



พลาสมาแบบอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ  
ATMOSPHERIC NON-THERMAL PLASMA FOR WATER QUALITY IMPROVEMENT



วุฒิชัยค แสงวัง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2565

พลาสมาแบบอนุกรมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ATMOSPHERIC NON-THERMAL PLASMA FOR WATER QUALITY IMPROVEMENT



WUTTHICHOK SANGWANG

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

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2022

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

พลาสมาแบบอนุกรมมิติต่ำที่สภาวะบรรยากาศเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ

ของ

วุฒิชัยค แสงวัง

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิตศรี มาตรา)

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิวพล ศรีสนพันธุ์)

ที่ปรึกษาร่วม

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สุธิดา ทีปักษ์พันธุ์)

(รองศาสตราจารย์ ดร.เวทิน ปิยรัตน์)

ชื่อเรื่อง	พลาสมาแบบอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ
ผู้วิจัย	วุฒิชัยค แสงวัง
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คณิศร์ มาตรา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. สุธิดา ทีปรักษพันธ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของพลาสมาแบบอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศเพื่อปรับปรุงสภาพน้ำ (Plasma activation water, PAW) ซึ่งได้ทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา การศึกษาอิทธิพลของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงต่อการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา และการศึกษาอิทธิพลของลำพลาสมาและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อมวลของต้นกล้าปืทุท จากผลการทดลองทั้ง 3 ส่วน สามารถยืนยันได้ว่าสภาวะการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาทั้งหมดส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของน้ำ โดยค่าความเป็นกรด (pH) ของน้ำ PAW ลดลง ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าของกลุ่มควบคุม นอกจากนี้ยังตรวจพบค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนเตรทและไนไตรท์ในน้ำ PAW เพิ่มขึ้น ซึ่งสารประกอบทางเคมีเหล่านี้มีประโยชน์ต่อการช่วยยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* และการเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการงอกและมวลของต้นกล้าปืทุท จากผลการศึกษาทั้ง 3 ส่วน สามารถสรุปได้ว่า PAW มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับงานทางเกษตรกรรมและการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค

คำสำคัญ : พลาสมาความดันบรรยากาศ การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา โคโรนาพลาสมา

Title	ATMOSPHERIC NON-THERMAL PLASMA FOR WATER QUALITY IMPROVEMENT
Author	WUTTHICHOK SANGWANG
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2022
Thesis Advisor	Assistant Professor Khanit Matra , Ph.D.
Co Advisor	Dr. Suthida Theeparaksapan

This research aims to study the influence of atmospheric non-thermal plasma on plasma-activated water (PAW) generation. The study has been divided into three parts, namely, to study the influence of the PAW technique on water improvement, the influence of AC high voltage waveform characteristics on PAW generation, and the influence of plasma jet and PAW on a mass of beetroot sprouts. From the experimental results of all three parts, it could be confirmed that all PAW conditions resulted in the change in the parameters of the water. The pH of PAW water has decreased, while the electrical conductivity has increased compared to that of the control group. Moreover, hydrogen peroxide, and nitrate and nitrite concentration have also been detected increasingly in PAW water. These chemical compounds are beneficial for *Escherichia coli* inhibition, and the germination rate and mass of beetroot sprout enhancement. Regarding the study results of all three parts, it can be confirmed that PAW has the potential to be applied in agriculture and pathogenic microbial inhibition.

Keyword : Atmospheric non-thermal plasma Plasma Activated Water Corona plasma.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง พลาสมาแบบอนุหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ ได้ดำเนินการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปริญญานิพนธ์ดังกล่าวจะสำเร็จขึ้นได้ด้วยความกรุณาอย่างสูงจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คณิศร์ มาตรา ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลักของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้รวมถึงให้คำชี้แนะ แนวทางแก้ไขปัญหา พร้อมคำปรึกษาด้านต่าง ๆ ทั้งในเรื่อง การศึกษา การทำปริญญานิพนธ์ และการสนับสนุนให้ผู้วิจัยได้รับโอกาสในการนำเสนองานวิจัยแก่ภายนอก ซึ่งสิ่งเหล่านี้หล่อหลอมให้ผู้วิจัยสามารถทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. สุธิดา ที่รักษัพันธ์ ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับวิธีการวัดผลการทดลองเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ของน้ำ และยังให้ความรู้ในเรื่องต่าง ๆ รวมไปถึงการแนะนำวิธีการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับ การวัดผลของงานวิจัย และขอขอบคุณอาจารย์จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และสิ่งแวดล้อมและเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกในการจัดทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทธร บุปผัน อาจารย์จากคณะกายภาพ ที่ให้คำปรึกษาเรื่องวิธีการเพาะเชื้อจุลินทรีย์ และให้ความสะดวกในการใช้สถานที่สำหรับการทำวิจัย รวมไปถึงการแนะนำวิธีการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ และยังให้ความรู้ในเรื่องต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ในสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความรู้และให้ความช่วยเหลือด้านสถานที่ในการทำปริญญานิพนธ์รวมถึงการแนะนำวิธีการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับงานวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคุณคณาจารย์บุคลากร ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษา อีกทั้งยังให้ความรู้และความช่วยเหลือด้านสถานที่ในการทำปริญญานิพนธ์ รวมถึงเอกสารต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับมหาบัณฑิต ตลอดจนอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ ตลอดจน การศึกษาในระดับมหาบัณฑิต และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่คอยให้คำแนะนำถึงข้อสงสัยต่าง ๆ ในการส่งเอกสารทุกครั้ง ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนตลอดการศึกษา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญาบัตรฉบับนี้ จะเป็นคุณอันประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจนำไปศึกษาไม่มากนักน้อยต่อไป คุณงามความดีและประโยชน์ใด ๆ จากปริญญาบัตรฉบับนี้ ขอมอบให้กับผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาทั้งหมด

วุฒิชัย แสงวัง





## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 พลาสมา .....	4
2.2 สนามไฟฟ้า .....	6
2.3 โคโรนาดิสชาร์จ .....	15
2.4 ลำพลาสมา .....	23
2.5 คุณสมบัติของน้ำ .....	24
2.6 การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา .....	27
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 อิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา.....	34

3.2 อิทธิพลของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงต่อการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา .....	37
3.3 อิทธิพลของลำพลาสมาและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อมวลของต้นกล้าปืทุท.....	41
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน .....	44
4.1 อิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา.....	44
4.2 อิทธิพลของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงต่อการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา .....	49
4.3 อิทธิพลของลำพลาสมาและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อมวลของต้นกล้าปืทุท.....	53
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	66
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	66
5.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	69
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	70
บรรณานุกรม .....	71
ภาคผนวก.....	74
ประวัติผู้เขียน.....	77

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ค่าพารามิเตอร์ของน้ำจากการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยพลาสมา .....	31
ตาราง 2 ปฏิริยาเคมีของ ROS และ RNS ที่เกิดจาก PAW .....	32
ตาราง 3 รายละเอียดอุปกรณ์ต่าง ๆ .....	36
ตาราง 4 รายละเอียดอุปกรณ์ต่าง ๆ .....	40
ตาราง 5 ผลการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้า.....	47
ตาราง 6 ปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> .....	48
ตาราง 7 ผลการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้า.....	53
ตาราง 8 ผลการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้า.....	59
ตาราง 9 จำนวนอัตราการงอก น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งเฉลี่ย ของต้นปืทุท .....	60

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ.....	7
ภาพประกอบ 2 สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่าง ๆ .....	9
ภาพประกอบ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า .....	10
ภาพประกอบ 4 กราฟการเบรกดาวนของก๊าซที่ระยะเริ่มต้น ระยะปานกลาง และระยะสุดท้าย ..	11
ภาพประกอบ 5 การปล่อยโคโรนารอบขดลวดไฟฟ้าแรงสูง.....	16
ภาพประกอบ 6 การปล่อยโคโรนาจากข้อที่แนบมากับสถานีไฟฟ้าแรงสูงของ ขดลวดเตสลา ...	16
ภาพประกอบ 7 การปล่อยโคโรนาขนาดใหญ่ (สีขาว) รอบตัวนำไฟฟ้าที่ได้รับพลังงานจากหม้อ แปลงไฟฟ้า 1.05 ล้านโวลต์ในห้องปฏิบัติการ US NIST ในปี 1941 .....	17
ภาพประกอบ 8 การเริ่มต้นของการดิสชาร์จโคโรนา .....	18
ภาพประกอบ 9 เบรกดาวนไฟฟ้า .....	19
ภาพประกอบ 10 การดิสชาร์จและการรักษาสภาพดิสชาร์จ.....	20
ภาพประกอบ 11 ลักษณะการสร้างลำพลาสมา (plasma jet) .....	24
ภาพประกอบ 12 ปฏิกริยาจากการปล่อยลำพลาสมา .....	28
ภาพประกอบ 13 รูปแบบการจำลองการสร้างพลาสมา .....	29
ภาพประกอบ 14 ลักษณะของการจัดเรียงแบบเข็มเดี่ยว และหลายเข็ม .....	30
ภาพประกอบ 15 การใช้น้ำแข็งจากกระตุ้นด้วยพลาสมาเพื่อถนอมกุ้ง.....	31
ภาพประกอบ 16 แผนภาพแสดงชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบใต้น้ำ.....	35
ภาพประกอบ 17 แผนภาพแสดงชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบหลายเข็มใต้น้ำ .....	39
ภาพประกอบ 18 (กรอบซ้ายหมายเลข 1) ชุดกำเนิดลำพลาสมา (DBD jet) และ (กรอบขวา หมายเลข 2) ชุดน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแบบโคโรนาเจ็ท (corona jet).....	42
ภาพประกอบ 19 ลักษณะการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา .....	45

ภาพประกอบ 20 (บน) ลักษณะแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ และ (ล่าง) ลักษณะกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ	46
ภาพประกอบ 21 ปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย E. coli.....	48
ภาพประกอบ 22 ลักษณะของลำพลาสมาขณะกระตุ้นน้ำ.....	50
ภาพประกอบ 23 (บน) ลักษณะแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ และ (ล่าง) ลักษณะกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ	51
ภาพประกอบ 24 ชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบ DBD jet สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวเมล็ดพืช ....	54
ภาพประกอบ 25 การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาแบบโคโรนาเจ็ต (corona jet) .....	55
ภาพประกอบ 26 (บน) ลักษณะแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ และ (ล่าง) ลักษณะกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ	56
ภาพประกอบ 27 กราฟ OES ของชุด corona jet .....	57
ภาพประกอบ 28 ภาพถ่าย SEM ผิวเมล็ดพืชที่เวลา (ซ้าย) 0 (กลาง) 2.5 และ (ขวา) 5 นาที .	58
ภาพประกอบ 29 อิทธิพลของการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา .....	61
ภาพประกอบ 30 อิทธิพลของน้ำ PAW ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E. coli .....	63
ภาพประกอบ 31 อิทธิพลของ DBD jet สำหรับการปรับปรุงสภาพเมล็ด .....	64

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการแก้ไขปัญหามลพิษทางน้ำในประเทศไทยได้กลายเป็นที่จำเป็นและต้องการจัดการอย่างเร่งด่วน เนื่องจากมีอุตสาหกรรมเกิดขึ้นหลายประเภท และมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำจากการปล่อยน้ำเสียในปริมาณมากออกสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ เช่น ในแม่น้ำ ลำคลอง เป็นต้น ทำให้ส่งผลกระทบต่อการใช้ชีวิตประจำวัน ทั้งในด้านอุปโภค และบริโภค ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงสภาพน้ำก่อนที่จะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ การปรับปรุงสภาพน้ำโดยทั่วไปนั้นมีหลายวิธี เช่น วิธีทางชีวภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยนี้จะให้ความสนใจในการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยวิธีทางไฟฟ้า หรือน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (Plasma Activated Water, PAW) โดยลักษณะการเกิดของพลาสมานั้นสามารถเกิดขึ้นได้จากการที่มีสนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่อากาศหรือก๊าซที่เป็นกลาง เมื่อเกิดสนามไฟฟ้าที่มีปริมาณมากพอ จึงทำให้เกิดการกระตุ้นของก๊าซ ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระวิ่งเข้าชนกับอะตอมของก๊าซอย่างรวดเร็ว และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซ หรือการดิสรจาร์จของไฟฟ้า โดยเรียกกระบวนการนี้ว่าการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) หรือกลายเป็นพลาสมา ทั้งนี้อนุภาคที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นจะปลดปล่อยรังสีออกมา โดยจะสามารถมองเห็นพลาสมาที่เปล่งแสงออกมาหรือที่เรียกว่า “โกลว์ดิสรจาร์จ (Glow Discharge)” เมื่อพลาสมาสัมผัสกับน้ำจะมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radical,  $\cdot\text{OH}$ ) อีกทั้งยังช่วยเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) และโอโซน (Ozone,  $\text{O}_3$ ) เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีพลาสมา (plasma technology) เป็นที่ได้รับความนิยม และความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากมีการนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายเกี่ยวกับงานวิจัยในด้านต่าง ๆ เช่น การประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ (G. Busco, 2022) การประยุกต์ใช้งานทางการเกษตร (Sergeichev et al., 2021) การประยุกต์ใช้งานทางด้านอาหาร (Liao et al., 2018) และ (A. Patange, 2019) และการประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม (P. Homon, 2016) เป็นต้น ทั้งนี้เทคโนโลยีพลาสมาถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด (clean technology) เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถทำงานได้ในช่วงความดันและอุณหภูมิที่หลากหลาย

เมื่อเร็ว ๆ นี้มีงานวิจัยที่กล่าวถึงลำพลาสมา (plasma jet) และน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (PAW) ที่สภาวะ ความดันบรรยากาศ ถือว่าเป็นพลาสมาอุณหภูมิต่ำ เป็นการรวมข้อดีของ ลักษณะแบบดิสชาร์จโคโรนา (corona discharge) และลักษณะแบบดิสชาร์จข้ามฉนวน (dielectric barrier discharge, DBD) เนื่องจากความคุ้มค่าและให้ลักษณะการสร้างสารอนุมูลอิสระ (free radicals) ที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามลักษณะการสร้างพลาสมามีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของอิเล็กโทรด ลักษณะของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (RF, HF, DC Pulse) และลักษณะของศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของอิเล็กโทรด เป็นต้น โดยที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดนี้จะส่งผลต่อลักษณะการเกิดลักษณะของพลาสมา และคุณสมบัติทั้งหมดของพลาสมา ในกรณีลักษณะรูปทรงของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการสร้างพลาสมาที่สภาวะความดันบรรยากาศ ที่นิยมใช้กันมากก็คือ ลักษณะอิเล็กโทรดระหว่างปลายแหลมกับระนาบ (pin-to-plane) (Y. Sato 2020) และ (K Matra et al., 2019) เนื่องจากเกิดการปลดปล่อยโคโรนาดิสชาร์จได้ง่าย แต่ในอีกทางเดียวกันนั้นลักษณะของโคโรนาดิสชาร์จก็มีทั้งโคโรนาบวก (positive corona) และ โคโรนาลบ (negative corona) ซึ่งโคโรนาทั้งสองแบบนี้จะขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วปลายแหลมของอิเล็กโทรด โดยที่โคโรนาทั้งสองจะให้ลักษณะการเกิดพลาสมาที่ไม่เหมือนกัน และเกิดการสร้างลักษณะสารอนุมูลอิสระที่ต่างกัน (K Matra et al., 2019) จึงทำให้มีความสนใจในการประยุกต์ใช้ลักษณะการเกิดของพลาสมาแบบดิสชาร์จโคโรนา และลักษณะการเกิดของพลาสมาแบบดิสชาร์จข้ามฉนวน (DBD) ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานในห้องปฏิบัติการทั่วไปหรือนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยทางด้านอื่น ๆ เนื่องจากการประกอบและการซ่อมบำรุงรักษาจะง่ายกว่าและไม่มีความซับซ้อนเมื่อเทียบกับระบบปิดอย่างระบบปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) นอกจากนี้ความซับซ้อนของลักษณะของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ปลายขั้วของอิเล็กโทรด ยังคงเป็นที่น่าสนใจและต้องการที่จะศึกษาเพื่ออีกต่อไป

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน โดยในส่วนแรกเป็นการศึกษาการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคพลาสมา โดยเป็นการศึกษาการวิจัยเพิ่มเติมจากอาจารย์ที่ปรึกษา ต่อมาในส่วนที่สองเป็นการศึกษาอิทธิพลของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงต่อการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา เพื่อทำการกำหนดลักษณะรูปคลื่นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง 3 รูปแบบ คือแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก แบบคลื่นไฟฟ้าสลับ และแบบครึ่งคลื่นทางด้านลบ และในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาอิทธิพลของลำพลาสมาและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นการประยุกต์งานวิจัยแรกและงานวิจัยที่สองเข้าด้วยกัน เพื่อปรับใช้ในทางด้านการเกษตร ซึ่งทำการวัดผลพารามิเตอร์ของน้ำหาค่าความเป็นกรด-ด่าง

(Positive potential of the Hydrogen ions, pH) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) รวมถึงตรวจสอบหาค่าปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนเตรท และไนไตรท์ เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งวัตถุประสงค์ออกเป็นหัวข้อใหญ่ ๆ ดังนี้

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคพลาสมา
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของน้ำพลาสมาต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงต่อการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา
- 1.2.4 เพื่อศึกษาอิทธิพลของลำพลาสมาและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อการเจริญเติบโตของพืช

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบใต้น้ำ ที่สภาวะบรรยากาศ
- 1.3.2 กำหนดลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง 3 รูปแบบ คือแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก แบบคลื่นไฟฟ้าสลับ และแบบครึ่งคลื่นทางด้านลบ
- 1.3.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของน้ำ ก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพน้ำโดยทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ค่าปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนเตรท และไนไตรท์
- 1.3.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบอัตราการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย (*Escherichia coli*, *E. coli*) โดยการใช้ลำพลาสมา
- 1.3.5 ใช้ชุด DBD jet สำหรับการกระตุ้นเมล็ดบีทรูท และนำเมล็ดบีทรูทไปเพาะแล้วรดน้ำด้วยน้ำพลาสมาเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นเปรียบเทียบอัตราการงอกและมวลของต้นกล้าบีทรูท

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาสามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ในน้ำได้
- 1.4.2 สามารถสร้างชุดกำเนิดลำพลาสมาที่สภาวะบรรยากาศ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* และการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของพืชได้
- 1.4.3 เป็นแนวทางในการออกแบบลักษณะของพลาสมาอุณหภูมิต่ำ ในรูปแบบอื่น ๆ



## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้ศึกษาหัวข้อทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยการนำมาใช้ในการประยุกต์และการพัฒนางานวิจัย ซึ่งได้นำการเสนอตามหัวข้อดังต่อไปนี้

- 2.1 พลาสมา (plasma)
- 2.2 สนามไฟฟ้า (electric field)
- 2.3 โคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge)
- 2.4 ลำพลาสมา (plasma jet)
- 2.5 คุณสมบัติน้ำ (water quality)
- 2.6 การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา (Plasma activation water, PAW)
- 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (literature reviews)

### 2.1 พลาสมา

พลาสมาจะเกิดขึ้นจากการกระตุ้นของสนามไฟฟ้าในปริมาณมากแก่ก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นกลาง ทำให้เกิดการส่งถ่ายพลังงานไปยังอิเล็กตรอน จึงทำให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่เข้าหากันแล้วเกิดการชนกับอะตอมของก๊าซ ซึ่งถ้าหากพลังงานที่อิเล็กตรอนอิสระได้รับมีมากพอ ก็จะส่งผลให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกมา ซึ่งลักษณะการเกิดเช่นนี้เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) หรือกลายเป็นพลาสมา ทั้งนี้อนุภาคภายในพลาสมาจะประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน ไอออน และอนุภาคที่มีประจุทั้งประจุลบและประจุบวกในปริมาณที่เท่า ๆ กัน เป็นต้น การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในพลาสมา นั้น ถือได้ว่าเป็นพฤติกรรมที่กลุ่มของพลาสมาแสดงออก ร่วมกันหรือเรียกว่า พฤติกรรมร่วม (collective behaviour) ซึ่งพฤติกรรมร่วมนี้ทำให้สภาพโดยรวมของพลาสมามีประจุสุทธิเป็นศูนย์ และยังรักษาสภาพให้คงอยู่เสมอเหมือนเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral) ทั้งนี้ลักษณะของพลาสมาจัดได้ว่าเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร นิยามโดยนักเคมีฟิสิกส์ Sir William Crooke ปี 1879 และคำว่า “พลาสมา” ถูกบัญญัติโดย เออริง ลางมัวร์ (Iring Langmuir) นักเคมีรางวัลโนเบลปี 1932 ในปัจจุบันพลาสมาสามารถแบ่งโดยใช้อุณหภูมิของพลาสมาเป็นเกณฑ์ในการแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ พลาสมาแบบอุณหภูมิสูง (thermal plasma) และพลาสมาแบบอุณหภูมิต่ำ หรือแบบไม่ใช้ความร้อน (non-thermal plasma) ดังนี้

### 2.1.1 พลาสมาแบบอุณหภูมิสูง (thermal plasma)

พลาสมาแบบอุณหภูมิสูง คือ ก๊าซดิสชาร์จแบบพลาสมาสภาวะสมดุลทางความร้อน (Thermal equilibrium) โดยที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (electron temperature,  $T_e$ ) จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของไอออน (ion temperature,  $T_i$ ) และมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของแก๊ส (gas temperature,  $T_g$ ) ( $T_e = T_i = T_g$ ) โดยเกิดการปล่อยประจุของลักษณะแบบอาร์คดิสชาร์จ (arc discharge) ซึ่งลักษณะการเกิดกระบวนการดิสชาร์จ เกิดขึ้นได้โดยการป้อนไฟฟ้าแรงดันสูงให้แก่ขั้วของอิเล็กโทรด ส่งผลให้เกิดการกระตุ้นของสนามไฟฟ้าในปริมาณมากแก่ก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นกลาง จึงส่งผลให้อิเล็กตรอนนั้นถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้ารอบ ๆ บริเวณข้างหน้าที่มีความหนาแน่นสูง และทำให้อิเล็กตรอนนั้นเคลื่อนที่เข้าไปชนกับโมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซ อย่างรวดเร็วด้วยความถี่ที่สูงจึงมีการแตกตัวอย่างรุนแรงในลักษณะสปาร์ค เหมือนฟ้าผ่าเป็นเส้นเล็ก ๆ จำนวนมากเป็นผลให้เกิดลักษณะของพลาสมาที่มีพลังงานสูง และสถานะความดันสูง ซึ่งพลาสมาแบบอุณหภูมิสูงนี้ส่วนใหญ่จะถูกสร้างขึ้นที่ห้องปฏิบัติการ หรือภายในกระสวยอวกาศ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเมื่อเกิดสภาวะสมดุลทางความร้อนขึ้นจำเป็นต้องมีวัสดุที่สามารถทนต่อความร้อนได้สูง ๆ ซึ่งในสภาวะสมดุลนี้พลาสมาจะคงรักษาสถานะของพลาสมาไว้ได้เอง ส่วนใหญ่จะนำพลาสมาอุณหภูมิสูงไปใช้ในการเชื่อม ตัด และหลอมโลหะ เป็นต้น (บุญญวรรณ, 2018)

### 2.1.2 พลาสมาแบบอุณหภูมิต่ำ (non-thermal plasma)

พลาสมาแบบอุณหภูมิต่ำหรือพลาสมาแบบไม่ใช้ความร้อน คือ ก๊าซดิสชาร์จแบบพลาสมาสภาวะไม่สมดุลทางความร้อน (Non-thermal equilibrium) โดยที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (Electron temperature,  $T_e$ ) จะมีค่ามากกว่าอุณหภูมิของแก๊ส (Gas temperature,  $T_g$ ) และอุณหภูมิของไอออน (ion temperature,  $T_i$ ) ( $T_e > T_i = T_g$ ) พลาสมาแบบอุณหภูมิต่ำมักจะถูกสร้างขึ้นที่สภาวะ ความดันบรรยากาศ สำหรับการดิสชาร์จก๊าซ ลักษณะของการเกิดดิสชาร์จนั้นเกิดจากการป้อนไฟฟ้าแรงดันสูงให้แก่ขั้วของอิเล็กโทรด ทำให้เกิดการกระตุ้นของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วบวก และขั้วลบ เมื่อความต่างศักย์สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้ง 2 มีค่าสูงมากพอ ส่งผลให้อิเล็กตรอนนั้นถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าได้โดยง่าย ซึ่งการที่อิเล็กตรอนถูกเร่งจึงทำให้เกิดสถานะของอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดลักษณะการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น ในสภาวะนี้ทำให้อิเล็กตรอนแตกตัวเป็นไอออนและสามารถนำไฟฟ้าได้ การแตกตัวของก๊าซประกอบด้วยคู่ของไอออนบวกและอิเล็กตรอน ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการเกิดเบรกดาวนในก๊าซ หรือการดิสชาร์จไอออน (ionization) โดยอนุภาคที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจะทำให้เห็นแสงสว่างเกิดขึ้น และมีการปลดปล่อยรังสีออกมา หรือมีลักษณะการปลดปล่อยสถานะแบบโกลวดิสชาร์จ (Glow discharges) ซึ่งเป็นที่นิยมในการ

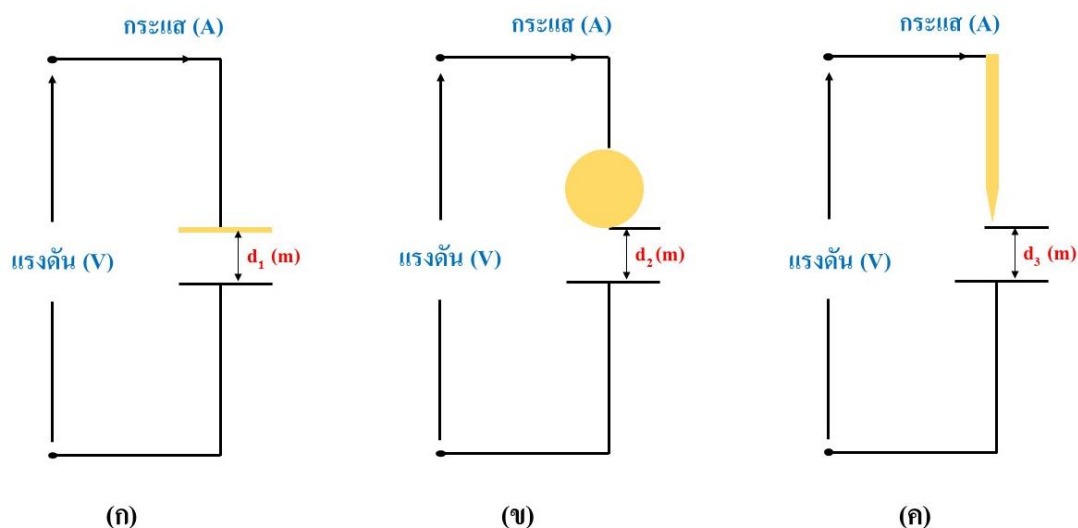
ใช้ในงานด้านที่ไม่ทำให้เกิดความร้อนมาก เช่น การทำฟิล์มบาง (thin film) หรือการกัด (etching) เป็นต้น (บุญญวรรณ, 2018)

## 2.2 สนามไฟฟ้า

ในส่วนของทฤษฎีสนามไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ลักษณะของสนามไฟฟ้า และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะกล่าวถึงหัวข้อต่อไป

### 2.2.1 ลักษณะของสนามไฟฟ้า

จากที่กล่าวมาข้างต้นลักษณะการสร้างพลาสมาหลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของอิเล็กโทรด ลักษณะของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของอิเล็กโทรด เป็นต้น อย่างไรก็ตามสนามไฟฟ้า (Electric field) ถือได้ว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งของการเกิดลักษณะพลาสมา ซึ่งความหมายของสนามไฟฟ้าคือ บริเวณที่มีประจุไฟฟ้าทำให้เกิดแรงกระทำกับอนุภาคมีประจุของอนุภาคภายในบริเวณโดยรอบตามจุดต่าง ๆ ซึ่งบริเวณระยะห่างของแต่ละช่วงภายในสนามไฟฟ้านั้นมีความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของแต่ละช่วงระยะนั้นแตกต่างกัน โดยจุดที่อยู่ใกล้ขั้วอิเล็กโทรดมากที่สุด หรืออยู่ใกล้ต้นกำเนิดสนามไฟฟ้ามากที่สุดจะมีปริมาณความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ลำดับถัดไกลออกไป ทั้งนี้หน่วยของสนามไฟฟ้าเรียกว่า นิวตันต่อคูลอมป์ หรือโวลต์ต่อเมตร พิกัดความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าจะถูกกำหนดด้วยสภาพแรกเริ่มของฉนวนและค่อย ๆ เปลี่ยนไปสู่สภาพการนำไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเกิดการสปาร์คขึ้น หรือแสงสว่างขึ้น เรียกว่าการเบรกดาวนข้ามฉนวน โดยปกติสภาพการนำไฟฟ้าอย่างดีนั้นจะมีแนวแคบ ๆ ตามเส้นทางที่เกิดเบรกดาวนถ้าฉนวนนั้นเป็นก๊าซ ฉนวนนั้นจะเปลี่ยนเป็นสภาพการนำไฟฟ้าไป และการคงสภาพการนำนี้ได้ขณะแรงดันนั้นสูงมากพอที่ส่งผลให้เกิดกระแสไหลผ่านฉนวนสูงพอจนเป็นอาร์ค นั่นก็หมายความว่า การเสียดสภาพฉนวนของก๊าซนั้นไม่เป็นแบบถาวร คือ การเสียดสภาพฉนวนในช่วงโดยที่แรงดันยังคงป้อนอยู่ ซึ่งจะมีลักษณะที่แตกต่างจากฉนวนที่เป็นของแข็ง หลังจากเกิดการเบรกดาวนแล้วฉนวนที่เป็นของแข็งจะเกิดการเสียดสภาพไปอย่างถาวร ในขณะที่ฉนวนที่เป็นสภาพของเหลวหลังจากเกิดเบรกดาวน ฉนวนที่มีสภาพเป็นของเหลวจะกลับคืนสู่สถานะฉนวนสภาพแบบเดิม และเป็นไปในทางแบบเดียวกันกับฉนวนที่เป็นก๊าซ จากที่กล่าวมาข้างต้นการเกิดสนามไฟฟ้าก็จะมีรูปแบบลักษณะสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าแบ่งออกได้ 2 ชนิดคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอนี้ก็แบ่งออกเป็นอีก 2 แบบ คือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และแบบไม่สม่ำเสมอสูง โดยที่สนามไฟฟ้าแต่ละแบบจะขึ้นอยู่กับลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดแสดงดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

- ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field)
- ข) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly non-uniform field)
- ค) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (highly non-uniform field)

จากภาพประกอบ 1 เมื่อป้อนไฟฟ้าแรงดันสูงให้แก่ขั้วอิเล็กโทรดตามรูปแบบลักษณะต่าง ๆ จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนจะมีค่าที่ไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะกำหนดระยะห่างของ  $d_1$ ,  $d_2$  และ  $d_3$  ให้มีระยะห่างที่เท่ากัน โดยความคงทนของฉนวนในแต่ละชนิดจะมีค่าที่ทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ส่วนใหญ่จะกำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) ขณะเกิดขึ้นที่บริเวณตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ในระหว่างที่เริ่มเกิดการเบรกดาวนขึ้น จะส่งผลมากหรือน้อยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ต่าง ๆ หลายประการ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น ฯลฯ โดยลักษณะของอิเล็กโทรดที่แตกต่างกันจะมีลักษณะดังนี้

#### 2.2.1.1 ลักษณะอิเล็กโทรดของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง อิเล็กโทรดที่มีปริมาณของสนามไฟฟ้าเท่ากันทุก ๆ จุดในช่องระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่เท่ากัน โดยช่องระหว่างอิเล็กโทรดของทั้งสองนั้น สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอ ดังภาพประกอบ 1 ก) ซึ่งจะสามารรถคำนวณได้จากสมการที่ (1) ดังนี้

$$E_{\max} = \frac{U}{d \cdot \eta^*} \quad (1)$$

เมื่อ	$E_{\max}$	คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (โวลต์ต่อเมตร)
	$U$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด (โวลต์)
	$d$	คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (เซนติเมตร)
	$\eta^*$	คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1

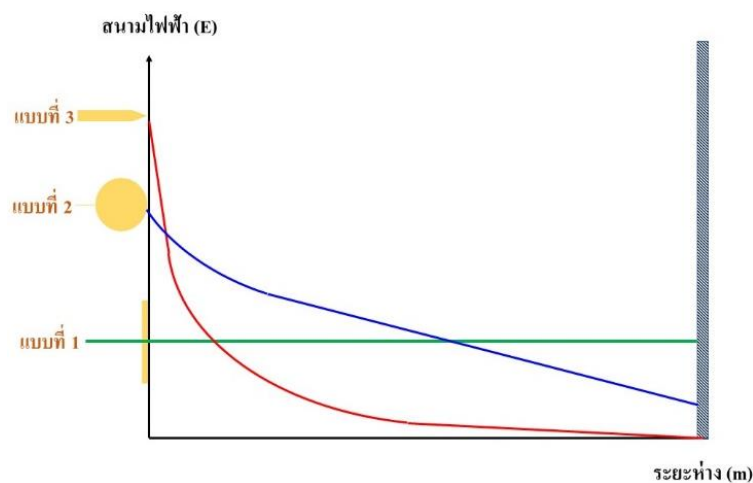
### 2.2.1.2 ลักษณะอิเล็กโทรดของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอจะมีความเครียดของสนามไฟฟ้าที่ในแต่ละตำแหน่งมีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับระยะของขั้วอิเล็กโทรดในจุดนั้น ๆ ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างตำแหน่งต่าง ๆ จะมีค่าเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรูปทรงของลักษณะขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าลักษณะอิเล็กโทรดแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ จะคำนวณได้จากความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังนี้

ในกรณีของอิเล็กโทรดแบบความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยค่า  $\eta^*$  จะมีค่า  $0.4 < \eta^* < 0.8$

ในกรณีของอิเล็กโทรดแบบความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยสูง  $\eta^*$  จะมีค่า  $0.4 < \eta^* < 0.8$

ในกรณีที่ขั้วอิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly non-uniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่บริเวณที่ผิวของอิเล็กโทรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เช่น บริเวณปลายแหลม โดยที่ระยะห่างถัดออกไปจากบริเวณปลายแหลมผิวอิเล็กโทรด จะส่งผลให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าที่ลดลงอย่างรวดเร็วดังภาพประกอบ 2 อย่างไรก็ตามถ้าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วการเบรกดาวนก็ยังไม่เกิด ทั้งนี้จะเกิดลักษณะโคโรนาขึ้นบริเวณรอบ ๆ ปลายแหลมอิเล็กโทรดซึ่งในบริเวณนี้มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่น ๆ ที่ระยะห่างออกไปจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าที่ลดลงและไม่เกิดลักษณะโคโรนา ส่วนกระแสที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดลักษณะโคโรนาเรียกว่ากระแสโคโรนา ดังนั้นสามารถคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้จากสมการที่ (2)



ภาพประกอบ 2 สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่าง ๆ

$$E_i = \frac{U_i}{d \cdot \eta^*} \quad (2)$$

เมื่อ	$E_i$	คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด (โวลต์ต่อเมตร)
	$U_i$	คือ แรงดันที่บ่อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (โวลต์)
	$d$	คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (เซนติเมตร)
	$\eta^*$	คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

โดยสมการนี้สามารถคำนวณหาแรงดันโคโรนา (inception voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระหว่างช่องว่างอิเล็กโทรด หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีทีอิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวนจ์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด) หรืออาจจะเป็นการเบรกดาวนจ์ (ในกรณีทีอิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือ ไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) ค่าแรงดันนี้จึงอาจเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทั่วไปได้ (3)

$$E_i \cdot d \cdot \eta^* = U_i \quad (3)$$

สามารถสรุปได้ คือ ในกรณีทีอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า  $U_i$  คือ  $U_b$  และ  $E_i$  คือ  $E_b$  ถ้าเป็นอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

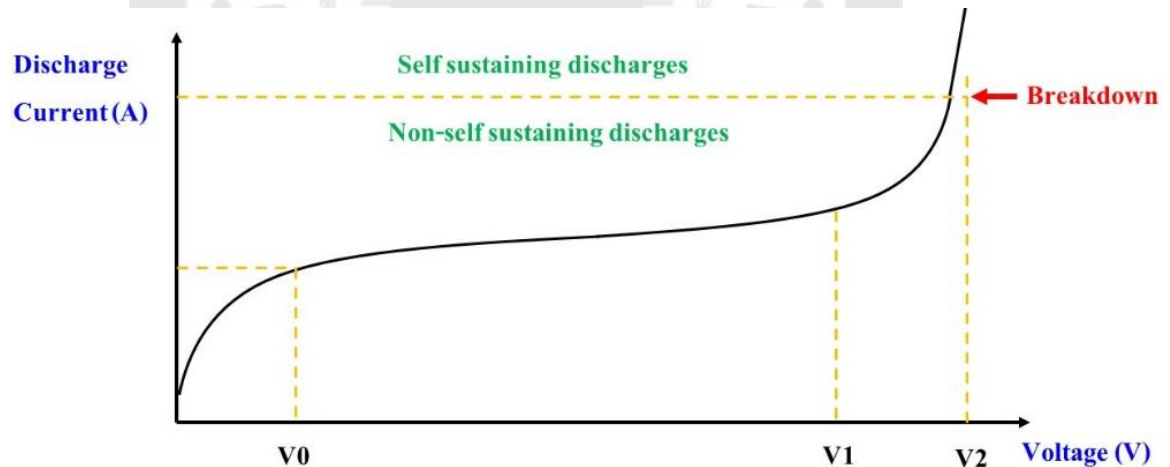
สูง ค่าของ  $U_b > U_i$  และ  $E_b > E_i$  โดยที่  $U_b$  คือแรงดันเบรกดาวน์ และ  $E_b$  คือสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์

### 2.2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้ากล่าวว่าขณะจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้แก่ขั้วอิเล็กโทรดทำให้เกิดสนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซหรืออากาศที่อยู่รอบ ๆ ขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลทำให้เกิดการกระตุ้นของก๊าซหรืออากาศ เมื่อสนามไฟฟ้ามีปริมาณมากพอจนทำให้เกิดการเบรกดาวน์ในก๊าซ (Gas breakdown) โดยการเกิดเบรกดาวน์นั้นถือเป็นการเปลี่ยนแปลงสภาพการเป็นฉนวนไฟฟ้าของก๊าซไปเป็นสภาพนำไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อระยะแกปมีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนในอะวาลานซ์มากพอ จนทำให้ระยะแกปมีสภาพนำไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันมีทฤษฎีที่มารองรับกระบวนการเพิ่มจำนวนอนุภาคประจุถึงค่าวิกฤตอยู่ 2 วิธี อันได้แก่

#### 2.2.2.1 ทฤษฎีของทาวน์เซนด์

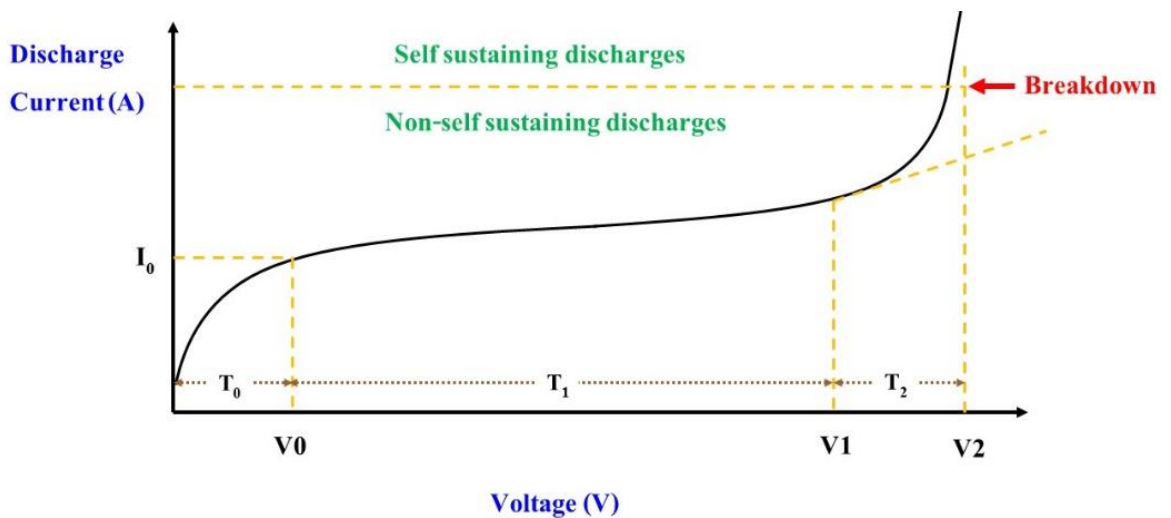
กลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์ (Townsend breakdown process) เกิดจากจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องระหว่างขั้วหรือช่องว่างอิเล็กโทรด



ภาพประกอบ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า

จากภาพประกอบ 3 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลในช่องว่างอิเล็กโทรด และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยจะเห็นได้จากกราฟว่าในช่วง  $V_0$  กระแสจะอิมิตัว ณ จุดนี้เป็น  $I_0$  ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายจะไม่มีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในช่องว่างอิเล็กโทรด จนถึงค่าแรงดัน  $V_1$  กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเป็นเอกซ์โพเนนเชียล โดยในช่วงนี้จะเรียกว่ากระบวนการขั้นต้น (Primary process or  $\alpha$ -process) เมื่อแรงดันไฟฟ้านั้นเพิ่มขึ้นถึงค่า  $V_2$

แล้วจะเกิดการเบรกดาวนขึ้นไม่ว่า  $I_0$  จะเพิ่มขึ้นเท่าใดก็ตาม ในช่วงนี้จะเรียกว่า กระบวนการขั้นที่สอง (Secondary process or  $\gamma$ -process) ในการเบรกดาวนของก๊าซที่ความดันต่ำนั้น แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนจะมีค่าใกล้เคียงกัน (Lucas, 2001)



ภาพประกอบ 4 กราฟการเบรกดาวนของก๊าซที่ระยะเริ่มต้น ระยะปานกลาง และระยะสุดท้าย

- (1) ที่ระยะเริ่มต้น ( $T_0$ ) แสดงให้เห็นว่ากระแสเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เพราะทำให้เกิดกระแสรั่วไหล
- (2) ที่ระยะปานกลาง ( $T_1$ ) กระแสที่ไหลค่อนข้างคงที่ เพราะเกิดกระบวนการไอออไนเซชันกับกระบวนการรวมตัวของอิเล็กตรอน ( $T_2$ ) สมดุลกัน
- (3) ที่ระยะสุดท้าย กระแสจะไหลอย่างรวดเร็วและมีปริมาณที่มาก ในที่สุดจะเกิดการเบรกดาวน

- กระบวนการขั้นต้น ( $\alpha$ -process)

ในกระบวนการที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นแล้วชนกับโมเลกุล หรืออะตอมของก๊าซ ทำให้เกิดการแตกตัวของอะตอมส่งผลให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเหลือเพียงไอออนบวก ทำให้เกิดกลุ่มก้อนประจุ (avalanche electron) ดังสมการที่ (4)

$$N_x = N_0 e^{\alpha x} \quad (4)$$

เมื่อ  $N_0$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งออกจากขั้วแคโทดต่อวินาที  
 $N_x$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งออกจากขั้วแคโทดที่ระยะทาง  $x$



โดยอิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากแคโทดจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีจำนวนเท่ากับจำนวนไอออนบวกที่เกิดขึ้นจากการไหลของอิเล็กตรอนที่ได้จากการไอออไนเซชัน ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าโดยเป็นดังสมการที่ (5)

$$I = I_0 e^{ad} \quad (5)$$

เมื่อ  $I_0$  คือ กระแสเริ่มต้นไหลระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนตัวแรก (primary electron)

$d$  คือ ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $x$

$e^{ad}$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากการเคลื่อนที่จากแคโทดไปยังแอโนด (avalanche electron)

- กระบวนการขั้นสอง ( $\gamma$  - process)

จากกระบวนการขั้นต้น การเกิดอิเล็กตรอนในกระบวนการที่สองนั้น มีหลายกระบวนการที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนใหม่ในขบวนการของแก๊รมานี้ อันได้แก่

(1) ขณะที่ไอออนบวกที่เกิดเนื่องมาจากอวาเลนซ์กลุ่มแรกไม่สามารถรับพลังงานจลน์ในสนามไฟฟ้ามากพอที่จะไปไอออไนซ์โมเลกุล จึงจำเป็นต้องมีพลังงานมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเมื่อไอออนบวกนี้ไปกระทบกับแคโทด

(2) โมเลกุลที่ถูกกระตุ้นในอวาเลนซ์อาจทำให้เกิดโฟตอนขึ้น และการแผ่รังสีนี้อาจไปตกกระทบบนแคโทดทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเนื่องจากโฟตอน ซึ่งอิเล็กตรอนนี้สามารถทำให้เกิดการอวาเลนซ์ใหม่ได้

(3) โมเลกุล metastable จะแผ่กระจายกลับไปยังแคโทด และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเมื่อโมเลกุลนี้ไปกระทบกับแคโทดจากกระบวนการทั้งสามนี้รวมแล้วเป็นกระบวนการขั้นที่สอง โดยให้  $\gamma$  เป็นสัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันตัวที่สอง โดยในกระบวนการนี้จะมีการทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนของอิเล็กตรอนแบบทวีคูณ จากการที่ไอออนบวกชนกับแคโทดทำให้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ซึ่งอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังแคโทด ดังสมการที่ (6)

$$N_d = \frac{N_0 e^{ad}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)} \quad (6)$$

จากสมการที่ (5) และ (6) จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสดังนี้

$$\frac{N_d}{N_0} = \frac{I}{I_0} = \frac{e^{ad}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)} \quad (7)$$

โดยในกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นตามศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และทำให้อิเล็กตรอนมีจำนวนเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นอนันต์ ดังสมการที่ (8)

$$\gamma(e^{ad} - 1) = 1 \quad (8)$$

หากพิจารณาในช่วงสภาวะคงตัว (steady state) นั้นจะได้สมการของกระแสเป็นดังสมการที่ (9)

$$I = \frac{I_0 e^{ad}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)} \quad (9)$$

จากสมการที่ (9) พบว่า

$\gamma e^{ad} < 1$  กระแสที่ไหลจะไม่สามารถประทั้งตัวเองได้ หรือเรียกว่าแบบ non-self-sustained discharge ถ้าเอาแหล่งจ่ายออก กระแสก็จะไม่ไหล และไม่เกิดกระบวนการขึ้นแรก

$\gamma e^{ad} = 1$  จำนวนของไอออนทำให้เกิดกลุ่มก้อนประจุอีกครั้ง โดยกระแสจะสามารถประทั้งตัวเองได้ หรือเรียกว่าแบบ self-sustained discharge หากเอาแหล่งจ่ายไฟออก กระแสยังคงไหลต่อไป ทำให้กระบวนการยังคงดำเนินต่อไปถึงจุดเบรกดาวน

$\gamma e^{ad} > 1$  จำนวนไอออนทำให้เกิดประจุจำนวนมาก ส่งผลให้มีกระแสไหลเป็นจำนวนมากและยังคงถึงจุดเบรกดาวน หากนำแหล่งจ่ายไฟออก (สังข์สะอาด, 2006)

ในส่วนของกระบวนการขั้นที่สองจะมีกระบวนการอื่น ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดการเบรกดาวน ซึ่งจะมีเงื่อนไขของการเบรกดาวนในลักษณะเดียวกัน ดังเช่นเงื่อนไขของการเบรกดาวนในลักษณะทั่วไป โดยแทนสมการของกระบวนการขั้นที่สองได้ดังนี้

$$\Gamma(e^{ad} - 1) = 1 \quad \text{เมื่อ } \Gamma = \frac{\beta}{\alpha} + \gamma_i + \gamma_{ph} \dots \quad (10)$$

### 2.2.2.2 กฎของพาสเชน (Paschen's law)

กฎของพาสเชนเป็นค่าที่เกิดจากกระบวนการของทาวนด์เซนต์ โดยกฎของพาสเชนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวนในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอกับผลคูณของความดันก๊าซและระยะแกประหว่างอิเล็กโทรด (G. Busco) ซึ่งอาจสรุปได้ว่า แรงดันของการเบรกดาวนนั้นขึ้นอยู่กับผลคูณของความดันก๊าซกับระยะแกประหว่างอิเล็กโทรดก็ว่าได้ แต่ข้อเสียของกฎของพาสเชนนั่นคือ ไม่สามารถใช้กับก๊าซที่มีความดันสูงและก๊าซที่มีการผสมได้ จากเงื่อนไขการเบรกดาวนของก๊าซที่สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอของทาวนด์เซนต์ ในสมการที่ (10) เขียนใหม่ได้ว่า

$$ad = \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) \quad (11)$$

จากความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอกับความดันก๊าซ ( $E/P$ ) ตามสมการ  
ดังนี้

$$\frac{\alpha}{P} = f\left(\frac{E}{P}\right) \quad (12)$$

จากสมการที่ (11) เขียนใหม่ได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) \quad (13)$$

$$P \cdot A \cdot e^{\frac{-Bpd}{U}} = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) \quad (14)$$

จากสมการที่ (13) และ (14) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ว่า

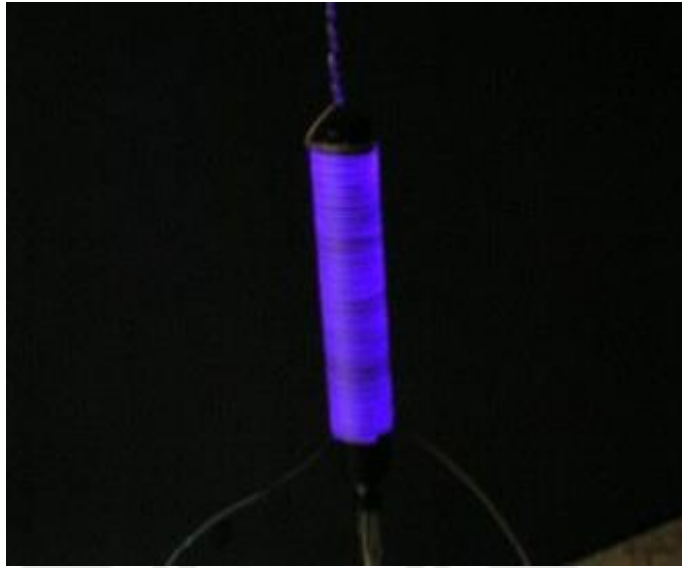
$$U_d = \frac{Bpd}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)} \quad (15)$$

โดย  $A, B$  คือ ค่าคงที่คงตัวของแก๊ส

$U_b$  คือ แรงดันเบรกดาวนีย์ที่อยู่ในฟังก์ชันของ  $pd$  เท่านั้น (สังข์  
สะอาด, 2006)

### 2.3 โครนาดีสชาร์จ

การปลดปล่อยประจุแบบโครนา (corona discharge) คือการคายประจุทางไฟฟ้าที่เกิดจากการแตกตัวเป็นไอออนของของไหลที่เกิดอยู่รอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้าที่มีไฟฟ้าแรงสูง ทำให้เกิดการแยกตัวทางไฟฟ้าและกลายเป็นไอออนทางไฟฟ้า ทำให้ประจุไหลออกจากตัวนำไปในอากาศอย่างต่อเนื่อง โดยการเกิดโครนานั้นจะสามารถเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ความแรงของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้าที่มีค่าเกินค่าความเป็นฉนวนของอากาศ ซึ่งโดยทั่วไปมักถูกมองว่าเป็นแสงสีม่วงหรือแสงสีน้ำเงิน ในอากาศที่อยู่ติดกับตัวนำโลหะแหลมที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงดังภาพประกอบ 5, 6 และ 7



ภาพประกอบ 5 การปล่อยโคโรนารอบขดลวดไฟฟ้าแรงสูง

ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/Corona\\_discharge](https://en.wikipedia.org/wiki/Corona_discharge)



ภาพประกอบ 6 การปล่อยโคโรนาจากชั้นที่แนบมากับสถานีไฟฟ้าแรงสูงของ ขดลวดเทสลา

ที่มา: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nje\\_shkarkese\\_korone\\_ne\\_nje\\_luge.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nje_shkarkese_korone_ne_nje_luge.jpg)



ภาพประกอบ 7 การปล่อยโคโรนาขนาดใหญ่ (สีขาว) รอบตัวนำไฟฟ้าที่ได้รับพลังงานจากหม้อแปลงไฟฟ้า 1.05 ล้านโวลต์ในห้องปฏิบัติการ US NIST ในปี 1941

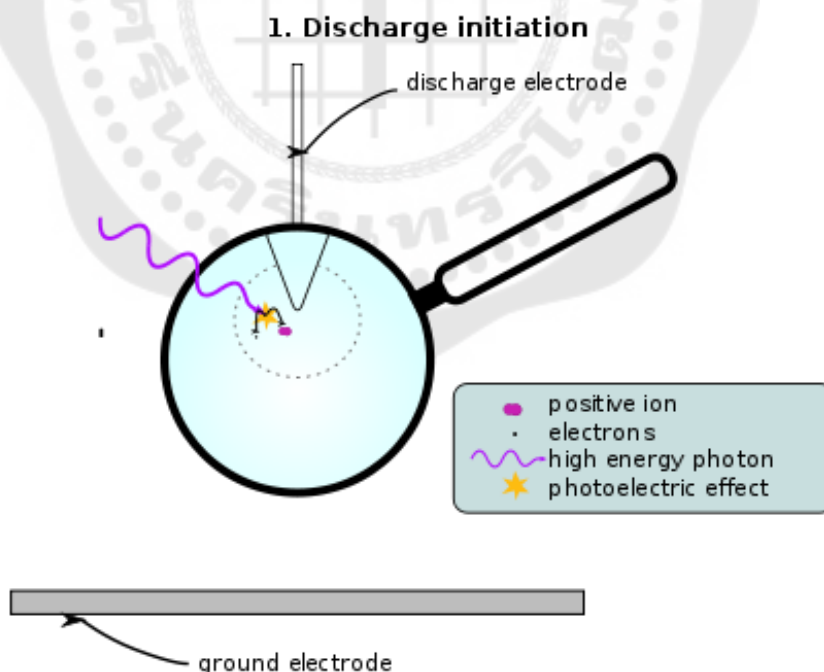
ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/Corona\\_discharge](https://en.wikipedia.org/wiki/Corona_discharge)

จากการปลดปล่อยประจุแบบโคโรนานั้นเป็นกระบวนการที่กระแสไหลจากอิเล็กโทรดที่มีศักย์ภาพสูงไปสู่ของไหลที่เป็นกลาง ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นอากาศ เกิดจากการทำให้อากาศนั้นแตกตัวเป็นไอออนเพื่อสร้างโคโรนารอบ ๆ อิเล็กโทรด ไอออนที่สร้างขึ้นนั้นจะส่งผ่านประจุไปยังพื้นที่ที่มีศักย์ภาพต่ำกว่าในบริเวณใกล้เคียง หรืออาจเกิดการรวมตัวเพื่อสร้างโมเลกุลใหม่ของก๊าซที่เป็นกลางทางไฟฟ้า โดยแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดโคโรนานั้นจะอยู่ที่ประมาณ 30 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร แต่ในขณะที่มีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นกระแสโคโรนาก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา เป็นผลให้มีค่าเกิดค่าวิกฤต ทำให้เกิดการสปาร์ค และทำให้อิเล็กโทรดเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นเราจำเป็นต้องศึกษาลักษณะสนามไฟฟ้าและแพคเตอร์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น เป็นต้น อย่างไรก็ตามประจุโคโรนานั้นอาจจะเป็นได้ทั้งบวกหรือลบ สิ่งนี้ถูกกำหนดโดยขั้วของแรงดันไฟฟ้าบนอิเล็กโทรด ถ้าขั้วไฟฟ้าเป็นบวกส่งผลให้โคโรนาที่เกิดขึ้นเป็นบวก ถ้าขั้วเป็นลบก็ส่งผลให้มีโคโรนาเป็นลบ โดยโคโรนาบวกและลบมี

ลักษณะที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างอนุภาคของไอออนและอิเล็กตรอน ความไม่เสมอภาพนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างที่มีเพียงอิเล็กตรอนอิสระเท่านั้นที่สามารถวิ่งเข้าชนกันเกิดการไอออไนซ์แบบไม่ยืดหยุ่นในความดันและอุณหภูมิทั่วไปของระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

กระบวนการการเกิดปรากฏการณ์โคโรนาพื้นฐาน

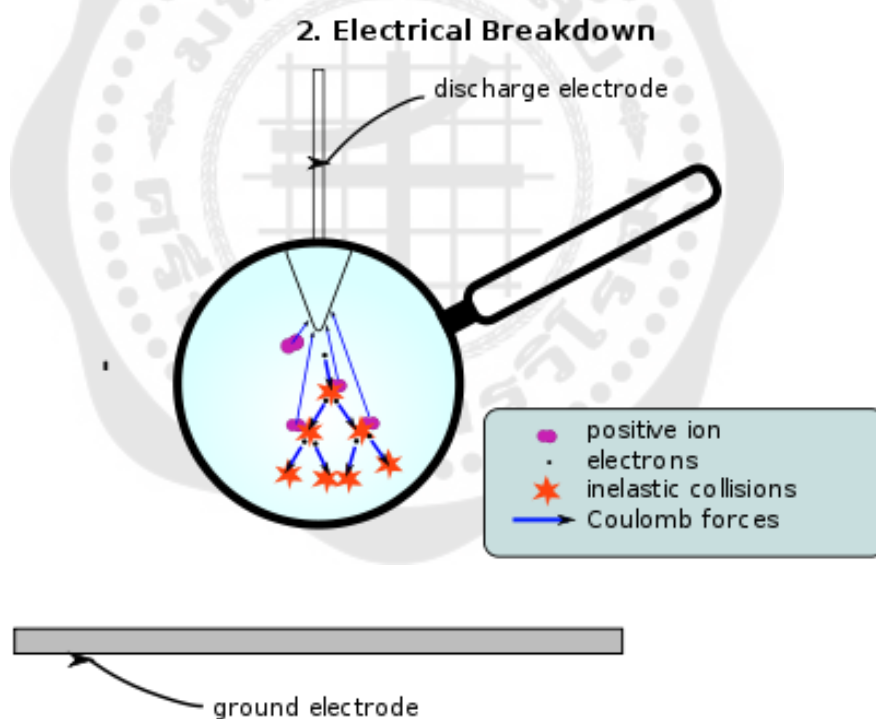
การปล่อยโคโรนาเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าแรงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ภายในอากาศ สนามไฟฟ้าจะทำให้ที่เร่งให้อิเล็กตรอนชนเข้ากับอะตอมจนทำให้เกิดการไอออไนซ์ ส่งผลให้มีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มมากขึ้น ขณะนั้นส่งผลให้อิเล็กตรอนแตกตัวเป็นไอออนอิสระมากขึ้น ดังภาพประกอบ 8 อยู่ในระดับที่เล็กมาก ๆ ของกระบวนการ ซึ่งการสร้างลักษณะของโคโรนาในอากาศบริเวณปลายแหลมของอิเล็กโทรดมีค่าแรงดันไฟฟ้าเชิงลบสูงกว่าระดับพื้นดิน เมื่อเทียบกับกันแล้วคือ โมเลกุลหรืออะตอมจะเป็นกลางภายในบริเวณสนามไฟฟ้ากำลังแรง (เช่น ใกล้เคียงปลายแหลมอิเล็กโทรดจะมีระดับความชันสูง) ส่งผลทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนดังเหตุการณ์ในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ (เช่น โดรนไฟตอนอัลตราไวโอเล็ตหรืออนุภาครังสีคอสมิก) สำหรับการสร้างอิเล็กตรอนอิสระและไอออนบวก



ภาพประกอบ 8 การเริ่มต้นของการดิสชาร์จโคโรนา

ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Corona\\_Discharge\\_initiation.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Corona_Discharge_initiation.svg)

สนามไฟฟ้ามีผลอย่างมากต่อการเร่งชนิดของประจุที่ตรงกันข้ามกันให้เคลื่อนที่ออกจากประจุที่เหมือนกัน เพื่อไม่ให้เกิดการรวมตัวภายในอนุภาคนั้น และการป้อนพลังงานจลน์ให้แก่ไอออนและอิเล็กตรอนอิสระโดยมีอัตราส่วนของมวลที่สูงกว่ากัน ส่งผลทำให้เกิดการเร่งให้เคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวก ทำให้ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกระทบกันกับอะตอมอื่นมากเพียงพอ จนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งการชนกันของอิเล็กตรอนทำให้เกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอีกเรื่อย ๆ กระบวนการเช่นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาลูกโซ่ หรือเรียกว่าหิมะถล่มแบบอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้จะถูกเร่งและเคลื่อนที่เข้าปะทะกับอะตอมอื่น ๆ ทั้งนี้โคโรนาบวกและโคโรนาลบขณะเกิดปรากฏการณ์หิมะถล่มของอิเล็กตรอน ในโคโรนาที่เป็นบวก ขั้วของอิเล็กโทรดที่เป็นบวกจะดึงดูดอิเล็กตรอนในบริเวณนั้นทั้งหมดเข้ามา ในโคโรนาที่เป็นลบ ขั้วของอิเล็กโทรดที่เป็นลบจะผลักอิเล็กตรอนให้ห่างออกไป และไอออนบวกจะถูกดึงดูดเข้ามา



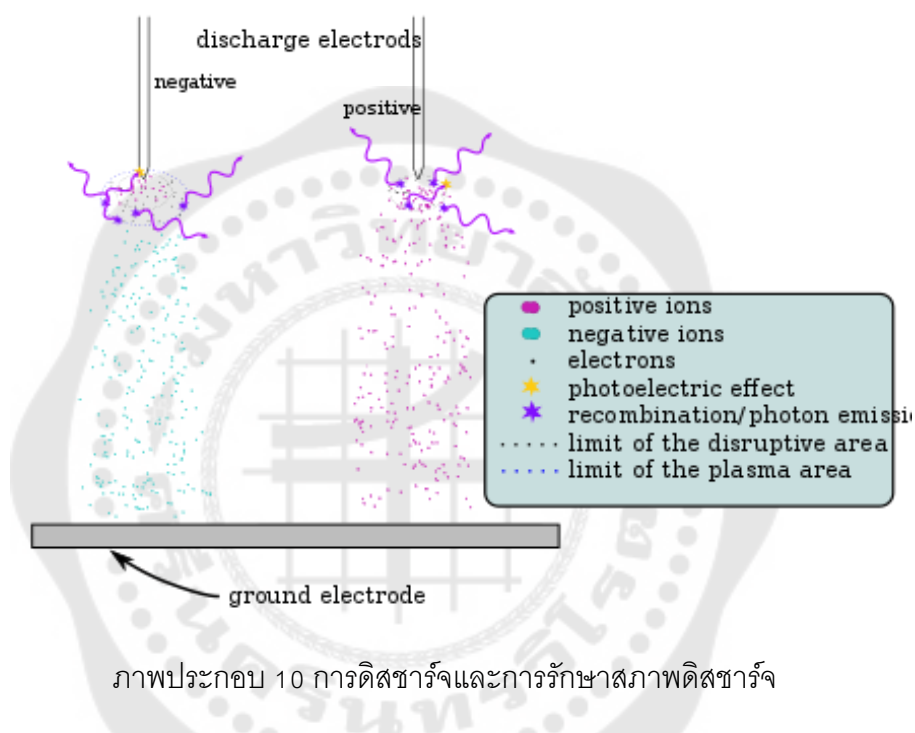
ภาพประกอบ 9 เบรกดาวน์ไฟฟ้า

ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/Corona\\_discharge](https://en.wikipedia.org/wiki/Corona_discharge)



การเรืองแสงของโคโรนาเกิดจากลักษณะของอิเล็กตรอนรวมตัวกับไอออนบวก ทำให้เกิดอนุภาคที่เป็นกลาง ในขณะที่อิเล็กตรอนย้อนสู่พลังงานในระดับเดิม ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยแสงฟोटอนออกมา อนุภาคของฟोटอนนั้นทำให้อะตอมอื่นแตกตัวเป็นไอออน โดยคงไว้ซึ่งการสร้างอิเล็กตรอนแบบถล่มดังภาพประกอบ 10

### 3. Recombination and upkeep of the discharge



ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Corona\\_discharge\\_upkeep.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Corona_discharge_upkeep.svg)

ในช่วงหนึ่งของอิเล็กโทรด ในขณะที่สนามไฟฟ้ามีค่าพลังงานที่ต่ำจนไม่สามารถกระตุ้นหรือเร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมหรืออนุภาคอื่น ๆ ได้ ก็จะไม่ทำให้เกิดการแตกตัวของไอออน ในบริเวณขอบเขตนอกของโคโรนา นอกเหนือจากที่กล่าวนี้ ไอออนจะเคลื่อนที่ในอากาศโดยไม่สร้างไอออนใหม่ ไอออนที่เคลื่อนที่ออกจากขอบเขตนอกของโคโรนา ซึ่งฝั่งที่เป็นขั้วอิเล็กโทรดด้านตรงข้ามจะดึงดูดให้ไอออนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วตรงข้ามนั้น เกิดการรวมตัวกันรอบ ๆ บริเวณขั้วนั้นจนทำให้เกิดอนุภาคที่เป็นกลางอีกครั้ง ทั้งนี้ยังคงรักษาสภาพสมบูรณ์ในทางอุณหพลศาสตร์ กระบวนการสร้างลักษณะของโคโรนาเป็นแบบไม่สมดุลอย่างยิ่งเป็นผลทำให้ลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้นนั้นมีอุณหภูมิไม่สูงมาก การเกิดอิเล็กตรอนแบบหิมะถล่มใช้พลังงานในการสร้างไม่สูงมากที่จะทำให้ก๊าซในบริเวณโคโรนาร้อนและแตกตัวเป็นไอออนได้ ต่างจากการเกิด

อาร์คไฟฟ้าหรือประกายไฟ ซึ่งก๊าซในโมเลกุลที่น้อยมากที่มีผลต่อการเกิดอิเล็กตรอนแบบหิมะถล่ม โดยมีพลังงานใกล้เคียงกับพลังงานไอออไนเซชันที่ 1 – 3 eV ส่วนที่เหลือของก๊าซจะใกล้เคียงกับ อุณหภูมิแวดล้อมของแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา โดยคุณสมบัติของโคโรนาบวกและลบมีดังนี้

### 2.3.1 คุณสมบัติของโคโรนาที่เป็นบวก

โคโรนาที่เป็นบวกจะสร้างลักษณะของพลาสมาที่สม่ำเสมอตามลักษณะของตัวนำ และสามารถเห็นเป็นแสงสีม่วงหรือสีน้ำเงินเรืองแสง แม้ว่าการปล่อยก๊าซจำนวนมากจะอยู่ในรังสี อัลตราไวโอเล็ต ความสม่ำเสมอของลักษณะพลาสมาเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดที่เป็นลักษณะ เดียวกันของอิเล็กตรอนแบบหิมะถล่ม ทั้งนี้ด้วยขนาดรูปร่างและแรงดันไฟฟ้าที่เหมือนกัน ทำให้มี ขนาดที่เล็กกว่าลักษณะของโคโรนาเชิงลบโดยสอดคล้องกันเล็กน้อย เนื่องจากไม่มีบริเวณ พลาสมาที่ไม่แตกตัวเป็นไอออนระหว่างบริเวณด้านในและด้านนอก โคโรนาบวกมีความหนาแน่น ของอิเล็กตรอนอิสระต่ำกว่าจากการเทียบกันกับโคโรนาเชิงลบ เปรียบเทียบได้เป็นหนึ่งในพันส่วน ของความหนาแน่นในอิเล็กตรอนบริเวณนั้น และเปรียบเทียบได้หนึ่งในร้อยของจำนวนอิเล็กตรอน ทั้งหมด อย่างไรก็ตามลักษณะของโคโรนาที่เป็นบวกจำนวนของอิเล็กตรอนจะมีความเข้มข้นใกล้ กับพื้นผิวของตัวนำที่โค้งงอ ในบริเวณที่มีการไล่ระดับศักย์สูง ในลักษณะของโคโรนาที่เป็นลบจะมี จำนวนอิเล็กตรอนอยู่ด้านนอกบริเวณพื้นที่ด้านล่างจำนวนมาก ดังนั้นหากจะให้ประโยชน์ด้าน อิเล็กตรอนจึงที่ต้องการพลังงานกระตุ้นสูง โคโรนาที่เป็นบวกอาจทำให้เกิดค่าคงที่ของการ ปฏิกริยาได้ดีกว่าโคโรนาแบบลบ แม้ว่าจำนวนของอิเล็กตรอนทั้งหมดอาจต่ำกว่า แต่จำนวน อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงมากอาจสูงกว่า

#### กระบวนการการเกิดปรากฏการณ์โคโรนาบวก

โคโรนาเชิงบวกเริ่มต้นโดยเหตุการณ์ไอออไนเซชัน เกิดจากการแตกตัวเป็นไอออนใน บริเวณที่มีระดับพลังงานสูง จำนวนอิเล็กตรอนจะถูกดึงดูดเข้าหาขั้วอิเล็กโทรดด้านตรงข้าม และ ไอออนที่เป็นบวกจะผลักไอออนที่เป็นลบ โดยการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นเคลื่อนที่ไปใกล้ขั้ว อิเล็กโทรดมากขึ้นเรื่อย ๆ โมเลกุลเหล่านั้นจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในโคโรนาที่เป็นบวก อิเล็กตรอนจะถูกสร้างเพิ่มขึ้นอย่างมากในตัวของไหล ในบริเวณนอกพลาสมาหรือบริเวณกลุ่ม อิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกสร้างขึ้นโดยการแตกตัวเป็นไอออนที่เกิดจากแสงไฟตอนที่ปล่อยออกมาจาก พลาสมานั้นในกระบวนการกำจัดการกระตุ้นต่าง ๆ ภายในที่เกิดลักษณะของพลาสมาขึ้นเป็นผล จากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเข้าหากัน พลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาในการเคลื่อนที่ เข้าหากันนั้นทำให้เกิดแสงไฟตอนที่แผ่เข้าสู่ก๊าซ และจะถูกดึงดูดด้วยสนามไฟฟ้าไฟฟ้าอ่อนไปยัง ขั้วอิเล็กโทรด และเริ่มกระบวนการสร้างพลาสมาเพิ่มเติมขึ้น

### 2.3.2 คุณสมบัติของโคโรนาเชิงลบ

โคโรนาแบบลบจะแสดงลักษณะของโคโรนาแบบไม่สม่ำเสมอ โดยลักษณะพื้นผิวและความผิดปกติของหัวอิเล็กโทรดจะแตกต่างกันไป ซึ่งลักษณะของโคโรนาลบมักจะพบที่ขอบคมของหัวอิเล็กโทรดเป็นจำนวนมากหรือเป็นกระจุก ทั้งนี้จะเปลี่ยนไปตามพลังงานของสนามไฟฟ้า โคโรนาแบบลบเป็นผลมาจากแหล่งกำเนิดของอิเล็กตรอนหิมะถล่มทุติยภูมิ ดูเหมือนว่ามีขนาดใหญ่กว่าโคโรนาที่เป็นบวกเล็กน้อย เนื่องจากอิเล็กตรอนได้รับอนุญาตให้ลอยออกจากบริเวณไอออน ดังนั้นพลาสมาจึงยังคงอยู่ห่างออกไปในช่วง ๆ หนึ่ง จำนวนความหนาแน่นและจำนวนของอิเล็กตรอนมีมากกว่าในโคโรนาบวกที่สอดคล้องกันมาก อย่างไรก็ตามพวกมันมีพลังงานต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากอยู่ในบริเวณที่มีความลาดเอียงต่ำ ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาหลาย ๆ ปฏิกิริยา จำนวนอิเล็กตรอนและความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาในพลังงานที่ต่ำกว่าของอิเล็กตรอน ทั้งนี้จะหมายความว่าปฏิกิริยาที่ต้องการอิเล็กตรอนพลังงานที่สูงขึ้นอาจเกิดขึ้นในอัตราที่ต่ำกว่า

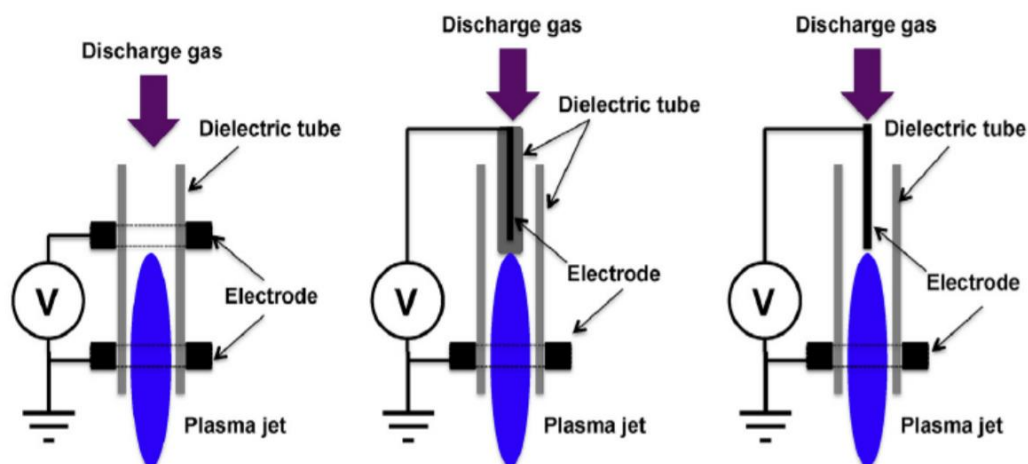
#### กระบวนการการเกิดปรากฏการณ์โคโรนาลบ

โคโรนาแบบลบมีลักษณะการสร้างที่ซับซ้อนกว่าโคโรนาที่เป็นบวก โดยลักษณะการสร้างของโคโรนาลบเกิดจากเหตุการณ์ไอออนไนเซชันบริเวณภายนอก ซึ่งอิเล็กตรอนเกิดขึ้นที่ชั้นปฐมภูมิตามด้วยอิเล็กตรอนแบบหิมะถล่ม อิเล็กตรอนที่แตกตัวเป็นไอออนจากก๊าซที่เป็นกลางจะไม่สามารถรักษาการเกิดกระบวนการในโคโรนาแบบลบได้ โดยการสร้างอิเล็กตรอนชั้นทุติยภูมิสำหรับหิมะถล่มเพิ่มเติม เนื่องจากการเคลื่อนที่ทั่วไปของอิเล็กตรอนในโคโรนาแบบลบจะถูกผลักดันออกจากหัวอิเล็กโทรด กระบวนการที่สำคัญในการสร้างอิเล็กตรอนบริเวณขอบเขตทุติยภูมิเกิดจากปฏิกิริยาแสงโฟโตอิเล็กทริกบริเวณผิวของหัวอิเล็กโทรดเอง พลังงานจากการไอออนไนซ์ของอากาศ ณ อุณหภูมิและความดันมาตรฐานทำให้มันเป็นแหล่งที่มาของเสรีนิยมมากขึ้นของอิเล็กตรอนรองภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ แหล่งที่มาของพลังงานสำหรับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนหลังจากการถูกกระตุ้นด้วยการชนกัน คือโฟตอนจะมีพลังงานสูงภายในพลาสมา ก๊าซที่เป็นกลางจากการแตกตัวเป็นไอออนจะลดลงในโคโรนาแบบลบ โดยไอออนบวกความเข้มข้นสูงรวมตัวกันเป็นก้อนรอบ ๆ ลักษณะอิเล็กโทรดภายใต้เงื่อนไขอื่น ๆ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างโคโรนาบวกและโคโรนาลบ ในลักษณะการเกิดของอิเล็กตรอนในลำดับถัดมาก็คือ ในโคโรนาบวกพวกมันถูกสร้างขึ้นโดยก๊าซที่อยู่รอบ ๆ บริเวณพลาสมา อิเล็กตรอนที่เกิดการชนกันใหม่จะเคลื่อนที่เข้าด้านใน ลักษณะของโคโรนาถูกสร้างขึ้นที่บริเวณปะลาแฮม ซึ่งโครงสร้างของโคโรนาลบเกิดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนตัวออกไปบริเวณภายนอก และเมื่อพบกับโมเลกุลของอิเล็กโตร เนกาทีฟ (เช่น

ออกซิเจนและไอน้ำ) เกิดการรวมตัวกันทำการสร้างไอออนลบ จากนั้นไอออนลบเหล่านี้จะถูกดึงดูดไปยังอิเล็กโทรดปลายแหลมที่เป็นบวก ทำให้ 'วงจร' สมบูรณ์

## 2.4 ลำพลาสมา

ชุดกำเนิดลำพลาสมา (plasma jet) ประกอบด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าสองขั้วระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ โดยกำหนดให้ท่อก๊าซมีช่องว่างอากาศที่สารตั้งต้นให้ก๊าซมีอัตราการไหลของก๊าซผ่านเข้ามาในท่อได้ เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้แก่ขั้วอิเล็กโทรดภายในท่อก๊าซซึ่งเป็นแกนกลางและต่อขั้วกราวด์ทางไฟฟ้าให้แก่อิเล็กโทรดภายนอกซึ่งทำหน้าที่เป็นกราวด์ของระบบ ในการเกิดลำพลาสมาจะใช้ก๊าซที่เป็นกลางหรืออากาศเป็นสารตั้งต้นให้ไหลผ่านเข้ามาในท่อระหว่างขั้วอิเล็กโทรดภายในออกสู่ภายนอก เมื่อสนามไฟฟ้าถูกกระตุ้นจากการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้แก่ขั้วอิเล็กโทรดภายใน เมื่ออิเล็กตรอนอิสระได้รับพลังงานมากเพียงพอจะทำให้เกิดการเร่งของอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซจนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขั้วอิเล็กโทรดภายในวิ่งเป็นเส้นตรงผ่านอากาศไปยังขั้วอิเล็กโทรดภายนอก แต่ในระหว่างนั้นก็เกิดการชนกันกับอนุภาคภายในของก๊าซหรืออากาศที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ทำให้โมเลกุลของก๊าซ หรือไอระเหย ที่ป้อนเข้า ทำให้ก๊าซเกิดปฏิกิริยาขณะอยู่ในสภาวะที่ถูกกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าจนทำให้พลังงานมีค่าที่สูงขึ้น และเกิดการแตกตัวหรือถูกไอออไนซ์ (เกิดการแตกตัวเป็น อนุภาคมูลอิสระ อิเล็กตรอน โมเลกุล อะตอม อนุภาคมีประจุทั้งประจุบวกและประจุลบ) เพื่อคงให้อยู่ในสถานะพลาสมาและจะถูกขับออกมาทางช่องว่างที่เปิดไว้ให้ไหลตามทิศทางการไหลของก๊าซ ประกอบกับการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้า ทำให้ลักษณะของพลาสมาที่พุ่งออกมานั้นมีรูปร่างเป็นลำเจ็ท หรือมีลักษณะคล้ายปลายแหลมดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 ลักษณะการสร้างลำพลาสมา (plasma jet)

ที่มา: <http://cuir.car.chula.ac.th/>

## 2.5 คุณสมบัติของน้ำ

จากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติของน้ำมีหลากหลายคุณสมบัติและองค์ประกอบ ซึ่งจะส่งผลต่อปฏิกิริยาของน้ำหลากหลายชนิด ดังนี้

### 2.5.1 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC)

ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำ คือความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า โดยการเกิดปฏิกิริยานั้นเกิดจากไอออนภายนอกซึ่งจะส่งผลเป็นอย่างมากต่อค่า EC เช่น เกลือหรือสารเคมีอื่นๆ ที่ละลายในน้ำสามารถแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุบวกและลบได้ ไอออนอิสระเหล่านี้ในน้ำจะนำไฟฟ้าค่าการนำไฟฟ้า โดยคุณสมบัตินี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับจากเกลือและวัสดุอนินทรีย์ที่ละลายน้ำ เช่นคลอไรด์ ซัลไฟด์ และสารประกอบคาร์บอเนต เป็นต้น โดยน้ำกลั่นหรือน้ำจะปราศจากไอออนซึ่งฉนวนมีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำมาก ยิ่งไปกว่านั้น กล่าวไว้ว่าสปีชีส์และไอออนที่ทำปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการบำบัดด้วยพลาสมาจะละลายได้ง่ายในน้ำ ซึ่งจะเปลี่ยนค่าการนำไฟฟ้าอย่างเห็นได้ชัด โดยจะมีการก่อตัวของอนุมูลอิสระออกซิเจน (reactive oxygen species, ROS) และอนุมูลอิสระไนโตรเจน (reactive nitrogen species, RNS) ในระหว่างการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาจะช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้าของน้ำ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของการนำไฟฟ้าของน้ำ จะรวมถึงการก่อตัวของไนโตรเจนออกไซด์ (nitrogen oxide,  $\text{NO}_x$ ) (R. Thirumdas, 2018)

ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าของน้ำจึงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออน ซึ่งที่มาของไอออนเหล่านี้มาจากของแข็งและความเค็มที่ละลายได้ทั้งหมด (total dissolved solids, TDS) สารเคมี

และโลหะหนักที่เจือปนในน้ำทำให้น้ำสามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งทั้งหมดนี้ใช้ในการวัดค่า EC ของน้ำ ซึ่งช่วยในการระบุความบริสุทธิ์ของน้ำ ยิ่งน้ำบริสุทธิ์ ค่าการนำไฟฟ้ายิ่งต่ำ (น้ำบริสุทธิ์ค่าการนำไฟฟ้า เป็นศูนย์) เพื่อแสดงตัวอย่างนั้นคือค่าน้ำกลั่นเกือบจะเป็นฉนวน แต่น้ำเค็มจะสามารถนำไฟฟ้าได้ดี

โดยหน่วยค่าการนำไฟฟ้าหน่วย SI (International Systems of Units) คือซีเมนส์ต่อเมตร (S/m) ถึงแม้ว่าหน่วย SI คือซีเมนส์ต่อเมตร (S/m) แต่ในทางปฏิบัติค่า EC ในน้ำไม่สูงจึงนิยมใช้เป็น ไมโครซีเมนส์/เซ็นติเมตร ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

ซึ่งมาตรฐานคุณภาพค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ เป็นมาตรการและวัดในระดับจาก 0 ถึง 50,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ค่าการนำไฟฟ้าวัดใน ซีเมนส์ต่อเมตร โดยค่าของน้ำจืดจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1,500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  และน้ำทะเลทั่วไปจะมีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 50,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  โดยค่าการนำไฟฟ้าจะแสดงดังนี้

เมื่อค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ 0 – 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  นิยมนำมาใช้เพื่อดื่มกินในการดำรงชีวิต สำหรับมนุษย์ (หากไม่มีสารพิษ อินทรีย์วัตถุแขวนลอยอยู่ไม่มากเกินไป) สำหรับการชลประทาน รวมถึงเหมาะสำหรับปศุสัตว์ทุกชนิด เป็นต้น ส่วนค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ 800 – 2,500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ก็ นิยมใช้เพื่อให้มนุษย์สามารถบริโภคได้, ใช้เพื่อการชลประทาน และยังเหมาะสำหรับปศุสัตว์ทุกชนิด และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ 2,500 -10,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  จะไม่แนะนำสำหรับการบริโภคของมนุษย์ ซึ่งโดยปกติไม่เหมาะสำหรับการชลประทาน แม้ว่าน้ำจะสูงถึง 6,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  แต่สามารถนำมาใช้สำหรับน้ำดื่มโดยสัตว์ปีกและสุกร

### 2.5.2 ค่าสารประกอบไนโตรเจน (nitrogen compound)

Thirumdas R. et al (2018) กล่าวไว้ว่า การศึกษาค่าไนไตรท์และไนเตรตใน PAW เป็นหลักฐานหลักที่แสดงให้เห็นถึงการก่อตัวของ RNS

2.5.2.1 ไนไตรท์ (nitrite,  $\text{NO}_2^-$ ) โดยปกติจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาวะการทำงานของระบบกรองชีวภาพ ว่าทำงานได้สมบูรณ์ หรือเพียงพอ ตามวัฏจักรไนโตรเจน เนื่องจากไนไตรท์เกิดจากการย่อยสลายแอมโมเนียโดยแบคทีเรียที่ใช้ก๊าซออกซิเจน ในบางสาเหตุการเพิ่มระดับไนไตรท์ จะสามารถเกิดจากการเพิ่มจำนวนสิ่งมีชีวิตได้

2.5.2.2 ไนเตรต (nitrate,  $\text{NO}_3^-$ ) เป็นสารเคมีตัวสุดท้ายในวัฏจักรไนโตรเจน เกิดจากการที่แบคทีเรียย่อยสลายไนไตรท์ โดยใช้ออกซิเจน ซึ่งในทางธรรมชาติของไนเตรตจะถูกพืชน้ำ และพืชบางชนิดจะนำไปใช้สร้างความเจริญเติบโต และอีกส่วนจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจน

ซึ่งค่าสารประกอบไนโตรเจนสามารถบ่งชี้คุณภาพน้ำได้ในกรณีที่พบค่าไนเตรทสูง อาจเนื่องจากคุณภาพน้ำเสียและเน่ามานานแล้วถ้าในแหล่งน้ำพบปริมาณไนเตรทสูงมากกว่า 50 ppm เป็นเวลานานจะมีผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลงส่งผลต่อสุขภาพสัตว์น้ำได้ ถ้าพบค่าแอมโมเนียสูงแสดงว่าคุณภาพน้ำไม่ดี เริ่มเน่าเสียซึ่งเป็นพิษต่อสัตว์น้ำที่เน้นให้อาหารที่มีโปรตีนสูง ซึ่งอาจพบว่าค่าไนโตรทสูงเช่นกัน ซึ่งในทางปฏิบัติจะแก้ไขโดยการใส่ เกลือแกง (sodium chloride, NaCl) เพื่อช่วยลดความเป็นพิษของสารประกอบไนโตรเจนได้หรือลดการให้อาหารเพื่อลดปริมาณของเสียในบ่อและการเพิ่มออกซิเจนในน้ำ เป็นต้น

### 2.5.3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

เป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์สามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนกับน้ำเมื่อถูกเจือจาง เป็นสารละลายไม่มีสีเนื่องจาก H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> สามารถสลายตัวเป็นน้ำได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงและความร้อน อีกทั้งยังเป็นสารฆ่าเชื้อ (sanitizer) ที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และแบคทีเรีย ซึ่งในการยับยั้งและทำลายเชื้อแบคทีเรียของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เนื่องจากเป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizes) ที่มีความสามารถในการชิงอิเล็คตรอนได้เก่งจึงเกิดเป็นสารอนุมูลอิสระเช่น (hydroxyl radical, ·HO) และ O<sup>-2</sup> (superoxide) จึงมีฤทธิ์รุนแรงต่อเซลล์ของแบคทีเรีย โดยจะออกซิไดซ์หมู่ซัลไฟไฮดริล (sulfhydryl) ของแบคทีเรียที่เยื่อหุ้มเซลล์ทำให้เกิดการเสียสภาพของโปรตีนในเซลล์และมีผลต่อไขมันในเยื่อหุ้มเซลล์โดยทำให้เกิดภาวะ Lipid peroxidation คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่ออนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากับกรดไขมันไม่อิ่มตัวในผนังเซลล์เกิดขึ้นในผนังเซลล์ของแบคทีเรียทำให้เยื่อหุ้มเซลล์เกิดความเสียหายหรือเสื่อมสภาพ เป็นผลทำให้เกิดการซึมผ่านได้สูงขึ้น (permeability) และส่งผลกระทบต่อระบบการป้องกันในการยอมให้สารซึมผ่านเข้าออกระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์ จึงเกิดการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และโครงสร้างโมเลกุลโปรตีนภายในเซลล์

### 2.5.4 ค่าความเป็นกรด-เบส (Positive potential of the Hydrogen ions, pH)

ค่า pH เป็นค่าที่แสดงความเป็นกรด-เบส หรืออาจเรียกได้ว่าศักยภาพของไฮโดรเจนไอออน เป็นค่าที่แสดงถึง ปริมาณความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนไอออน (H<sup>+</sup>) ใช้แสดงค่าความเป็นกรด-เบส ของสสารหรือสารที่อยู่ในรูปแบบต่าง ๆ โดยค่า pH จะอยู่ในช่วง 1-14 ทั้งนี้เมื่อค่า pH สูงขึ้นเกินกว่า 7 สารชนิดนั้นก็จะมีฤทธิ์เป็นเบสหรือด่าง และถ้าค่า pH ลดลงน้อยกว่า 7 สารชนิดนั้นจะมีฤทธิ์เป็นกรด แต่ถ้าหากค่า pH นั้นมีค่าเท่ากับ 7 แสดงว่าสารชนิดนั้นมีค่าเป็นกลางหรือที่เรียกว่า pH balance

สำหรับการตรวจสอบหาค่า pH ในน้ำ จะเป็นค่าที่บอกปริมาณของกรดที่ปนอยู่ในน้ำ ค่า pH มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในน้ำ น้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากสิ่งปนเปื้อน (และต้อง

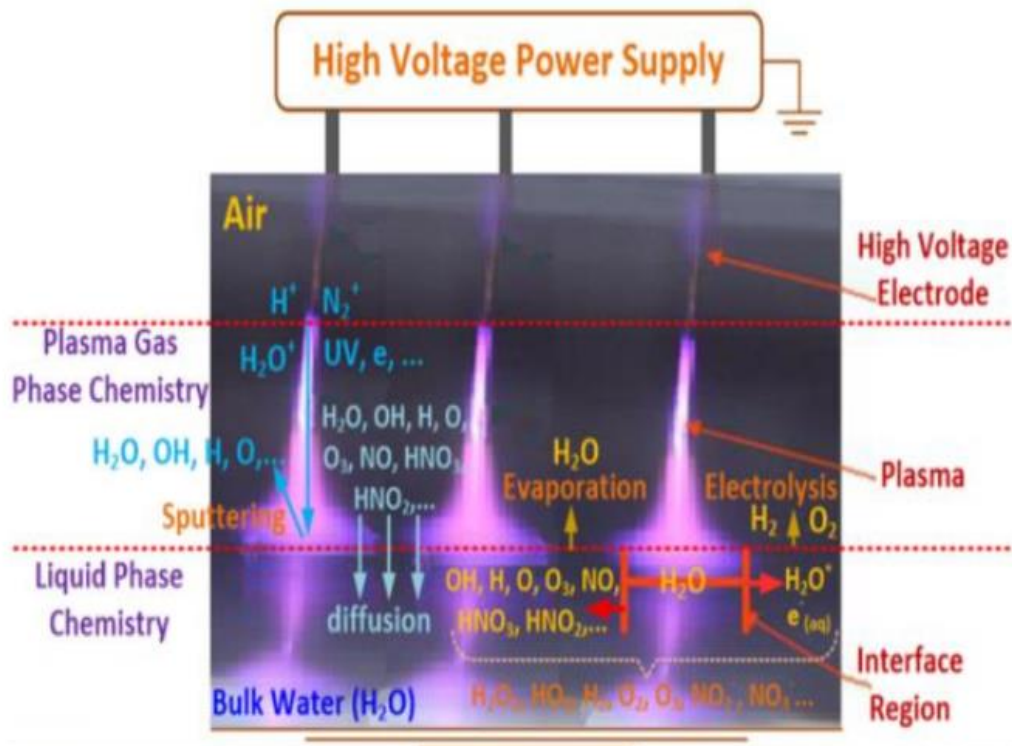
ไม่สัมผัสกับอากาศด้วย) จะมีค่า pH เท่ากับ 7 น้ำซึ่งมีสิ่งเจือปนอยู่ด้วยอาจจะมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 ได้ ถ้าน้ำนั้นมีกรดและเบสอยู่ในปริมาณที่เท่ากันและสมดุลกัน ถ้าน้ำมีค่า pH ต่ำกว่า 7 แสดงว่าน้ำนั้นมีปริมาณกรดอยู่มากเกินจุดที่สมดุล แต่ถ้ามีค่า pH มากกว่า 7 แสดงว่าในน้ำนั้นมีเบสมากเกินจุดที่สมดุล

โดยธรรมชาติแล้ว น้ำฝนที่ไม่มีสิ่งปนเปื้อนจะมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 5 – 6 ดังนั้นแม้ว่าน้ำฝนที่ตกในบริเวณที่มีภาวะมลพิษน้อยที่สุดบนพื้นโลก ก็ยังคงมีส่วนเป็นกรดอยู่นั่นเอง ทั้งนี้เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศสามารถละลายได้ในหยดน้ำฝน โดยปกติแล้วน้ำกลั่นที่สัมผัสกับอากาศก็จะมีค่า pH ประมาณ 5 – 6 เช่นกัน ฝนกรดส่วนใหญ่่มักจะมีค่า pH ประมาณ 4 แต่ถ้าเป็นหมอกในเขตเมืองอาจจะมีค่า pH ต่ำกว่า 2 ก็ได้ น้ำในทะเลสาบและลำธารส่วนใหญ่จะมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.5 – 8.5 อาจจะมีน้ำซึ่งมีสภาพเป็นกรดเองโดยธรรมชาติในบริเวณที่มีดินแร่บางชนิดอยู่ในดิน (เช่น ซัลไฟด์) การทำเหมืองแร่อาจจะมีดินแร่บางอย่างที่ทำให้เกิดการถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำเช่นเดียวกัน น้ำที่มีสภาพเป็นเบสเองโดยธรรมชาติมักจะมีพบเฉพาะในดินที่มีดินแร่บางชนิดปนอยู่มาก เช่น ปูนขาว หรือหินปูน

## 2.6 การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา

การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา (Plasma Activated Water, PAW) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมและเป็นที่น่าสนใจกันอย่างมาก ทำให้มีการนำมาใช้ในการปรับปรุงสภาพน้ำกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเทคโนโลยีนี้เป็นเทคโนโลยีที่ปราศจากสารเคมีและปลอดภัยกับสิ่งแวดล้อม เมื่อนำ PAW มาใช้ในการปรับปรุงสภาพน้ำ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารอนุมูลอิสระ เกิดการก่อตัวของปฏิกิริยาออกซิเจน (reactive oxygen species, ROS) และการก่อตัวของปฏิกิริยาไนโตรเจน (reactive nitrogen species, RNS) ซึ่งการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมานั้น เป็นหนึ่งในพลาสมาอุณหภูมิต่ำ (Non-thermal plasma) ประเภทหนึ่ง เมื่อก๊าซถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า จะทำให้เกิดการดิสชาร์จของไฟฟ้า เกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) หรือกลายเป็นพลาสมา เมื่อพลาสมาสัมผัสกับน้ำจะมีความไวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radicals,  $\cdot\text{OH}$ ) อีกทั้งยังช่วยเพิ่มโอโซน (ozone,  $\text{O}_3$ ) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ไนเตรท (nitrite,  $\text{NO}_2^-$ ) และไนเตรต (nitrate,  $\text{NO}_3^-$ ) เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วยังสามารถนำมาใช้ในการประยุกต์ทางด้านการเกษตรได้อีกด้วย เช่น การยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ของพืช การเพิ่มความสามารถในการเจริญเติบโตของพืช การลดการใช้น้ำในกระบวนการผลิตและการเพิ่มอัตราการงอกของเมล็ด การเพิ่มน้ำหนักของต้นพืช เป็นต้น





ภาพประกอบ 12 ปฏิกริยาจากการปล่อยลำพลาสมา

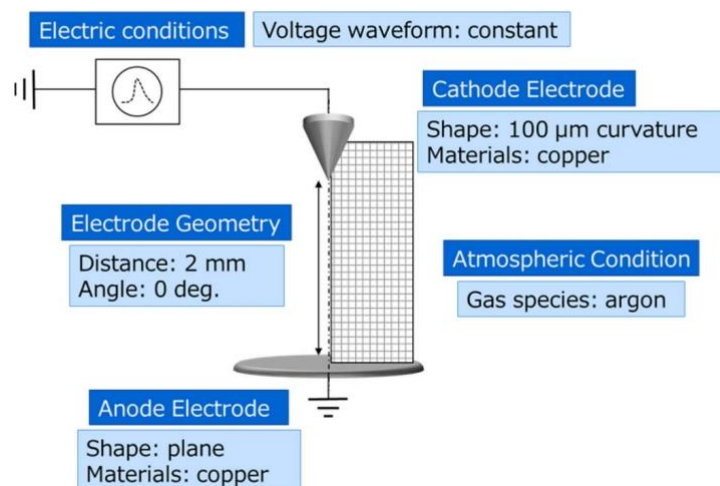
ที่มา: (C. Dechthummarong)

จากที่กล่าวมาข้างต้นการเกิดลักษณะของพลาสมาสามารถดูได้จากภาพประกอบ 12 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพลาสมาสามารถเกิดขึ้นได้โดยก๊าซที่เป็นกลางไหลผ่านบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า และเมื่อสนามไฟฟ้ามีปริมาณสูงมากเพียงพอก็จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระนั้นได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าไปกระตุ้นก๊าซที่ไหลผ่าน จึงทำให้อิเล็กตรอนอิสระเกิดการเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ ซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกจากอะตอม โดยจำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานั้นจะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยกระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ซึ่งจะเกิดเป็นพลาสมาในที่สุด ซึ่ง PAW ดังกล่าวถือว่าเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการนำมาใช้งานและง่ายต่อการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านต่าง ๆ ซึ่งการสร้างลักษณะของพลาสมามีการสร้างที่ไม่ซับซ้อน มีขนาดและปริมาณที่สามารถกำหนดเองได้ มีการจัดเก็บที่สะดวก และใช้ต้นทุนในการสร้างชุดกำเนิดลำพลาสมาที่ต่ำ

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะนำเอาเทคโนโลยีพลาสมาประยุกต์ใช้สำหรับการปรับปรุงสภาพน้ำ จากการที่ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์เบื้องต้นจากหัวข้อที่ผ่านมาไม่ว่าจะเป็น พลาสมา สนามไฟฟ้า โครนาไดสชาร์จ ถ้าพลาสมา คุณสมบัติของน้ำ และการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งจะมีส่วนสำคัญสำหรับงานวิจัยเล่มนี้ จึงได้หาข้อมูลและแหล่งอ้างอิงต่าง ๆ เพื่อนำมาประกอบกับการทดลอง ดังจะกล่าวต่อไป

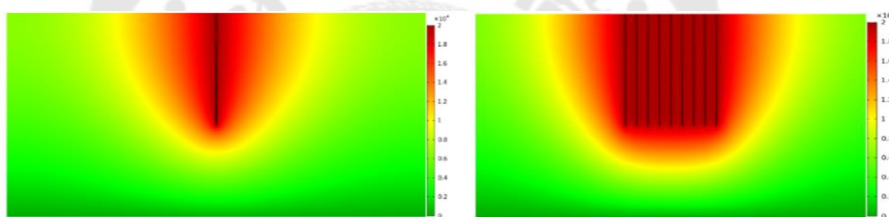
ในงานของ Yosuke Sato et al. (2020) จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของวิธีการสร้างแบบจำลองลักษณะอิเล็กโทรดระหว่างปลายแหลมกับระนาบแสดงดังภาพประกอบ 13 โดยการป้อนไฟฟ้าแรงดันสูงเข้าที่ขั้วของแคโทดที่มีระยะห่าง 2 มม. ภายใต้ความดันบรรยากาศในก๊าซอาร์กอน สำหรับขั้ววงที่ปลายแหลมอิเล็กโทรด โครนาพลาสมาจะเกิดเร็วขึ้นและโครนาพลาสมาจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในบริเวณปลายแหลมมีค่าลดลง สำหรับขั้ววงการคายประจุที่เหมือนโครนาเกิดขึ้นรอบ ๆ อิเล็กโทรดปลายแหลมภายใต้แรงดันไฟฟ้าต่ำ และโครนาพลาสมาจะกระจายก่อดัวภายใต้แรงดันไฟฟ้าที่สูง แสดงให้เห็นว่าการทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้าต่ำที่ลักษณะมีขั้วเป็นวงมีประโยชน์สำหรับการปล่อยอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นสูงและเสถียรภายใต้อาร์กอนความดันบรรยากาศ



ภาพประกอบ 13 รูปแบบการจำลองการสร้างพลาสมา

ที่มา: Yosuke Sato et al. (2020)

ในงานวิจัยของ Yottana Tanakaran et al. (2020) ได้ออกแบบการจำลองปล่อยโคโรนาแบบหลายหัว เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของสนามไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมต่อการสร้างลักษณะพลาสมา ซึ่งลักษณะของการจัดเรียงแบบหลายเข็มและแบบเข็มเดี่ยวแสดงดังภาพประกอบ 14 จะมีสนามไฟฟ้าที่มีปริมาณมากที่สูงบริเวณรอบ ๆ ตำแหน่งใกล้ปลายแหลม โดยสนามไฟฟ้าจะลดลงเมื่อมีระยะห่างจากพื้นผิว อย่างไรก็ตามสนามไฟฟ้าของหัวอิเล็กโทรดแบบหลายเข็มกำหนดให้มีระยะห่างที่เท่ากันในแต่ละเข็ม และทุกปลายแหลมของเข็มโดยถูกตัดแล้วเชื่อมรวมเข้าด้วยกันให้มีระยะห่างจากพื้นผิวที่เท่ากัน ดังนั้นจะทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากันรอบปลายแหลมที่เชื่อมต่อกับหัวแอโนด ส่งผลให้ลักษณะแบบหลายเข็มมีขนาดกว้างขึ้นด้วยการเพิ่มจำนวนของเข็ม ทำให้เกิดอิเล็กโทรดระนาบกึ่งเครื่องแบบเสมือนที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอสูงเพื่อรักษาสถานะพลาสมาให้เสถียรขึ้นมากกว่าแบบเข็มเดี่ยว

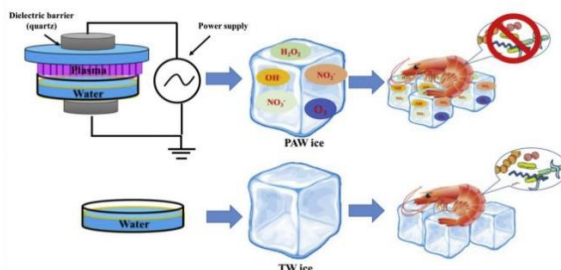


ภาพประกอบ 14 ลักษณะของการจัดเรียงแบบเข็มเดี่ยว และหลายเข็ม

ที่มา: Yottana Tanakaran et al. (2020)

ในงานวิจัยของ Xinyu Liao et al. (2018) ได้มีการนำเอาเทคโนโลยีกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา (PAW) โดยจะมีการนำเอา PAW มาใช้ในการปรับปรุงสภาพน้ำ และนำน้ำที่ผ่านการปรับปรุงสภาพแล้วมาแช่แข็ง หลังจากนั้นก็ทำไว้สำหรับแช่กุ้งเพื่อเก็บรักษาความสดของกุ้ง และยังมีความสามารถในการช่วยยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ โดยผลของ PAW สามารถที่จะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังคงคุณภาพของกุ้งให้คงความสดแสดงดังภาพประกอบ 15 เพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้ยาวนานยิ่งขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของพลาสมากับน้ำจะเพิ่มการก่อตัวของออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น โดยคุณสมบัติทางเคมีของน้ำแข็งที่ผลิตจากน้ำประปาและผลิตจากน้ำที่ถูกปรับปรุงสภาพด้วยพลาสมาจะแสดงดังตาราง 1 จะทำให้เห็นได้ว่า PAW มีผลการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ไม่ว่าจะเป็นค่าไอออนไนต์ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค่าความเข้มข้นไอโซน

และค่าความเข้มข้นไนเตรต ซึ่งค่าที่กล่าวมานั้นมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย



ภาพประกอบ 15 การใช้ น้ำแข็งจากกระตุ้นด้วยพลาสมาเพื่อถนอมกุ้ง

ที่มา: Xinyu Liao et al. (2018)

ตาราง 1 ค่าพารามิเตอร์ของน้ำจากการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยพลาสมา

Property	pH	ORP (mV)	Electrical conductivity ( $\mu\text{s/cm}$ )	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> concentration (mg/L)	Ozone concentration (mg/L)	Nitrate concentration (mg/L)
TW ice	6.91 $\pm$ 0.09	267 $\pm$ 8	8.6 $\pm$ 0.5	0.030 $\pm$ 0.001	0.050 $\pm$ 0.002	1.60 $\pm$ 0.04
PAW ice	3.04 $\pm$ 0.14	485 $\pm$ 2	427.0 $\pm$ 3.0	2.15 $\pm$ 0.02	8.60 $\pm$ 0.11	78.2 $\pm$ 1.5

ที่มา: Xinyu Liao et al. (2018)

ในงานวิจัยของ Thirumdas R. et al (2018) ได้ทำการศึกษาถึงผลการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจาก PAW ส่งผลทำให้น้ำมีค่าเข้าใกล้ความเป็นกรดมากขึ้น จากนั้นยังศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดจากไอออนภายนอกในน้ำที่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าอย่างมากเมื่อได้รับการปรับปรุงสภาพน้ำด้วย PAW จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพ ซึ่งจะส่งผลให้เห็นได้ชัดด้านการนำไฟฟ้ารวมถึงยังแสดงให้เห็นถึงการเกิดของปฏิกิริยาออกซิเจน (ROS) และการก่อตัวของปฏิกิริยาไนโตรเจน (RNS) ในระหว่างการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาภายในพลาสมาเกิดการแตกตัวอย่างรวดเร็วและรุนแรง โดยการก่อตัวของปฏิกิริยานั้นช่วยเพิ่มค่าสารประกอบไนโตรเจนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากที่กล่าวมานั้นจะแสดงการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการสร้างของ PAW ทำให้เกิด ROS และ RNS ดังตาราง 2

ตาราง 2 ปฏิกิริยาเคมีของ ROS และ RNS ที่เกิดจาก PAW

ปฏิกิริยาเคมีของ ROS และ RNS	
$H_2O+e \rightarrow OH\cdot+H\cdot+e^-$	(1)
$H_2O+e \rightarrow O\cdot+H\cdot+H\cdot+e^-$	(2)
$H_2O+e \rightarrow H^++OH\cdot+2e^-$	(3)
$O_2+e \rightarrow O^-+O$	(4)
$O_2+e \rightarrow O^++O+2e$	(5)
$O+O_2+e \rightarrow O_3$	(6)
$O_3+NO \rightarrow NO_2+O_2$	(7)
$O+N_2 \rightarrow NO+N$	(8)
$N+O_2 \rightarrow NO+O$	(9)
$2NO+O_2 \rightarrow 2NO_2$	(10)
$O+NO_2 \rightarrow NO+O_2$	(11)
$H_2O_2+h\nu \rightarrow OH\cdot+OH\cdot$	(12)
$OH\cdot+OH\cdot \rightarrow H_2O_2$	(13)
$H_2O_2+H^++NO_2^- \rightarrow ONOOH+H_2O$	(14)
$OH+NO_2 \rightarrow [O=N-OOH] \rightarrow O=N-OO^-+H^+$	(15)
$NO_2+OH \rightarrow HNO_3$	(16)
$NO+NO \rightarrow N_2+O_2$	(17)
$NO+OH\cdot \rightarrow HNO_2$	(18)
$HNO_2+OH\cdot \rightarrow NO_2+H_2O$	(19)
$NO_2+h\nu \rightarrow NO+O\cdot$	(20)
$NO_3+h\nu \rightarrow NO+O_2$	(21)
$NO_2+NO_3 \rightarrow N_2O_5$	(22)
$N_2O_5+H_2O \rightarrow 2HNO_3$	(23)
$2NO_2+H_2O \rightarrow NO_2^-+NO_3^-+2H^+$	(24)
$3NO_2+H_2O \rightarrow 2HNO_3+NO$	(25)
$3NO_2^-+3H^+ \rightarrow 2NO+NO_3^-+H_3O^+$	(26)

ที่มา: Thirumdas R. et al (2018)

นอกจากนี้แล้วในงานของ Thi Quynh Xuan Le. (2022) ได้กล่าวว่าผลกระทบของระยะเวลาในการสร้างลักษณะของพลาสมาและอัตราส่วนของแต่ละชนิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันสำหรับการปรับปรุงสภาพด้วยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของฮอริโมนและเอนไซม์ต่าง ๆ ทั้งภายนอกและภายในของเมล็ด โดยการช่วยเร่งอัตราการงอกและการเพิ่มการเจริญเติบโตของเมล็ดถั่วเขียว ซึ่งการงอกของเมล็ดและต้นอ่อนมีความยาวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหลังจากการปรับปรุงสภาพด้วยพลาสมา และภาพ SEM แสดงให้เห็นว่าพลาสมาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปโดยตรงกับเมล็ด ทั้งนี้สภาพพื้นผิวของเมล็ดที่หุ้มรวมถึงผนังเปลือกเมล็ดเกิดการบิดรูปและหดตัว รวมถึงมีรอยแตกเกิดขึ้น ผลกระทบเหล่านี้อาจทำให้การดูดซึมน้ำดีขึ้น จากงานวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเมื่อทราบแล้วว่า PAW มีผลต่อการปรับปรุงสภาพน้ำ จึงเป็นเหตุทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจในการใช้เทคโนโลยีพลาสมาแบบอนุหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศต่อการปรับปรุงสภาพน้ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพผลที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการสร้างลักษณะของพลาสมามีหลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของอิเล็กโทรด ลักษณะของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของอิเล็กโทรด เป็นต้น ซึ่งการใช้ลักษณะของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและการออกแบบชุดอุปกรณ์การกำเนิดลักษณะของพลาสมาจะกล่าวในบทถัดไป

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งในส่วนแรกเป็นการศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา โดยเป็นการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมจาก (Chanchai Dechthummarong & Matra, 2018) เพื่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (*Escherichia coli*, *E. coli*) ต่อมาในส่วนที่สองเป็นการศึกษาอิทธิพลของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงต่อการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา โดยทำการกำหนดลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า 3 รูปแบบ คือแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก แบบคลื่นไฟฟ้าสลับ และแบบครึ่งคลื่นทางด้านลบ และในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาอิทธิพลของลำพลาสมาและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา โดยเป็นการประยุกต์งานวิจัยในส่วนแรกและงานวิจัยในส่วนที่สองเข้าด้วยกัน เพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนการใช้งานให้เหมาะสมในงานทางด้านเกษตร ซึ่งแต่การศึกษาจะทำการวัดผลทางพารามิเตอร์ของน้ำหาค่าความเป็นกรด-ด่าง (Positive potential of the Hydrogen ions, pH) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) ทั้งนี้ในส่วนของการศึกษาที่สองและสามจะทำการตรวจสอบหาค่าปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนเตรท และไนไตรท์ ในน้ำเพิ่มเติม ยิ่งกว่านั้นในส่วนของการศึกษาสุดท้ายจะทำการใช้ชุด DBD jet สำหรับการกระตุ้นเมล็ดพืช และนำเมล็ดพืชไปเพาะในจานเพาะเมล็ด แล้วทำการรดน้ำด้วยน้ำพลาสมาเป็นระยะเวลา 7 วัน หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบอัตราการงอกและมวลของต้นกล้าพืชต่อไป อย่างไรก็ตามรายละเอียดการศึกษาเพิ่มเติมจะอธิบายดังต่อไปนี้

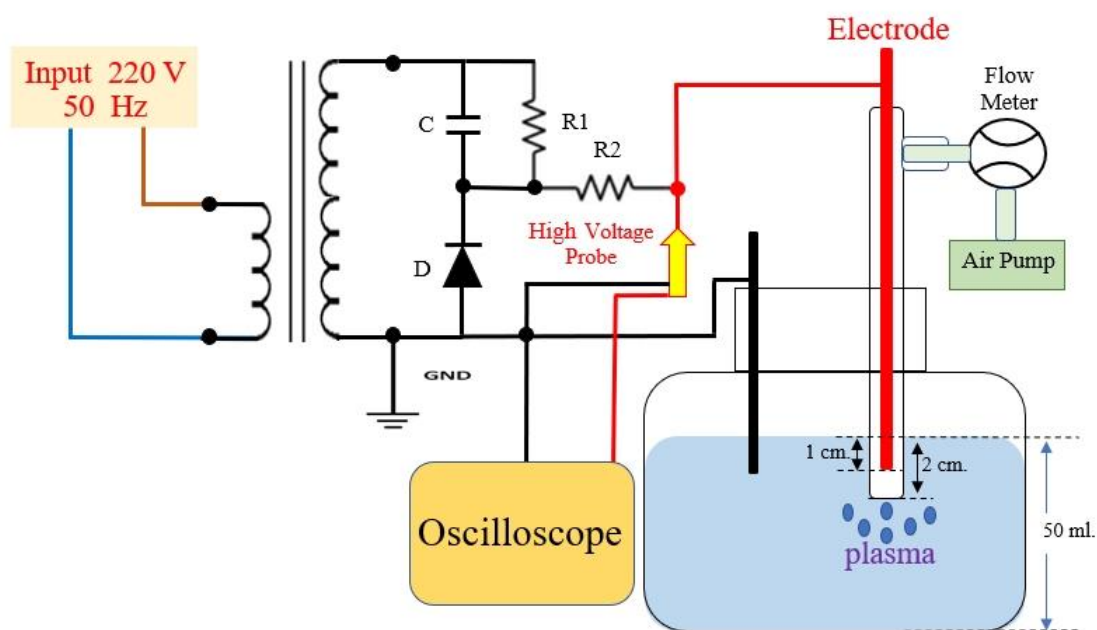
#### 3.1 อิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา

ในส่วนแรกเป็นการศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา โดยเป็นการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมจากอาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งจะประกอบไปด้วยการออกแบบชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบใต้น้ำพร้อมอุปกรณ์การทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองดังหัวข้อต่อไปนี้

##### 3.1.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

ชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบใต้น้ำได้รับการออกแบบและประยุกต์ใช้สำหรับการปรับปรุงสภาพน้ำแสดงดังภาพประกอบ 16 การสร้างลักษณะของพลาสมาเกิดจากการบ้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าที่ ( $V_{in}$ ) 220 V ผ่านหม้อแปลงไมโครเวฟขนาด 900 วัตต์ เชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุขนาด 1  $\mu\text{F}$  ที่เชื่อมต่อบนขานานกับตัวต้านทาน 1  $\text{M}\Omega$  วงจรเรียงกระแสไดโอดแรงดันสูง

เชื่อมต่อแบบอนุกรมระหว่างตัวเก็บประจุและกราวด์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าขาออกหรือแรงดันไฟฟ้าที่จ่าย ( $V_o$ ) เป็นแบบครึ่งคลื่นบวกสูงถึง 6.40 kV มีความถี่ตอบสนองสูงสุดที่ 50 Hz ทำการวัดโดยใช้ออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS 3034C ซึ่งได้ทำการเชื่อมต่อช่องสัญญาณของออสซิลโลสโคปเข้ากับหัววัดแรงดันสูง (High voltage probe) ยี่ห้อ Tektronix รุ่น P6015A จากนั้นทำการเชื่อมกับแท่งตัวนำทั้งสแตนเลส  $\varnothing$  2.4 mm. ที่อยู่ในท่อควอตซ์ ลำเลียงอากาศเข้าในท่อควอตซ์สำหรับการสร้างพลาสมา โดยที่แท่งกราวดิเล็กไทโรดและปลายท่อควอตซ์ถูกแช่ในขวดแก้วดูแรน ขนาด 100 ml. ซึ่งบรรจุน้ำ 50 ml. จะทำให้เกิดการปล่อยลำพลาสมาผ่านรูท่อควอตซ์ไปสัมผัสกับน้ำสามารถทำให้เกิดการกระจายพลาสมาได้น้ำได้อย่างทั่วถึง ซึ่งรายละเอียดอุปกรณ์ต่าง ๆ อธิบายดังตาราง 3



ภาพประกอบ 16 แผนภาพแสดงชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบได้น้ำ

ที่มา: วุฒิโชค แสงวัง (2021)



ตาราง 3 รายละเอียดอุปกรณ์ต่าง ๆ

อุปกรณ์	รายละเอียด
หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)	ขนาด 900 W รุ่น SHV-EPT06A มีแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 220 V แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิประมาณ 2110 V ความต้านทานขดลวดปฐมภูมิประมาณ 2.2 $\Omega$ ความต้านทานขดลวดทุติยภูมิประมาณ 104 $\Omega$ ความถี่ 50 Hz กำลังไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดเท่ากับ 85 W
ตัวเก็บประจุ (Capacitor)	ตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มโพลีโพรพิลีน ขนาดความจุ 1 $\mu\text{F}$ หรือ 0.9 $\mu\text{F}$ ความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ แรงดันไฟฟ้า AC 2100 V 50/60 Hz
ตัวต้านทาน (Resistor)	ตัวต้านทาน R1 ขนาด 1 M $\Omega$ 1 ตัว ชุดตัวต้านทาน R2 เป็นแบบกระเบื้อง มีขนาดผลรวมภายในเท่ากับ 100 k $\Omega$ 80 W จำนวน 4 ตัว
ไดโอด (diode)	ไดโอดแรงดันสูงขนาด 12 kV รุ่น CL01-12 จำนวน 1 ตัว
ออสซิลโลสโคป (oscilloscope)	แบบดิจิทัล ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS 3034C
หัววัดแรงดันสูง (High voltage probe)	ยี่ห้อ Tektronix รุ่น P6015A อัตราส่วนการลดทอนคือ 1:1000 วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สูงสุด 20 kV <sub>rms</sub> และกระแสลับได้สูงสุด 40 kV Bandwidth 75 MHz
ตัวนำไฟฟ้า (Conductor)	แท่งตัวนำทั้งสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 mm. ยาว 15 mm. จำนวน 1 แท่ง
ท่อแก้วทนไฟ (Quartz)	มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm. ทนความร้อน 1200 °C ยาว 10 mm. จำนวน 1 ท่อ

### 3.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 3.1.2.1 การตรวจวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า

การตรวจวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าก่อนเกิดลักษณะของพลาสมาและขณะการเกิดลักษณะของพลาสมา ซึ่งสามารถทำการวัดค่าแรงไฟฟ้าขณะจ่ายให้กับชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบ

ได้น้ำ และขณะเกิดแรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จหรือกระแสไฟฟ้าดิซชาร์จ โดยใช้ Oscilloscope ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS 3034C เชื่อมต่อหัววัดแรงดันสูง (High voltage probe) ยี่ห้อ Tektronix รุ่น P6015A และหัววัดแรงดันสูง (High voltage probe) ยี่ห้อ Tektronix รุ่น P6015A

### 3.1.2.2 การปรับปรุงสภาพน้ำ

ทำการทดลองดึงหัวข้ออิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา ซึ่งน้ำประปาและน้ำกลั่นได้รับการปรับปรุงสภาพน้ำเป็นเวลา 3 นาที และ 5 นาที ตามลำดับ จากนั้นทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์ของน้ำทั้งสองชนิดก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา โดยทำการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (EC) โดยใช้เครื่องวัดคุณภาพน้ำ ยี่ห้อ WTW รุ่น pH 3110 SET 1 และ Cond 3210 SET 1 ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ ที่กำหนดโดย ANOVA โดยใช้ซอฟต์แวร์ทางสถิติ IBM SPSS Statistics version 29.0

### 3.1.2.3 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (*Escherichia coli*, *E. coli*)

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* โดยการนำเชื้อแบคทีเรียที่ระดับความเข้มข้น 0.5 McFarland ใช้ปิเปตดูดเชื้อ *E. coli* ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในน้ำที่ผ่านการปรับปรุงด้วยพลาสมาแต่ละเงื่อนไข ปริมาณอย่างละ 9 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากัน จากนั้นใช้ปิเปตดูดออกมา 1 มิลลิลิตร ไปทำเจือจางที่ระดับ  $10^{-7}$  ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นพบว่า ที่ระดับความเข้มข้น  $10^{-7}$  จะสามารถนับจำนวนเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ จากนั้นนำเชื้อที่ผ่านการเจือจางแล้ว ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร จำนวน 5 หยด ของทุกระดับความเข้มข้นของการเจือจาง หยดลงบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อแล้วนำไปบ่มเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ในตู้บ่มเชื้อ (incubator) 37 องศาเซลเซียส แล้วทำการนับจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ที่เจริญ และคำนวณปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรียจาก Log Reduction หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ ที่กำหนดโดย ANOVA โดยใช้ซอฟต์แวร์ทางสถิติ IBM SPSS Statistics version 29.0

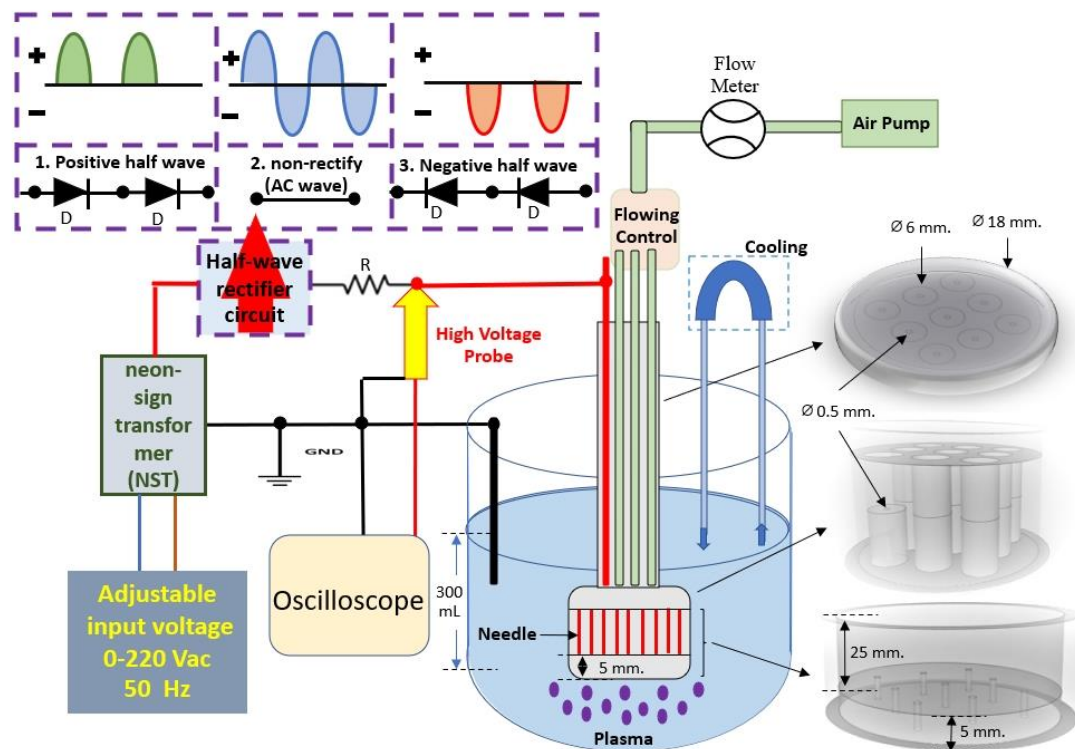
## 3.2 อิทธิพลของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงต่อการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา

ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาอิทธิพลของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงต่อการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา ซึ่งเป็นการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมจากหัวข้อ 3.1 โดยทำการกำหนดลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า 3 รูปแบบ คือแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก แบบแรงดันไฟฟ้าสลับ และแบบครึ่งคลื่นทางด้านลบ เพื่อเชื่อมต่อกับชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบหลาย

เข็มไต้ น้ำ ซึ่งจะประกอบไปด้วยการออกแบบชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบหลายเข็มไต้ น้ำพร้อมอุปกรณ์การทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองดังหัวข้อต่อไปนี้

### 3.2.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

ชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบหลายเข็มไต้ น้ำได้รับการออกแบบและประยุกต์ใช้สำหรับการปรับปรุงสภาพน้ำแสดงดังภาพประกอบ 17 การสร้างลักษณะของพลาสมานั้นเกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า ( $V_{in}$ ) ซึ่งสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าได้ตั้งแต่ 0-230 V เชื่อมผ่านหม้อแปลงไฟฟ้านีออนไลท์ ยี่ห้อ Super Transformer โดยมีแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุด 15 kV และ 30 mA ตามลำดับ จากนั้นต่อเข้ากับไดโอดแรงดันสูงขนาด 12 kV จำนวน 2 ตัว โดยที่ไดโอดสามารถทำการกำหนดลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าได้ 3 รูปแบบ คือ เป็นแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก (ต่อ  $V_{out}$  หม้อแปลงเข้าที่ขั้วแอนโนดของไดโอด) แบบคลื่นไฟฟ้าสลับ (ขณะไม่ต่อไดโอด) และแบบครึ่งคลื่นทางด้านลบ (กลับทิศทางของไดโอด) เชื่อมต่อแบบอนุกรมกับตัวต้านทานขนาด  $100\text{ k}\Omega$  ซึ่งส่งผลให้มีแรงดันไฟฟ้าที่จ่าย ( $V_s$ ) สูงถึง 10.2 kV มีความถี่ตอบสนองสูงสุดที่ 50 Hz โดยใช้ออสซิลโลสโคปแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS 3034C ซึ่งได้ทำการเชื่อมต่อช่องสัญญาณของออสซิลโลสโคปเข้ากับหัววัดแรงดันสูง (High voltage probe) ยี่ห้อ Tektronix รุ่น P6015A จากนั้นเปิดวาล์วอากาศ ที่สภาวะ ณ ความดันบรรยากาศ ปรับอัตราการไหลของอากาศอย่างสม่ำเสมอที่อัตราการจ่ายอากาศ 7.5 LPM เชื่อมต่อกับชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบไต้ น้ำ ซึ่งภายในประกอบไปด้วยแท่งอะคริลิก ที่เจาะเป็นช่องเพื่อใส่ท่อเข็มขนาด  $\varnothing$  0.55 mm. ยาว 25 mm. จำนวน 9 เข็ม เชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่าย ( $V_s$ ) เข้ากับเข็มทั้งหมดและปลายเข็มอยู่ห่างจากระดับน้ำ 5 mm. โดยมีท่ออากาศจากภายนอกเชื่อมต่อกับเข็มทั้งหมดอยู่ภายในช่องของท่ออะคริลิก ลำเลียงอากาศเข้าในท่ออากาศสำหรับการสร้างพลาสมา โดยที่ชุดกำเนิดลำพลาสมาถูกแช่ในบีกเกอร์ ขนาด 500 mL ซึ่งบรรจุน้ำกลั่น 300 mL จะทำให้เกิดการปล่อยลำพลาสมาผ่านปลายเข็มไปสัมผัสกับน้ำสามารถทำให้เกิดการกระจายพลาสมาไต้ น้ำได้อย่างทั่วถึง ซึ่งรายละเอียดอุปกรณ์ต่าง ๆ อธิบายดังตาราง 4



ภาพประกอบ 17 แผนภาพแสดงชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบหลายเข็มใต้น้ำ

ที่มา: วุฒิชัยค แสงวัง (2021)

### 3.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 3.2.2.1 การตรวจวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า

การตรวจวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าก่อนเกิดลักษณะของพลาสมาและขณะการเกิดลักษณะของพลาสมา ซึ่งสามารถทำการวัดลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง ขณะจ่ายให้กับชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบหลายเข็มใต้น้ำ และขณะเกิดแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จหรือกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จของทุกลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า โดยใช้ Oscilloscope ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS 3034C เชื่อมต่อหัววัดแรงดันสูง (High voltage probe) ยี่ห้อ Tektronix รุ่น P6015A และหัววัดแรงดันสูง (High voltage probe) ยี่ห้อ Tektronix รุ่น P6015A

ตาราง 4 รายละเอียดอุปกรณ์ต่าง ๆ

อุปกรณ์	รายละเอียด
หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)	หม้อแปลงไฟฟ้านีออนไลท์ ขนาด 450 W ยี่ห้อ Super Transformer รุ่น NT15030 มีแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 220 V แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 15 kV และมีกระแสไฟฟ้าสูงสุด 30 mA ความถี่ 50 Hz
ไดโอด (diode)	ไดโอดแรงดันสูงขนาด 12 kV รุ่น CL01-12 จำนวน 2 ตัว
ตัวต้านทาน (Resistor)	ชุดตัวต้านทาน R เป็นแบบกระเบื้อง มีขนาดผลรวมภายในเท่ากับ 100 k $\Omega$ 80 W จำนวน 4 ตัว
ออสซิลโลสโคป (oscilloscope)	แบบดิจิทัล ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS 3034C
หัววัดแรงดันสูง (High voltage probe)	ยี่ห้อ Tektronix รุ่น P6015A อัตราส่วนการลดทอนคือ 1:1000 วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สูงสุด 20 kV <sub>rms</sub> และกระแสสลับได้สูงสุด 40 kV Bandwidth 75 MHz
ตัวนำไฟฟ้า (Conductor)	ท่อเข็มขนาด $\varnothing$ 0.55 mm. ยาว 25 mm. จำนวน 9 เข็ม
อะคริลิก (Acrylic)	อะคริลิกทำหน้าที่เป็นฉนวนโดยทำการออกแบบให้ใส่ท่อเข็มขนาดดังกล่าว จำนวน 9 ช่อง

### 3.2.2.2 การปรับปรุงสภาพน้ำ

ทำการทดลองตั้งหัวข้ออิทธิพลของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงต่อการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา ซึ่งน้ำกลั่นได้รับการปรับปรุงสภาพน้ำเป็นเวลา 10 นาที ของทุกลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์ของน้ำกลั่นก่อนและหลังกระตุ้นด้วยพลาสมา โดยทำการตรวจสอบหาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (EC) โดยใช้เครื่องวัดคุณภาพน้ำ ยี่ห้อ WTW รุ่น pH 3110 SET 1 และ Cond 3210 SET 1 ตามลำดับ หลังจากนั้นตรวจสอบหาค่าปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนเตรท และไนไตรท์ จากชุดกระดาษทดสอบ ยี่ห้อ QUANTOFIX ชนิด กระดาษทดสอบเปอร์ออกไซด์ 0-25 mg/L (ppm) กระดาษทดสอบไนเตรท และไนไตรท์ รุ่น 91313 10-500 mg/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup> และ 10-500 mg/L

$\text{NO}_2^-$  ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ ที่กำหนดโดย ANOVA โดยใช้ซอฟต์แวร์ทางสถิติ IBM SPSS Statistics version 29.0

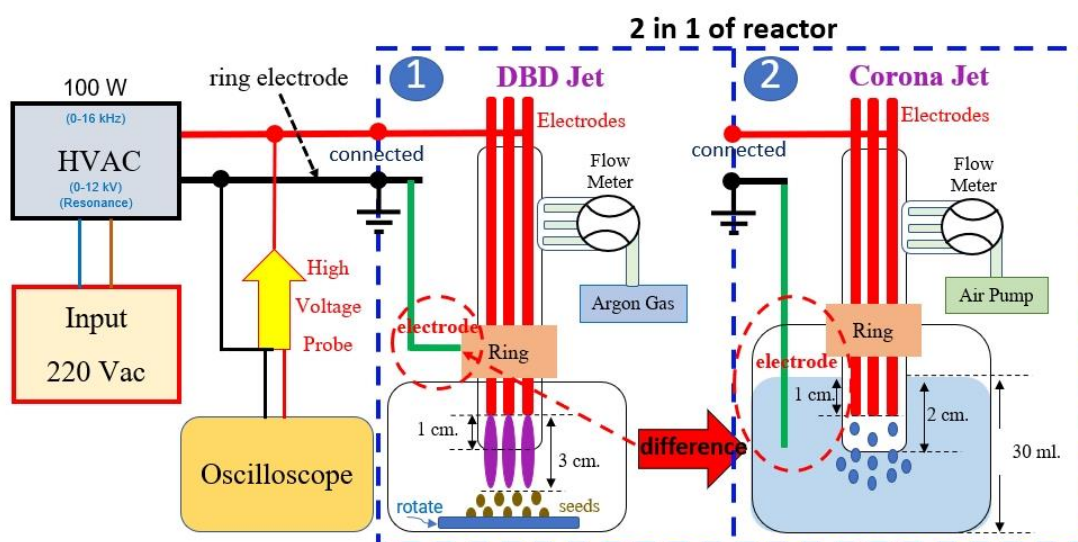
### 3.3 อิทธิพลของลำพลาสมาและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อมวลของต้นกล้าปีทูท

ในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาอิทธิพลของลำพลาสมาและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อมวลของต้นกล้าปีทูท โดยเป็นการประยุกต์การรวมข้อดีของลักษณะแบบดิสชาร์จโคโรนา (corona discharge) และลักษณะแบบดิสชาร์จข้ามฉนวน (dielectric barrier discharge, DBD) ทั้งนี้เป็นการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมจากหัวข้อที่ 3.1 และหัวข้อที่ 3.2 สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวเมล็ดปีทูท และการปรับปรุงสภาพน้ำ จึงมีการปรับเปลี่ยนชุดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและชุดอุปกรณ์ของทั้งสองงานวิจัยให้สามารถปรับเปลี่ยนการใช้งานได้อย่างเหมาะสมในงานทางด้านเกษตร ซึ่งจะประกอบไปด้วยการออกแบบชุด DBD jet และ corona jet พร้อมอุปกรณ์การทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 3.3.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

ชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบดิสชาร์จข้ามฉนวน (DBD jet) (กรอบซ้ายหมายเลข 1) และชุดน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแบบโคโรนาเจ็ท (corona jet) (กรอบซ้ายหมายเลข 2) ซึ่งโครงสร้างและอุปกรณ์ภายในของชุดกำเนิดลำพลาสมาทั้งสองแบบอยู่ร่วมกันเป็นหนึ่งชุดอุปกรณ์ ทั้งนี้ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนการใช้งานได้อย่างเหมาะสมในงานทางด้านเกษตร สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวเมล็ดปีทูท และการปรับปรุงสภาพน้ำแสดงดังภาพประกอบ 18 การสร้างลักษณะของพลาสมานั้นเกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า ( $V_{in}$ ) เชื่อมผ่านเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง (High Voltage Alternating Current, HVAC) ที่สร้างขึ้นในห้องแลปทดลอง ขนาด 100 W โดยเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้านี้ใช้หลักการของเรโซแนนซ์ ซึ่งสามารถทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้ในช่วงที่ 0 ถึง 12 kV และสามารถปรับสัญญาณความถี่ได้ในช่วงที่ 0 ถึง 16 kHz ซึ่งค่าที่ทำให้เกิดการสร้างลักษณะพลาสมาของอุปกรณ์ทั้งสองแบบ มีค่าแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายให้สูงที่สุดคือ 8 kV ณ ความถี่ 8 kHz ทั้งนี้ค่าดังกล่าวมีค่าเข้าใกล้รูปสัญญาณคลื่นไซน์มากที่สุด ทำการวัดโดยใช้ออสซิลโลสโคปแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS 3034C และทำการเชื่อมต่อช่องสัญญาณของออสซิลโลสโคปเข้ากับหัววัดแรงดันสูง (High voltage probe) ยี่ห้อ Tektronix รุ่น P6015A จากนั้นทำการเปิดวาล์วก๊าซอาร์กอนโดยมีอัตราการไหลของอาร์กอนที่ 5 LPM สำหรับชุด DBD jet และที่สภาวะ ณ ความดันบรรยากาศที่มีอัตราการไหลของอากาศที่ 5 LPM สำหรับชุด corona jet ซึ่งภายในประกอบไปด้วยหลอดดอคูมินาเซรามิกคอร์ันดัมทนอุณหภูมิสูงขนาด  $\varnothing$  6 mm. ยาว 10 mm. จำนวน 3 หลอด ภายในหลอดใส่แท่ง

ตัวนำทั้งสแตนปลายแหลมทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดขนาด  $\varnothing$  2.4 mm. ยาว 15 mm. จำนวน 3 แท่ง โดยปลายแหลมของแท่งอิเล็กโทรดอยู่ห่างจากปลายหลอดอลูมินา 1 cm. ซึ่งชุด DBD jet ปลายแหลมของแท่งอิเล็กโทรดอยู่ห่างจากระดับผิวของเมล็ดบีทรูท 3 cm. โดยมีแผ่นแหวนทองแดงทำหน้าที่เป็นกราวด์ของระบบดังภาพประกอบ 18 (กรอบซ้ายหมายเลข 1) และชุด corona jet มีปลายแหลมของแท่งอิเล็กโทรดอยู่ห่างจากระดับน้ำ 1 cm. โดยที่หลอดอลูมินาถูกแช่อยู่ในบีกเกอร์ขนาด 50 mL บรรจุน้ำประปา 30 mL และให้น้ำประปาทำหน้าที่เป็นกราวด์ของระบบดังภาพประกอบ 18 (กรอบขวาหมายเลข 2)



ภาพประกอบ 18 (กรอบซ้ายหมายเลข 1) ชุดกำเนิดลำพลาสมา (DBD jet) และ (กรอบขวาหมายเลข 2) ชุดน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแบบโคโรนาเจ็ท (corona jet)

ที่มา: วุฒิโชค แสงวัง (2022)

### 3.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 3.3.2.1 การปรับปรุงพื้นผิวเมล็ดบีทรูท

เตรียมเมล็ดบีทรูทกลุ่มละจำนวน 50 เมล็ด ทำการทดลองโดยใช้ชุด DBD jet ดังหัวข้ออุปกรณ์ข้างต้น สำหรับปรับปรุงสภาพพื้นผิวเมล็ดบีทรูทเป็นเวลา 2.5 และ 5 นาที ยกเว้นกลุ่มควบคุม (ไม่มีการปรับปรุงสภาพพื้นผิวเมล็ด) ซึ่งทั้ง 50 เมล็ดนั้นถูกวางอยู่บนจานเพาะที่มีการติดตั้งอยู่กับมอเตอร์เพื่อให้จานเพาะนั้นสามารถหมุนให้เมล็ดสัมผัสกับลำพลาสมาได้อย่างทั่วถึง จากนั้นทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสภาพพื้นผิวก่อนและหลังของเมล็ดบีทรูท โดย

เครื่องมือวิเคราะห์พื้นผิวของวัสดุชนิดกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น SU5000

### 3.3.2.2 การปรับปรุงสภาพน้ำ

ทำการทดลองโดยใช้ชุด corona jet ดังหัวข้ออุปกรณ์ข้างต้น สำหรับการปรับปรุงสภาพน้ำประปาเป็นเวลา 7.5 และ 15 นาที ยกเว้นกลุ่มควบคุม (ไม่มีการปรับปรุงสภาพน้ำประปา) จากนั้นทำการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของน้ำก่อนและหลัง โดยทำการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (EC) โดยใช้เครื่องวัดคุณภาพน้ำ ยี่ห้อ WTW รุ่น pH 3110 SET 1 และ Cond 3210 SET 1 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ตรวจสอบค่าปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนเตรท และไนไตรท์ จากชุดกระดาษทดสอบ ยี่ห้อ QUANTOFIX ชนิด กระดาษทดสอบเปอร์ออกไซด์ 0-25 mg/L (ppm) กระดาษทดสอบไนเตรท และไนไตรท์ รุ่น 91313 10-500 mg/L  $\text{NO}_3^-$  และ 10-500 mg/L  $\text{NO}_2^-$  ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ ที่กำหนดโดย ANOVA โดยใช้ซอฟต์แวร์ทางสถิติ IBM SPSS Statistics version 29.0

### 3.3.2.3 การแช่และการรดน้ำเมล็ดพืช

นำเมล็ดพืชที่ได้รับการปรับปรุงสภาพพื้นผิวเมล็ดด้วยชุด DBD jet มาวางลงบนแผ่นกระดาษซับในจานเพาะเมล็ดของแต่ละเงื่อนไข ซึ่งกระดาษซับถูกแช่โดยน้ำประปาที่ได้รับการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยชุด corona jet และทำการรดน้ำเมล็ดพืชด้วยน้ำพลาสติกมาวันละ 2 ครั้ง ครั้งละ 10 mL เป็นเวลา 7 วัน ยกเว้นกลุ่มควบคุม (ไม่มีการใช้ชุด DBD jet และ corona jet) จากนั้นทำการสังเกตและบันทึกผลจำนวนอัตราการงอก และมวลของต้นกล้าพืช หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ ที่กำหนดโดย ANOVA โดยใช้ซอฟต์แวร์ทางสถิติ IBM SPSS Statistics version 29.0



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

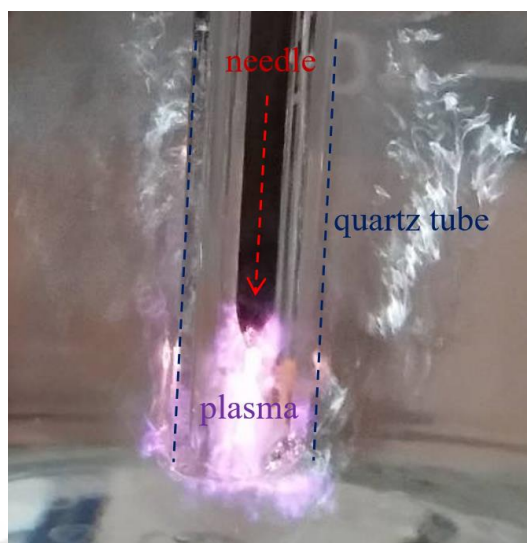
ในบทนี้จะแสดงถึงผลการศึกษาของพลาสมาแบบอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศ สำหรับการปรับปรุงสภาพน้ำ โดยนำน้ำที่ได้นั้นไปประยุกต์ใช้ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (*Escherichia coli*, *E. coli*) และการประยุกต์ใช้ทางด้านการเกษตร ทั้งนี้ได้แบ่งผลการศึกษา ออกเป็น 3 ส่วน คือใน ส่วนแรกเป็นผลการศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิค กระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา ต่อมาในส่วนที่สองเป็นผลการศึกษาอิทธิพลของลักษณะรูปคลื่น สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงต่อการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา และในส่วนสุดท้ายเป็น ผลการศึกษาอิทธิพลของลำพลาสมาและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อมวลของต้นกล้าปีที่รุท มี รายละเอียดดังนี้

#### 4.1 อิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา

ผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ผลการตรวจวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า ผลการปรับปรุงสภาพน้ำ และผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

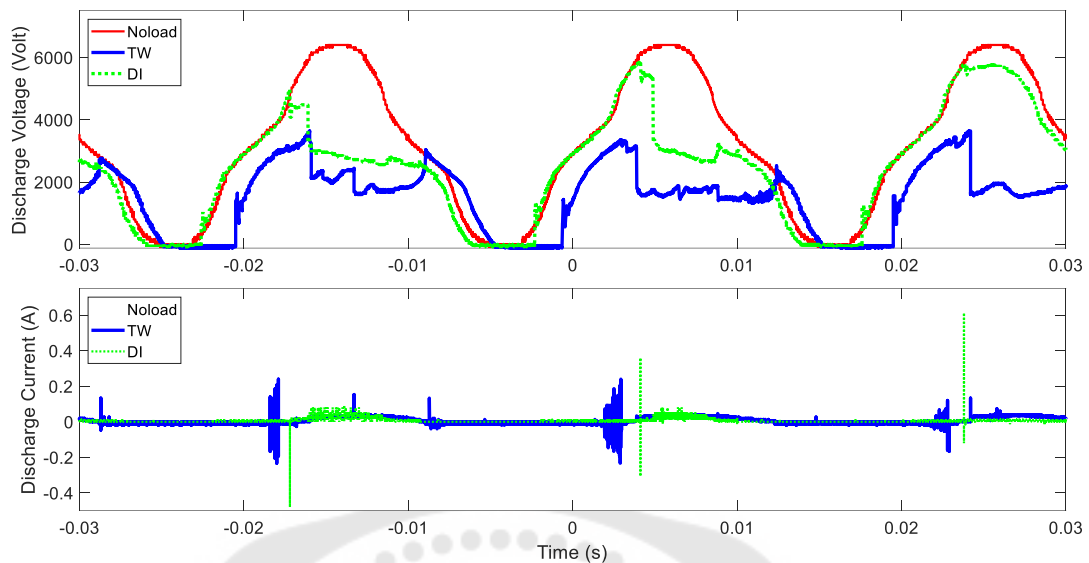
##### 4.1.1 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า

การตรวจวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบได้นำ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการสร้างลักษณะของพลาสมาของชุดการทดลองนี้เกิดขึ้นจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่นบวกสูงถึง 6.40 kV ความถี่ 50 Hz มีอัตราการไหลของอากาศ 5 LPM ในขณะนั้นพลาสมาถูกสร้างขึ้นที่ปลายแหลมของแท่งอิเล็กโทรด โดยบริเวณรอบ ๆ นั้นเกิดสนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่อากาศ หลังจากนั้นช่องว่างอากาศก็ถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า เมื่อสนามไฟฟ้ามีปริมาณมากเพียงพอจึงทำให้เกิดการคายประจุของอากาศ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านอากาศ เกิดกระบวนการไอออไนซ์หรือกลายเป็นพลาสมา ทั้งนี้แสงสีม่วงที่ปรากฏขึ้นจะเป็นการปล่อยโคโรนาเรืองแสง และลำพลาสมาจะถูกขับออกมาในรูปของหลอดควอทซ์และยึดออกมาพร้อมกับรูปร่างของฟองอากาศที่ฉีดลงไปใต้น้ำ ดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 ลักษณะการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา

จากภาพประกอบ 19 ทำการวัดลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวกขณะจ่ายแรงดันให้กับชุดกำเนิดล้าพลาสมาแบบได้น้ำ ในขณะที่เกิดการสร้างลักษณะของพลาสมาขึ้น จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของกราฟแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ และกราฟกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่เกิดขึ้นมีลักษณะแตกต่างกันภายในช่วงเวลาไม่กี่ไมโครวินาที ขณะนั้นมีการปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จออกมาเป็นระยะอย่างรวดเร็วตามแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดเบรกดาว์น แล้วแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จก็จะพุ่งขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน การเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นซ้ำไปอีกเรื่อย ๆ ซึ่งกราฟแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จและกราฟกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุงสภาพน้ำประปาและน้ำกลั่นด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาจะแสดงให้เห็นดังภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 (บน) ลักษณะแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จ และ (ล่าง) ลักษณะกระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ

จากภาพประกอบ 20 กราฟแสดงให้เห็นว่าลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก ของชุดการทดลองกรณีกระตุ้นน้ำประปาด้วยพลาสมาเกิดการเบรกดาวนได้รวดเร็วกว่า ชุดการทดลองกรณีกระตุ้นน้ำกลั่นด้วยพลาสมา ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จของการกระตุ้นน้ำประปาที่เกิดขึ้นคือ  $1.78 \text{ kV}_{\text{rms}}$  และมีค่ากระแสไฟฟ้าดีสชาร์จที่เกิดขึ้นคือ  $20.13 \text{ mA}$  ทั้งนี้ในกรณีของการกระตุ้นน้ำกลั่นทำให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จที่เกิดขึ้นคือ  $3.09 \text{ kV}_{\text{rms}}$  และมีค่ากระแสไฟฟ้าดีสชาร์จที่เกิดขึ้นคือ  $12.10 \text{ mA}$  จากผลการทดลองจะสังเกตเห็นว่าการกระตุ้นน้ำประปามีค่าแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จที่เกิดขึ้นน้อยกว่าชุดการกระตุ้นน้ำกลั่น แต่มีค่ากระแสไฟฟ้าดีสชาร์จที่เกิดขึ้นสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำประปาและน้ำกลั่นมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกัน โดยน้ำประปาจะสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าน้ำกลั่นจึงเกิดการเบรกดาวนได้รวดเร็วกว่า ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของน้ำทั้งสองจะถูกตรวจสอบคุณสมบัติและทำการแสดงผลการทดลองให้เห็นในหัวข้อการปรับปรุงสภาพน้ำต่อไป

#### 4.1.2 การปรับปรุงสภาพน้ำ

หลังจากการปรับปรุงสภาพน้ำประปาและน้ำกลั่นด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาเป็นเวลา 3 นาที และ 5 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบครึ่งคลื่นบวก  $6.40 \text{ kV}$  ความถี่  $50 \text{ Hz}$  อัตราการจ่ายอากาศ  $5 \text{ LPM}$  ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำทั้งสองเงื่อนไขมีค่า pH ที่ลดลง และค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำประปาและน้ำกลั่นของกลุ่มควบคุม แสดงดังตาราง 5

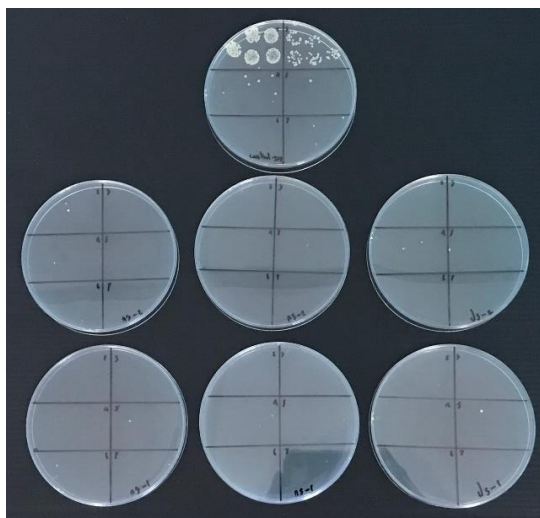
ตาราง 5 ผลการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้า

ระยะเวลา ในการปรับปรุงสภาพ น้ำประปาและน้ำกลั่น	ผลการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของน้ำทั้งสอง	
	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm.}$ )
	Avg. $\pm$ S.D.	Avg. $\pm$ S.D.
น้ำประปา 0 นาที	7.36 $\pm$ 0.16 <sup>a</sup>	256 $\pm$ 4.20 <sup>d</sup>
น้ำประปา 3 นาที	4.24 $\pm$ 0.12 <sup>c</sup>	621 $\pm$ 3.50 <sup>b</sup>
น้ำประปา 5 นาที	3.59 $\pm$ 0.14 <sup>d</sup>	856 $\pm$ 4.90 <sup>a</sup>
น้ำกลั่น 0 นาที	6.68 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	6.8 $\pm$ 0.05 <sup>f</sup>
น้ำกลั่น 3 นาที	4.05 $\pm$ 0.07 <sup>cd</sup>	59 $\pm$ 2.10 <sup>e</sup>
น้ำกลั่น 5 นาที	3.34 $\pm$ 0.09 <sup>d</sup>	278 $\pm$ 2.80 <sup>c</sup>

\*\*หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD; น้ำประปาและน้ำกลั่น 0 นาที คือตัวอย่างที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงสภาพด้วยพลาสมา ตัวอักษร a - z แสดงค่าเฉลี่ยของแต่ละเงื่อนไขตามแนวตั้งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

#### 4.1.3 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli*

ผลการทดลองการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* โดยน้ำประปาและน้ำกลั่นที่ได้รับการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา ซึ่งมีเงื่อนไขการทดลองคือจะถูกกำหนดด้วยระยะเวลาที่น้ำถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาที่เวลา 3 นาที และ 5 นาที ตามลำดับ และมีอัตราการไหลของอากาศอยู่ที่ 5 LPM จากนั้นการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ถูกกำหนดตามขั้นตอนการทดลองในหัวข้อที่ 3.1.2.3 หลังจากการบ่มเชื้อแล้วจะแสดงปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 ปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli*

จากภาพประกอบ 21 จะทำการนับผลของจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ที่เจริญได้หลังจากการทดลองแล้ว จะถูกคำนวณปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรียจากสมการของ  $\text{Log Reduction} = \text{CFU}_{\text{control}} / \text{CFU}_{\text{PAW}}$  ซึ่งปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* จากการปรับปรุงสภาพน้ำทั้งหมดในแต่ละเงื่อนไขจะมีการลดลงมากขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้เพิ่มมากขึ้น โดยมีความหนาแน่นของเชื้อกลุ่มควบคุมอยู่ที่  $1.80 \times 10^9$  CFU แสดงดังตาราง 6

ตาราง 6 ปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli*

ระยะเวลา	ปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> (Log CFU/ml)
ในการปรับปรุงสภาพ น้ำประปาและน้ำกลั่น	
น้ำประปา 3 นาที	$3.16 \pm 0.06^b$ (93.06%)
น้ำประปา 5 นาที	$3.50 \pm 0.03^a$ (96.81%)
น้ำกลั่น 3 นาที	$3.12 \pm 0.07^b$ (92.25%)
น้ำกลั่น 5 นาที	$3.46 \pm 0.05^a$ (96.53%)

\*\*หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (%การลดลง); ตัวอักษร a - z แสดงค่าเฉลี่ยของแต่ละเงื่อนไขตาม  
แนวตั้งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา (PAW) ที่เกิดจากการบ้อนแรงดันไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 6.40 kV ความถี่ 50 Hz อัตราการจ่ายอากาศ 5 LPM โดยค่าพารามิเตอร์ของน้ำทั้งสองเงื่อนไขมีความเป็นกรด-เบสที่ลดลง และค่าการนำไฟฟ้า (EC) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม อีกทั้งยังทำปฏิกิริยาในการช่วยยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ (Khanit Matra, Tanakaran, Luang-In, & Theepharaksapan) โดยการปรับปรุงสภาพน้ำในแต่ละเงื่อนไขสามารถลดปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ตั้งตาราง 6 ข้างต้น ซึ่งแสดงผลการคำนวณได้จากสูตรผลการนับจำนวนเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ทั้งหมดในงานอาหารเลี้ยงเชื้อที่ระดับความเจือจางที่สามารถทำการนับจำนวนโคโลนีได้ ซึ่งในกรณีของการวิเคราะห์นี้จะทำการนับจำนวนโคโลนีบนจานอาหารที่อยู่ในช่วง 1-20 โดยให้นับจำนวนโคโลนีในระดับความเจือจางที่ต่ำที่สุด

#### 4.2 อิทธิพลของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงต่อการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา

ผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการตรวจวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า และผลการปรับปรุงสภาพน้ำมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า

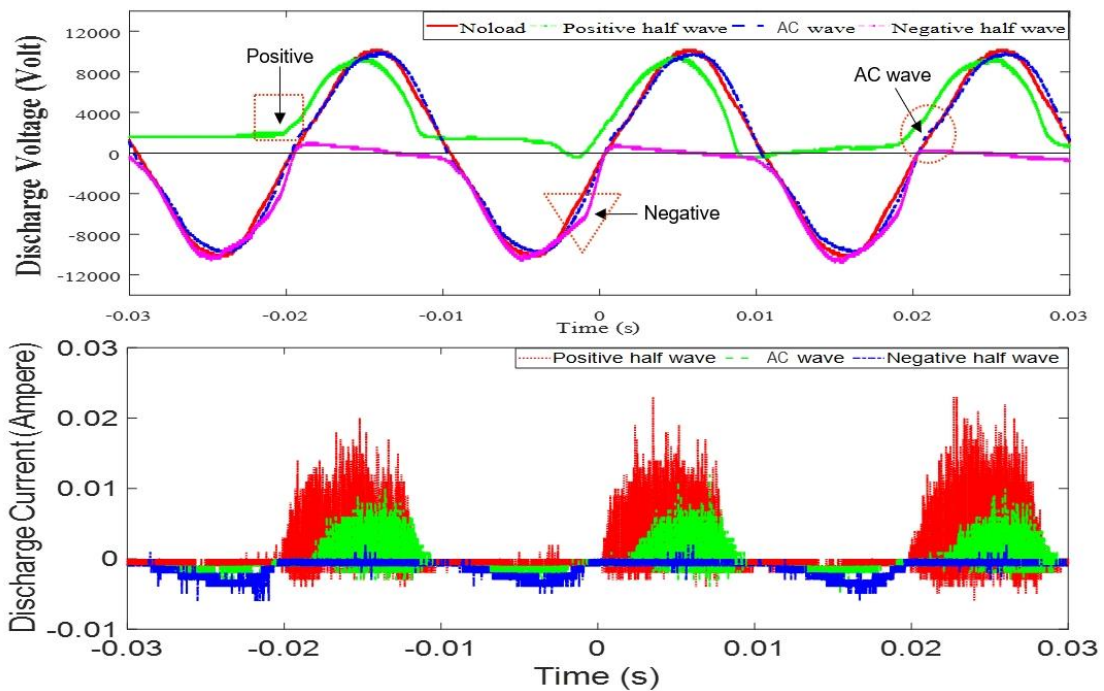
หลังจากทำการกำหนดลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงทั้ง 3 รูปแบบ คือแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก แบบคลื่นไฟฟ้าสลับ และแบบครึ่งคลื่นทางด้านลบ แล้วเชื่อมต่อกับชุดกำเนิดพลาสมาแบบหลายเข็มได้น้ำ โดยทำการปรับอัตราการไหลของอากาศที่ 7.5 LPM เพื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าขาออกหรือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายขณะไร้อหลดสูงสุดที่ 10.2 kV โดยที่ชุดกำเนิดลพลาสมาถูกแช่ในบีกเกอร์ ขนาด 500 mL ซึ่งบรรจุน้ำกลั่น 300 mL มีกรวดเชื่อมต่อกับน้ำกลั่นทำหน้าที่เป็นกรวดของระบบทุกกรณี ทั้งนี้ลักษณะการเกิดของพลาสมาจะถูกสร้างขึ้นจากอิทธิพลของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงทั้ง 3 รูปแบบ ซึ่งพลาสมาจะถูกสร้างขึ้นที่ปลายแหลมของแท่งอิเล็กโทรด เมื่อสนามไฟฟ้ามีปริมาณมากพอก่อให้เกิดการกระตุ้นแก้อากาศ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านอากาศ เกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน หรือกลายเป็นพลาสมา ทั้งนี้อนุภาคที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจะปลดปล่อยรังสีออกมา โดยจะสามารถมองเห็นพลาสมาที่เปล่งแสงออกมาหรือที่เรียกว่า “โกลวดิสชาร์จ (Glow Discharge)” และลพลาสมาจะถูกขับออกมาตามรูปร่างของช่องอากาศไปสัมผัสกับน้ำ ดังภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 22 ลักษณะของลำพลาสมาขณะกระตุ้นน้ำ

ที่มา: วุฒิโชค แสงวัง (2021)

จากภาพประกอบ 22 สามารถทำการวัดลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงแบบ ครึ่งคลื่นทางด้านบวก (ต่อ  $V_{out}$  หม้อแปลงเข้าที่ขั้วแอนโนดของไดโอด) แบบคลื่นไฟฟ้าสลับ (ขณะ ไม่ต่อไดโอด) และแบบครึ่งคลื่นทางด้านลบ (กลับทิศทางของไดโอด) ในขณะที่เกิดการสร้าง ลักษณะของพลาสมาขึ้น จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของกราฟแรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จ์ และกราฟ กระแสไฟฟ้าดิซชาร์จ์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่องกันเกิดขึ้นภายในช่วงเวลาไม่กี่ไมโครวินาที จะ เห็นได้จากกราฟแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดวิกฤต และเกิดการเบรกดาวนในที่สุด ในขณะที่ นั้นเองกระแสไฟฟ้าดิซชาร์จ์ก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ค่าแรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จ์ก็จะลดลงสวนทาง กับกระแสไฟฟ้าดิซชาร์จ์ที่เพิ่มขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 (บน) ลักษณะแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จ และ (ล่าง) ลักษณะกระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ

ที่มา: วุฒิโชค แสงวัง (2021)

จากภาพประกอบ 23 กราฟแสดงให้เห็นว่าลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก เกิดการเบรกดาวนได้เร็วกว่าแบบคลื่นไฟฟ้าสลับ และแบบครึ่งคลื่นทางด้านลบ โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จที่เกิดขึ้นคือ  $5.68 \text{ kV}_{\text{rms}}$ ,  $5.86 \text{ kV}_{\text{rms}}$ , และ  $5.87 \text{ kV}_{\text{rms}}$  ตามลำดับ จากกราฟจะสังเกตเห็นอีกว่าลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก มีค่ากระแสไฟฟ้าดีสชาร์จที่สูงกว่าทั้งแบบคลื่นไฟฟ้าสลับ และแบบครึ่งคลื่นทางด้านลบ ซึ่งมีค่ากระแสไฟฟ้าดีสชาร์จที่เกิดขึ้นคือ  $25.57 \text{ mA}$ ,  $24.23 \text{ mA}$ , และ  $12.10 \text{ mA}$  ตามลำดับ ทั้งนี้สามารถทำการวิเคราะห์ได้ว่าศักย์ไฟฟ้าที่ชั่วพลายแหลมของเข็มเป็นได้ทั้งบวกหรือลบ โดยการเกิดลักษณะของโคโรนาบวก และโคโรนาลบจะมีลักษณะในการสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งศักย์ไฟฟ้าที่ชั่วพลายช่วงขอบเขตแรกจะมีจำนวนอิเล็กตรอนเริ่มต้นที่ผิวปลายแหลมของเข็มในบริเวณความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ชั่วบวก ซึ่งการสร้างลักษณะของโคโรนาลบมักจะมีแรงดันเริ่มต้นที่สูงกว่าการสร้างลักษณะของโคโรนาบวก เนื่องจากในช่วงบริเวณขอบเขตที่สองของการเกิดลักษณะโคโรนาบวก มีการเกิดเบรกดาวนขึ้นที่ชั่วอิเล็กโทรดลงสู่ระนาบของน้ำกลั่นที่เชื่อมต่อเข้ากับกราวด์ของระบบ จึงทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานที่เร็วกว่าลักษณะของโคโรนาลบ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของโคโรนาลบในบริเวณขอบเขต มีคุณสมบัติของโมเลกุลมาก



และเกิดอิเล็กโทรเนกาติวิตีสูง อย่างไรก็ตามลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแบบคลื่นไฟฟ้าสลับ ที่ขั้วอิเล็กโทรดจะมีค่าที่สลับกลับไปกลับมาอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากเป็นผลของการเกิดประจุค้างที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งฝั่งทางด้านบวก และฝั่งทางด้านลบ จึงทำให้เกิดกระบวนการแตกตัวของไอออนได้ง่ายขึ้น จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จที่เกิดขึ้นน้อยมาก ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของน้ำทั้งสามเงื่อนไขจะถูกตรวจสอบคุณสมบัติและทำการแสดงผลการทดลองให้เห็นในหัวข้อการปรับปรุงสภาพน้ำต่อไป

#### 4.2.1 การปรับปรุงสภาพน้ำ

หลังจากการปรับปรุงสภาพน้ำกลั่นเป็นเวลา 10 นาที ของทุกเงื่อนไข ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ของน้ำกลั่นก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยพลาสติก จากผลการทดลองพบว่าทุกผลการทดลองของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงทั้ง 3 รูปแบบ คือแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก แบบคลื่นไฟฟ้าสลับ และแบบครึ่งคลื่นทางด้านลบ ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ลดลง และค่าการนำไฟฟ้า (EC) มีค่าที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับน้ำกลั่นที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยพลาสติก ซึ่งลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวกมีค่าความเป็นกรดสูงกว่าทั้งคลื่นไฟฟ้าสลับ และแบบครึ่งคลื่นทางด้านลบ ที่ 3.63, 3.69 และ 4.52 ตามลำดับ โดยที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำกลั่นเริ่มต้นที่ 6.52 อีกทั้งลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวกยังมีค่าการนำไฟฟ้า (EC) ที่สูงกว่าทั้งคลื่นไฟฟ้าสลับ และแบบครึ่งคลื่นทางด้านลบ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 89.18  $\mu\text{S}/\text{cm}$  78.80  $\mu\text{S}/\text{cm}$  และ 34.43  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ตามลำดับ จากค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของน้ำกลั่นมีค่าเริ่มต้นที่ 1.14  $\mu\text{S}/\text{cm}$  แสดงดังตาราง 7

ตาราง 7 ผลการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้า

ลักษณะรูปคลื่น สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันสูง	ผลการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของน้ำทั้งสอง	
	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}.$ )
	Avg. $\pm$ S.D.	Avg. $\pm$ S.D.
คลื่นทางด้านบวก	3.63 $\pm$ 0.05 <sup>c</sup>	89.18 $\pm$ 2.43 <sup>a</sup>
คลื่นไฟฟ้าสลับ	3.69 $\pm$ 0.15 <sup>c</sup>	78.80 $\pm$ 18.75 <sup>ab</sup>
คลื่นทางด้านลบ	4.52 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>	34.43 $\pm$ 3.39 <sup>b</sup>
น้ำกลั่น	6.52 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	1.14 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>

\*\*หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD; น้ำกลั่นคือตัวอย่างที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงสภาพด้วยพลาสติก  
ตัวอักษร a - z แสดงค่าเฉลี่ยของแต่ละเงื่อนไขตามแนวตั้งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ  
ทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

นอกจากนี้ยังได้ตรวจสอบหาค่าปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในเตรท และใน  
ไตรท์ อันเป็นประโยชน์อย่างมากกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในงานทางด้านเกษตร และการยับยั้ง  
การเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และเชื้อราต่าง ๆ ซึ่งลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า  
แรงดันสูงทั้ง 3 รูปแบบ มีค่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในเตรท และในไตรท์ มีค่าเพิ่มขึ้น  
ในช่วงค่าปริมาณที่ใกล้เคียงกันคือ 25 mg/L, 100-250 mg/L และ 40 mg/L ตามลำดับ ทั้งนี้  
ระยะห่างของช่วงการวัดค่าปริมาณจากชุดกระดาดทดสอบ มีค่าปริมาณหน่วยนับที่กว้างมาก จึง  
ทำให้ค่าปริมาณของธาตุที่วัดได้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า  
ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแบบคลื่นทางด้านบวก และแบบคลื่นไฟฟ้าสลับ มีค่าความ  
เป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน โดยทั้ง 2 ลักษณะ มีค่าแรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จ และค่า  
กระแสไฟฟ้าดิซชาร์จสูงกว่าแบบคลื่นทางด้านลบ

#### 4.3 อิทธิพลของลำพลาสมาและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อมวลของต้นกล้าปีทูท

การทดลองนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ลักษณะของพลาสมา และอิทธิพลของ  
ลำพลาสมาและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 ลักษณะของพลาสมา

##### 4.3.1.1 ชุดกำเนิดลำพลาสมา (DBD jet)

การสร้างลักษณะพลาสมาแบบ DBD jet มีค่าแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายให้สูงสุดคือ 8 kV ณ ความถี่ 8 kHz โดยมีอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 5 LPM สำหรับการปรับปรุงสภาพพื้นผิวเมล็ดปืทุท ทั้งนี้ปลายแหลมของแท่งอิเล็กโทรดอยู่ห่างจากปลายหลอดอะลูมินา 1 cm. และห่างจากระดับผิวของเมล็ดปืทุท 3 cm. ซึ่งให้แผ่นแหวนทองแดงทำหน้าที่เป็นกราวด์ของระบบ ในขณะที่เกิดการสร้างลักษณะของพลาสมาขึ้นทำให้เกิดแสงสีม่วงที่ปรากฏขึ้นจะเป็นการปล่อยโคโรนาเรืองแสง และลำพลาสมาจะถูกขับออกมาในรูปของหลอดอะลูมินาและยึดออกมาสัมผัสกับเมล็ดปืทุท ดังภาพประกอบ 24 ขณะฉายลำพลาสมาเมล็ดที่วางอยู่บนจานเพาะจะทำการติดตั้งไว้กับมอเตอร์เพื่อทำการหมุนภาชนะที่ใช้วางเมล็ด ทั้งนี้จะทำให้ลำพลาสมาสัมผัสกับเมล็ดปืทุทได้อย่างทั่วถึงทุกเมล็ด



ภาพประกอบ 24 ชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบ DBD jet สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวเมล็ดปืทุท

##### 4.3.1.2 ชุดกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาโคโรนาเจ็ท (corona jet)

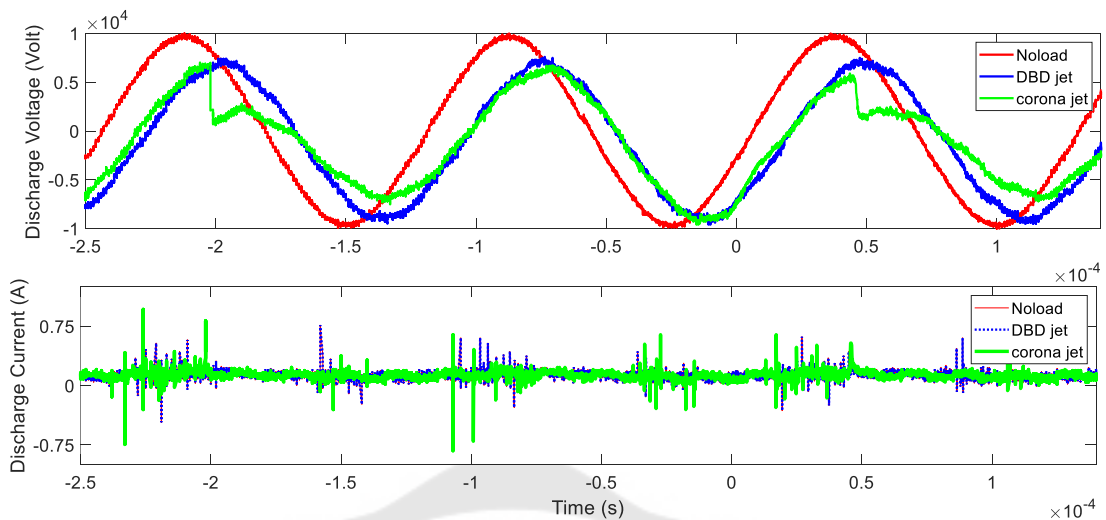
การสร้างลักษณะพลาสมาแบบโคโรนาเจ็ท corona jet มีค่าแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายให้สูงสุดคือ 8 kV ณ ความถี่ 8 kHz โดยมีอัตราการไหลของอากาศที่ 5 LPM สำหรับการปรับปรุง

สภาพน้ำ ทั้งนี้ปลายแหลมของแท่งอิเล็กโทรดอยู่ห่างจากระดับน้ำ 1 cm. โดยที่หลอดออสซิลูมิเตอร์ อยู่ในบีกเกอร์ขนาด 50 mL บรรจุน้ำประปา 30 mL และให้น้ำประปาทำหน้าที่เป็นกรวดของระบบ ในขณะที่เกิดการสร้างลักษณะของพลาสมาขึ้นทำให้เกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนหรือพลาสมาขึ้น และลำพลาสมาจะถูกขับออกมาตามรูปร่างของช่องอากาศไปสัมผัสกับน้ำทำให้เกิดการกระจายตัวอย่างทั่วถึงแสดงดังภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาแบบโคโรนาเจ็ท (corona jet)

จากภาพประกอบ 24 และ 25 ค่าที่ทำให้เกิดการสร้างลักษณะของพลาสมาภายในอุปกรณ์ทั้งสอง มีค่าแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายให้สูงสุดที่ 8 kV ณ ความถี่ 8 kHz ทั้งนี้ค่าดังกล่าวมีค่าเข้าใกล้รูปสัญญาณคลื่นไซน์มากที่สุด ในขณะที่เกิดการสร้างลักษณะของลำพลาสมาจากชุด DBD jet ทำให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ และค่ากระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่เกิดขึ้นคือ 5.62 kV<sub>rms</sub> และ 30 mA ตามลำดับ หลังจากนั้นในขณะที่เกิดการสร้างลักษณะของพลาสมาจากชุด corona jet ทำให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ และค่ากระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่เกิดขึ้นคือ 4.41 kV<sub>rms</sub> และ 32.5 mA ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 26



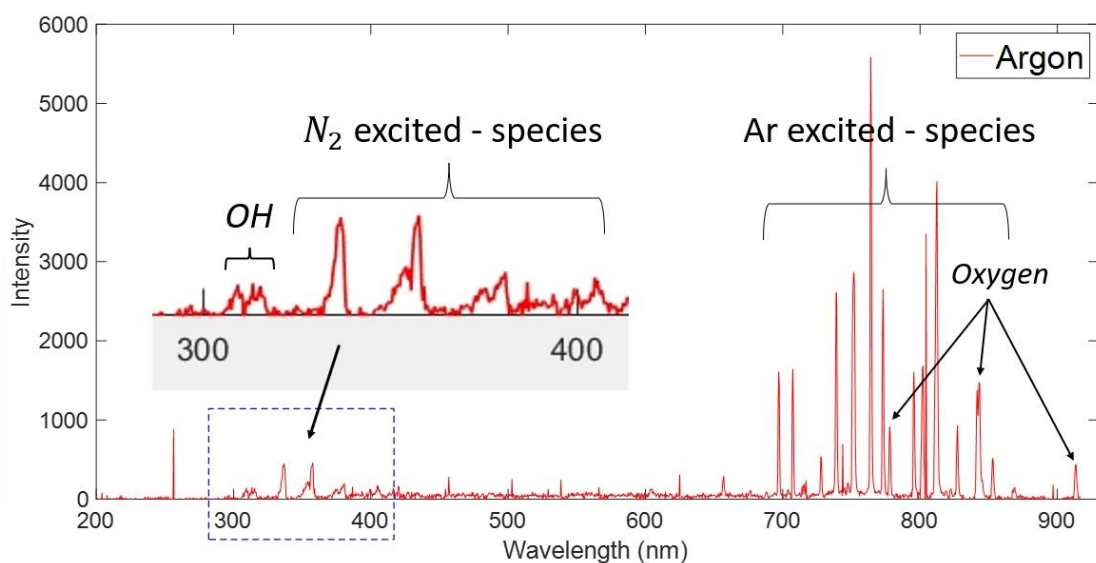
ภาพประกอบ 26 (บน) ลักษณะแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จ และ (ล่าง) ลักษณะกระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ

ที่มา: วุฒิโชค แสงวัง (2022)

จากภาพประกอบ 26 แสดงให้เห็นว่าชุดกำหนดพลาสมาแบบ DBD jet มีค่าแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จที่เกิดขึ้นสูงกว่าชุดกำหนดพลาสมาแบบ corona jet ทั้งนี้เป็นเพราะว่าสนามไฟฟ้าของทั้งสองชุดมีลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน โดยชุด DBD jet จะมีลักษณะของสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอคือ มีแผ่นวงแหวนทองแดงทำหน้าที่เป็นกราวด์ อยู่ตรงข้ามขั้วของแท่งอิเล็กโทรดและมีฉนวนคั่นไว้ ซึ่งทำให้เกิดลักษณะของพลาสมาได้ยากกว่า ทั้งนี้ลักษณะขั้วอิเล็กโทรดของชุด corona jet จะมีลักษณะของสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูงคือ มีปลายแหลมของแท่งอิเล็กโทรดอยู่เหนือระดับผิวหน้า และไม่มีฉนวนคั่นไว้ โดยมีน้ำทำหน้าที่เป็นกราวด์ของระบบ ซึ่งจะทำให้เกิดลักษณะของพลาสมาได้ง่ายกว่า และกราฟแรงดันไฟฟ้ามีการเกิดเบรกดาวนที่ขั้วอิเล็กโทรดลงสู่ระนาบของน้ำประปาอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีการปลดปล่อยพลังงานที่สูงและมีค่ากระแสไฟฟ้าดีสชาร์จที่เกิดขึ้นสูงกว่าชุด DBD jet

ยิ่งไปกว่านั้นจากการทดลองได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกราฟ OES (Optical Emission Spectrometry) ซึ่งใช้ในการระบุคุณสมบัติของสปีชีส์ที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีในอากาศ จากการสร้างขึ้นของชุดพลาสมาแบบ DBD jet เป็นกราฟแสดงความเข้มสัมพัทธ์ของแสง (relative intensity) ต่อความยาวคลื่นของอะตอมที่ปล่อยพลังงานในรูปของแสงออกมา ดังภาพประกอบ 27 จากกราฟตรวจพบว่าจะมีอนุมูลอิสระของไนโตรเจน (nitrogen,  $N_2$ ) เกิดในช่วงความยาวคลื่น 340-380 นาโนเมตร โดยสามารถสังเกตเห็นถึงการปล่อยอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radicals, OH) ในช่วงความยาวคลื่น 310-325 นาโนเมตร และอนุมูลอิสระที่โดดเด่นของออกซิเจน

(oxygen, O) จะปรากฏขึ้นที่ความยาวคลื่น 777, 844 และ 926 นาโนเมตร (Jamil et al., 2017) ซึ่งอาจเกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลของน้ำในอากาศ เกิดจากการชนกับอิเล็กตรอนพลังงานสูง จากสารประกอบดังกล่าวเมื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีในอากาศจะก่อให้เกิดสารประกอบอื่น ๆ ออกมา ดังเช่น  $\text{OH}^-$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  และ  $\text{H}_2\text{O}_2$  เป็นต้น สารประกอบเหล่านี้มีประโยชน์ในการยับยั้งเชื้อได้ (Tanakaran & Matra, 2021), (Knust, Kuhlmann, de Los Arcos, & Grundmeier, 2019) และ (Khanit Matra, 2017)



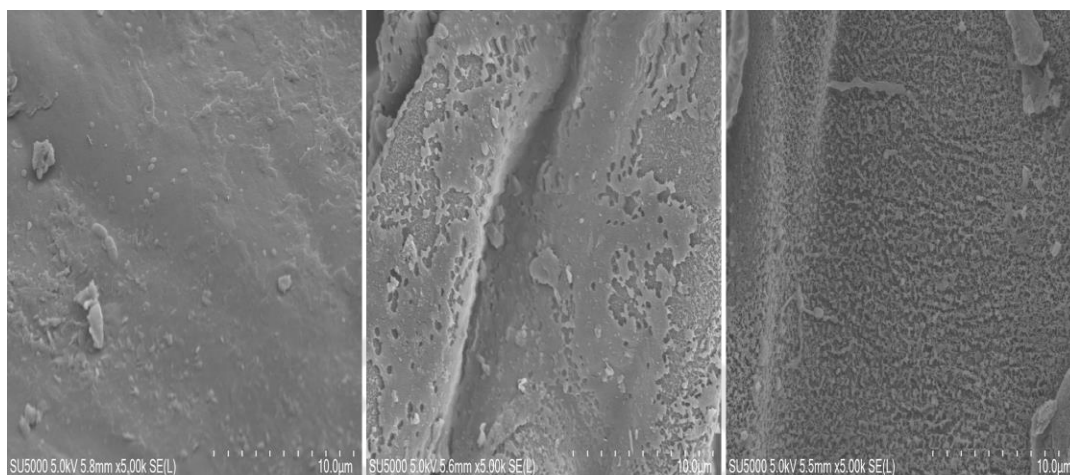
ภาพประกอบ 27 กราฟ OES ของชุด corona jet

#### 4.3.2 อิทธิพลของลำพลาสมาและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา

##### 4.3.2.1 การปรับปรุงพื้นผิวเมล็ดบิทูท

จากภาพประกอบ 24 ข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเมล็ดบิทูท หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของเมล็ดบิทูทโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ซึ่งใช้กำลังขยายในการถ่ายภาพพื้นผิวของเมล็ดบิทูทที่กำลังขยาย 5000 เท่า ผลการวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของเมล็ดบิทูทพบว่าที่เวลา 0, 2.5 และ 5 นาที มีลักษณะสภาพพื้นผิวที่แตกต่างกัน โดยสภาพพื้นผิวของเมล็ดบิทูทที่ไม่ผ่านการฉายด้วยลำพลาสมาจะพบว่าสภาพพื้นผิวของเมล็ดบิทูทมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันที่ไม่มีรอยขีดข่วน และไม่มีรูพรุนจากสภาพพื้นผิว ทั้งนี้เมื่อเมล็ดบิทูทผ่านการฉายสภาพพื้นผิวด้วยลำพลาสมาเป็นเวลา 2.5 และ 5 นาที พบว่าสภาพพื้นผิวของเมล็ดบิทูทมีลักษณะเป็นรูพรุน และมีขนาดน้อยกว่า  $10 \mu\text{m}$  ซึ่งจะมีลักษณะเป็น

รูพรุนเพิ่มมากยิ่งขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการฉายด้วยลำพลาสมานานมากขึ้นดัง  
ภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 ภาพถ่าย SEM ผิวเมล็ดบีทรูทที่เวลา (ซ้าย) 0 (กลาง) 2.5 และ (ขวา) 5 นาที

ที่มา: วุฒิโชค แสงวัง (2022)

#### 4.3.2.2 การปรับปรุงสภาพน้ำ

หลังจากทำการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยพลาสมาแบบโคโรนาเจ็ต (corona jet) เป็นเวลา 0, 7.5 และ 15 นาที ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ลดลง และค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยพลาสมา (Khanit Matra et al.) ซึ่งการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยพลาสมาที่เวลา 15 นาที มีค่าความเป็นกรดสูงกว่าการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยพลาสมาที่เวลา 7.5 นาที โดยมีค่าความเป็นกรดอยู่ที่ 3.42 และ 4.05 ตามลำดับ อีกทั้งยังมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่า ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 978  $\mu\text{S}/\text{cm}$  และ 621  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ตามลำดับ โดยที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำประปามีค่าเริ่มต้นที่ 7.52 และ 125  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ตามลำดับ แสดงดังตาราง 8 นอกจากนี้ยังได้ตรวจสอบหาค่าปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนเตรท และไนไตรท์ จากการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา ซึ่งมีค่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนเตรท และไนไตรท์ มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงปริมาณที่ใกล้เคียงกันคือ 25 mg/L, 250-500 mg/L และ 40-80 mg/L ตามลำดับ

ตาราง 8 ผลการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้า

เวลาการปรับปรุงสภาพน้ำ	ผลการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของน้ำทั้งสอง	
	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm.}$ )
	Avg. $\pm$ S.D.	Avg. $\pm$ S.D.
น้ำประปา 0 นาที	7.52 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	125 $\pm$ 3.52 <sup>c</sup>
น้ำประปา 7.5 นาที	4.05 $\pm$ 0.15 <sup>b</sup>	621 $\pm$ 13.32 <sup>b</sup>
น้ำประปา 15 นาที	3.42 $\pm$ 0.05 <sup>c</sup>	978 $\pm$ 7.92 <sup>a</sup>

\*\*หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD; น้ำประปา 0 นาที คือตัวอย่างที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงสภาพด้วยพลาสมา ตัวอักษร a - z แสดงค่าเฉลี่ยของแต่ละเงื่อนไขตามแนวตั้งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

#### 4.3.2.3 อัตราการงอกและมวล

ทำการทดลองดังหัวข้อที่ 3.3 หลังจากนั้นทำการปลูกเมล็ดปีทูทเป็นเวลา 7 วัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเมล็ดปีทูทด้วยลำพลาสมา และการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา ส่งผลให้มีค่าเปอร์เซ็นต์จำนวนอัตราการงอกสูงขึ้นกว่ากลุ่มควบคุม โดยที่กลุ่มควบคุมมีค่าเปอร์เซ็นต์จำนวนอัตราการงอกอยู่ที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ยังส่งผลต่อมวลของต้นกล้าปีทูทคือ มีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งเฉลี่ยสูงกว่าต้นกล้ากลุ่มควบคุม โดยที่น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของต้นกล้ากลุ่มควบคุมคือ 602.60 $\pm$ 0.14 มิลลิกรัม และ 47.30 $\pm$ 1.56 มิลลิกรัม ตามลำดับ แสดงดังตาราง 9

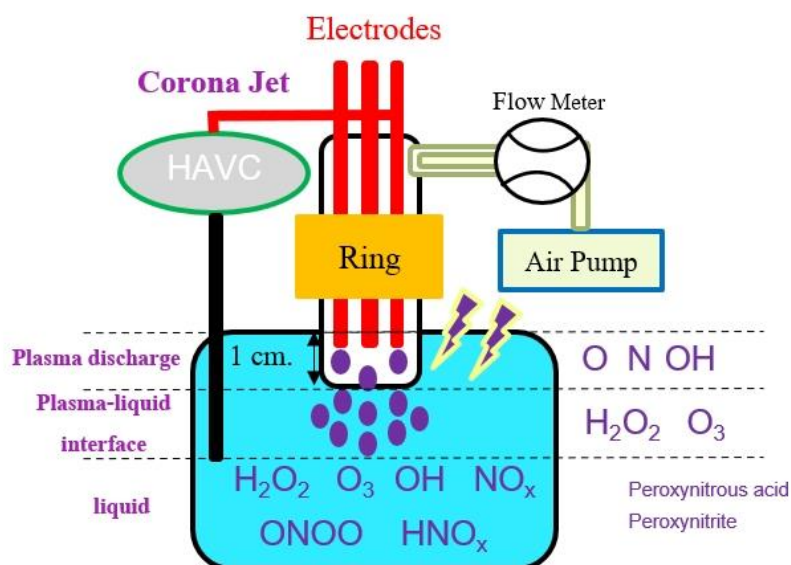


ตาราง 9 จำนวนอัตราการงอก น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งเฉลี่ย ของต้นบีทรูท

DBD jet และ corona jet (ผิวเมล็ดและน้ำ) นาที	อัตราการงอก (%)	น้ำหนักสด (mg) Avg. ± S.D.	น้ำหนักแห้ง (mg) Avg. ± S.D.
กลุ่มควบคุม	60	602.60±0.14 <sup>h</sup>	47.30±1.56 <sup>e</sup>
0 นาที และ 7.5 นาที	66	715.10±0.28 <sup>f</sup>	74.40±0.85 <sup>b</sup>
0 นาที และ 15 นาที	76	806.35±0.21 <sup>e</sup>	51.55±1.91 <sup>d</sup>
2.5 นาที และ 0 นาที	68	693.45±0.49 <sup>g</sup>	65.45±0.07 <sup>c</sup>
2.5 นาที และ 7.5 นาที	82	807.45±0.47 <sup>d</sup>	74.15±2.62 <sup>b</sup>
2.5 นาที และ 15 นาที	92	908.35±0.64 <sup>c</sup>	76.50±1.53 <sup>b</sup>
5 นาที และ 0 นาที	74	805.95±0.35 <sup>e</sup>	76.85±1.88 <sup>b</sup>
5 นาที และ 7.5 นาที	94	973.65±0.19 <sup>b</sup>	105.20±1.98 <sup>a</sup>
5 นาที และ 15 นาที	88	998.45±0.32 <sup>a</sup>	80.95±4.31 <sup>b</sup>

\*\*หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย (น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง) ±SD; กลุ่มควบคุม คือตัวอย่างที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงสภาพด้วย DBD jet และ corona jet ตัวอักษร a - z แสดงค่าเฉลี่ยของแต่ละเงื่อนไขตามแนวตั้งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

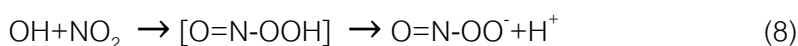
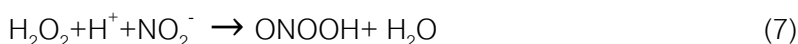
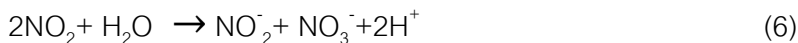
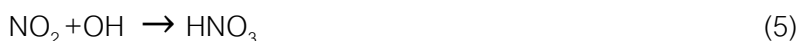
ทั้งนี้สามารถอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นได้จากการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาจะส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ลดลง และค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังตรวจพบค่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในเตรท และไนไตรท์ (Khanit Matra et al.) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 อิทธิพลของการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา

จากภาพประกอบ 29 อิทธิพลของการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาส่งผลต่อ ค่า pH ของน้ำ PAW มีค่าที่ลดลง เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากสปีชีส์ที่เป็นกรดจากการเกิดลักษณะของพลาสมาในอากาศ และการรวมตัวของสารประกอบที่เป็นกรดในเฟสของเหลว ในขณะที่เกิดการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาขึ้นจะมีความไวต่ออนุมูลไฮดรอกซิล (OH) เมื่ออนุมูล OH มีสองตัวสามารถรวมตัวกันใหม่เพื่อสร้าง  $H_2O_2$  หลังจากนั้น  $H_2O_2$  ที่ละลายในของเหลวส่งผลต่อค่า pH ของน้ำดังที่กล่าวมาในตอนต้น นอกจากนี้การมีอยู่ของ NO ขณะเกิดพลาสมาอาจบ่งบอกถึงความเป็นไปได้ในการสร้าง  $HNO_3$ ,  $H^+$ ,  $ONOOH$  และ  $ONOO^-$  ในน้ำ แสดงดังสมการนี้ (Khanit Matra et al., 2021), (Thirumdas R. et al., 2018)

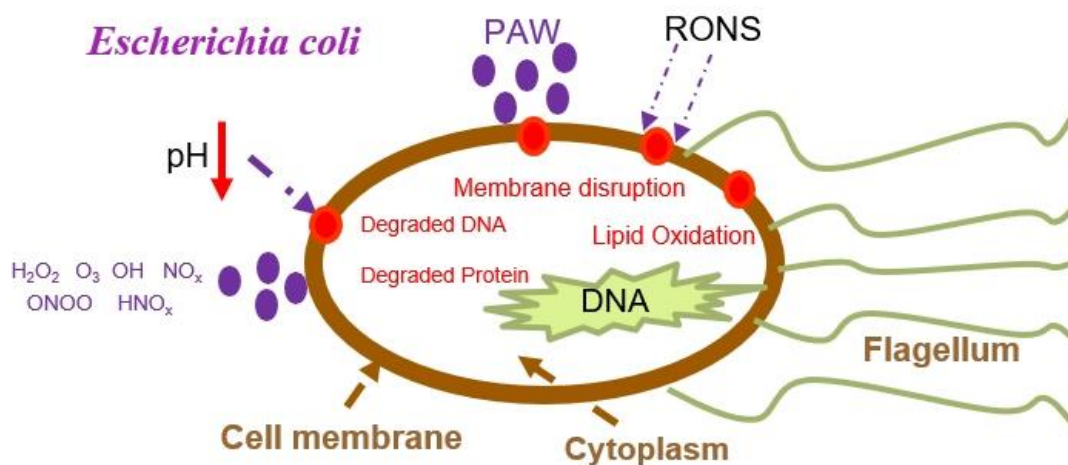




ในส่วนของค่า EC ของน้ำ PAW มีค่าที่เพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) หรือพลาสมาในอากาศ ทั้งนี้เมื่อไอออนหรือพลาสมาสัมผัสกับน้ำจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาทั้งออกซิเดชันและรีดักชัน (oxidation-reduction) ในขณะนั้นมีการสร้างไอออนที่ออกฤทธิ์หลายอย่างระหว่างเกิดการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา (K. Matra et al., 2022) สังเกตได้จากสมการที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น (1)-(8) ดังนั้นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า EC จะสอดคล้องกับการลดลงของค่า pH ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในข้อข้างต้น

จากผลการทดลองเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในเตรท และไนโตรท ในน้ำ PAW ที่ตรวจพบมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังที่ได้กล่าวมาแล้วในสมการที่ (2)-(6) ซึ่งอาจบ่งบอกถึงความเป็นไปได้ในการก่อให้เกิดสารอนุมูลอิสระออกซิเจน (ROS) และสารอนุมูลอิสระไนโตรเจน (RNS) อย่างไรก็ตามสารเคมีที่เป็นผลพลอยได้ครั้งแรกในการดูดซับน้ำ PAW ทางรากของพืชคือสารประกอบไนโตรเจน ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าพืช

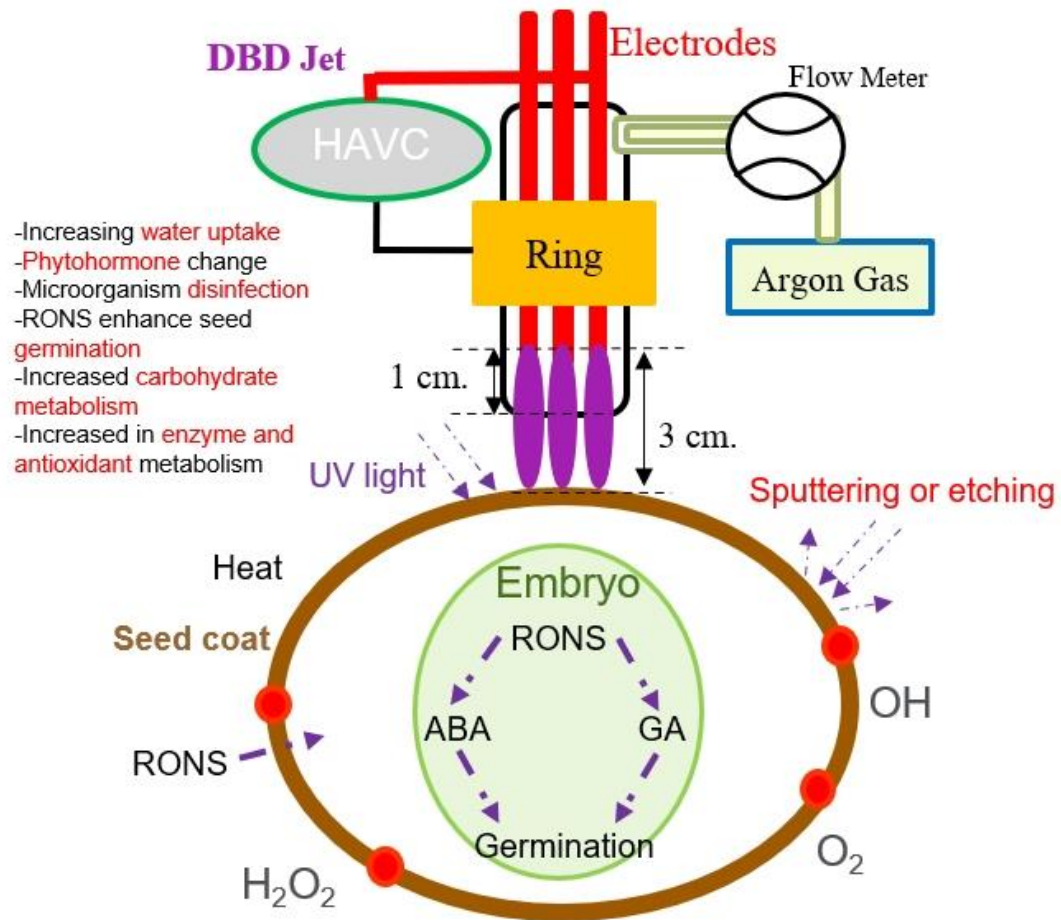
นอกจากนี้สารอนุมูลอิสระ RONS ชนิดอื่น ๆ ยังมีผลกระทบต่อการแสดงออกของยีนและฮอร์โมนพืชโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทำงานร่วมกันของ NO และ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ช่วยลดความเสียหายของพืชที่เกิดจากการออกซิเดชันและนำไปสู่การรักษามาตรฐานสำหรับสรีรวิทยาของพืชและเมแทบอลิซึม ทั้งนี้ไม่ได้กล่าวถึงเฉพาะการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของพืชเพียงเท่านั้น RONS สายพันธุ์อื่น ๆ ยังสามารถทำปฏิกิริยาในการช่วยยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ตั้งภาพประกอบ 30 และจากผลการทดลองดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในหัวข้อที่ 4.1 อิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา



ภาพประกอบ 30 อิทธิพลของน้ำ PAW ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli*

จากภาพประกอบ 30 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในน้ำ PAW มีสารอนุมูลอิสระจำนวนมากโดยเฉพาะอนุมูลอิสระจากออกซิเจนและ อนุมูลอิสระจากไนโตรเจน (RONS) ซึ่งมีผลทำให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นที่เยื่อหุ้มเซลล์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบชนิดฟอสโฟลิพิด (phospholipid) ในกลุ่มของลิพิด (lipid) และโปรตีนที่แทรกอยู่ในผนังของเยื่อหุ้มเซลล์ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดังกล่าวทำให้เซลล์ถูกทำลาย และก่อให้เกิดรูขึ้นภายในเยื่อหุ้มเซลล์ ทั้งนี้สารอนุมูลอิสระ RONS ของน้ำ PAW ยังไปทำลายส่วนอื่น ๆ ที่อยู่ภายในเยื่อหุ้มเซลล์ เช่น mitochondrion และ nucleus เป็นต้น รวมถึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของ DNA จึงทำให้ metabolism และกระบวนการต่าง ๆ ของเซลล์เกิดการ ทำงานที่ผิดปกติ ส่งผลให้เซลล์นั้นเสื่อมสภาพและตายไปในที่สุด (Hati, Patel, & Yadav, 2018)

ในส่วนสุดท้ายของบทนี้จะอธิบายถึงการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเมล็ดปีทูทที่ส่งผลต่ออัตราการงอกและมวลของต้นกล้าปีทูทดังภาพประกอบ 31



ภาพประกอบ 31 อิทธิพลของ DBD jet สำหรับการปรับปรุงสภาพเมล็ด

จากภาพประกอบ 31 อิทธิพลของ DBD jet สำหรับการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเมล็ดพืช เมื่อลำพลาสมาสัมผัสกับเมล็ดพืชจะทำอันตรกิริยาเฉพาะที่พื้นผิวของเมล็ด ได้แก่ ความร้อน รังสีอัลตราไวโอเล็ต และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ทั้งนี้จะรวมถึงกระบวนการสเปคโตรริง (Sputtering) เป็นกระบวนการที่พื้นผิวหน้าของเมล็ดพืชถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูงดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับพื้นผิวของเมล็ดพืช กระบวนการนี้อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ เนื่องจากการทำลายชั้นเซลล์บริเวณผิวเปลือกหุ้มเมล็ดพืช ส่งผลให้พื้นผิวเปลือกมีรูพรุนมากขึ้นทำให้น้ำสามารถซึมผ่านเข้าสู่ภายในเมล็ดเร็วขึ้น ทั้งนี้เมื่ออนุมูลอิสระออกซิเจน และอนุมูลอิสระไนโตรเจน (RONS) ซึมผ่านผิวเปลือกเมล็ดมากขึ้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเมล็ดได้แก่ ส่งผลต่อกลไกการควบคุมการดูดซับน้ำที่เร็วขึ้น การเปลี่ยนแปลงของไฟโตฮอร์โมน (phytohormone) ที่มีผลต่อกระบวนการช่วยเพิ่มการงอกของเมล็ด

และเพิ่มการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรตของกลุ่ม hydroxyl carboxyl และ carbonyl อีกทั้งยังเพิ่มการเผาผลาญเอนไซม์และสารต้านอนุมูลอิสระอีกด้วย ดังนั้นจากผลการทดลองที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่าเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์จำนวนอัตราการงอก ช่วยกระตุ้นให้มีการดูดซับน้ำได้เร็ว และช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดพืช (Le et al., 2022), (Y. Tanakaran and K. Matra., 2020), (Khamseen et al., 2016)



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยเรื่องนี้ได้ทำการศึกษาพลาสมาแบบอนุกรมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศเพื่อปรับปรุงสภาพน้ำ สำหรับการประยุกต์ใช้ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และการประยุกต์ใช้ทางด้านการเกษตรเพื่อเพิ่มอัตราการงอกและมวลของต้นกล้าปืทุท ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 อิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา

สรุปผลการทดลองการศึกษอิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา จากการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวกที่ 6.40 kV ความถี่ 50 Hz มีอัตราการไหลของอากาศที่ 5 LPM เมื่อทำการเชื่อมต่อเข้ากับชุดกำเนิดลพลาสมาแบบได้น้ำ ในขณะที่เกิดการสร้างลักษณะของพลาสมาจะเกิดการเบรกดาวนผ่านอากาศไปสัมผัสกับน้ำ โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จและค่ากระแสไฟฟ้าดิสชาร์จจากการกระตุ้นน้ำประปาคือ 1.78 kV<sub>rms</sub> และ 20.13 mA ตามลำดับ ในกรณีของการกระตุ้นน้ำกลั่นมีค่าแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จและค่ากระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่เกิดขึ้นคือ 3.09 kV<sub>rms</sub> และ 12.10 mA ตามลำดับ ทั้งนี้คุณสมบัติของน้ำประปาและน้ำกลั่นมีคุณสมบัติที่ไม่เท่ากัน จากผลการทดลองการศึกษอิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาพบว่าค่าพารามิเตอร์ของน้ำประปาและน้ำกลั่นมีค่ากรด-ด่าง (pH) ที่ลดลง และค่าการนำไฟฟ้า (EC) มีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม เนื่องจากในอากาศส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และก๊าซเฉื่อยชนิดอื่น ๆ ทั้งนี้การที่อิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากการดิสชาร์จไปชนกับอะตอมของน้ำทำให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้นทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัว ทำให้เกิดองค์ประกอบอนุมูลอิสระออกซิเจน (Reactive Oxygen Species, ROS) และอนุมูลอิสระไนโตรเจน (Reactive Nitrogen Species, RNS) ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ของสารอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลอันมีความไวต่อชีวโมเลกุลภายในเซลล์ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ว่าสารอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง อย่างไรก็ตามอิทธิพลของพลาสมาังก่อให้เกิดองค์ประกอบอื่น ๆ ที่สามารถทำปฏิกิริยากับเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้น้ำพลาสมามีความสามารถต่อการทำปฏิกิริยาในการช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ถึง 3.12 - 3.50 Log CFU/ml จากการใช้น้ำกลั่นและน้ำประปาที่ผ่านการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยพลาสมาเป็นเวลา 3-5 นาที โดยมีความหนาแน่นของเชื้อกลุ่มควบคุมอยู่ที่ 1.80x10<sup>9</sup> CFU ซึ่งเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วจะสามารถลดปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้มากถึง 92.25-96.81%

### 5.1.2 อิทธิพลของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงต่อการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา

สรุปผลการทดลองอิทธิพลของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงต่อการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา จากการกำหนดลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงทั้ง 3 รูปแบบ คือแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก แบบคลื่นไฟฟ้าสลับ และแบบครึ่งคลื่นทางด้านลบ โดยทำการบ้อนแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสร้างลักษณะของพลาสมาคือ 10.2 kV ที่สภาวะบรรยากาศ ณ ความถี่ 50 Hz อัตราการจ่ายอากาศ 7.5 LPM เชื่อมต่อกับชุดกำเนิดลำพลาสมาแบบหลายเข็มใต้น้ำ ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จที่เกิดขึ้นคือ 5.68 kV<sub>rms</sub>, 5.86 kV<sub>rms</sub>, และ 5.87 kV<sub>rms</sub> ตามลำดับ และมีค่ากระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่เกิดขึ้นคือ 25.57 mA, 24.23 mA, และ 12.10 mA ตามลำดับ หลังจากการกระตุ้นน้ำกลั่นด้วยพลาสมาเป็นเวลา 10 นาที จากผลการทดลองพบว่าสภาวะทั้งหมดส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ลดลง และค่าการนำไฟฟ้า (EC) มีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำกลั่นชุดควบคุม ซึ่งค่าที่ดีที่สุดพบในกรณีของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก มีแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ และกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่เกิดขึ้นคือ 5.68 kV<sub>rms</sub> และ 25.57 mA ตามลำดับ โดยมีค่าความเป็นกรดลดลงที่ 3.63 และค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 89.18  $\mu\text{S}/\text{cm}$  อีกทั้งยังตรวจพบค่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนเตรท และไนไตรท์ มีค่าเพิ่มขึ้นในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้จากการสร้างลักษณะพลาสมาของโคโรนาบวกที่เกิดขึ้นบริเวณปลายเข็มอิเล็กโทรด มีจำนวนเข็มของการเกิดพลาสมาในจำนวนที่มากกว่า และมีความสม่ำเสมอของการเกิดพลาสมาได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับการเกิดลักษณะพลาสมาของโคโรนาลบ ในขณะที่กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงแบบคลื่นไฟฟ้าสลับ จะมีกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่เกิดขึ้นฝั่งทางด้านบวกมากกว่าฝั่งทางด้านลบ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จแบบคลื่นไฟฟ้าสลับจึงมีค่าที่มากกว่าแบบครึ่งคลื่นทางด้านลบ จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก และแบบคลื่นไฟฟ้าสลับมีค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังมีค่าแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ และค่ากระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่เกิดขึ้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก อย่างไรก็ตามก็ตามลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงของแต่ละลักษณะรูปคลื่นยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสมกับการสร้างลักษณะของพลาสมาในรูปแบบอื่น ๆ



### 5.1.3 อิทธิพลของลำพลาสมาและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อมวลของต้นกล้าบีทรูท

ชุดการกระตุ้นเมล็ดด้วยพลาสมาแบบ DBD jet และชุดการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาแบบโคโรนาเจ็ต (corona jet) ได้รับการออกแบบที่เรียบง่ายสามารถปรับเปลี่ยนการใช้งานได้อย่างหลากหลาย อีกทั้งยังเป็นเครื่องกำเนิดพลาสมาที่ใช้งานได้ทั้ง 2 แบบในเครื่องเดียว ซึ่งการสร้างลักษณะการเกิดของพลาสมาแบบ DBD jet และ corona jet นั้น ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้มีค่าที่เท่ากันคือ 8 kV AC ณ ความถี่ 8 kHz โดยมีอัตราการไหลของอาร์กอนใช้กับ DBD jet อยู่ที่ 5 LPM สำหรับการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเมล็ดบีทรูทเป็นเวลา 2.5 นาที และ 5 นาที และที่สภาวะบรรยากาศได้ใช้อัตราการไหลของอากาศที่ 5 LPM สำหรับการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาแบบ corona jet เป็นเวลา 7.5 นาที และ 15 นาที ในขณะที่เกิดการสร้างลักษณะของพลาสมาแบบ DBD jet มีค่าแรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จ และค่ากระแสไฟฟ้าดิซชาร์จที่เกิดขึ้นคือ 5.62 kV<sub>rms</sub> และ 30 mA ตามลำดับ ในส่วนของ corona jet มีค่าแรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จ และค่ากระแสไฟฟ้าดิซชาร์จที่เกิดขึ้นคือ 4.41 kV<sub>rms</sub> และ 32.5 mA ตามลำดับ หลังจากนั้นนำเมล็ดบีทรูทที่ได้รับการปรับปรุงสภาพพื้นผิวจากชุด DBD jet มาทำการเพาะและรดน้ำพลาสมาจากการปรับปรุงสภาพน้ำจากชุด corona jet เป็นเวลา 7 วัน ซึ่งผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าในส่วนของ การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเมล็ดบีทรูทจาก DBD jet มีอิทธิพลต่อสภาพพื้นผิวของเมล็ดที่เปลี่ยนไป โดยสภาพพื้นผิวของเมล็ดบีทรูทจะมีลักษณะเป็นรูพรุนเล็ก ๆ โดยที่มีรูขนาดเล็กลงกว่า 10  $\mu\text{m}$  และจะมีลักษณะเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อใช้ระยะเวลาในการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเมล็ดนานขึ้น ในส่วนของการปรับปรุงสภาพน้ำจาก corona jet จะส่งอิทธิพลต่อค่าพารามิเตอร์ของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่าความเป็นกรดที่ลดลง และค่าการนำไฟฟ้า (EC) ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม อีกทั้งยังตรวจพบค่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนเตรท และไนไตรท์ ที่เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้สำหรับการวัดผลเป็นการวัดโดยใช้กระดาษทดสอบ QUANTOFIX อาจทำให้มีค่าความแม่นยำไม่มากและก่อให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนได้ อย่างไรก็ตามจากที่กล่าวมาข้างต้นอิทธิพลของพลาสมาแบบ DBD jet และ corona jet ส่งผลที่ดีต่ออัตราการงอกและมวลของต้นกล้าบีทรูท เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ทั้งนี้เป็นเพราะชนิดปฏิกิริยาของลำพลาสมาที่ส่งผลต่อสภาพพื้นผิวของเมล็ดที่เปลี่ยนแปลงไป และคุณภาพของน้ำที่กระตุ้นน้ำด้วยพลาสมามีค่าที่เป็นประโยชน์ต่อเมล็ดบีทรูท อีกทั้งยังสามารถช่วยเพิ่มการดูดซับน้ำ และช่วยกระตุ้นอัตราการงอกได้ดีขึ้น ซึ่งค่าที่ดีที่สุดพบในกลุ่มของการใช้ DBD jet เป็นเวลา 5 นาที และ corona jet เป็นเวลา 7.5 นาที ส่งผลให้มีอัตราการงอกเพิ่มขึ้น 34 เปอร์เซ็นต์ และมีน้ำหนักแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณ 2.22 เท่า เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม

จากผลการทดลองของทั้ง 3 ส่วน สามารถสรุปได้ว่าการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปคือ ค่า pH ของน้ำ PAW จากทั้ง 3 การทดลอง มีค่า pH ที่ลดลงตามเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพน้ำมากขึ้น และค่าการนำไฟฟ้า EC ของน้ำ PAW จากทั้ง 3 การทดลอง มีค่า EC ที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการปรับปรุงสภาพน้ำที่มีเวลามากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นยังตรวจพบค่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนเตรท และไนไตรท์ ที่เพิ่มขึ้นในน้ำ PAW ทั้งนี้สำหรับการวัดผลเป็นการวัดโดยใช้กระดาษทดสอบ QUANTOFIX อาจทำให้มีค่าความแม่นยำที่ไม่มากและอาจก่อให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนได้ อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองทั้งหมดสามารถยืนยันได้ว่าพลาสมามีอิทธิพลอย่างมากต่อ การเปลี่ยนแปลงของสารอนุมูลอิสระออกซิเจน (ROS) และสารอนุมูลอิสระไนโตรเจน (RNS) ซึ่งก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (oxidation-reduction) ของสารอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radical,  $\cdot\text{OH}$ ) อันมีความไวต่อชีวโมเลกุลภายในเซลล์ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ว่าสารอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง และอิทธิพลของพลาสมายังก่อให้เกิดองค์ประกอบอื่น ๆ ที่สามารถทำปฏิกิริยากับเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้น้ำพลาสมามีความสามารถต่อการทำปฏิกิริยาในการช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ แล้วยังสามารถนำมาใช้ในการเกษตรได้อีกด้วย เช่น การยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ของพืช การเพิ่มความสามารถในการงอกของเมล็ด และการเพิ่มน้ำหนักของต้นพืช เป็นต้น อย่างไรก็ตามในปฏิญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์จำนวนอัตราการงอก ช่วยกระตุ้นให้มีการดูดซับน้ำได้เร็ว และช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดปืทุท ซึ่งสามารถนำประโยชน์ไปใช้ในการประยุกต์ในการเกษตรกรรมอื่น ๆ ได้

## 5.2 ปัญหาและอุปสรรค

5.2.1 ในขณะที่เกิดลักษณะของพลาสมาเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานมากขึ้นจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขั้วของอิเล็กโทรดทำให้วัสดุที่ใช้อาจเกิดความชำรุดเสียหายได้ จึงจำเป็นที่จะต้องใช้วัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี และทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูง

5.2.2 ในขณะที่เกิดลักษณะของพลาสมาจะไม่สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าได้ เนื่องจากการเกิดเบรกดาวนในก๊าซ

5.2.3 ในส่วนของการทดลองที่เกี่ยวกับการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* อาจเกิดการเปราะเปื้อนและทำให้ผลการทดลองที่ออกมาไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลหรือสรุปผลได้ และต้องทำการทดลองใหม่

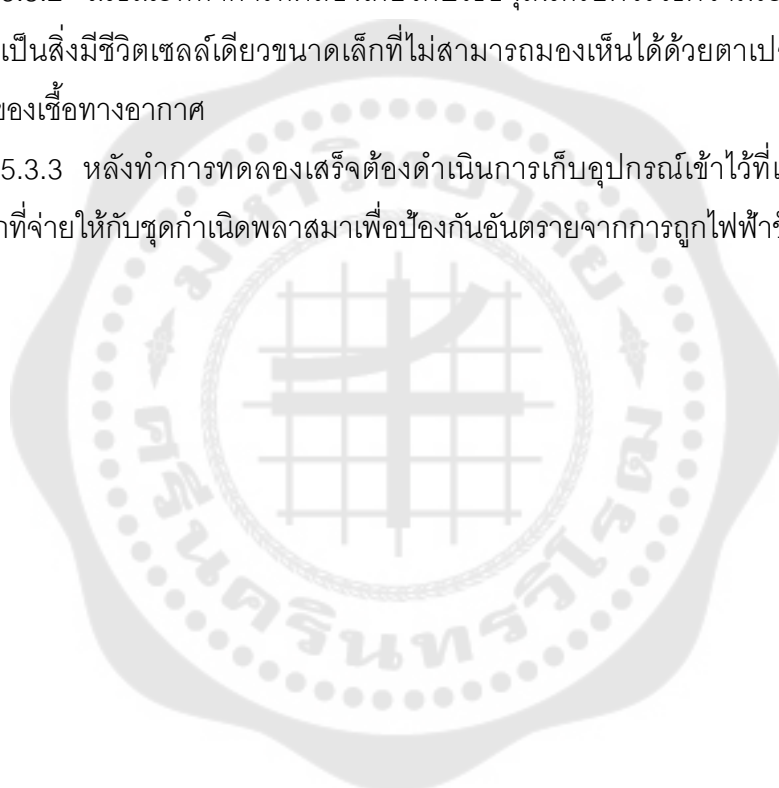
5.2.4 ในส่วนของการออกแบบชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและการออกแบบรูปทรงของชุดอุปกรณ์ในการสร้างลักษณะของพลาสติกต้องมีการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับการทดลอง

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในขณะที่ทำการทดลองเกี่ยวกับอุปกรณ์ไฟฟ้าควรใช้ความระมัดระวัง และตรวจสอบการต่อชุดอุปกรณ์ให้ถูกต้อง เนื่องจากการทดลองนี้ใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงอาจเกิดอันตรายกับผู้ทำการทดลองได้

5.3.2 ในขณะที่ทำการทดลองเกี่ยวกับเชื้อจุลินทรีย์ควรใช้ความระมัดระวังอย่างมาก เนื่องจากเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวขนาดเล็กที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเชื้อทางอากาศ

5.3.3 หลังทำการทดลองเสร็จต้องดำเนินการเก็บอุปกรณ์เข้าไว้ที่เดิม และทำการตัดไฟฟ้าหลักที่จ่ายให้กับชุดกำเนิดพลาสติกมาเพื่อป้องกันอันตรายจากการถูกไฟฟ้าช็อต



บรรณานุกรม



## บรรณานุกรม

- A. Patange, P. L., D. Boehm, P. J. Cullen, and P. Bourke. (2019). Efficacy of cold plasma functionalised water for improving microbiological safety of fresh produce and wash water recycling. *84*.
- Dechthummarong, C.). A perspective on the gas and liquid electrical discharge of plasma for agriculture applications: Part I. Enhancement of yield in plant lifecyc. *RMUTL Engineering Journal*, 2(2).
- Dechthummarong, C., & Matra, K. (2018). *An investigation of plasma activated water generated by 50 Hz half wave ac high voltage*. Paper presented at the 2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON).
- G. Busco, E. R., N. Chettouh-Hammas, J. M. Pouvesle, and C. Grillon. (2022). The emerging potential of cold atmospheric plasma in skin biology. *Free Radic. Biol. Med*, 161, 290-304.
- Hati, S., Patel, M., & Yadav, D. (2018). Food bioprocessing by non-thermal plasma technology. *Current opinion in food science*, 19, 85-91.
- Jamil, M., Ahmad, J., Bukhari, S., Mazhar, M., Nissar, U., RAOB, A., . . . Murtaza, G. (2017). Atmospheric pressure glow discharge (APGD) plasma generation and surface modification of aluminum and silicon Si (100). *Dig. J. Nanomater. Biostructures*, 12(2), 595-604.
- Khamsen, N., Onwimol, D., Teerakawanich, N., Dechanupaprittha, S., Kanokbannakorn, W., Hongesombut, K., & 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.
- Knust, S., Kuhlmann, A., de Los Arcos, T., & Grundmeier, G. (2019). Surface modification of ZnMgAl-coated steel by dielectric-barrier discharge plasma. *RSC advances*, 9(60), 35077-35088.
- Le, T. Q. X., Nguyen, L. N., Nguyen, T. T., Choi, E. H., Nguyen, Q. L., Kaushik, N. K., & Dao, N. T. (2022). Effects of Cold Plasma Treatment on Physical Modification

- and Endogenous Hormone Regulation in Enhancing Seed Germination and Radicle Growth of Mung Bean. *Applied Sciences*, 12(20), 10308.
- Liao, X., Su, Y., Liu, D., Chen, S., Hu, Y., Ye, X., . . . Ding, T. (2018). Application of atmospheric cold plasma-activated water (PAW) ice for preservation of shrimps (*Metapenaeus ensis*). *Food Control*, 94, 307-314.
- Lucas, J. R. (2001). High voltage engineering.
- Matra, K. (2017). Atmospheric non-thermal argon–oxygen plasma for sunflower seedling growth improvement. *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(1S), 01AG03.
- Matra, K., Tanakaran, Y., Luang-In, V., & Theeparaksapan, S. (2021). Enhancement of Lettuce Growth by PAW Spray Gliding Arc Plasma Generator. *IEEE Transactions on Plasma Science*.
- Matra, K., Tanakaran, Y., Temponsub, T., Nimbua, S., Thab-In, P., & Pluksa, C. (2019). Electrical characteristics of atmospheric air corona plasma by multi-pin electrodes.
- P. Homon, M. J., T. Pankrib, and P. Chantawong, . (2016). The development and design of wastewater treatment from battery factory by high pressure plasma system of ozone technology. *J. Appl. Sci*, 15, 21–33.
- R. Thirumdas, e. a. (2018). Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. *Trends in Food Science & Technology*, 77.
- Sergeichev, K. F., Lukina, N. A., Sarimov, R. M., Smirnov, I. G., Simakin, A. V., Dorokhov, A. S., & Gudkov, S. V. (2021). Physicochemical properties of pure water treated by pure argon plasma jet generated by microwave discharge in opened atmosphere. *Frontiers in Physics*, 8, 614684.
- Tanakaran, Y., & Matra, K. (2021). Influence of multi-pin anode arrangement on electric field distribution characteristics and its application on microgreen seed treatment. *physica status solidi (a)*, 218(1), 2000240.

Y. Sato , e. a. (2020). Numerical simulations of stable, high-electron-density atmospheric pressure argon plasma under pin-to-plane electrode geometry: Effects of applied voltage polarity. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 53(26).

บุญญาวรณ, ธ. (2018). ฟิสิกส์ของพลาสมา. *Science CMU Printing Service*.

สังข์สะอาด, ส. (2006). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (High voltage engineering).





ภาคผนวก



อิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา

1. ผลการตรวจสอบค่า pH โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง (ข้อมูลดิบ)

PAW	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
น้ำประปา 0 นาที	7.36	7.20	7.52
น้ำประปา 3 นาที	4.36	4.12	4.24
น้ำประปา 5 นาที	3.73	3.59	3.45
น้ำกลั่น 0 นาที	6.70	6.68	6.60
น้ำกลั่น 3 นาที	4.12	4.05	4.98
น้ำกลั่น 5 นาที	3.25	3.43	3.40

2. ผลการตรวจสอบค่า EC โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง (ข้อมูลดิบ)

PAW	ครั้งที่ 1 ( $\mu\text{S/cm.}$ )	ครั้งที่ 2 ( $\mu\text{S/cm.}$ )	ครั้งที่ 3 ( $\mu\text{S/cm.}$ )
น้ำประปา 0 นาที	253.80	256.00	260.20
น้ำประปา 3 นาที	621.00	625.50	618.50
น้ำประปา 5 นาที	854.00	851.00	863.00
น้ำกลั่น 0 นาที	6.80	6.85	6.80
น้ำกลั่น 3 นาที	62.10	56.90	59.00
น้ำกลั่น 5 นาที	280.80	275.20	278.00

อิทธิพลของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงต่อการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา

1. ผลการตรวจสอบค่า pH โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง (ข้อมูลดิบ)

PAW	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ครึ่งคลื่นทางด้านบวก	3.62	3.58	3.68
คลื่นไฟฟ้าสลับ	3.81	3.52	3.74
ครึ่งคลื่นทางด้านลบ	4.42	4.60	4.53
น้ำกลั่น	6.55	6.49	6.53

2. ผลการตรวจสอบค่า EC โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง (ข้อมูลดิบ)

PAW	ครั้งที่ 1 ( $\mu\text{S/cm.}$ )	ครั้งที่ 2 ( $\mu\text{S/cm.}$ )	ครั้งที่ 3 ( $\mu\text{S/cm.}$ )
เครื่องคลื่นทางด้านบวก	91.25	86.50	89.80
คลื่นไฟฟ้าสลับ	60.20	97.70	78.50
เครื่องคลื่นทางด้านลบ	37.50	30.80	35.00
น้ำกลั่น	1.13	1.16	1.14

อิทธิพลของลำพลาสมาและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อมวลของต้นกล้าปีทูท

1. ผลการตรวจสอบค่า pH โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง (ข้อมูลดิบ)

PAW	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
น้ำประปา 0 นาที	7.52	7.58	7.46
น้ำประปา 7.5 นาที	4.20	4.05	3.90
น้ำประปา 15 นาที	3.42	3.70	3.47

2. ผลการตรวจสอบค่า EC โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง (ข้อมูลดิบ)

PAW	ครั้งที่ 1 ( $\mu\text{S/cm.}$ )	ครั้งที่ 2 ( $\mu\text{S/cm.}$ )	ครั้งที่ 3 ( $\mu\text{S/cm.}$ )
น้ำประปา 0 นาที	125.00	121.00	129.00
น้ำประปา 7.5 นาที	621.00	607.00	635.00
น้ำประปา 15 นาที	978.00	970.00	986.00

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วุฒิชัยค แสงวัง
วัน เดือน ปี เกิด	21 กรกฎาคม 2537
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลลำปาง
วุฒิการศึกษา	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	180 หมู่ 1 ตำบลบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง 52220

