุลินทรีย์ดังกล่าว จนกระทั่งอัตราการเจริญเติบโตของพืชไมโครกรีนดีขึ้น (Bafoil และคนอื่น ๆ, 2018; Khamseen และคนอื่น ๆ, 2016; Matra, 2017)

4.8.3 ปริมาณความชื้น



ภาพประกอบ 41 ปริมาณความชื้นของพืชไมโครกรีนหลังจากการปลูกเป็นเวลา 7 วัน

จากผลการวัดปริมาณความชื้นจะสามารถสังเกตได้ว่าผลของความชื้นมีแนวโน้มที่คล้ายกันกับผลของความยาวลำต้นเฉลี่ยของพืชไมโครกรีน ทุกกลุ่มที่ถูกบำบัดด้วยพลาสติกมีปริมาณความชื้นที่ดีกว่ากลุ่มควบคุม โดยปริมาณความชื้นของพืชไมโครกรีนจะมากขึ้นตามกลุ่มที่ได้รับการรดด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกเป็นเวลาที่มากขึ้น นอกจากนี้กลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสติกเป็นเวลา 4 นาที มีปริมาณความชื้นมากกว่ากลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยพลาสติกเป็นเวลา 2 นาที ดังนั้นกลุ่มที่มีปริมาณความชื้นมากที่สุดคือกลุ่มที่บำบัดด้วยพลาสติกเป็นเวลา 4 นาที และรดด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกเป็นเวลา 10 นาที โดยมีปริมาณความชื้นอยู่ที่ 91.82% ซึ่งมากกว่ากลุ่มควบคุมที่มีความยาวลำต้นเฉลี่ย 83.39%

ปริมาณความชื้นของพืชสามารถบ่งบอกได้ถึงการดูดซึมน้ำของต้นพืช โดยพืชที่ดูดซึมน้ำได้ดีย่อมดูดซึมแร่ธาตุซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ดี ดังนั้นพืชไมโครกรีนที่มีปริมาณความชื้นที่มากจึงมีความเป็นไปได้ที่จะมีอัตราการเจริญเติบโตที่ดีกว่ากลุ่มอื่น ๆ ซึ่งผล

ของปริมาณความชื้นที่วัดได้จากการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการวัดอัตราการเจริญเติบโตของพืช
ไมโครกรีน (Jiafeng และคนอื่น ๆ, 2014)



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุป

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของพลาสมาอุณหภูมิต่ำ ณ ความดันบรรยากาศที่สร้างขึ้นจากเครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบหลายเข็มที่มีต่อการกระตุ้นการงอกและการเจริญเติบโตของพืชไมโครกรีน โดยได้ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ

(1) ส่วนของการจำลองการจัดวางเข็มแอโนดของเครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบหลายเข็มด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปในการสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอ โดยทำการจัดวางเข็มแอโนดที่ระยะห่างระหว่างเข็มแอโนดที่แตกต่างกันที่ 2.5, 5 และ 7.5 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองในส่วนนี้ทำให้ทราบว่าเส้นสมศักย์มีอิทธิพลต่อลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้า โดยความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูงจะมีค่ามากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างเข็มแอโนด ในขณะที่การลดระยะห่างระหว่างเข็มแอโนดทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าลดลงและเกิดสนามไฟฟ้าที่เสมือนว่ามีความสม่ำเสมอสูง ซึ่งลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าลักษณะนี้สามารถส่งผลต่อการสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้ จากผลการจำลองดังกล่าวทำให้ได้ข้อสรุปว่าการทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอต่อไป เครื่องมือต้นแบบต้องมีระยะห่างระหว่างเข็มแอโนดที่ไม่กว้างและแคบจนเกินไป ซึ่งระยะห่างระหว่างเข็มที่เหมาะสมที่สุดในงานนี้คือ 5 มิลลิเมตร

จากนั้นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการจำลองการจัดวางเข็มแอโนดดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้เพื่อสร้างเครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบหลายเข็ม จากนั้นเครื่องมือต้นแบบที่สร้างขึ้นถูกนำไปศึกษาการสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่แตกต่างกันที่ 14, 16, 18 และ 20 มิลลิเมตร โดยจากผลการศึกษาทำให้ทราบว่าเครื่องมือต้นแบบสามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอขึ้นได้จริงที่ช่วงของแรงดันแหล่งจ่ายตั้งแต่ 10-16, 12-18, 14-22 และ 16 - 30 กิโลโวลต์ ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 14, 16, 18 และ 20 มิลลิเมตร โดยระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่เลือกใช้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนด้วยพลาสมาต่อไปคือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 20 มิลลิเมตร ดังนั้นพลาสมาที่นำไปปรับปรุงเมล็ดไมโคร

กรีนจะถูกสร้างขึ้นที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 20 มิลลิเมตร ด้วยแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 30 กิโลโวลต์

(2) ส่วนของการใช้พลาสติกในการกระตุ้นการงอกและการเจริญเติบโตของพืชไมโครกรีนด้วยวิธีต่าง ๆ โดยการทดลองมีทั้งหมด 2 การทดลอง

ในส่วนแรกคือการทดลองศึกษาการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนด้วยพลาสติกที่ถูกสร้างขึ้นด้วยชนิดของแคโทดที่แตกต่างกัน (แผ่นทองแดงและน้ำประปา) เป็นเวลา 2 นาที โดยจากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การบำบัดเมล็ดไมโครกรีนบนแคโทดแบบแผ่นทองแดงให้ผลของอัตราการงอกและการเจริญเติบโตของพืชไมโครกรีนที่ดีกว่าการบำบัดเมล็ดไมโครกรีนบนแคโทดแบบน้ำประปาประมาณ 2% และ 1.54 เท่า ตามลำดับ โดยจากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่า แคโทดแบบแผ่นทองแดงมีความนำไฟฟ้ามากกว่าแคโทดแบบน้ำประปา โดยแคโทดที่มีความนำไฟฟ้ามากจะส่งผลต่อการเกิดอิเล็กตรอน ไฮดรอน และกระบวนการแตกตัวของแก๊สได้ดีกว่า ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากการสร้างพลาสติกด้วยแคโทดแบบแผ่นทองแดงมีความเข้มข้นมากกว่าการสร้างพลาสติกด้วยแคโทดแบบน้ำประปา โดยทั่วไปอนุมูลอิสระดังกล่าวที่สามารถวัดได้จากการทดลองนี้มีประโยชน์ในการปรับปรุงการงอกและการเจริญเติบโตของเมล็ดพืช ดังนั้นความเข้มข้นของอนุมูลอิสระจากพลาสติกที่ถูกสร้างขึ้นด้วยแคโทดแบบแผ่นทองแดงจึงส่งผลต่อการปรับปรุงการงอกและการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีนได้ดีกว่า แคโทดแบบน้ำประปา

ในส่วนที่สองคือการทดลองศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการบำบัดเมล็ดไมโครกรีนด้วยพลาสติกเป็นเวลา 2 และ 4 นาที และอิทธิพลของน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกเป็นเวลา 1, 5 และ 10 นาที แล้วนำไปแช่และรดเมล็ดไมโครกรีนขณะทำการปลูกที่มีต่อการปรับปรุงการงอกและการเจริญเติบโตของเมล็ดไมโครกรีน โดยจากผลการทดลองทำให้ทราบว่า กรณีที่ให้ผลอัตราการงอกที่ดีที่สุดคือบำบัดเมล็ดไมโครกรีนด้วยพลาสติกเป็นเวลา 4 นาที และรดด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกเป็นเวลา 10 นาที ซึ่งให้ผลที่ดีกว่ากลุ่มควบคุมประมาณ 10% ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากสารประกอบไนโตรเจนและออกซิเจนในพลาสติกที่สามารถวัดได้ในงานวิจัยนี้มีอิทธิพลต่อการปรับปรุงผิวของเมล็ดพืช ซึ่งส่งผลต่อการดูดซึมน้ำและอัตราการงอกที่ดีขึ้น

ในส่วนของการอัตราการเจริญเติบโต การใช้ น้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกเป็นเวลานานเพื่อนำมาแช่และรดเมล็ดไมโครกรีนมีส่วนช่วยในการปรับปรุงอัตราการเจริญเติบโตของพืชไมโครกรีน โดยกรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดคือบำบัดเมล็ดไมโครกรีนด้วยพลาสติกเป็นเวลา 4 นาที และรดด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกเป็นเวลา 10 นาที ซึ่งมีความยาวลำต้นและน้ำหนัก

แห้งมากกว่ากลุ่มควบคุมประมาณ 78.42% และ 21.66% ตามลำดับ ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมและการวัดคุณสมบัติทางแสงของพลาสติกในงานวิจัยนี้สามารถบ่งบอกได้ว่าการกระตุ้นน้ำประปาด้วยพลาสติกส่งผลให้สารประกอบไนโตรเจนในน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกมีความเข้มข้นมากขึ้น โดยยิ่งเวลาในการกระตุ้นน้ำประปามีเวลามากทำให้ความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนมากขึ้นตามไปด้วย โดยทั่วไปสารประกอบไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบของปุ๋ยซึ่งมีส่วนช่วยในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช ดังนั้นการปรับปรุงการเจริญเติบโตของพืชไมโครกรีนด้วยน้ำประปาที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสติกเป็นเวลานานให้ผลที่ดีที่สุด

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

(1) ในห้องวิจัยมีอุปกรณ์ในการวัดและการทดลองที่ไม่เพียงพอ ดังนั้นผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องทำเรื่องขอยืมอุปกรณ์การวิจัยจากที่อื่นซึ่งส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการทดลอง

(2) เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยมีจำกัด ดังนั้นการวัดและการทดลองบางอย่างอาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ เนื่องจากจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อื่นมาทดแทนอุปกรณ์ที่ไม่มีในห้องวิจัย

(3) การทดลองนี้เป็นการทดลองกับสิ่งมีชีวิต ดังนั้นการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เพื่อให้ผลการทดลองออกมาให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจึงเป็นเรื่องยาก

(4) ในการทดลองนี้เป็นการทดลองสร้างพลาสติกกับน้ำซึ่งมีพื้นผิวที่ไม่คงที่ ดังนั้นการสร้างพลาสติกบนผิวน้ำจึงเป็นเรื่องยาก จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อื่น ๆ ช่วยส่งเสริมให้สร้างพลาสติกสามารถสร้างบนผิวน้ำได้ง่ายขึ้น

(5) เครื่องมือต้นแบบชนิดดิสชาร์จแบบหลายเข็มในการทดลองนี้สามารถสร้างพลาสติกที่มีความสม่ำเสมอขึ้นได้ แต่เมื่อใส่เมล็ดเข้าไปในเครื่องมือต้นแบบพลาสติกที่สร้างขึ้นมีความสม่ำเสมอลดลง เนื่องจากเมล็ดไมโครกรีนที่ใส่เข้าไปในเครื่องมือต้นแบบมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งการสร้างพลาสติกบนฉนวนไฟฟ้ามีความยากมากกว่าสร้างพลาสติกบนผิวน้ำไฟฟ้า

5.3 ข้อเสนอแนะ

(1) การประยุกต์ใช้พลาสติกกับเมล็ดพืชซึ่งมีการตอบสนองต่อสิ่งเร้าได้ง่ายจึงมีความจำเป็นต้องใช้พลาสติกอุณหภูมิต่ำในการทดลองเท่านั้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงสามารถส่งผลเสียต่อเมล็ดพืชได้

(2) การทำการทดลองกับไฟฟ้าแรงสูงควรมีการป้องกันอย่างรอบคอบเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่อผู้ทดลอง

(3) การทดลองกับพืชจำเป็นต้องมีการวัดผลอย่างแม่นยำและตรงเวลาเนื่องจากพืชมีการเจริญเติบโตอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการวัดผลที่ล่าช้าจะส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองได้



บรรณานุกรม

- Ahn, H. J., Kim, K. I., Hoan, N. N., Kim, C. H., Moon, E., Choi, K. S., . . . Lee, J.-S. (2014). Targeting cancer cells with reactive oxygen and nitrogen species generated by atmospheric-pressure air plasma. *PloS one*, 9(1).
- Al-Hamouz, Z. M. (1999). Corona power loss on bundled conductors: Experimental and computational results. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35(6), 1277-1283.
- Altamimi, G., Illias, H., Mokhtar, N., Mokhlis, H., และ Bakar, A. (2014). *Corona discharges under various types of electrodes*. Paper presented at the 2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon).
- Bafoil, M., Jemmat, A., Martinez, Y., Merbahi, N., Eichwald, O., Dunand, C., และ Yousfi, M. (2018). Effects of low temperature plasmas and plasma activated waters on *Arabidopsis thaliana* germination and growth. *PloS one*, 13(4), e0195512.
- Bousiou, E., Mikropoulos, P., และ Zagkanas, V. (2017). *Experimental investigation of negative DC corona on conductor bundles: A comparison with positive corona*. Paper presented at the 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC).
- Chen, F. F. (1984). *Introduction to plasma physics and controlled fusion* (1): Springer.
- Chen, H. H., Chang, H. C., Chen, Y. K., Hung, C. L., Lin, S. Y., และ Chen, Y. S. (2016). An improved process for high nutrition of germinated brown rice production: Low-pressure plasma. *Food chemistry*, 191, 120-127.
- Dobrin, D., Magureanu, M., Mandache, N. B., และ Ionita, M.-D. (2015). The effect of non-thermal plasma treatment on wheat germination and early growth. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 29, 255-260.
- Jiafeng, J., Xin, H., Ling, L., Jiangang, L., Hanliang, S., Qilai, X., . . . Yuanhua, D. (2014). Effect of cold plasma treatment on seed germination and growth of wheat. *Plasma Science and Technology*, 16(1), 54.
- Khamsen, N., Onwimol, D., Teerakawanich, N., Dechanupaprittha, S., Kanokbannakorn,

- W., Hongesombut, K., และ Srisonphan, S. (2016). Rice (*Oryza sativa* L.) seed sterilization and germination enhancement via atmospheric hybrid nonthermal discharge plasma. *ACS applied materials & interfaces*, 8(30), 19268-19275.
- Kim, J. W., Puligundla, P., และ Mok, C. (2017). Effect of corona discharge plasma jet on surface-borne microorganisms and sprouting of broccoli seeds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(1), 128-134.
- Kim, Y. H., Hong, Y. J., Baik, K. Y., Kwon, G. C., Choi, J. J., Cho, G. S., . . . Choi, E. H. (2014). Measurement of reactive hydroxyl radical species inside the biosolutions during non-thermal atmospheric pressure plasma jet bombardment onto the solution. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 34(3), 457-472.
- Lee, L., และ Kim, Y. (2012). Low-Voltage Atmospheric-Plasma Generation by Utilizing Afterglow Initiation Carrier. *IEEE transactions on plasma science*, 41(1), 155-158.
- Ling, L., Jiangang, L., Minchong, S., Chunlei, Z., และ Yuanhua, D. (2015). Cold plasma treatment enhances oilseed rape seed germination under drought stress. *Scientific Reports*, 5, 13033.
- Lloyd, G., Friedman, G., Jafri, S., Schultz, G., Fridman, A., และ Harding, K. (2010). Gas Plasma: Medical Uses and Developments in Wound Care. *Plasma Processes and Polymers*, 7(3-4), 194-211.
- Matra, K. (2013). Characteristics of micro plasma jet in SEM and its applications.
- Matra, K. (2017). Atmospheric non-thermal argon-oxygen plasma for sunflower seedling growth improvement. *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(1S), 01AG03.
- Matra, K., Furuta, H., และ Hatta, A. (2013). *Current-voltage characteristics of dc discharge in micro gas jet injected into vacuum environment*. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.
- Matra, K., Tanakaran, Y., Temponsub, T., Nimbua, S., Thab-in, P., และ Pluksa, C. (2019). Electrical Characteristics of Atmospheric Air Corona Plasma by Multi-pin Electrodes. 2019, 14(3).
- Plasma Universe. (2562a). www.plasma-universe.com
- Plasma Universe. (2562b). www.plasma-universe.com

- Randhawa, H. (1988). Cathodic arc plasma deposition technology. *Thin Solid Films*, 167(1), 175-186.
- Roe, N. E. (2006). *Growing microgreens: maybe the ultimate specialty crop!* Paper presented at the Proceedings of the Florida State Horticultural Society.
- Saengha, W., Karirat, T., Buranrat, B., Matra, K., Deeseenthum, S., และ Luang-In, V. (2019). Plasma Technology and Abiotic Elicitor Effectively Increased Isothiocyanates, Bioactive Compounds and Cytotoxicity against Caco2 Cells in Mustard Green Microgreen Extract.
- Schutze, A., Jeong, J. Y., Babayan, S. E., Park, J., Selwyn, G. S., และ Hicks, R. F. (1998). The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources. *IEEE transactions on plasma science*, 26(6), 1685-1694.
- Shaw, P., Kumar, N., Kwak, H. S., Park, J. H., Uhm, H. S., Bogaerts, A., . . . Attri, P. (2018). Bacterial inactivation by plasma treated water enhanced by reactive nitrogen species. *Scientific Reports*, 8(1), 1-10.
- Shin, W.-T., Yiacoumi, S., Tsouris, C., และ Dai, S. (2000). A pulseless corona-discharge process for the oxidation of organic compounds in water. *Industrial & engineering chemistry research*, 39(11), 4408-4414.
- Sookwong, P., Yodpitak, S., Doungkaew, J., Jurithayo, J., Boonyawan, D., และ Mahatheeranont, S. (2014). Application of oxygen-argon plasma as a potential approach of improving the nutrition value of pre-germinated brown rice. *Journal of Food and Nutrition Research*, 2(12), 946-951.
- Tucker, G. (2003). Nutritional enhancement of plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 14(2), 221-225.
- Wang, X., Zhou, M., และ Jin, X. (2012). Application of glow discharge plasma for wastewater treatment. *Electrochimica Acta*, 83, 501-512.
- Willett, W. C. (2002). Balancing life-style and genomics research for disease prevention. *Science*, 296(5568), 695-698.
- Wright, W., และ Rowell, L. (2010). Examining the effect of gardening on vegetable consumption among youth in kindergarten through fifth grade. *Wisconsin Medical*

Journal (WMJ), 109(3), 125.

Wu, M.-C., Liu, C.-T., Chiang, C.-Y., Lin, Y.-J., Lin, Y.-H., Chang, Y.-W., และ Wu, J.-S.

(2018). Inactivation Effect of Colletotrichum Gloeosporioides by Long-Lived Chemical Species Using Atmospheric-Pressure Corona Plasma-Activated Water. *IEEE transactions on plasma science*, 47(2), 1100-1104.

Xiao, Z., Nou, X., Luo, Y., และ Wang, Q. (2014). Comparison of the growth of *Escherichia coli* O157: H7 and O104: H4 during sprouting and microgreen production from contaminated radish seeds. *Food microbiology*, 44, 60-63.

น้ำหอมจันทร์, ธ. (2555). การออกแบบสร้างชุดทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนไนในนวนอากาศ สำหรับความดันอากาศ -30 ถึง 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ระยะแกป 1 ถึง 5 มิลลิเมตร. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

ภพลภ, ฉ. (2555). เบรกดาวนไนในก๊าซ. <http://chatchaiee54.blogspot.com/2012/01/5.html>

มัจฉาชีพ, อ., สุขนิคม, ส., บุตรใส, จ., ทองรักษ์, พ., ชัยศรี, อ., มณีน้อย, อ., ... เจริญศรีสัมพันธ์, ส. (2557). การศึกษาการผลิตไมโครกรีนพืชพื้นบ้านเพื่อการค้าในสภาพโรงเรือน.

มาตรา, ค. (2559). โครงการวิจัยเครื่องกำเนิดล้าพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศเพื่อกระตุ้นการงอกของเมล็ดพันธุ์พืช. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. (ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ ไฟฟ้า).

มาตรา, ค., แซ่เอี้ย, ก., ธนินทรานุกโคตร, ว., และ ธนการณย์, ย. (2559). พลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศเพื่อการปรับปรุงเมล็ดพันธุ์ข้าวหอมมะลิ. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. (วิศวกรรมไฟฟ้า).

มิตรายน, ล. (2555). การพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาความหนาแน่นสูงที่ความดันบรรยากาศแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศรีสรนัตร, ศ. (2546). เคมีวิเคราะห์สำหรับวิศวกรรมเคมี. กรุงเทพฯ.

สระเงินสิงห์, ป., และ แก้วตาปี, ธ. (2548). กลไกเบรกดาวนไนของทาวนไนเซนด.

หาระโคตร, พ., จิระเกียรติกุล, เ., และ ฤทธิไชย, ภ. (2019). ผลของสารกระตุ้นชีวภาพต่อปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระในไมโครกรีนผักพื้นเมืองวงศ์ Brassicaceae. *Thai Science and Technology Journal*, 109-123.





ภาคผนวก ก

ข้อมูลของการศึกษาอิทธิพลของพลาสมาที่สร้างจากลักษณะของแคโทดที่แตกต่างกัน

ตาราง 11 ความยาวลำต้นของเมล็ดไมโครกรีนจำนวน 50 เมล็ด (มิลลิเมตร)

แผ่นทองแดง	น้ำประปา	กลุ่มควบคุม
10	20	15
20	10	10
15	1	1
30	15	1
10	1	1
0	15	15
0	10	15
50	1	0
40	1	1
60	20	15
50	30	1
100	30	10
55	30	1
60	30	1
30	25	1
90	25	1
50	20	1
45	20	5
75	1	5
75	1	1
100	1	5
100	1	5
50	1	1
80	25	1

ตาราง 11 (ต่อ)

แผ่นทองแดง	น้ำประปา	กลุ่มควบคุม
50	30	1
60	60	5
40	10	1
50	75	1
90	50	50
50	45	40
75	100	65
75	60	20
50	70	60
40	70	40
40	65	40
55	75	60
55	35	45
55	40	30
75	45	65
75	35	30
65	35	30
90	50	35
60	45	45
90	45	60
110	35	40
90	85	60
1	70	40
1	70	1
1	75	1
1	1	1



ข้อมูลของการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงเมล็ดไมโครกรีนด้วยพลาสมา

ตาราง 12 ความยาวลำต้นของเมล็ดไมโครกรีนจำนวน 50 เมล็ด (มิลลิเมตร)

seed2- 0	seed2- 1	seed2- 5	seed2- 10	seed4- 0	seed4- 1	seed4- 5	seed4- 10	กลุ่ม ควบคุม
20	45	45	30	30	30	30	5	30
20	40	30	30	15	95	30	30	30
10	60	30	30	75	45	30	30	30
20	85	35	30	90	30	30	30	15
30	85	30	15	70	60	30	35	30
40	50	30	5	80	85	30	5	15
25	75	35	30	120	75	30	30	15
10	20	65	47	40	55	115	122	15
40	10	70	83	75	65	70	80	5
40	30	65	135	15	75	60	80	40
45	65	50	45	35	80	90	123	15
30	50	55	42	65	35	100	64	15
30	90	90	45	55	40	98	65	20
40	30	30	80	55	65	88	70	20
30	30	45	95	40	60	110	95	30
20	30	80	110	95	60	60	120	40
40	30	90	95	40	70	120	95	15
45	30	65	59	80	65	62	70	25
35	30	30	60	85	95	85	75	45
70	75	50	100	40	60	105	80	80
50	55	80	90	55	30	50	105	75
30	35	70	110	65	55	110	105	35
60	60	35	55	70	60	120	30	70
75	65	70	60	105	75	80	115	65

ตาราง 12 (ต่อ)

seed2- 0	seed2- 1	seed2- 5	seed2- 10	seed4- 0	seed4- 1	seed4- 5	seed4- 10	กลุ่ม ควบคุม
72	80	75	78	65	45	115	110	75
100	45	95	73	63	65	55	55	60
45	60	35	85	63	80	55	115	45
52	65	30	100	95	30	100	85	60
70	75	65	73	60	35	83	60	85
40	100	85	65	60	35	93	70	50
55	65	60	42	67	60	65	55	55
52	35	60	85	60	85	87	45	70
50	90	35	80	65	75	45	45	95
43	40	55	127	40	30	47	55	90
62	70	55	72	20	20	70	65	70
72	50	63	70	20	130	55	135	65
50	25	90	116	55	70	100	95	70
65	60	70	75	95	70	50	75	50
45	75	60	76	45	85	110	65	35
45	35	65	107	100	75	130	60	40
50	50	30	104	89	75	70	95	40
80	70	90	100	35	105	60	115	45
82	15	55	65	66	45	114	65	45
105	40	75	88	75	100	69	77	55
80	40	40	65	78	100	88	70	60
80	50	100	80	83	120	55	95	60
90	75	80	95	85	85	95	80	0
0	60	85	73	70	0	83	45	0
0	110	95	0	92	0	110	100	0
0	0	105	0	0	0	0	147	0

ตาราง 13 น้ำหนักของเมล็ดไมโครกรีนก่อนอบและหลังอบจำนวน 50 เมล็ด (กรัม)

เงื่อนไขการทดลอง	น้ำหนักก่อนอบ	น้ำหนักหลังอบ
กลุ่มควบคุม	3.656	0.6027
seed2-water0	4.2838	0.6489
seed2-water1	5.1642	0.6416
seed2-water5	6.3289	0.6878
seed2-water10	8.2073	0.6953
seed4-water0	5.8735	0.6108
seed4-water1	5.5029	0.6114
seed4-water5	8.1143	0.6746
seed4-water10	8.959	0.7332



ผลงานการเผยแพร่วิจัย

1. K. Matra, Y. Tanakaran, T. Temponsub, S. Nimbua, P. Thab-in, and C. Pluksa, "Electrical Characteristics of Atmospheric Air Corona Plasma by Multi-pin Electrodes," *International Review of Electrical Engineering*, 2019.
2. Y. Tanakaran and K. Matra, "Wastewater Treatment by Dielectric Barrier Discharge Plasma," *Journal of Physics: Conference Series*, 2019.
3. Y. Tanakaran, "Electric-field Distribution Characteristics between Multi-pin Electrodes and The Planar Counter Electrode," *presented at the 7th International Symposium on Frontier Technology*, Ambassador City Jomtien, Pattaya, Thailand, 2019.
4. ยศชน ธนการณย์, มงคล ลิ้มอวชันนาการ, ประทีป บุญทอง, พิชิตชัย สุวรรณเพชร และ คณิศร์ มาตรา, "การศึกษาอิทธิพลของน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา ณ สภาวะบรรยากาศที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเมล็ดพืช," *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12*, 2563.
5. Y. Tanakaran and K. Matra, "The Influence of Atmospheric Non-thermal Plasma on Jasmine Rice Seed Enhancements," *Journal of Plant Growth Regulation*.
6. Y. Tanakaran and K. Matra, "Effect of Atmospheric Pressure Multi-Corona Air Plasmas and Plasma Activated Water on Germination and Growth of Rat-Tailed Radish Seeds," *IEEE Transactions on Plasma Science*.
7. Y. Tanakaran and K. Matra, "Influence of multi-pin anode arrangement on electric field distribution characteristics and its application on microgreen seed treatment," *Physica Status Solidi (a)*.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ยศชน หนการันย์
วัน เดือน ปี เกิด	9 มกราคม 2538
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลอุตรดิตถ์
วุฒิการศึกษา	จบการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลอุตรดิตถ์ จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอุตรดิตถ์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรีจากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 42 ถนนเจริญภัณฑ์ ต่าบดท่าอิฐ อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์
ผลงานตีพิมพ์	Electrical Characteristics of Atmospheric Air Corona Plasma by Multi-pin Electrodes, International Review of Electrical Engineering (IREE), 2019. Wastewater treatment by dielectric barrier discharge plasma, Journal of Physics: Conference Series, 2019.