

การพัฒนาระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ประสิทธิภาพสูงสำหรับเครื่องปรับอากาศ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม ไม่สังกัดภาควิชา/เทียบเท่า

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF HIGH-PERFORMANCE PLASMA IONIZER SYSTEM FOR AIR
CONDITIONER



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Science for Industry

Common Course

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบพลาสมาไอออนไนเซออร์ประสิทธิภาพสูง สำหรับเครื่องปรับอากาศ
โดย	นายณัฐสรณ์ แน่นหนา
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร พรหมรส

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิราวัฒน์ อนันตกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร พรหมรส)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ แดงดีป)

นฤสรณ์ แนนหนา : การพัฒนาระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ประสิทธิภาพสูงสำหรับ
เครื่องปรับอากาศ. (DEVELOPMENT OF HIGH-PERFORMANCE
PLASMA IONIZER SYSTEM FOR AIR CONDITIONER) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.บุญ
โชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.ณัฐพร พรหมรส

ในงานวิจัยนี้ วงจรเครื่องกำเนิดพลาสมาถูกออกแบบโดยวางรากฐานอยู่บนการใช้ Flyback Transformer ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสวิตชิงกำลังไฟฟ้าของ MOSFET ในการคายประจุแบบพลาสมาไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดิสชาร์จเชิงผิวเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับพลาสมาไอออนไนเซอร์ซึ่งเป็นเทคโนโลยีของบริษัท บีทีไวส์ (ประเทศไทย) จำกัด แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับเครื่องพลาสมาไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดิสชาร์จเชิงผิวใช้แรงดันไฟฟ้า 5.38 kV วงจรกำเนิดพลาสมาได้รับการออกแบบมีการทำงานที่ความถี่ 0.2 Hz เมื่อใช้ Duty Cycle ที่ 5%, 10%, 20% และ 100% การศึกษาอุณหภูมิวัสดุไดอิเล็กตริกที่เปิดระบบไว้ 10 นาที อยู่ที่ 34.0 °C, 36.5 °C, 39.6 °C และ 67.0 °C ตามลำดับ และเมื่อตรวจวัดค่าไอออนพบว่ามีความเข้มข้นไอออน 174 ppb, 794 ppb, 1,820 ppb และ 9,849 ppb ตามลำดับ จากการศึกษาสเปกโตรสโกปีการเปล่งแสงของพลาสมาไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดิสชาร์จพื้นผิวที่ความดันบรรยากาศเผยให้เห็นว่ามีกลุ่ม N₂, NO และ OH ซึ่งสารอนุมูลอิสระเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ โดยการใช้ Optical Emission Spectrometer พบว่ามีอุณหภูมิพลาสมาที่ 0.82 eV การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อใช้ *Escherichia coli* (*E. coli*) ATCC 25922 ในการทดสอบ เชื้อ *E. coli* ถูกฉายด้วยไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดิสชาร์จเชิงผิวและพลาสมาไอออนไนเซอร์เป็นเวลา 10 นาที จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดิสชาร์จเชิงผิวสามารถลดปริมาณเชื้อ *E. coli* ได้ถึง 100% ในขณะที่พลาสมาไอออนไนเซอร์ไม่สามารถลดปริมาณเชื้อ *E. coli* ได้

สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม	ลายมือชื่อนิสิต
ปีการศึกษา	2564	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6370202023 : MAJOR SCIENCE FOR INDUSTRY

KEYWORD: Surface Dielectric Barrier Discharge, Cold Atmospheric Pressure
Plasma, Air Conditioner, Plasma Sterilization

Naruesorn Nanna : DEVELOPMENT OF HIGH-PERFORMANCE
PLASMA IONIZER SYSTEM FOR AIR CONDITIONER. Advisor: Assoc. Prof.
BOONCHOAT PAOSAWATYANYONG, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. Nathaporn
Promros, Ph.D.

In this work, the plasma generator circuit was designed based on the flyback transformer with MOSFET power switching technology. The designed surface dielectric barrier discharge (SDBD) system was compared with plasma ionizer manufactured by Bitwise (Thailand) Co., Ltd. The high voltage AC provided to the SDBD plasma generator was 5.38 kV. The designed plasma generator operated at a frequency of 0.2 Hz under 5%, 10%, 20%, and 100% duty cycles. Surface dielectric temperatures attained after 10 minutes of plasma generation were 34.0 °C, 36.5 °C, 39.6 °C, and 67.0 °C, respectively. Ozone studies show that ozone concentrations were 174 ppb, 794 ppb, 1,820 ppb, and 9,849 ppb, respectively. Optical Emission Spectroscopy results indicate that N₂, NO, and OH radical groups which could attribute to antimicrobial activity. The plasma temperature of SDBD plasma is 0.82 eV. *Escherichia coli* (*E. coli*) ATCC 25922 was exposed to SDBD and plasma ionizer for 10 minutes to compare their antimicrobial efficacy. The results show that SDBD plasma can reduce *E. coli* by 100%, while Plasma ionizer can't.

Field of Study: Science for Industry

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี ด้วยความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งเป็นผู้คอยให้คำแนะนำ ความรู้ และแนวทางในการดำเนินการทำวิจัย อีกทั้งช่วยตรวจสอบและแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ บริษัท บีทีไอส์ (ประเทศไทย) จำกัด และ โปรแกรมสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรม ที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ โครงการวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม ที่ได้มอบโอกาสในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท และประสบการณ์ในการทำงานร่วมกับภาคส่วนของอุตสาหกรรม

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนให้ใช้เครื่องมือทดลองทางไฟฟ้าสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สนับสนุนให้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ประพันธ์ คูชลธารา และ รศ.ดร.สมศักดิ์ แดงดีบ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบโครงร่างและสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมให้ข้อเสนอแนะในงานวิจัยชิ้นนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บิดา มารดา ครอบครัว เพื่อน ๆ และนิสิตปริญญาโท หลักสูตรสาขาวิชา วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนและคอยให้กำลังใจเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

นฤสรณ์ แฉ่นหนา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	15
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	15
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	15
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 ฟิสิกส์ของพลาสมา.....	17
2.1.1 ประเภทของพลาสมา (Plasma Classification).....	18
2.1.2 พลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Plasma).....	19
2.2 กระบวนการเกิดอนุภาคที่มีประจุ.....	19
2.2.1 การแตกตัวเป็นไอออนโดยการชน (Impact Ionization).....	20
2.2.2 แหล่งกำเนิดพลาสมา (Plasma Source).....	21
2.3 ระบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (Cold Atmospheric Pressure Plasma; CAPP).....	23
2.3.1 เครื่องกำเนิดพลาสมาเจ็ท (Atmospheric Pressure Plasma Jet; APPJ).....	23

2.3.2 เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge; DBD)	25
2.4 วัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric Material)	26
2.5 สเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง (Optical Emission Spectroscopy; OES)	29
2.6 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสมา (Plasma Parameter).....	31
2.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD).....	32
2.8 รามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)	33
2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)	35
2.9.1 ส่วนประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	35
2.9.2 สัญญาณภาพที่เกิดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	35
2.10 พลาสมาไอออนไนเซอร์ (Plasma Ionizer)	36
2.10.1 การกำจัดฝุ่น.....	37
2.10.2 การกำจัดเชื้อ.....	37
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมา	43
3.1 การศึกษาระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ปัจจุบัน.....	43
3.1.1 การศึกษาคุณสมบัติวงจรไฟฟ้าของพลาสมาไอออนไนเซอร์	44
3.1.2 การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุปล่อยประจุพลาสมาไอออนไนเซอร์	45
3.1.3 การศึกษาความเข้มข้นไอออนของพลาสมาไอออนไนเซอร์.....	46
3.1.4 การศึกษาสเปกตรัมของพลาสมาไอออนไนเซอร์	46
3.1.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของพลาสมาไอออนไนเซอร์.....	47
3.2 การออกแบบและศึกษาระบบไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ดีสชาร์จพลาสมา	47
3.2.1 การออกแบบวงจรกำเนิดพลาสมา	48
3.2.2 การออกแบบโครงสร้างทางกายภาพไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ดีสชาร์จพลาสมา	50

3.2.3 การศึกษาคุนสมบัติทางไฟฟ้าไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมา.....	50
3.2.4 การศึกษาคุนสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก	51
3.2.5 การศึกษาความเข้มข้นไอออนของไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมา	51
3.2.6 การศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวไดอิเล็กตริกของไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมา	51
3.2.7 การศึกษาสเปกตรัมของพลาสมาไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จ.....	52
3.2.8 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อของไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมา	52
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง.....	54
4.1 ผลการศึกษาระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์	54
4.1.1 คุนสมบัติทางไฟฟ้าของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์	54
4.1.2 คุนสมบัติของวัสดุปล่อยประจุพลาสมาไอออนไนเซอร์	55
4.1.3 ความเข้มข้นไอออนของพลาสมาไอออนไนเซอร์	59
4.1.4 สเปกตรัมของพลาสมาไอออนไนเซอร์.....	60
4.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของพลาสมาไอออนไนเซอร์	60
4.2 ผลการศึกษาระบบไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมา.....	61
4.2.1 คุนสมบัติทางไฟฟ้าไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมา	61
4.2.2 ผลกระทบต่อวัสดุไดอิเล็กตริก	64
4.2.3 อุณหภูมิพื้นผิวไดอิเล็กตริก	65
4.2.4 ผลการศึกษาคุนสมบัติของไอออนไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมา.....	66
4.2.5 สเปกตรัมไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมา	66
4.2.6 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อของไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมา.....	67
บทที่ 5 วิจารณ์และสรุปผล	69
5.1 วิจารณ์ผล	69
5.1.1 ระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์	69
5.1.2 ระบบไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จ	69

5.1.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	70
บรรณานุกรม.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	76



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุชนิดต่าง ๆ.....	28



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 การชนกันของอิเล็กตรอนและอะตอม; (ก) อะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนไม่เปลี่ยนแปลง(ข) อะตอมแตกตัวเป็นไอออน (ค) อะตอมเข้าชนมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ (ง) อิเล็กตรอนเข้าชนมีพลังงานจลน์สูงขึ้นหลังจากการชน (จ) อะตอมที่ถูกชนถูกทำให้แตกตัว	21
รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของการดิสชาร์จของแก๊ส	23
รูปที่ 3 พลาสมาเจ็ทความดันบรรยากาศ	24
รูปที่ 4 โครงสร้างแบบดิสชาร์จเชิงปริมาตร	26
รูปที่ 5 โครงสร้างแบบดิสชาร์จเชิงผิว	26
รูปที่ 6 โครงสร้างแบบดิสชาร์จระนาบคู่	26
รูปที่ 7 กระบวนการเปล่งแสงของอะตอม	29
รูปที่ 8 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอกซ์	32
รูปที่ 9 การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในปรากฏการณ์ต่าง ๆ	34
รูปที่ 10 แผนภาพการทำงานของรามานสเปกโตรมิเตอร์	34
รูปที่ 11 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	36
รูปที่ 12 แผนภาพกระบวนการพลาสมาไอออนไนเซอร์	37
รูปที่ 13 ภาพแสดงระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์	43
รูปที่ 14 ภาพแสดงวงจรระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์	44
รูปที่ 15 แผนภาพของกระบวนการผลิตพลาสมาไอออนไนเซอร์	44
รูปที่ 16 การทดสอบความนำไฟฟ้าของวัสดุ Carbon	46
รูปที่ 17 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์	47
รูปที่ 18 แผนภาพการทำงานของวงจรกำเนิดพลาสมา	48
รูปที่ 19 วงจรกำเนิดพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ	49
รูปที่ 20 อุปกรณ์กำเนิดพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ: (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง	49

รูปที่ 21	หัวกำเนิดพลาสมาชนิด SDBD : (ก) แสดงหัวกำเนิดพลาสมาที่มีวัสดุไดอิเล็กทริก Al_2O_3 และพลาสมา (ข) แสดงหัวกำเนิดพลาสมาที่มีวัสดุไดอิเล็กทริก FR4	50
รูปที่ 22	การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จพลาสมา	51
รูปที่ 23	การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อของระบบพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ .	53
รูปที่ 24	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรพลาสมาไอออนไนเซอร์ปัจจุบัน: (ก) ที่ Time/DIV 10 us และ (ข) ที่ Time/DIV 4 ms	54
รูปที่ 25	ผลการทดลอง XRD ของ Carbon ต่าง ๆ	55
รูปที่ 26	ผลการทดลอง XRD ของ Carbon ขนแปร่งปล่อยประจุกับ Carbon Black Powder	56
รูปที่ 27	ผลการวิเคราะห์เทคนิค Raman Spectroscopy	57
รูปที่ 28	ภาพ Carbon Black Fiber ที่ถ่ายด้วย SEM: (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 2000 เท่า	57
รูปที่ 29	การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของ Carbon Black Fiber ด้วย EDS	58
รูปที่ 30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า	58
รูปที่ 31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า	59
รูปที่ 32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไอออนกับเวลาของพลาสมาไอออนไนเซอร์	59
รูปที่ 33	สเปกตรัมของพลาสมาไอออนไนเซอร์	60
รูปที่ 34	ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อ <i>E. coli</i> ของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์บนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง: (ก) ชุดการทดลองควบคุม (ข) ครั้งที่ 1 (ค) ครั้งที่ 2 (ง) ครั้งที่ 3	61
รูปที่ 35	สัญญาณตัวจับเวลาที่ความถี่ 0.2 Hz Duty Cycle : (ก) 5% (ข) 10% (ค) 20% (ง) 100%	62
รูปที่ 36	ภาพแสดงสัญญาณด้านเอาต์พุตของวงจรกำเนิดพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ ...	63
รูปที่ 37	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันเอาต์พุตของวัสดุ Al_2O_3	63
รูปที่ 38	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันเอาต์พุตของวัสดุ FR4	64
รูปที่ 39	ภาพวัสดุ Al_2O_3 : (ก) บริเวณที่เกิดพลาสมาและไม่เกิดพลาสมาที่กำลังขยาย 100 เท่า (ข) บริเวณไม่เกิดพลาสมาที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ค) บริเวณเกิดพลาสมาที่กำลังขยาย 1000 เท่า	64

รูปที่ 40 ภาพวัสดุ FR4: (ก) บริเวณที่เกิดพลาสมาและไม่เกิดพลาสมาที่กำลังขยาย 100 เท่า (ข) บริเวณไม่เกิดพลาสมาที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ค) บริเวณเกิดพลาสมาที่กำลังขยาย 1000 เท่า	65
รูปที่ 41 อุณหภูมิพื้นผิวไดอิเล็กตริกของ Al_2O_3 และ FR4 ขณะเกิดพลาสมาเป็นเวลา 10 นาที.....	65
รูปที่ 42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มไอโซนกับเวลา	66
รูปที่ 43 สเปกตรัมของไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมา.....	67
รูปที่ 44 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อของไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมา....	67
รูปที่ 45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อ <i>Escherichia coli</i> กับการเปรียบเทียบไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมากับพลาสมาไอออนไนเซอร์	68



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความนิยมในตลาดของเครื่องปรับอากาศสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับการแพร่ระบาดของเชื้อก่อโรคทางอากาศ ทำให้ผู้บริโภคให้ความสนใจเทคโนโลยีที่ช่วยป้องกันและการกำจัดเชื้อมากยิ่งขึ้น ซึ่งในอนาคตเทคโนโลยีนี้จะกลายเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อที่พักและสำนักงานเกือบทุกแห่ง หนึ่งในนวัตกรรมที่บริษัท บีทไวย์ส์ (ประเทศไทย) จำกัด ได้พัฒนาขึ้นคือ การนำเทคโนโลยีพลาสมาไอออนไนเซอร์ที่มีวัตถุประสงค์หลักในการกำจัดเชื้อก่อโรคและฝุ่นในอากาศมาประยุกต์ใช้กับการทำงานของเครื่องปรับอากาศ ซึ่งนอกจากทำให้เกิดการรวมตัวของฝุ่นที่มีขนาดเล็กระดับไมครอนตกลงสู่พื้นและลดการฟุ้งกระจายในอากาศได้แล้ว ยังสามารถสร้างสารอนุมูลอิสระเพื่อไปยับยั้งและทำลายจุลินทรีย์ในอากาศได้ ด้วยเหตุดังกล่าวจึงประสงค์ที่จะศึกษาข้อมูลตัวแปรลักษณะเฉพาะของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน เมื่อทราบข้อมูลตัวแปรดังกล่าวจะสามารถนำไปพัฒนาระบบพลาสมาในรุ่นถัดไป

โดยพื้นฐานแล้ว พลาสมาเย็นความดันบรรยากาศ (Cold Atmospheric Pressure Plasma; CAPP) เป็นพลาสมาที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศปกติ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถจัดสร้างโดยใช้ชิ้นส่วนที่ไม่มาก วงจรที่ไม่ซับซ้อน ราคาไม่สูง ปราศจากระบบสุญญากาศที่ต้องการการจัดการพิเศษ และมีลักษณะการปล่อยประจุจากภาวะโกลว์ดิสชาร์จ (Glow Discharge) โดยทั่วไปการสร้างสภาวะพลาสมาในความดันสูงที่ระดับความดันบรรยากาศซึ่งมีระยะทางอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอนน้อยอย่างยิ่ง จะต้องใช้พลังงานสูงมากในระดับที่ไม่สามารถทำให้เกิดได้ในห้องปฏิบัติการทั่วไปได้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีการสร้างพลาสมาโดยการทำให้แก๊สแตกตัวเป็นสถานะพลาสมาจากความต่างศักย์สูง 10^3 - 10^4 V ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดในความถี่สูง และด้วยกระแสการดิสชาร์จที่ต่ำมาก ซึ่งวิธีนี้จะทำให้เกิดสภาวะพลาสมาได้ในความดันบรรยากาศปกติ โดยที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอนของพลาสมายังอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 10 eV จึงมักถูกเรียกว่าพลาสมาเย็น [1] และมีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น กระบวนการฆ่าเชื้อก่อโรค กำจัดฝุ่น เป็นต้น [2] แนวทางในการสร้างพลาสมาเย็นที่ระดับความดันบรรยากาศที่ได้รับการศึกษากันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ ไดอิเล็กทริกแบร์ริเออร์ดิสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge; DBD) และเครื่องกำเนิดพลาสมาเจ็ต (Atmospheric Pressure Plasma Jet; APPJ) [3]

ด้วยเหตุดังกล่าว จึงร่วมกับ บริษัท บีทีไวส์ (ประเทศไทย) จำกัด ในการพัฒนาระบบพลาสมา ความดันบรรยากาศแบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดิซชาร์จที่มีความแตกต่างคือ สามารถเกิดสภาวะ พลาสมาได้จริงที่สร้างสารอนุมูลอิสระได้มากกว่า อีกทั้งยังสามารถปลดปล่อยแสงความยาวคลื่น ในช่วงยูวี (Ultraviolet) เพื่อไปฆ่าเชื้อก่อโรคเมื่อเทียบกับระบบที่มีอยู่ในปัจจุบันที่เป็นเพียงระบบ ไอออนไนเซอร์ โดยจะมุ่งเป้าหมายไปที่การทำให้เกิดสภาวะพลาสมาจริง (True Plasma) โดยมี ประสิทธิภาพที่ทัดเทียมหรือมากกว่าระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน สามารถติดตั้งใน เครื่องปรับอากาศได้ และมีคุณลักษณะในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ตามมาตรฐานสากล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาข้อมูลตัวแปรลักษณะเฉพาะของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ที่บริษัท บีทีไวส์ (ประเทศไทย) จำกัด มีอยู่ในปัจจุบัน

1.2.2 พัฒนาคู่มือระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ที่มีคุณลักษณะเหมาะสมต่อการผลิต และมีประสิทธิภาพทัดเทียมหรือสูงกว่าระบบในปัจจุบัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การศึกษาข้อมูลตัวแปรลักษณะเฉพาะของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ปัจจุบัน

1.3.2 การพัฒนาคู่มือระบบพลาสมาไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดิซชาร์จ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 การศึกษาวงจรอิเล็กทรอนิกส์แผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board หรือ PCB) และสัญญาณคลื่นทางด้านเอาต์พุตระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ในปัจจุบัน

1.4.2 วิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์และการทดสอบสมบัติวัสดุขนแปรงปล่อยประจุของระบบ พลาสมาไอออนไนเซอร์ในปัจจุบัน

1.4.3 ศึกษาคุณสมบัติพลาสมาของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ในปัจจุบัน

1.4.4 รวบรวมข้อมูล ออกแบบและศึกษาคุณสมบัติระบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดิซชาร์จ

1.4.5 สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ได้ข้อมูลตัวแปรคุณลักษณะเฉพาะของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน

1.5.2 ได้ต้นแบบระบบพลาสมาไอออนไนเซอ์ที่มีคุณลักษณะเหมาะสมต่อการผลิต และมีประสิทธิภาพทัดเทียมหรือสูงกว่าระบบในปัจจุบัน



บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟิสิกส์ของพลาสมา

พลาสมาเป็นสภาวะที่อะตอมที่อยู่ในสถานะก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจากการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอมที่เป็นกลาง จึงทำให้พลาสมามีประจุสุทธิเป็นศูนย์ พลาสมาประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน ประจุบวก และอะตอมที่มีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า สำหรับพลาสมาความหนาแน่นต่ำจะมีอัตราหรือเปอร์เซ็นต์ที่จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนหรือเรียกว่าองศาของการไอออนไนซ์ (Degree of Ionization) ต่ำเพื่อรักษาสภาพในการเกิดพลาสมาให้คงอยู่ กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) และกระบวนการรีคอมบายน (Recombination) จำเป็นที่จะต้องมีความสมดุลกัน พลาสมามีลักษณะเฉพาะที่มีความแตกต่างไปจากสถานะอื่นของสสารอย่างชัดเจน โดยพลาสมาจะมีอนุภาคที่ประกอบไปด้วยทั้งประจุบวกและประจุลบในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ การรวมกันของอนุภาคประจุบวกและประจุลบเหล่านี้เป็นแบบเสมือนเป็นกลางทางไฟฟ้า (Quasi Neutral) ซึ่งหมายความว่าอนุภาคอิเล็กตรอนและไอออนในพื้นที่ที่เกิดพลาสมานั้นมีจำนวนเท่า ๆ กัน และจะแสดงพฤติกรรมร่วม (Collective Behavior) การทำให้เกิดพลาสมาต้องอาศัยแหล่งพลังงานจากภายนอกมาช่วยกระตุ้นทำให้เกิดสถานะพลาสมาขึ้นมาได้ ในทางปฏิบัติจะใช้สนามไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานซึ่งสามารถทำให้อนุภาคที่มีประจุเท่านั้นเกิดการเคลื่อนที่ได้ เมื่อพลังงานภายนอกถูกส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระนั้นชนกับอะตอมในลักษณะต่าง ๆ เกิดไอออนไนเซชันแยกอิเล็กตรอนออกจากไอออนภายในพลาสมาอย่างต่อเนื่อง [4]

พลาสมามีส่วนประกอบที่เป็นไอออน อิเล็กตรอน และอะตอมที่ยังไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน (อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า) รวมกันอยู่ โดยที่พลาสมาจะมีความหนาแน่นขององค์ประกอบต่าง ๆ แตกต่างกันไป ถ้าพลาสมามีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Electron Density; n_e) ความหนาแน่นของไอออน (Plasma Ion Density) และความหนาแน่นของอนุภาคที่เป็นกลาง (Neutral Particle Density) ความหนาแน่นของอนุภาคทั้งสามนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออน โดยเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออนสามารถหาได้ดังสมการที่ 2.1 [4]

$$\frac{n_i}{n_i + n_n} \times 100\% \quad (2.1)$$

เมื่อ n_i คือ ความหนาแน่นของไอออน

n_n คือ ความหนาแน่นของอนุภาคที่เป็นกลาง

ถ้าเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออนมีค่ามากกว่า 10 % ถือว่าก๊าซนั้นถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนในปริมาณที่มาก ดังนั้นในการพิจารณาพฤติกรรมของตัวกลางต้องพิจารณาผลของพลาสมาเป็นหลัก แต่ถ้าเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออนมีค่าน้อยกว่า 1 % จะต้องพิจารณาผลของแรงปฏิกิริยาอันเนื่องมาจากอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าด้วย

2.1.1 ประเภทของพลาสมา (Plasma Classification)

พลาสมาสามารถแบ่งออกเป็นพลาสมาที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (Nature Plasma) เช่น ดาว หรือ Interstellar Matter และพลาสมาที่สามารถสร้างขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Plasma) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ พลาสมาอุณหภูมิสูงหรือพลาสมาฟิวชัน (Fusion Plasma) และพลาสมาอุณหภูมิต่ำหรือดิสชาร์จในแก๊ส (Gaseous Discharge) โดยทั่วไปนิยมแบ่งก๊าซดิสชาร์จออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ [5] ได้แก่ พลาสมาอุณหภูมิสูงหรือ พลาสมาร้อน (Hot Plasma) และพลาสมาอุณหภูมิต่ำหรือพลาสมาอุณหภูมิต่ำเย็น (Cold Plasma) ดังนี้

พลาสมาร้อน คือ ก๊าซดิสชาร์จแบบพลาสมา LTE (Local Thermodynamic Equilibrium) มีการดิสชาร์จแบบอาร์ค (Arc Discharge) ซึ่งจากการเกิดกระบวนการดิสชาร์จนั้นเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรด ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่สูงจนกระตุ้นให้ก๊าซบางส่วนเกิดการแตกตัวอย่างรุนแรงกลายเป็นประจุบวกและอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นสูง อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่อยู่ข้างหน้าขั้วลบ และเคลื่อนที่ไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซด้วยความถี่สูงและรุนแรง เกิดการปล่อยประจุในลักษณะของสปาร์ค (Spark) ของประจุเป็นเส้นเล็ก ๆ จำนวนมาก (Filament) ทำให้เกิดสถานะของพลาสมาที่มีความดันและพลังงานสูง โดยพลาสมาร้อนนี้จะถูกสร้างที่ความดันใกล้เคียงความดันบรรยากาศหรือมากกว่านั้น ใช้ในการผลิตพลาสมาสเปรย์หรือใช้ในการหลอม เชื่อม และตัดโลหะ เป็นต้น

พลาสมาเย็น คือ ก๊าซดิสชาร์จแบบพลาสมา Non-LTE (Non-Local Thermodynamic Equilibrium Plasma) มีลักษณะการปล่อยประจุแบบโกลด์ดิสชาร์จ เป็นการสร้างพลาสมาที่พัฒนามาจากพลาสมาร้อนเป็นการลดความดันในการเกิดพลาสมาให้ต่ำ โดยอุณหภูมิของอนุภาคหนักจะมีค่าต่ำและมักจะไม่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง แต่สำหรับอิเล็กตรอนจะมีอุณหภูมิสูงมาก จึงถูกเร่งในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ยาก การที่อิเล็กตรอนมีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น ซึ่งจากกระบวนการดิสชาร์จเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรดทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้น

ระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่สูงพอจนกระตุ้นให้ก๊าซบางส่วนแตกตัวและกลายเป็นประจุบวก และอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่อยู่ข้างหน้าขั้วลบ และเคลื่อนที่ไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ ทำให้เกิดการกระตุ้นและแตกตัวเป็นประจุ อนุภาคที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นจะปลดปล่อยรังสีออกมาและลงมาอยู่ในสถานะที่ต่ำลงมาทำให้เกิดแสงสว่าง นิยมใช้ในงาน เช่น การกัด การทำฟิล์มบาง การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ เป็นต้น

2.1.2 พลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Plasma)

พลาสมาความดันต่ำประมาณ 10^{-4} - 10^{-2} kPa จัดเป็นแก๊สดีสชาร์จแบบพลาสมาสภาพสมดุลของเทอร์โมไดนามิกแบบเฉพาะ (Non-Local Thermodynamic Equilibrium Plasma; Non-LTE) ซึ่งอนุภาคหนักของอนุภาคหนัก (Heavy Particles) จะต่ำกว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน (Electron Temperature; T_e) ($T_e > T_h$) เนื่องจากการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Collision) ระหว่างอิเล็กตรอนและอนุภาคของก๊าซ ซึ่งอะตอมที่ถูกชนจะอยู่ในสภาวะที่ถูกกระตุ้นหรือถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน การชนในลักษณะนี้ไม่ทำให้อุณหภูมิของอนุภาคหนักเพิ่มขึ้น

เมื่อความดันของพลาสมาสูงขึ้น จะมีการชนกันของอนุภาคหนักกับอิเล็กตรอนมากขึ้น และมีการแลกเปลี่ยนพลังงานซึ่งกันและกัน ภายหลังการชนอะตอมที่ถูกชนไม่อยู่ในลักษณะการถูกกระตุ้นหรือไม่ทำให้แตกตัวเป็นไอออนซึ่งเป็นการชนแบบยืดหยุ่น เป็นเหตุให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและอุณหภูมิของอนุภาคหนักลดลง โดยพลาสมาเข้าสู่สภาวะใกล้เคียงกับ LTE (Local Thermodynamic Equilibrium Plasma) แต่ยังไม่ใช่ LTE

ความหนาแน่นของพลาสมาขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแหล่งกำเนิดพลาสมา ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อสภาวะของพลาสมาว่าจะเป็น LTE หรือไม่ การเลือกใช้กำลังไฟฟ้าสูง (High Power Density) จะทำให้เกิดพลาสมาที่เป็น LTE เช่น Arc Plasma ในทางกลับกันหากต้องการพลาสมาที่เป็น Non-LTE ต้องเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำ ดังนั้น พลาสมาที่ความดันบรรยากาศอาจเป็นพลาสมาที่เป็น LTE หรือ Non-LTE ก็ได้

2.2 กระบวนการเกิดอนุภาคที่มีประจุ

พลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมที่เป็นกลางเกิดการแตกตัวซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแตกตัวเป็นไอออนโดยแสง (Photo Ionization) และการชนด้วยอิเล็กตรอน (Electron Impact) เป็นต้น เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานเพียงพอ อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออน ถ้าอัตราการเกิดของอิเล็กตรอนอิสระเท่ากับหรือมากกว่าอัตราการสูญเสียแสดงว่ามีพลาสมาเกิดขึ้น พลังงานน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกจากอะตอมเรียกว่า พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization Energy) ในกรณีนี้

ของแข็งได้รับพลังงานแล้วอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของของแข็งจะเรียกกระบวนการนี้ว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอน (Electron Emission) และพลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดได้เรียกว่า ฟังก์ชันงาน (Work Function) การแตกตัวเป็นไอออนและการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในการสร้างพลาสมา

2.2.1 การแตกตัวเป็นไอออนโดยการชน (Impact Ionization)

เมื่ออิเล็กตรอน ไอออน หรืออะตอมที่เป็นกลางวิ่งเข้าชนอะตอมใด ๆ ด้วยความเร็วค่าหนึ่งจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานซึ่งกันและกัน ถ้าหลังการชนอะตอมที่ถูกชนไม่อยู่ในสถานะเอกไซเตชัน (Excitation) หรือไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน การชนในลักษณะนี้จะเป็นการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic Collision) และในทางกลับกันถ้าอะตอมของก๊าซที่ถูกชนอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้น หรือทำให้แตกตัวเป็นไอออน การชนในลักษณะนี้จะเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Collision) ในกรณีที่อนุภาคที่เข้าชนเป็นอิเล็กตรอน ถ้าการชนเป็นผลให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการแตกตัวเป็นไอออนแบบการชนด้วยอิเล็กตรอน ซึ่งในกรณีนี้อิเล็กตรอนต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม ดังสมการที่ 2.2 [6] นั่นคือ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.2)$$

เมื่อ W_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

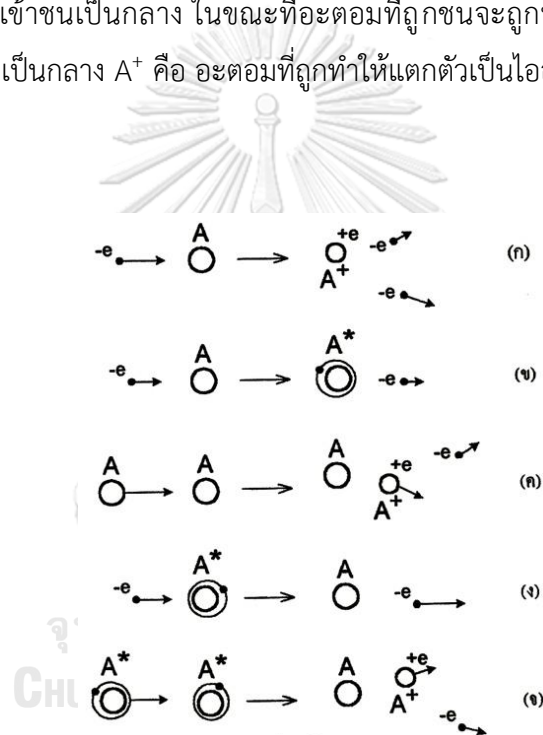
m คือ มวลของอิเล็กตรอน

v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

หลังการชนอิเล็กตรอนที่เข้าชนจะมีพลังงานจลน์ลดลง อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมจะมีพลังงานจลน์ค่าหนึ่งดังรูปที่ 1 (ก) ในกรณีการชนแบบนี้พลังงานจลน์ของอะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนจะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอะตอมมีมวลมากเมื่อเทียบกับมวลของอิเล็กตรอน ในบางกรณีอะตอมที่ถูกชนจะไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนเพียงแต่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเท่านั้นดังในรูปที่ 1 (ข) ถ้าก่อนที่อะตอมนี้จะกลับเข้าสู่สถานะพื้น (Ground State) มีอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งเข้าชนอาจเป็นผลให้อะตอมนั้นถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนได้ การแตกตัวเป็นไอออนแบบนี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนแบบขั้น (Step Ionization) กรณีนี้เป็นไปได้ถ้าอิเล็กตรอนที่เข้าชนมีความหนาแน่นสูงและสถานะถูกกระตุ้นของอะตอมเป็นสถานะกึ่งเสถียร (Metastable Excited State) ซึ่งมีช่วงชีวิต (Life Time) ยาวกว่าสถานะถูกกระตุ้นปกติ

การแตกตัวเป็นไอออนอาจเกิดจากการชนด้วยอะตอมที่เป็นกลางก็ได้ถ้าอะตอมที่เข้าชนมีพลังงานจลน์มากพอ หลังการชนจะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานและโมเมนตัม ทำให้อะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง ในขณะที่อะตอมที่เข้าชนจะมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ดังในรูปที่ 1 (ค)

ถ้าอะตอมที่ถูกชนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นอยู่ก่อนแล้ว กรณีอะตอมหลังถูกชนในรูปที่ 1 (ข) หลังจากการชนอะตอมที่ถูกชนจะเป็นกลางและอิเล็กตรอนเข้าชนจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้นดังในรูปที่ 1 (ง) แต่ถ้าอะตอมที่ถูกชนอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้นอยู่ก่อนแล้วนั้นถูกชนด้วยอะตอมที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเช่นกัน หลังจากการชนอะตอมที่เข้าชนจะถ่ายเทพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ให้แก่อะตอมที่ถูกชนทำให้อะตอมที่เข้าชนเป็นกลาง ในขณะที่อะตอมที่ถูกชนจะถูกทำให้แตกตัวดังในรูปที่ 1 (จ) โดยที่ A คือ อะตอมที่เป็นกลาง A^+ คือ อะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนบวก และ A^* คือ อะตอมที่สถานะถูกกระตุ้น



รูปที่ 1 การชนกันของอิเล็กตรอนและอะตอม; (ก) อะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนไม่เปลี่ยนแปลง (ข) อะตอมแตกตัวเป็นไอออน (ค) อะตอมเข้าชนมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ (ง) อิเล็กตรอนเข้าชนมีพลังงานจลน์สูงขึ้นหลังจากการชน (จ) อะตอมที่ถูกชนถูกทำให้แตกตัว [4]

2.2.2 แหล่งกำเนิดพลาสมา (Plasma Source)

พลาสมาเกิดขึ้นโดยการทำให้อะตอมที่เป็นกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแตกตัวเป็นไอออนบริเวณผิวหน้า (Surface Ionization) การแตกตัว

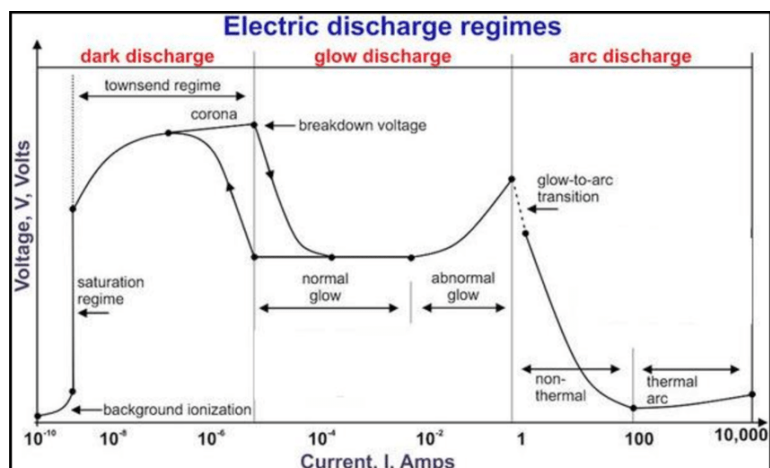
เป็น ไอออนโดยใช่แสง และการปลดปล่อยอิเล็กตรอนโดยสนามไฟฟ้า (Field Emission) แต่วิธีที่ใช้แพร่หลายที่สุด ได้แก่ วิธีก๊าซดิสชาร์จ [5]

ลักษณะของการดิสชาร์จ คือ ขณะที่ไม่มีการแสไฟฟ้าไหลผ่าน อากาศเปรียบเสมือนฉนวนไฟฟ้า แต่เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าสูง ๆ ระดับกิโลโวลต์ จะเกิดการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนอิสระซึ่งมีอยู่ในอากาศเคลื่อนที่เข้าชนกับโมเลกุลของอากาศจนแตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอนด้วยกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน จากนั้นอิเล็กตรอนจากการแตกตัวอาจมีพลังงานพอที่จะเคลื่อนที่ไปชนกับโมเลกุลอื่น ๆ จนแตกตัวได้อิเล็กตรอนตัวใหม่ต่อไปเรื่อย ๆ และหากปริมาณของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นใหม่มีมากกว่าอิเล็กตรอนที่อาจเกิดการสูญเสียจากการตึงเข้ารวมกับไอออนบวก จะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Electron Avalanche และได้พลาสมาออกมาในที่สุด โดยทั่วไปสามารถแบ่งลักษณะของการดิสชาร์จตามกระแสและความต่างศักย์ได้สามแบบซึ่งแสดงดังรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดดังนี้ [7]

- โคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge) เป็นลักษณะของการดิสชาร์จที่ใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ (10^{-10} ถึง 10^{-5} แอมแปร์) แต่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง สามารถเกิดได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ เพื่อก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เข้มสูงและทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออน ความสมมาตรของสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับการจัดตำแหน่งขั้วไฟฟ้า ซึ่งบริเวณที่อยู่ใกล้ขั้วไฟฟ้าจะมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูง และในบริเวณที่ไกลออกไปจะเกิดพลาสมาขึ้นเนื่องจากมีความเข้มสนามไฟฟ้าน้อย ทำให้พลาสมาชนิดนี้กระจายเป็นหย่อม ๆ ไม่สม่ำเสมอ จึงเป็นข้อจำกัดของการออกแบบในลักษณะของโคโรนาดิสชาร์จ โดยพลาสมาจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเท่านั้น

- โกลวดิสชาร์จ (Glow Discharge) เกิดขึ้นที่กระแสไฟฟ้าต่ำ (น้อยกว่า 1 แอมแปร์) และใช้ความต่างศักย์สูงระดับกิโลโวลต์ โกลวดิสชาร์จเกิดขึ้นได้ที่ระดับกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 1 แอมแปร์ มีความต่างศักย์สูงและความถี่สูงระดับ (5-15 kV, 10-100 KHz) สามารถเกิดได้ทั้งแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าตรงและกระแสไฟฟ้าสลับ แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดนี้เป็นแบบไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดิสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge; DBD)

- อาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge) ประกอบด้วยกระแสไฟฟ้าสูง (ระหว่าง 1-100,000 แอมแปร์) แต่ใช้ความต่างศักย์ต่ำกว่าโกลวดิสชาร์จ



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของการดิสชาร์จของแก๊ส [7]

2.3 ระบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (Cold Atmospheric Pressure Plasma; CAPP)

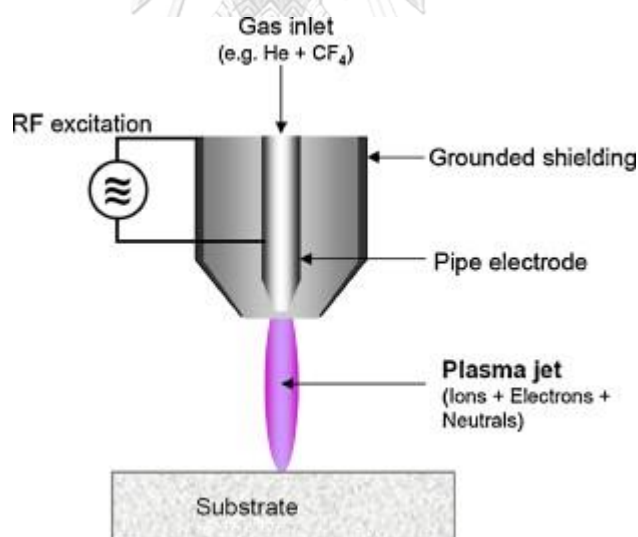
พลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศ เป็นพลาสมาที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศปกติ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ง่าย ราคาถูก และไม่มีระบบสุญญากาศที่ซับซ้อน มีลักษณะการปล่อยประจุแบบโกลว์ดิสชาร์จ โดยปกติสถานะพลาสมาจะมีอุณหภูมิสูงมาก แต่ในปัจจุบันมีการสร้างพลาสมาอีกวิธีหนึ่งโดยการทำให้แก๊สแตกตัวเป็นสถานะพลาสมาจากการที่เราให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดมีค่าสูง ซึ่งวิธีนี้จะทำให้เกิดพลาสมาในความดันบรรยากาศปกติได้ อีกทั้งอุณหภูมิของพลาสมาไม่สูงเราจึงเรียกว่าพลาสมาเย็น ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ

พลาสมาเย็นเป็นการใช้วิธีสนามไฟฟ้าดิสชาร์จตัวกลางซึ่งอาจเป็นก๊าซหรือไอของเหลวจนเกิดเป็นอนุภาค หรืออนุคลิอัสระ จากนั้นอนุคลิอัสพลาสมาจะสามารถแพร่ซึมผ่านตัวกลางไปทำปฏิกิริยาเคมี เช่น การออกซิไดซ์ การรีดิวซ์ เป็นต้น เพราะหนึ่งในกระบวนการเคมีที่ใช้ในการย่อยสาร (Decompose) มักใช้อนุคลิไฮดรอกซิล (OH) เป็นหลัก และพลาสมาเย็นสามารถสร้างอนุคลิชนิดนี้ทดแทนการใช้สารเคมีแบบดั้งเดิมได้เป็นอย่างดี และเพื่อให้สะดวกในการผลิตและนำไปใช้งาน เครื่องกำเนิดพลาสมาเย็นความดันบรรยากาศที่ใช้ส่วนมากมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดิสชาร์จ และเครื่องกำเนิดพลาสมาเจ็ท

2.3.1 เครื่องกำเนิดพลาสมาเจ็ท (Atmospheric Pressure Plasma Jet; APPJ)

พลาสมาเจ็ทความดันอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เกิดขึ้นได้จากการให้ความต่างศักย์สูง (High Voltage) ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว คือขั้วอิเล็กโทรดศักย์สูง (High-Voltage Electrode) และอิเล็กโทรดศักย์ศูนย์ (Grounded Electrode) เมื่อขนาดของความต่างศักย์นี้มีค่าเพิ่มขึ้นจนเท่ากับศักย์ไฟฟ้าแตกตัว (Breakdown Voltage) ของอากาศ จะทำให้เกิดการดิสชาร์จของ

อากาศชั้นระหว่างปลายของแท่งอิเล็กโทรดค้ำสูงกับผิวด้านในของอิเล็กโทรดค้ำศูนย์ โดยมีลักษณะการดีสชาร์จเป็น Transient Spark Discharge ที่ประกอบด้วย 2 เฟสสำคัญ คือ Streamer Discharge และ Spark Discharge [8] [9] ซึ่งการดีสชาร์จนี้มีลักษณะเฉพาะคือ ทำให้อิเล็กตรอนมีจำนวนมากและมีพลังงานสูงเพียงพอต่อการทำให้โมเลกุลไนโตรเจน ออกซิเจน และไอน้ำ เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นไอออน อะตอมและโมเลกุล และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกลุ่มไอออน อะตอม โมเลกุลเหล่านี้ทำให้เกิดกลุ่มอนุมูลออกซิเจนและไนโตรเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา อนุมูลเหล่านี้ยังมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอากาศที่ป้อนเข้าไป หลังจากนั้นกลุ่มพลาสมาอากาศที่ถูกผลิตขึ้นจะออกมาทางรูเปิดที่แคบด้วยการการไหลของอากาศ (Air Flow) ให้มีรูปร่างเป็นลำเจ็ทหรือรูปร่างคล้ายเข็ม โดยการป้อนอากาศเข้าไปในพลาสมาเจ็ทต้องใช้ปั๊มลมเพื่อให้อากาศไหลด้วยความดันที่สูง และใช้ก๊าซพา (Carrier Gas) เข้ามาช่วยในการกระจายตัวของพลาสมา ทำให้เกิดพลาสมาของก๊าซผสมมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ โดยจะบรรจุอยู่ภายในถัง เช่น อาร์กอน ฮีเลียม เป็นต้น ดังนั้น เครื่องกำเนิดพลาสมาเจ็ทจึงไม่เหมาะสำหรับติดตั้งในระบบปรับอากาศ โดยแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ขั้วอิเล็กโทรด และก๊าซพา เมื่อเปิดการทำงานและให้ก๊าซพาไหลผ่านขั้วอิเล็กโทรด จะทำให้เกิดพลาสมาที่มีรูปร่างเป็นลำเจ็ทขึ้น [10]



รูปที่ 3 พลาสมาเจ็ทความดันบรรยากาศ [10]

2.3.2 เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge; DBD)

เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสชาร์จ ใช้หลักการสะสม (Charge) และคายประจุ (Discharge) บนวัสดุไดอิเล็กตริกด้วยไฟฟ้ากระแสสลับที่ความต่างศักย์สูง โดยโครงสร้างหลักของเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสชาร์จ ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด แผ่นไดอิเล็กตริกและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์สูง โดยนำขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์สูงและนำแผ่นไดอิเล็กตริกอย่างน้อยหนึ่งแผ่นวางคั่นระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสอง [11] พลาสมาจะถูกผลิตออกมา และถูกเรียกว่า ไมโครติสชาร์จ (Micro Discharge) ซึ่งกระจายอยู่ทั่วช่องว่างระหว่างขั้วนั้น ลักษณะของการติสชาร์จที่เกิดขึ้นอาจเป็นเส้น (Filament Discharge) หรือเกิดแบบโกลด์ติสชาร์จ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น ความต่างศักย์ไฟฟ้า ความถี่ ชนิดของแผ่นไดอิเล็กตริก ระยะห่าง ระหว่างแผ่นคู่ขนาน ชนิดของก๊าซ ความดัน เป็นต้น

โดยสรุปแล้ววัสดุไดอิเล็กตริกมีหน้าที่หลัก ๆ 2 ประการคือ จำกัดการเคลื่อนย้ายของประจุไปยังขั้วไม่ให้นำมากจนเกินไป ซึ่งเป็นการป้องกันการลัดวงจร และช่วยกระจายไมโครติสชาร์จให้ทั่วช่องว่างระหว่างขั้ว เพื่อให้อิเล็กตรอนมีโอกาสสัมผัสกับอนุภาคของก๊าซให้ได้มากที่สุด

แหล่งกำเนิดชนิดนี้สามารถทำงานภายใต้ความดันบรรยากาศ (ประมาณ 1 atm) โดยอาจใช้แหล่งจ่ายไฟชนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Voltage) หรือชนิดพัลส์ แต่อย่างไรก็ตามไม่นิยมใช้ไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสชาร์จกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage) เพราะจะต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าค่อนข้างสูงในการผลิตพลาสมาเนื่องจากเกิด Capacitive Coupling ที่ขั้วไฟฟ้าขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานส่วนใหญ่จะใช้ไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสชาร์จกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งก๊าซในระบบสามารถที่จะแตกตัวได้ง่ายกว่าแหล่งกำเนิดชนิดอื่น ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานจะอยู่ในช่วง 1-100 กิโลโวลต์ และมีความถี่ที่ระดับกิโลเฮิร์ตซ์ถึงเมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่ง DBD จะได้พลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ผลิตได้ที่มีความดันบรรยากาศ [12]

โครงสร้างของพลาสมา DBD แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) แบบติสชาร์จเชิงปริมาตร (Volume Discharge)

โครงสร้างแบบติสชาร์จเชิงปริมาตรจะมีลักษณะการวางขั้วอิเล็กโทรดขนานกัน โดยด้านหนึ่งจะต่อกับไฟฟ้าแรงดันสูง และอีกด้านหนึ่งจะต่อกับขั้วไฟฟ้าศักย์ศูนย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จะมีแผ่นไดอิเล็กตริกหนึ่งหรือสองส่วน โดยพลาสมาจะเกิดขึ้นบริเวณช่องว่าง (Gap) ระหว่างขั้วไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้ แสดงดังรูปที่ 4

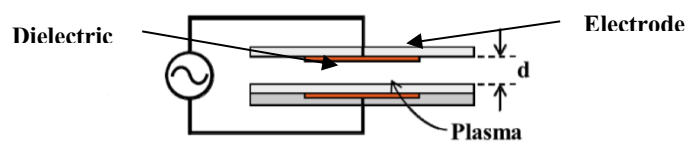
2) แบบติสชาร์จเชิงผิว (Surface Discharge)

โครงสร้างแบบดิสชาร์จเชิงผิว แสดงดังรูปที่ 5 ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองฝั่งจะติดกับแผ่นวัสดุไดอิเล็กตริก โดยพลาสมาจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวด้านข้างของขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก

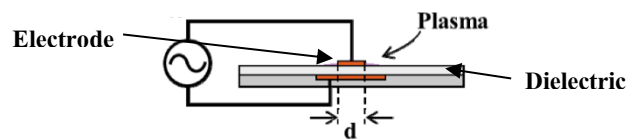
3) แบบดิสชาร์จระนาบคู่ (Coplanar Discharge)

โครงสร้างแบบดิสชาร์จระนาบคู่ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6 โดยขั้วไฟฟ้าจะถูกฝังไว้ภายในวัสดุไดอิเล็กตริกตามระยะห่างของแต่ละขั้ว พลาสมาจะเกิดขึ้นภายนอกวัสดุไดอิเล็กตริก

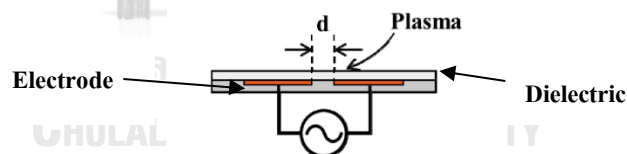
ทั้งนี้ในแต่ละประเภทจะเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกันไปตามความเหมาะสม



รูปที่ 4 โครงสร้างแบบดิสชาร์จเชิงปริมาตร



รูปที่ 5 โครงสร้างแบบดิสชาร์จเชิงผิว



รูปที่ 6 โครงสร้างแบบดิสชาร์จระนาบคู่ [12]

2.4 วัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric Material)

วัสดุไดอิเล็กตริกเป็นฉนวนไฟฟ้าชนิดหนึ่งกล่าวคือ อิเล็กตรอนของอะตอมของวัสดุเหล่านี้เป็นอิเล็กตรอนที่ไม่สามารถหลุดเป็นอิสระได้ง่าย เช่น แก้ว คิววิตซ์ และเซรามิก เป็นต้น โดยวัสดุไดอิเล็กตริกทำให้มีช่องทางไฟฟ้าได้โดยการใช้สนามไฟฟ้า เมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกถูกวางอยู่ในสนามไฟฟ้า ประจุไฟฟ้าจะไม่ไหลผ่านตัววัสดุเหมือนอย่างที่ผ่านตัวนำ เพียงแต่ขยับเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจากตำแหน่งสมดุลเฉลี่ยเดิมก่อให้เกิดความเป็นขั้วไดอิเล็กตริก (Dielectric Polarization) โดยประจุบวก

จะถูกผลักไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าและประจุลบจะขยับไปในทิศทางตรงกันข้ามของสนามไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้จะสร้างสนามไฟฟ้าภายในที่ช่วยลดสนามโดยรวมภายในตัวไดอิเล็กตริกมันเอง โดยเรียกอัตราส่วนของค่าความจุใหม่ขณะที่มีวัสดุไดอิเล็กตริกเทียบกับค่าความจุเดิมขณะที่ไม่มีวัสดุไดอิเล็กตริกนี้ว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) [13] นั่นคือ

$$C = \frac{\epsilon A}{d} = \frac{\epsilon_0 K A}{d} = C_0 K \quad (2.3)$$

$$K = \frac{C}{C_0} \quad (2.4)$$

- เมื่อ ϵ คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ (Permittivity) (F/m)
 ϵ_0 คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ในสุญญากาศ มีค่า 8.854×10^{-12} (F/m)
 C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีตัวคั่นกลางเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (F)
 C_0 คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีตัวคั่นกลางเป็นสุญญากาศ (F)
 A คือ พื้นที่ของแผ่นเพลตตัวนำ (m^2)
 d คือ ความหนาของแผ่นสารไดอิเล็กตริกหรือระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตตัวนำ (m)
 K คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นสมบัติไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้าสถิต (Dielectrics in Static Electric Fields) คือ เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุไดอิเล็กตริกในอุดมคติ จะมีเพียงการจัดเรียงประจุกันใหม่อย่างเป็นระเบียบในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า จึงต้องอาศัยโมเมนต์ขั้ว (Dipole Moment) และเรียกว่าการเกิดขั้วหรือการโพลาริเซชัน (Polarization) โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดของวัสดุจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังตารางที่ 1 [14], [15], [16] โดยวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงจะสามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดีหรือเป็นฉนวนไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุไดอิเล็กตริก	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (K)
Vacuum	1
Air	1.006
Polypropylene PP	2.2
Polyester PET	3.3
Mica	6.8
Tantalum Oxide	27.7
Alumina Ceramic	8.5-9
FR-4	4.5

เมื่อใส่วัสดุไดอิเล็กตริกเข้าไประหว่างแผ่นตัวนำขนาน จะพบว่าความจุของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นขนานจะมีค่าลดลง ในขณะที่ประจุไฟฟ้า Q นั้นคงที่ และสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำขนานทั้งสองมีค่าลดลง จากสมการ 2.4 จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.5)$$

$$K = \frac{Q/V}{Q/V_0} = \frac{V_0}{V} \quad (2.6)$$

$$V = Ed \quad (2.7)$$

$$K = \frac{E_0 d}{Ed} = \frac{E_0}{E} \quad (2.8)$$

เมื่อ Q คือ ประจุบนแผ่นเพลตตัวนำ

V คือ ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นเพลตตัวนำเมื่อมีวัสดุไดอิเล็กตริก

V_0 คือ ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นเพลตตัวนำเมื่อไม่มีวัสดุไดอิเล็กตริก

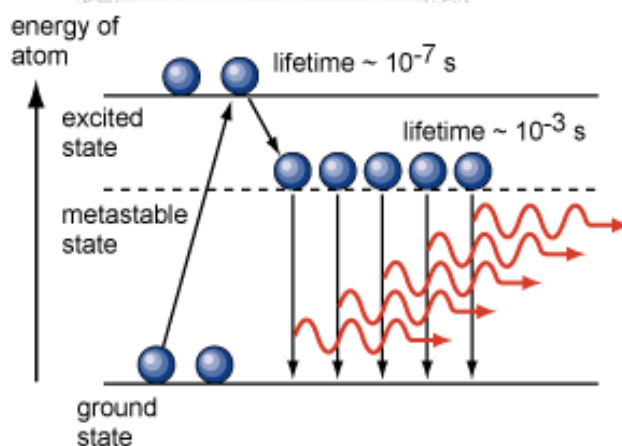
E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเมื่อมีวัสดุไดอิเล็กตริก

E_0 คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเมื่อไม่มีวัสดุไดอิเล็กตริก

2.5 สเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง (Optical Emission Spectroscopy; OES)

การศึกษาสมบัติของพลาสมาโดยการวัดสเปกตรัมของพลาสมาเป็นเทคนิคที่ไม่มีการรบกวนพลาสมา (Non-Intrusive) และไม่มีอิทธิพลต่อตัวอย่างที่ศึกษา โดยการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมาสามารถบอกค่าพารามิเตอร์หลาย ๆ อย่างเช่น อุณหภูมิของอิเล็กตรอน อุณหภูมิของก๊าซ ความหนาแน่นของพลาสมา หรือความเข้มข้นของก๊าซที่แตกตัว การตรวจวัดความหนาแน่นของอนุภาคที่จำเป็นต่อกระบวนการในพลาสมา โดยการวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะตัวของอนุภาคที่เป็นผลของปฏิกิริยาพลาสมาเคมีจะทำให้ได้ข้อมูลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและจุดสิ้นสุดของปฏิกิริยาในการเกิดพลาสมา

การวัดสเปกตรัมของการเปล่งแสงทำงานโดยอาศัยหลักการเปล่งแสงของอะตอมหรือโมเลกุล ซึ่งในตอนแรกนั้นอยู่ที่ชั้น Ground State และถูกกระตุ้นเนื่องจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนอะตอม หรือโมเลกุลของก๊าซที่ชั้น Ground State ทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นไปยังชั้น Excited State และภายหลังจากอะตอมยังมีการปล่อยโฟตอนออกมาและไปยังชั้น Metastable State ซึ่งการเปล่งแสงนั้นสัมพันธ์โดยตรงกับฟลักซ์ของโฟตอนที่เปลี่ยนแปลงจากชั้น Excited State ไปยังชั้น Ground State และยังเกี่ยวข้องกับอัตราการชนของอิเล็กตรอนกับอะตอมหรือโมเลกุลอีกด้วย นอกจากนี้การกระตุ้นที่เกิดจากอิเล็กตรอนแล้วยังมีการปลดปล่อยโฟตอนจากระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่าประกอบอีกด้วยดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กระบวนการเปล่งแสงของอะตอม

ที่มารูป : https://www.blendspace.com/lessons/iKrueYkmH_LRAw/lecture-4-population-inversion-and-metastable-state

เมื่อพิจารณาอะตอมในพลาสมาที่ถูกกระตุ้นเข้าสู่ระดับชั้นกระตุ้น (i) ด้วยการชนกันระหว่างอะตอมและอิเล็กตรอน ต่อมาอะตอมเหล่านั้นสลายตัวแล้วตกกลับลงมาชั้นที่ต่ำกว่า (j) ฟลักซ์ของโฟตอนของการเปลี่ยนระดับชั้น $i \rightarrow j (\Phi_{ij})$ ดังสมการที่ 2.9

$$\Phi_{ij} = n_0 n_e \int_0^\infty \sigma_{ij}(E) f(E) \left(\frac{2E}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} dE \quad (2.9)$$

เมื่อ Φ_{ij} คือ ฟลักซ์ของโฟตอน
 n_0 คือ จำนวนของอะตอมที่สถานะพื้น (Ground State)
 n_e คือ จำนวนของอิเล็กตรอน
 $\sigma_{ij}(E)$ คือ ฟังก์ชันของพลังงาน (E) ของอิเล็กตรอนจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน
 $f(E)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอน
 m_e คือ มวลของอิเล็กตรอน

ซึ่งฟังก์ชันของพลังงาน (E) ของอิเล็กตรอนของการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจาก $i \rightarrow j$ สามารถหาได้จากสมการ

$$\sigma_{ij}(E) = \frac{A_{ij}}{\sum_{l < i} A_{il}} \sigma_i(E) \quad (2.10)$$

เมื่อ A_{ij} คือ อัตราการเปล่งแสงที่เกิดจากชั้น $i \rightarrow j$
 A_{il} คือ อัตราการเปล่งแสงที่เกิดจากชั้น $i \rightarrow l$
 σ_i คือ ฟังก์ชันของพลังงาน (E) ของอิเล็กตรอนของระดับชั้นพลังงานจาก i

นอกจากฟลักซ์ของโฟตอนที่เกิดจากการกระตุ้นที่สถานะพื้นแล้ว ยังมีฟลักซ์จากชั้นอื่นรวมอยู่อีกด้วย (ชั้นกึ่งเสถียร (Metastable State) หรือจากระดับชั้นของไอออน) ซึ่งฟลักซ์ของโฟตอนเหล่านี้ได้มาจากการแผ่กระจายในหลายทิศทางของแต่ละอะตอมในพลาสมา โดยปริมาณประเภทนี้จะขึ้นกับตำแหน่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และฟังก์ชันการกระจายของพลังงานของอิเล็กตรอน ความเข้มของการเปล่งแสงที่สังเกตเห็นเป็นการรวมกันของฟลักซ์ของโฟตอนในช่วงที่สามารถมองเห็นได้โดยมุมที่รองรับช่องรับแสง

2.6 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสมา (Plasma Parameter)

ในการใช้พลาสมาไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจวิเคราะห์อุณหภูมิของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมมี 2 วิธี คือวิธีที่ใช้หัววัดลางมัวร์ (Langmuir Probe) และวิธีวัดสเปกโตรสโกปีการเปล่งแสง วิธีหัววัดลางมัวร์ เป็นวิธีที่ง่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสมาซึ่งเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (Current-Voltage; I-V) แล้วนำมาคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอน แต่ที่ความดันบรรยากาศพลาสมาที่เกิดขึ้นมีการความถี่การชนกันของอิเล็กตรอนที่สูง จึงไม่นิยมใช้วิธีนี้เนื่องจากมีการเกิดความร้อนสูง ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนสูง อีกทั้งพลาสมาที่ออกแบบและสร้างขึ้นมามีขนาดเล็ก [17]

ต่อมามีการพัฒนาการวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสมาด้วยเครื่องวัดสเปกโตรสโกปีการเปล่งแสงซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก อุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสามารถพิจารณาจากสเปกตรัมความเข้มของการปล่อยพลังงานของอะตอม ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอิเล็กตรอน และจำนวนของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น อุณหภูมิของอิเล็กตรอนสามารถคำนวณได้จากสมการโบลทซ์มานน์ (Boltzmann) สมการที่ 2.11 [17]

$$k_B T_e = \frac{E_2 - E_1}{\log \left(\frac{I_1 \lambda_1 g_2 A_2}{I_2 \lambda_2 g_1 A_1} \right)} \quad (2.11)$$

เมื่อ	I	คือ ความเข้มเส้นสเปกตรัม
	λ	คือ ความยาวคลื่น
	g	คือ ตัวถ่วงน้ำหนักทางสถิติ
	A	คือ ความน่าจะเป็นในการเกิดการเปลี่ยนสถานะ
	E	คือ พลังงานที่ให้ในการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ
	k_B	คือ ค่าคงที่โบลทซ์มานน์

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน สามารถคำนวณได้จากการใช้อัตราส่วนความเข้มของเส้นสเปกตรัมของอะตอมและของไอออนตามสมการโบลทซ์มานน์และซาฮา (Boltzmann-Saha) โดยการแทนค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ที่ได้จากสมการที่ 2.11 ลงในสมการที่ 2.12 [18]

$$n_e = 2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \left(\frac{g_2}{g_1} \right) \left[\frac{2\pi m_e k_B T_e}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \exp \left[-\frac{E_1 - E_2 + E_i}{k_B T_e} \right] \quad (2.12)$$

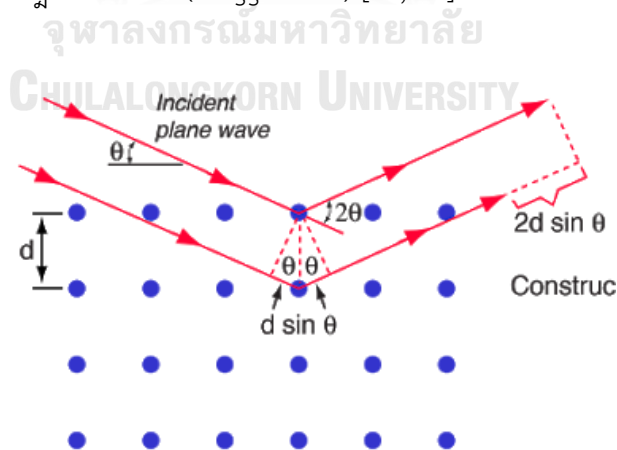
เมื่อ m_e คือ มวลของอิเล็กตรอน

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์

E_i คือ พลังงานไอออนไนเซชันของอะตอมที่เป็นกลาง

2.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงาน โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่าง ๆ ซึ่งอาศัยหลักการของการแทรกสอดของคลื่นรังสีเอกซ์ โดยรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอกซ์ 2 ชนิดคือ รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-ray) กับรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-ray) รังสีเอกซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึกและเมื่อผ่านโครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและหักล้างกันดังรูปที่ 8 ซึ่ง วิลเลียม เฮนรี แบริก (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงสร้างผลึกไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (Path Different) เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ซึ่งเรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's Law) [13, 19]



รูปที่ 8 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอกซ์

ที่มารูป : <https://www.slideshare.net/SyedAliAfzal/xray-diffraction-qualitative-and-quantitative-analysis/>

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.13)$$

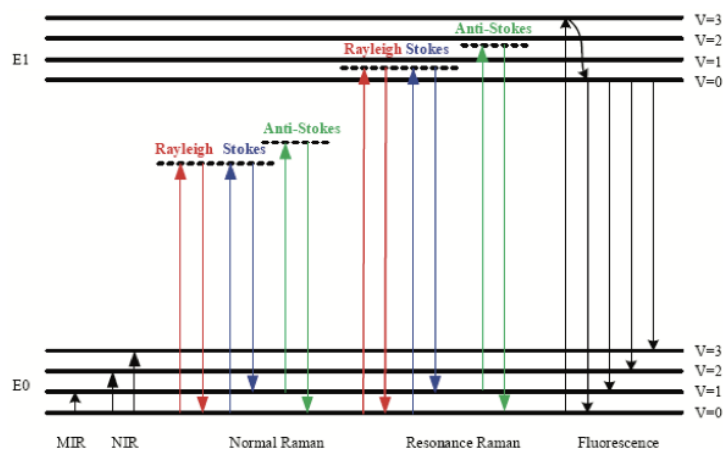
- เมื่อ n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน
 n คือ ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์
 d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ
 θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ซึ่งเท่ากับมุมตกกระทบ

การแทรกสอดของรังสีจะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อรังสีเคลื่อนที่ผ่านระนาบเฉพาะเท่านั้น โดยระนาบใด ๆ ไม่สามารถก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg Plane) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่าง ๆ จะถูกตรวจหาด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และนำค่าทั้งสองที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยอาศัยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ในการทดสอบบางครั้งมุมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์อาจมีการเลื่อนไปในตำแหน่งมุมที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ในผิวของสารเคลือบ ส่วนความเข้มของสัญญาณที่ได้นั้นอาจจะไม่เป็นไปตามค่ามาตรฐาน JCPDS เพราะเกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ชอบ (Prefer Orientation) ต่างกันของอะตอมในชั้นเคลือบ นอกจากนี้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ยังสามารถให้ข้อมูลที่บ่งบอกถึงส่วนผสมทางเคมีของเฟส (Phase Composition) และค่าแลตทิซ (Lattice) อีกด้วย

2.8 รามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

รามานสเปกโทรสโกปีเป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการในการกระเจิงของแสงที่เกิดจากการที่แสงตกกระทบวัตถุและส่งผลทำให้โมเลกุลของสารถูกกระตุ้นให้อยู่ในสภาวะเร้า เมื่อโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นพยายามที่จะกลับคืนสู่สภาวะปกติซึ่งมีพลังงานต่ำกว่าจะทำให้เกิดการกระเจิงแสงออกมา การกระเจิงของแสงดังกล่าวจะมีกระบวนการกระเจิงของแสงแบบยืดหยุ่น (Elastic Process) (พลังงานแสงคงที่) และกระบวนการกระเจิงของแสงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Process) ซึ่งแสงที่กระเจิงออกมามีพลังงานหรือความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นเริ่มต้นของแสงที่ตกกระทบ จากรูปที่ 9 [20] เมื่อแสงตกกระทบกับวัสดุจะเกิดการกระเจิงแสง โดยส่วนใหญ่จะเกิดการกระเจิงแสงแบบเรย์ลีย์ (Rayleigh Scattering) ซึ่งเป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่นมากกว่า การกระเจิงแสงแบบรามานที่เป็นแบบไม่ยืดหยุ่น (มีเพียงประมาณ 1 ใน 10^7 ของแสงที่ตกกระทบ) ทั้งนี้การกระเจิงแสง

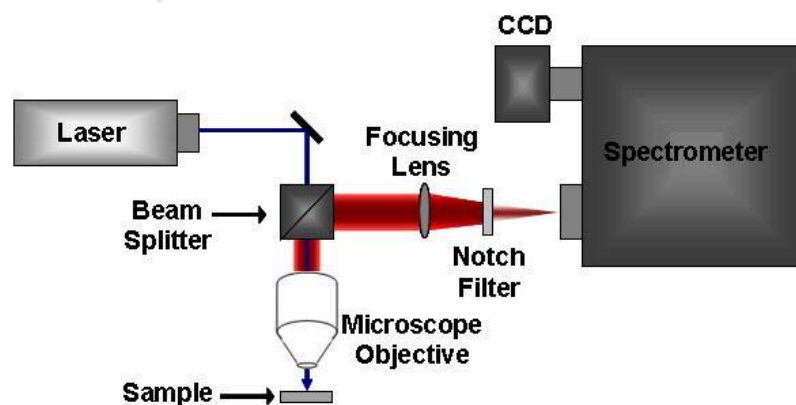
แบบรามานอาจให้พลังงานเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ ถ้าโมเลกุลดูดกลืนพลังงานแล้วขึ้นไปสู่สถานะกระตุ้น จากนั้นคายพลังงานกลับมาที่สถานะกระตุ้น และเมื่อคายพลังงานที่มีค่าน้อยกว่าพลังงานที่ดูดกลืนเข้าไป เรียกรการกระเจิงแบบนี้ว่าการกระเจิงแบบสโตคส์ (Stokes Scattering) ถ้าโมเลกุลมีพลังงานอยู่ค่าหนึ่งที่สูงกว่าสถานะพื้น เมื่อดูดกลืนพลังงานขึ้นไปสู่สถานะกระตุ้นและคายพลังงานลงมาสู่สถานะพื้น โดยพลังงานที่คายออกมามีค่ามากกว่าพลังงานที่ดูดกลืนเข้าไปเรียกรการกระเจิงแบบนี้ว่าการกระเจิงแบบแอนติสโตคส์ (Anti-Stokes Scattering) และมีแผนภาพแสดงการทำงาน ดังรูปที่ 10 [10]



รูปที่ 9 การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในปรากฏการณ์ต่าง ๆ

ที่มารูป : <https://www2.gpo.or.th/Portals/6/Newsletter/RDINewsYr25No1-5.pdf>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 10 แผนภาพการทำงานของรามานสเปกโตรมิเตอร์

ที่มารูป : <https://www.training.com/2015/06/26/what-are-the-differences-between-raman-and-ir-spectroscopy/>

การกระเจิงแบบรามาน คือ การที่ผลต่างของพลังงานของแสงที่ตกกระทบกับพลังงานของแสงที่กระเจิง (Raman Shift) มีค่าตรงกันกับพลังงาน (หรือความถี่) ของพันธะในการสั่นของโมเลกุล โดยค่าของการกระเจิงแบบรามานหาได้จากสมการที่ 2.14

$$\Delta\omega = \frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_1} \quad (2.14)$$

เมื่อ $\Delta\omega$ คือ การกระเจิงแบบรามานมีหน่วย cm^{-1}
 λ_0 คือ ความยาวคลื่นของแสงที่มากกระตุ้น
 λ_1 คือ ความยาวคลื่นของการกระเจิงของรามาน

2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุที่มีขนาดเล็ก ลักษณะสัญญาณวิทยา เช่น ลักษณะรูปร่างตลอดจนขนาดของวัสดุ โดยลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ [21] โดยมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้

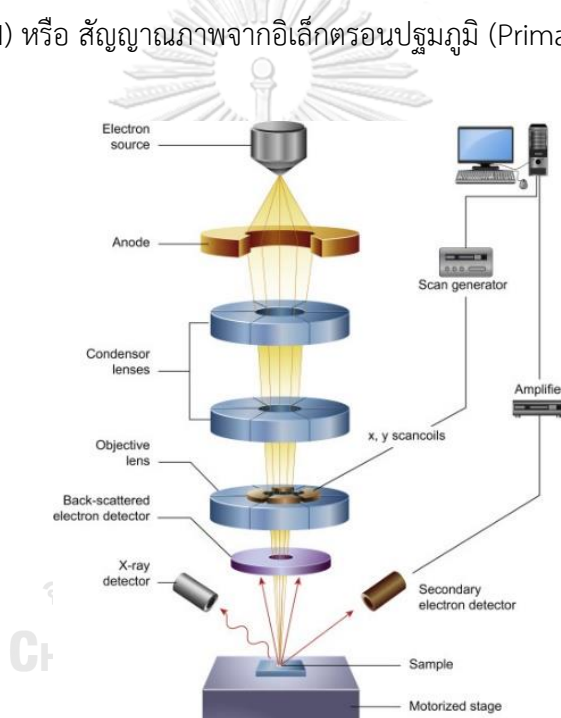
2.9.1 ส่วนประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

มีส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) เมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron; SE) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปแปลงเป็นภาพต่อไป

2.9.2 สัญญาณภาพที่เกิดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

อิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นอิเล็กตรอนพลังงานต่ำที่เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electrons; PE) ไปชนกับอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดของชิ้นงานและจะหลุดออกจากผิวชิ้นที่ความลึกจากพื้นผิวไม่เกิน 10 นาโนเมตร พลังงานอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะส่งสัญญาณไปยังเครื่องตรวจจับ (Detector) ให้ภาพที่มีรายละเอียดสูง ภาพที่ได้จากอิเล็กตรอนทุติยภูมิเรียกว่า สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image; SEI)

สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons; BSE) คือ อิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิดที่ทะลุทะลวงเข้าไปใต้ผิวชิ้นงานและเกิดอันตรกิริยากับอะตอมใน ชิ้นงานในการกระเจิงแบบยืดหยุ่น ซึ่งจะมีการกระเจิงกลับออกมาจากผิวชิ้นงาน ดังนั้นสัญญาณภาพ จากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับจึงมีพลังงานสูงในระดับที่ใกล้เคียงกับพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิจาก แหล่งกำเนิด กล่าวคือเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าใกล้หรือเข้าชนนิวเคลียสของอะตอมบนผิวชิ้นงาน ก็เกิดการเปลี่ยนทิศทางกระเจิงกลับออกมาจากผิว โดยสัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ จะเกิดมากกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ความเข้มของสัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับจะขึ้นกับ มุมที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิตกใส่ชิ้นงาน และยังขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุที่ผิวชิ้นงาน ภาพที่ได้จาก อิเล็กตรอนกระเจิงกลับเราเรียกว่า สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron Image; BEI) หรือ สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electron Image)



รูปที่ 11 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [21]

2.10 พลาสมาไอออนไนเซอร์ (Plasma Ionizer)

ระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ถูกนำไปใช้ในเครื่องปรับอากาศ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้อากาศบริสุทธิ์ ด้วยการทำให้เกิดการรวมตัวของฝุ่นที่มีขนาดเล็กระดับไมครอนตกลงสู่พื้นและลดการฟุ้งกระจายในอากาศได้แล้ว ยังสามารถสร้างสารอนุมูลอิสระเพื่อไปยับยั้งและทำลายจุลินทรีย์ในอากาศและกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ที่ได้ โดยหลักการทำงานดังนี้

2.10.1 การกำจัดฝุ่น

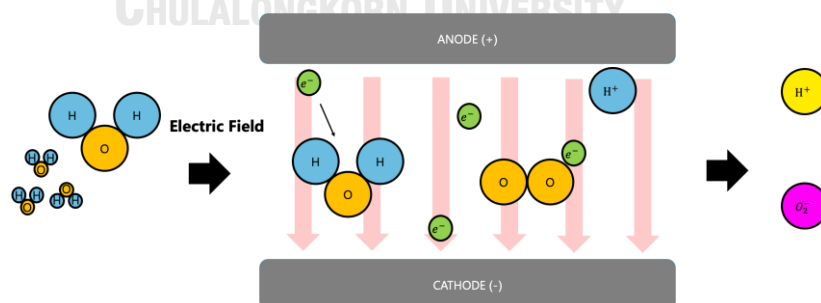
ระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์จะปล่อยประจุลบ (Negative Ion) ออกมาเพื่อให้ไปเกาะกับฝุ่นที่มีขนาดเล็ก ทำให้ฝุ่นมีประจุซึ่งไปจับกับวัตถุที่เป็นกราวด์ทางไฟฟ้า นอกจากนั้นเมื่อประจุลบรวมกับความชื้นในอากาศจะกลายเป็น H_3O_2 (Hydroxide Hydrate) ไปจับฝุ่นขนาดต่าง ๆ ในอากาศ รวมถึงฝุ่นขนาด 2.5 ไมโครเมตร ไม่ให้ฝุ่นฟุ้งกระจายและลอยอยู่ในอากาศ ซึ่งจะง่ายต่อการสูดดม และหายใจเข้าระบบทางเดินหายใจ โดยแบ่งฝุ่นออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) ฝุ่นน้ำหนักเบา อนุภาคเล็กมากจนมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ฝุ่นประเภทนี้จะลอยในอากาศเสมอ และนอกจากนี้แล้วร่างกายเรายังสามารถหายใจเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ แล้วผ่านเข้าสู่ระบบหมุนเวียนเลือดในร่างกาย ซึ่งก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ ได้

2) ฝุ่นขนาดใหญ่ เนื่องจากขนาดใหญ่มีน้ำหนักมาก จึงสามารถตกลงไปกองบนพื้น บนเฟอร์นิเจอร์ โดยฝุ่นประเภทนี้สามารถทำความสะอาดได้ จากการกวาด ดูดฝุ่น เช็ดถู ฝุ่นประเภทนี้

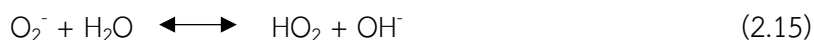
2.10.2 การกำจัดเชื้อ

เมื่อโมเลกุลของน้ำถูกชนด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็น H^+ และ O_2^- ดังรูปที่ 14 [22] ไอออนนี้จะไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำและออกซิเจนในอากาศ ดังสมการที่ 2.15 ถึง 2.18 ทำให้เกิดสารอนุมูลอิสระ (Reactive Oxygen Species) เช่น OH^- (Hydroxyl Ion), H_2O_2 (Hydrogen Peroxide) และ O_3 (Ozone) เป็นต้น ซึ่ง OH^- ก็จะดึงเอาไฮโดรเจนจากโปรตีนที่ห่อหุ้มเนื้อเยื่อชั้นนอกของเชื้อโรคออกมาแล้วรวมกันกลายเป็น H_2O ซึ่งช่วยเพิ่มความชุ่มชื้นได้ และเมื่อ O_2^- เคลื่อนที่ไปในอากาศก็จะสามารถรวมตัวกับโมเลกุลอื่น ๆ ที่อยู่ในอากาศจนกลายเป็นโมเลกุลต่าง ๆ

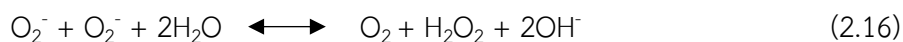


รูปที่ 12 แผนภาพกระบวนการพลาสมาไอออนไนเซอร์

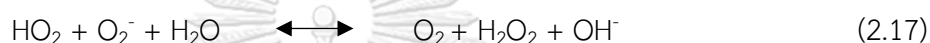
เนื่องจาก O_2^- ที่ผลิตมาเมื่อเจอกับโมเลกุลน้ำในอากาศจะทำปฏิกิริยากันเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังสมการ 2.15



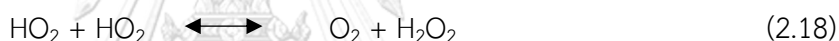
หรือสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.16



เนื่องจาก O_2^- ที่ถูกล้อมรอบด้วยน้ำทำให้เกิดเป็น OH^- ที่สามารถลอยได้ไม่ไกล เนื่องจากมีครึ่งชีวิตที่สั้น ดังนั้น ถ้าหากว่า OH^- ไม่สามารถลอยไปจับกับเชื้อโรคได้จะทำให้เกิดเป็นปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.17



และสมการที่ 2.18



2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี 2018 Timmermann และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Indoor Air Purification by Dielectric Barrier Discharge Combined with Ionic Wind: Physical and Microbiological Investigations เป็นการศึกษาพลาสมาเย็นความดันบรรยากาศชนิด DBD ที่ได้รับการพัฒนาสำหรับการทำงานระบบอากาศหมุนเวียนในห้องปฏิบัติการของโรงพยาบาล การทดลองทางจุลชีววิทยาใช้ *Escherichia coli* ทดสอบในอากาศ จากผลการทดลองเชื้อที่ผ่านระบบพลาสมาสามารถกำจัดเชื้อได้ 20% และพลาสมาที่มีลมไอออนิกกำจัดเชื้อได้มากถึง 90% โดยความเข้มข้นของไอโซนเป็นส่วนประกอบเพียง 360 ppb ซึ่งมีแนวโน้มสำหรับการนำไปใช้งาน

ปี 2020 Abbasi และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Thermal Characteristics of Plasma Actuators in Turbulent Boundary Layer เป็นการศึกษาการดิสชาร์จพลาสมาที่ใช้อิเล็กโทรดแบบสลับ (AC) ในการทำงาน โดยศึกษาทดลองในอุโมงค์ลมที่มีความเร็ว 10-20 m/s และมีการทำงานความถี่ต่ำที่ 5 Hz และ 10 Hz จากการทดลองโดยใช้กล้องอินฟราเรดในการศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวพบว่า เมื่อรอบการทำงาน (Duty Cycle) สูงขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวสูงขึ้นไปด้วย และเมื่อความเร็วในอุโมงค์ลมสูงขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวลดลง

ปี 2008 Law และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Handheld Flyback Driven Coaxial Dielectric Barrier Discharge: Development and Characterization เป็นการศึกษาและพัฒนาพลาสมา DBD แบบโคแอกเซียลที่ขับเคลื่อนวงจร Flyback โดยใช้ MOSFET เพื่อแปลงกำลังไฟฟ้าตรงแบบต่อเนื่องที่ 10-33 W เป็นแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ 1.2-1.6 kV ด้วยความถี่ 50 kHz และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 0.5-10 slm การศึกษาสเปกโทรสโกปีที่ปล่อยออกมาเผยให้เห็นว่ามีอะตอมอาร์กอนที่เป็นกลางและไนโตรเจนระดับโมเลกุลจำนวนมาก

ปี 2017 Subedi, Shrestha และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Generation and Diagnostics of Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge in Argon/Air เป็นการศึกษาคุณสมบัติของพลาสมาโดยใช้เครื่องสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสงในการวิเคราะห์ ได้แก่ อุณหภูมิของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพลาสมา การคายประจุเกิดขึ้นโดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0-20 kV ซึ่งทำงานที่ความถี่ 27 kHz ในระบบอิเล็กโทรดแบบขนาน โดยมีแก้วเป็นไดอิเล็กตริก การคำนวณใช้อัตราส่วนความเข้มแสงของเส้นสเปกตรัมในพลาสมา โดยเลือกไปเปรียบเทียบกับค่าสเปกตรัมของ NIST Atomic Spectra Lines Form

ปี 2016 Han และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Mechanisms of Inactivation by High Voltage Atmospheric Cold Plasma Differ for *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* เป็นการศึกษาพลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Cold Plasma) เป็นเทคโนโลยีพลาสมาที่ไม่ก่อให้เกิดความร้อนที่สูงและเทคโนโลยีนี้มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งทำให้เกิดโรค ซึ่งสารอนุมูลอิสระมีหน้าที่สำคัญในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคด้วยการทำให้เซลล์ได้รับความเสียหาย ยับยั้งเอนไซม์และทำให้เกิดการเสียหายของสารพันธุกรรม (Deoxyribonucleic Acid; DNA) โดยใช้อากาศหรือก๊าซอื่น ๆ ในอากาศ ทำให้เกิดออกซิเดชันเป็นสารอนุมูลอิสระ เช่น ไฮดรอกซิลไฮดรอกซิลเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น ด้วยวิธีการดิสชาร์จทางไฟฟ้าให้เกิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศโดยใช้แรงดันไฟฟ้าสูง จากการทดลองโดยการนำเชื้อ *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* ไว้ในบริเวณที่เกิดพลาสมา พบว่าเชื้อมีปริมาณที่น้อยลงเมื่อเพิ่มเวลาของพลาสมามากขึ้น และจากการนำไปทดสอบด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเซลล์ของเชื้อได้รับความเสียหาย โดยเกิดรูขึ้นที่ผนังเซลล์

ปี 2014 Saravanan และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาเรื่อง An in Situ Generated Carbon as Integrated Conductive Additive for Hierarchical Negative Plate of Lead-acid Battery เป็นการศึกษาคาร์บอนที่สร้างจากน้ำตาล (Sugar Device Carbon; SDC) ที่เป็นสารเติมแต่งในสารที่ช่วยปรับปรุงลักษณะการปลดปล่อยประจุของเซลล์แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด และศึกษาผลกระทบของ Carbon Black (CB) โดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ รูปแบบ XRD ของคาร์บอนแบล็คและวัสดุ SDC ที่เตรียมไว้ จุดสูงสุดที่ 26.6° เกิดจากการเลี้ยวเบนของกราฟไฟต์ แถบกว้างบ่งชี้ว่าโครงสร้างของอนุภาค

CB เป็นอัสสัมฐาน ค่าสูงสุดของการเลี้ยวเบนที่ได้มาสำหรับ CB นั้นต่ำกว่าและกว้างกว่า SDC มาก ซึ่งยืนยันว่า CB ประกอบด้วยสารคาร์บอนที่มีความเป็นผลึกต่ำ พิศการเลี้ยวเบนสำหรับ SDC แสดงเฟสผลึก ความเป็นผลึกสูงของ SDC บ่งบอกถึงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีที่ดี

ปี 2013 Yun และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Preparation of Carbon Blacks by Liquid Phase Plasma (LPP) Process เป็นการศึกษาอนุภาคนาโน Carbon Black ที่ถูกสังเคราะห์ด้วยเทคนิค Liquid Phase Plasma (LPP) การทดสอบด้วยรามานสเปกโทรสโกปี พบ D-band ที่ 1325 cm^{-1} และ G-band ที่ 1600 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติหลักของวัสดุคาร์บอน

ปี 2018 Qu และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Effect of Filler Orientation on the Electrical Conductivity of Carbon Fiber/PMMA Composites เป็นการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของ Carbon Fiber/ Polymethylmethacrylate (PMMA) ที่ถูกอัดรีดและถูกตัดเป็นตัวอย่างยาว 20 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร ส่วนปลายถูกขัดเพื่อขัดโพลีเมอร์ออก จากนั้นเคลือบสีเงินนำไฟฟ้าเฉพาะที่ปลายในการวัด ความต้านทานไฟฟ้า R ของชิ้นงานตัวอย่างถูกวัดโดยใช้แอมป์มิเตอร์ โดยต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 1 V และทดสอบภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง ค่าการนำไฟฟ้าสามารถคำนวณได้โดยค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของชิ้นงาน ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของ PMMA มีค่า $1.16 \times 10^{-9}\text{ S/cm}$

ปี 2017 Lin&Lin [30] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Generation and Determination of Negative Air Ions ซึ่งเป็นการศึกษากลไกการสร้างไอออนด้วย Negative Air Ions (NAI) ในอากาศ พลังงานที่จำเป็นในการแตกตัวเป็นไอออนของโมเลกุลในบรรยากาศ เช่น รังสีคอสมิกและรังสีอัลตราไวโอเล็ต แรงแรงทางไฟฟ้า การปล่อยแสง การสังเคราะห์ด้วยแสง การกระตุ้นด้วยแสง ส่งผลโดยตรงในการแตกตัวเป็นไอออนของโมเลกุลก๊าซที่เป็นกลาง ซึ่งในอากาศประกอบด้วยไนโตรเจนและออกซิเจน ซึ่งพลังงานไอออนไนซ์ที่ 14.5 eV ($1,400\text{ kJ/mol}$) และ 13.5 eV ($1,300\text{ kJ/mol}$) ตามลำดับ ดังนั้นพลังงานสามารถดึงอิเล็กตรอนออกจากก๊าซในบรรยากาศทรงกลมเมื่อมีค่ามากกว่า 1400 kJ/mol กลไกการสร้างไอออนทำให้เกิดโมเลกุลต่าง ๆ เช่น O^- , O_3 , NO_2 และ NO_3^- เป็นต้น

ปี 2018 Akkara และ Jarin [31] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Experimental Implementation on HVDC form Single Phase AC using Multiplier Circuit ได้ทำการออกแบบและศึกษาแรงดันไฟฟ้าสูงกระแสตรง (HVDC) ด้วยวงจรทวีแรงดัน (Voltage Multiplier) โดยมีแหล่งจ่ายไฟ AC อินพุต 230 V โดยใช้ตัวเก็บประจุมีค่า $25\text{ }\mu\text{F}$ และไดโอด 1N4007 ที่ต่อกันแบบ Cockcroft-Walton 8 ชั้น ซึ่งจะทำให้แปลงจาก AC เป็น DC และทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่า 2 kV ซึ่งสามารถเพิ่มได้สูงสุดถึง 10 kV วงจรนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ เช่น ปืนช็อตไฟฟ้า ทางวิศวกรรม และไอออนไนเซอร์ในอากาศ

ปี 2015 Blbler และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Impact of Cold Atmospheric Pressure Plasma on Physiology and Flavonol Glycoside Profile of Peas (*Pisum sativum* 'Salamanca') เป็นการศึกษาโดยใช้พลาสมาเย็นความดันบรรยากาศ (CAPP) ในการประยุกต์ทางการเกษตร รูปแบบพลาสมาเป็นแบบไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดิสชาร์จพื้นผิว (SDBD) การบำบัดด้วย SDBD ต่อ flavonol glycoside ของถั่วลันเตาใช้แรงดันไฟฟ้าระหว่าง 6 ถึง 12 kV_{p-p} ที่ความถี่ 3.0 kHz ส่งผลให้เกิดสเปกตรัมการแผ่รังสี UV-B และ UV-C สเปกตรัมการแผ่รังสีที่เกิดอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 200–400 นาโนเมตร สเปกตรัม UV-B มีแถบโมเลกุลของแถบโมเลกุลที่สามและสี่ที่มีความยาวคลื่น 296.5 นาโนเมตร และ 315.5 นาโนเมตร ตามลำดับ และ Second Positive Systems of N₂ ที่ความยาวคลื่น 336.5, 354, 357, 372, 374.5 และ 379.5 นาโนเมตร

ปี 2009 Meschke และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาเรื่อง The Effect of Surface Charge, Negative and Bipolar Ionization on The Deposition of Airborne Bacteria เป็นการศึกษาเพื่อประเมินผลของประจุที่พื้นผิวและการแตกตัวเป็นไอออนของอากาศต่อการสะสมของแบคทีเรียในอากาศภายในสภาวะแวดล้อมในอาคาร โดยใช้แผ่นเพลตที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า -5 kV, -2.5 kV, 0 kV, +2.5 kV และ +5kV กับ Electrostatic Attraction (ESA), Negative Air Ionization (NAI) และ Bipolar Air Ionization (BAI) ผลการศึกษาพบว่าการสะสมของแบคทีเรียบนเพลตเมื่อเทียบอัตราส่วนการสะสมของแบคทีเรียมีมาตรฐานที่ 0 kV โดยมีค่าเฉลี่ย 45 CFU/plate อัตราส่วนการสะสมของเชื้อแบคทีเรียที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า +5 kV ของอุปกรณ์ ESA, NAI และ BAI มีอัตราส่วน 2.48, 3.08 และ 1.03 ตามลำดับ ซึ่งแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอาจเป็นแรงสำคัญที่ส่งผลต่อการสะสมของแบคทีเรียในอากาศ

ปี 2018 Rodrigues และคณะ [34] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Experimental Analysis of Alternative Dielectric Materials for DBD Plasma Actuators เป็นการศึกษาผลกระทบของวัสดุไดอิเล็กตริกของเครื่องกำเนิดพลาสมาชนิด SDBD ต่อกำลังไฟฟ้า โดยทำการศึกษาด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก Kapton, Polyisobutylene, Silicone และ Polyactic Acid ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน โดยทำการปรับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 4-14 kV จากการทดสอบพบว่าวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงจะต้องใช้กำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น

ปี 2013 Mastanaiah และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Effect of Dielectric and Liquid on Plasma Sterilization Using Dielectric Barrier Discharge Plasma เป็นการศึกษาผลกระทบของพลาสมาชนิด SDBD ต่อเชื้อแบคทีเรีย ด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก FR4 ระหว่างเปิดการทำงานของพลาสมา 30 นาที ว่าพบวัสดุเกิดการเสื่อมสภาพ การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเบื้องต้น (SEM) ระบุว่าหลังจากสร้างพลาสมาประมาณ 30 นาที ไดอิเล็กตริก FR4 จะเริ่มเสื่อมสภาพ วิธีหนึ่งในการอธิบายเรื่องนี้ อาจเป็นเพราะ FR4 ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

สูงกว่า ต้องการกำลังไฟฟ้าเข้าที่สูงกว่าสำหรับการผลิตพลาสมา ซึ่งจะนำไปสู่ความร้อนที่พื้นผิวสูงขึ้น ส่งผลให้การสลายตัวเร็วขึ้นกับพื้นผิวอิเล็กทริกในกรณีของ FR4

ปี 2016 Ozkan และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาเรื่อง How do the barrier thickness and dielectric material influence the filamentary mode and CO₂ conversion in a flowing DBD? ซึ่งเป็นการศึกษาความหนาและชนิดของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ CO₂ วัสดุไดอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบได้แก่ Alumina, Mullite, Pyrex และ Quartz ซึ่งมีความหนา 2.0, 2.4 และ 2.8 มิลลิเมตร การเพิ่มความหนาของวัสดุไดอิเล็กทริกจะส่งผลทำให้ CO₂ สูงขึ้นไปด้วย และคุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุไดอิเล็กทริกได้รับการทดสอบโดยกล้องอินฟราเรด อุณหภูมิเฉลี่ยของอิเล็กโทรดทั้งสองชนิดถูกทดสอบด้วยการใช้กำลังไฟฟ้า 75 W เปิดการทำงานเป็นเวลา 4 นาที จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิ 136°C, 149°C, 157°C และ 169°C ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิที่แตกต่างของก๊าซจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง CO₂ ด้วย



บทที่ 3

การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ปัจจุบัน เพื่อสร้างระบบไดโอดีเล็กทรอนิกส์แบบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมาสำหรับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ และในระบบไดโอดีเล็กทรอนิกส์แบบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมาได้ทำการออกแบบวงจรกำเนิดพลาสมา รวมถึงโครงสร้างทางกายภาพ เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์กับระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ปัจจุบัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การศึกษาระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ปัจจุบัน

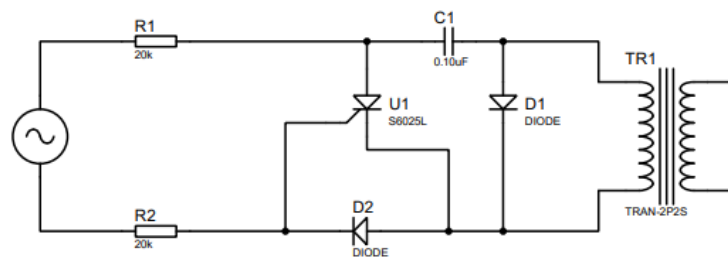
ระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์เป็นเทคโนโลยีที่บริษัท บีทีไวส์ (ประเทศไทย) จำกัด ได้นำมาประยุกต์ใช้กับการทำงานของระบบปรับอากาศ แสดงดังรูปที่ 13 และต้องการที่จะพัฒนาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ให้มากยิ่งขึ้น โดยแนวทางสำหรับการศึกษาระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ปัจจุบันแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ ปริมาณความเข้มข้นไอออน การศึกษาสเปกตรัมของพลาสมา และประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ โดยจะศึกษาขึ้นเพื่อรวบรวมข้อมูล



รูปที่ 13 ภาพแสดงระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์

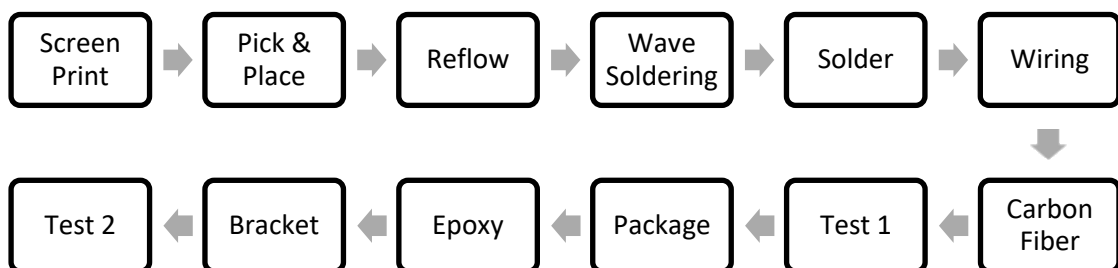
3.1.1 การศึกษาคุณสมบัติวงจรไฟฟ้าของพลาสมาไอออนไนเซอร์

ระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ปัจจุบันใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ 220 V ความถี่ 50 Hz จากนั้น SCR ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดการทำงานของวงจร และจะมีวงจร Negative Clamper คือ C1 และ D2 จากนั้นไปสู่หม้อแปลงแรงดันสูงที่ต่อกับขั้วแปรง Carbon ซึ่งทำหน้าที่ขยายแรงดันไฟฟ้าโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำของจำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ วงจรระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ปัจจุบัน แสดงดังรูปที่ 14 ซึ่งมีลักษณะของวงจรที่แตกต่างไปจากระบบไอออนไนเซอร์รุ่นอื่น ๆ ซึ่งจะใช้วงจรทวีแรงดัน (Voltage Multiplier) [31] การศึกษาสัญญาณการทำงานของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ วัดด้วยเครื่องออสซิลโลสโคปรุ่น Tektronix TDS 3032 ซึ่งถูกต่อเข้ากับโพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูงรุ่น Hantek T3100 100x และโพรบวัดกระแสไฟฟ้าวรุ่น Pearson Model 150 ในการวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรพลาสมาไอออนไนเซอร์



รูปที่ 14 ภาพแสดงวงจรระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์

ในส่วนนี้เป็นการศึกษากระบวนการผลิตระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ในปัจจุบันของบริษัท ซึ่งในการเก็บข้อมูลนี้เป็นการดำเนินงานวิจัยเพื่อบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตพลาสมาไอออนไนเซอร์ เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการผลิตสำหรับระบบพลาสมาในรุ่นถัดไป โดยประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 15



รูปที่ 15 แผนภาพของกระบวนการผลิตพลาสมาไอออนไนเซอร์

3.1.2 การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุปล่อยประจุพลาสมาไอออนไนเซอร์

1) การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การศึกษาวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุสำหรับปล่อยประจุ ได้ทำการตรวจสอบหาระนาบจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์รุ่น Rigaku MiniFlex 600 โดยจะทำการเปรียบเทียบระนาบจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์กับ Carbon ชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ทราบถึงวัสดุของชนแปรงปล่อยประจุ โดยวัสดุที่ใช้คือชนแปรงปล่อยประจุ Carbon ของพลาสมาไอออนไนเซอร์ Carbon Black Powder (purity ~99.95% , 0.075 um, Sigma Aldrich, USA) และ Graphite Powder (Sigma Aldrich, USA) การศึกษาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้รับการตรวจสอบโดยการวิเคราะห์ระนาบการเลี้ยวเบนสามารถบ่งชี้ชนิดของวัสดุได้ และแถบความกว้างของระนาบสามารถบ่งชี้โครงสร้างของวัสดุได้ [27]

2) รามานสเปกโทรสโกปี

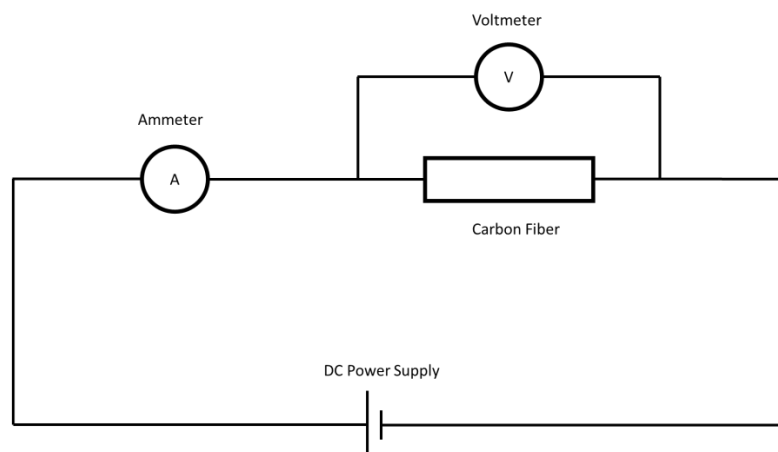
ในส่วนนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างของวัสดุชนแปรง Carbon ด้วยเครื่องรุ่น Raman Thermo Scientific DXR SmartRaman เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุชนแปรง Carbon และวิเคราะห์เพื่อหาขนาดของผลึก ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุและนาโนเทคโนโลยี การทดสอบด้วยรามานสเปกโทรสโกปีเป็นการหาอัตราส่วนระหว่าง D-band กับ G-band เพื่อตรวจสอบค่าคุณสมบัติหลักของวัสดุคาร์บอนและนำไปคำนวณหาขนาดของผลึกของวัสดุคาร์บอน [27], [28]

3) การศึกษาโครงสร้างวัสดุและส่วนประกอบของวัสดุ

เครื่อง SEM-EDS รุ่น IT-500HR ถูกนำมาใช้ในการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานพื้นผิวของวัสดุชนแปรง Carbon ของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ และวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุที่มีในวัสดุของชนแปรงด้วยฟังก์ชันการทำงาน EDS

4) การศึกษาความนำไฟฟ้าของวัสดุ

ในส่วนนี้ได้ศึกษาถึงค่าการนำไฟฟ้าของชนแปรงปล่อยประจุ Carbon โดยความต้านทานไฟฟ้า R ของชิ้นงานตัวอย่างถูกวัดโดยใช้แอมป์มิเตอร์ โดยต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 1 V และทดสอบภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง ค่าการนำไฟฟ้าสามารถคำนวณได้โดยค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของวัสดุคาร์บอนที่ทำการทดสอบ [29] โดยความยาวของชนแปรงปล่อยประจุ Carbon ที่ใช้มีความยาว 5 เซนติเมตร โดยทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ 0.01-0.09 A ไปที่ Carbon Black Fiber เพื่อวัดความนำไฟฟ้าโดยการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม Carbon Black Fiber หาความต้านทานเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ที่ใช้ ได้แก่ Power Supply, Carbon Black Fiber และ Digital Multi Meter (DMM) รุ่น Sanwa CD771 สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่าน แสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 การทดสอบความนำไฟฟ้าของวัสดุ Carbon

3.1.3 การศึกษาความเข้มข้นไอออนของพลาสมาไอออนไนเซอร์

จากหลักการทำงานของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ที่กล่าวไปในบททฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งกล่าวในหัวข้อที่ 2.10 ระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์จะสร้างไอออนจากการทำปฏิกิริยาของโมเลกุลในอากาศ จากการศึกษาหลักการสร้างไอออนด้วย Negative Air Ions (NAI) ในอากาศที่ผ่านมา กลไกการสร้างไอออนทำให้เกิดโมเลกุลต่าง ๆ เช่น O^- , O_3 , NO_2 และ NO_3^- เป็นต้น [30] ในส่วนนี้เป็นการศึกษาความเข้มข้นไอออนที่สามารถตรวจสอบได้โดยใช้ไอออนเซ็นเซอร์รุ่น DFRobot SEN0321 Gravity I2C ซึ่งถูกติดตั้งเป็นระยะ 5 เซนติเมตร จากระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ โดยทดลองในกล่องอะคริลิกใสขนาด กว้าง × ยาว × สูง คือ 30 × 30 × 30 เซนติเมตร ตามลำดับ และเปิดการทำงานของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์เป็นเวลา 210 วินาที

3.1.4 การศึกษาสเปกตรัมของพลาสมาไอออนไนเซอร์

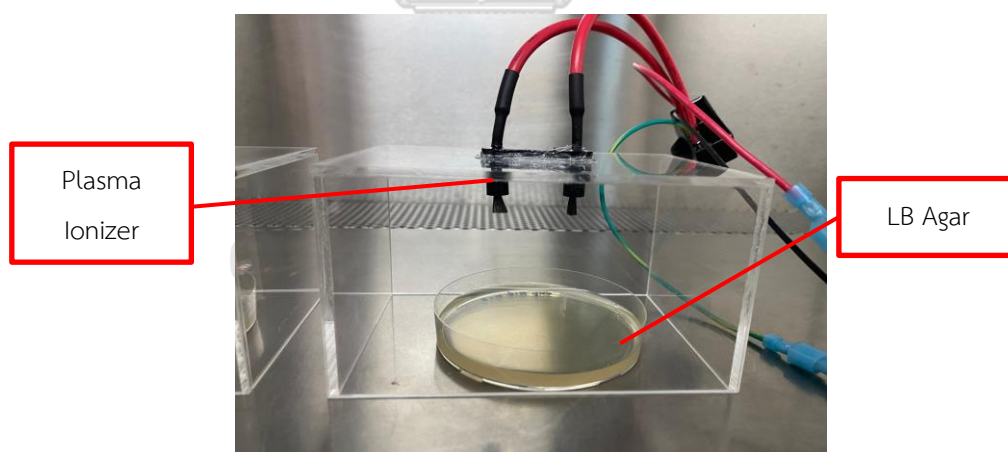
โดยทั่วไปแล้วการเกิดสถานะพลาสมาที่ความดันบรรยากาศจะใช้สนามไฟฟ้าเพื่อเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานที่สูงเพื่อเกิดกระบวนการไอออไนเซชัน ซึ่งจะทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานในรูปของโฟตอน ซึ่งกล่าวในหัวข้อที่ 2.5 โดยในส่วนนี้เป็นการศึกษาสเปกโทรสโกปีของพลาสมาไอออนไนเซอร์โดยวัดสเปกตรัมของแสง โดยได้ทำการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เครื่องสเปกโตรมิเตอร์รุ่น HR4000 ประกอบด้วยส่วน สำคัญ 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นระบบส่งผ่านแสงเพื่อไปจำแนกแสงจากการแผ่รังสีของอะตอมหรือไอออนของแก๊สที่ไอออไนซ์เป็นพลาสมา หัววัดของ HR4000 เป็นเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic) ส่วนที่สองเป็นระบบจำแนกความยาวคลื่นแสงซึ่งอาศัยการจำแนกแสงด้วยเกรตติงเลนส์ CCD แบบแถวสามารถวัดได้แม่นยำในย่านความยาวคลื่น 200 ถึง 1100 นาโนเมตร และสามารถวัดได้ครอบคลุมย่าน UV โดยที่เครื่องวัดสเปกตรัมรุ่นนี้ใช้ร่วมกับโปรแกรม Ocean

Optic SpectraSuite ซึ่งทำหน้าที่แสดง ประมวลผล และเก็บข้อมูลสเปกตรัมตามโหมดควบคุมการทำงานที่ผู้ใช้งานกำหนด และการประมวลผลข้อมูลสเปกตรัมจากโปรแกรม Ocean Optic SpectraSuite เพื่อการวิเคราะห์อุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์จากสมการที่ 2.11

3.1.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของพลาสมาไอออนไนเซอร์

เชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* (*E. coli*) ถูกนำมาใช้ทดสอบสำหรับการหาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ ซึ่งทดสอบบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง (LB Agar) โดยเปิดการทำงานเป็นเวลา 10 นาที ภายในกล่องอะคริลิก แสดงดังรูปที่ 17 มีการศึกษาเพื่อประเมินผลของประจุที่พื้นผิวและการแตกตัวเป็นไอออนของอากาศต่อการสะสมของแบคทีเรียในอากาศภายในสภาวะแวดล้อมในอาคารของ Negative Air Ionization (NAI) โดยใช้แผ่นความต่างศักย์ไฟฟ้า +5 kV ซึ่งสอดคล้องกับระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ที่ใช้ในปัจจุบัน [33]

E. coli American Type Culture Collection (ATCC) 25922 ถูกเพาะเลี้ยงใน Difco™ LB 5 mL, Lennox และเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที (RPM) ภายใต้อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พร้อมด้วยแสงแหล่งกำเนิดแสงที่มีความหนาแน่นของแสง 0.98-1.10 ที่ 600 นาโนเมตร (OD600) ถูกเจือจาง 10 เท่าที่ 10^8 CFU/mL และเคลือบบนวุ้น 1.5% (LB broth; Difco™ และ Bacto-Agar; Himedia™)



รูปที่ 17 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์

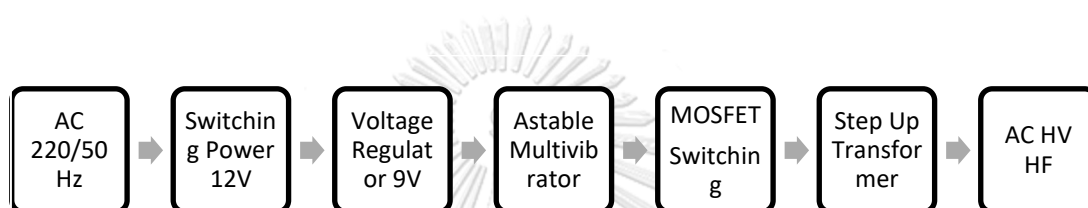
3.2 การออกแบบและศึกษาระบบไดโอดีทริกแบริเออร์ดิสชาร์จพลาสมา

การออกแบบและสร้างไดโอดีทริกแบริเออร์ดิสชาร์จพลาสมาได้กำหนดแนวทางสำหรับการศึกษาซึ่งแบ่งออกเป็น 7 ส่วน ได้แก่ การออกแบบวงจรกำเนิดพลาสมา การออกแบบโครงสร้าง

ทางกายภาพ การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ การศึกษาความเข้มข้นไอโซน การศึกษาสเปกตรัมของพลาสมา และประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์

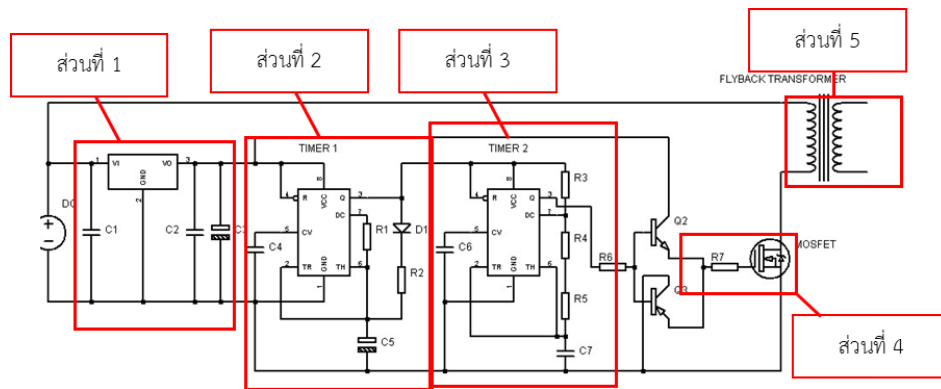
3.2.1 การออกแบบวงจรกำเนิดพลาสมา

จากการศึกษาข้อมูลการออกแบบวงจรกำเนิดพลาสมาไดโอดีเล็กทรอนิกส์จะใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ที่แรงดันไฟฟ้า 3.0-5.5 kV_{p-p} และความถี่แหล่งกำเนิดพลาสมา ระหว่าง 20-60 kHz ซึ่งจะทำให้เกิดสถานะพลาสมาที่มีลักษณะการคายประจุแบบโกลด์สชาร์จ โดยข้อมูลดังกล่าวได้นำมาออกแบบการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูง โดยมีต้นทุนต่ำ แสดงดังรูปที่ 18

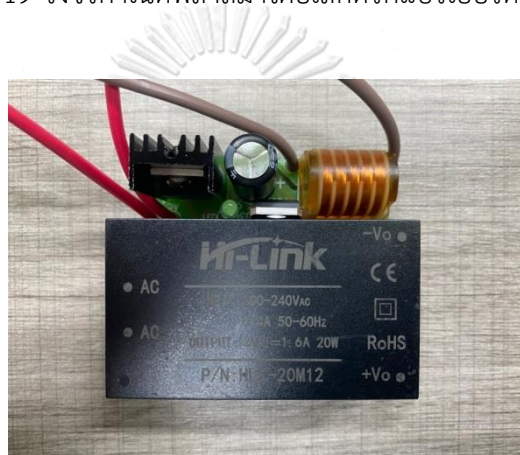


รูปที่ 18 แผนภาพการทำงานของวงจรกำเนิดพลาสมา

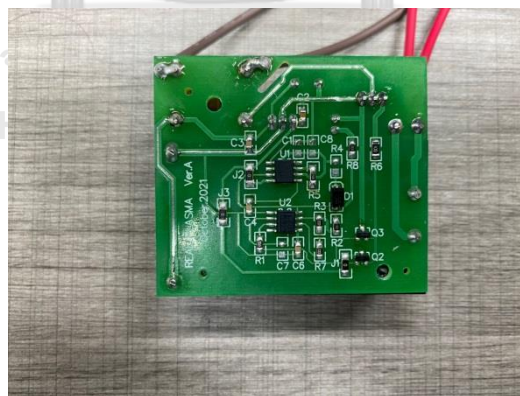
วงจรกำเนิดพลาสมาถูกออกแบบโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในด้านอินพุต 0-15 V และผ่านวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulator) 9 V ในส่วนที่ 1 เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ IC Timer Ne555 ตัวที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมความถี่ในการทำงานของระบบ นั่นคือส่วนที่ 2 จากนั้นจะส่งสัญญาณไปยัง IC Timer Ne555 ตัวที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่ในการกำเนิดความถี่แหล่งกำเนิดพลาสมา ความถี่ในการเปลี่ยนถูกควบคุมโดยตัวจับเวลาซึ่งต่อสายในโหมดการทำงานวงจรแบบอะสเตเบิล (Astable) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ด้วยโพเทนซีโอมิเตอร์ จากนั้นความถี่สวิตซ์ซึ่งจะถูกขับด้วยทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบโลหะ-ออกไซด์-สารกึ่งนำ (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor; MOSFET) ก่อนส่งสัญญาณไปที่หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง Single-Tube Flyback Transformer เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตและส่งต่อไปที่หัวกำเนิดพลาสมา แสดงดังรูปที่ 19 มีงานวิจัยได้ทำการศึกษาเรื่องเป็นการศึกษาและพัฒนาพลาสมา DBD แบบโคแอกเซียลที่ใช้ Flyback Transformer โดยใช้ MOSFET เพื่อแปลงกำลังไฟฟ้าตรงแบบต่อเนื่องที่ 10-33 W เป็นแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ 1.2-1.6 kV ด้วยความถี่ 50 kHz [25] เมื่อนำเข้าสู่กระบวนการผลิตจะได้อุปกรณ์กำเนิดพลาสมาไดโอดีเล็กทรอนิกส์ แสดงดังรูปที่ 20



รูปที่ 19 วงจรกำเนิดพลาสมาไดโอดีเล็กทรอนิกส์แบเรอร์ติสชาร์จ



(ก)

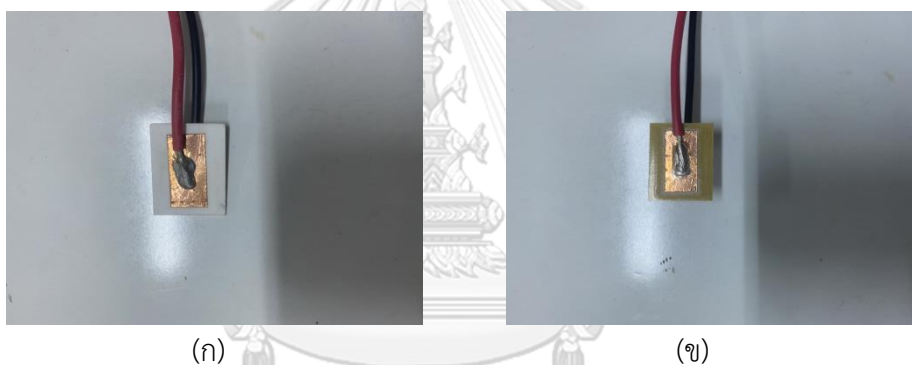


(ข)

รูปที่ 20 อุปกรณ์กำเนิดพลาสมาไดโอดีเล็กทรอนิกส์แบเรอร์ติสชาร์จ: (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

3.2.2 การออกแบบโครงสร้างทางกายภาพไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จพลาสมา

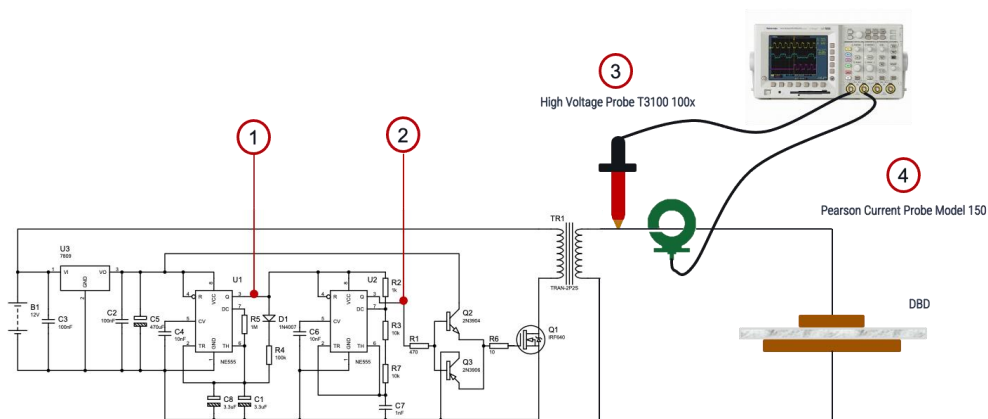
ระบบพลาสมาเป็นความดันบรรยากาศแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จมีรูปแบบที่ใช้กันเป็นส่วนใหญ่ด้วยกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบดิสชาร์จปริมาณ แบบดิสชาร์จระนาบคู่ และแบบดิสชาร์จพื้นผิว เนื่องจากการออกแบบนี้ต้องนำไปใช้ในระบบปรับอากาศด้วย การเลือกใช้รูปแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จจึงต้องคำนึงถึงขนาดพื้นที่ในการติดตั้ง และการสร้างหัวพลาสมาให้มีความเหมาะสมต่อการผลิตและนำไปใช้งาน จึงเลือกรูปแบบดิสชาร์จพื้นผิวเพื่อนำมาพัฒนาต่อจากระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ โครงสร้างทางกายภาพของหัวพลาสมาที่ได้นำมาใช้และศึกษา ได้แก่ Alumina Ceramic (Al_2O_3) ความบริสุทธิ์ 96% ขนาด 20×25 มิลลิเมตรหนา 1 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกคือ 9.1 และ แผ่นวัสดุ PCB ชนิด Flame Retardance 4 (FR4) ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกคือ 4.15 จากตารางที่ 2.1 ติดตั้งด้วยวัสดุแผ่นเทปพอยล์ทองแดงขนาด 10×20 มิลลิเมตร ทั้งสองด้านเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วอิเล็กโทรดในการกำเนิดพลาสมา แสดงดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 หัวกำเนิดพลาสมาชนิด SDBD : (ก) แสดงหัวกำเนิดพลาสมาที่มีวัสดุไดอิเล็กทริก Al_2O_3 และพลาสมา (ข) แสดงหัวกำเนิดพลาสมาที่มีวัสดุไดอิเล็กทริก FR4

3.2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จพลาสมา

ในการศึกษาวงจรอิเล็กทรอนิกส์และการทำงาน ได้ทำการวัดสัญญาณคลื่นแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าทางด้านขาออกกับวงจรกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ ดังรูปที่ 22 โดยวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้คือ Oscilloscope Tektronix TDS-3034, DC Power Supply KORAD KA3005D, High Voltage Probe Hantek T3100 100x และ Pearson Current Probe Model 150 และศึกษากำลังไฟฟ้าที่ใช้กับหัวพลาสมาที่ทำมาจากวัสดุไดอิเล็กทริกต่างชนิด ได้แก่ Alumina Ceramic และ Flame Retardance 4 ซึ่งมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลกระทบของชนิดวัสดุไดอิเล็กทริกต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้ [34]



รูปที่ 22 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดีสชาร์จพลาสมา

3.2.4 การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก

เครื่อง SEM-EDS รุ่น IT-500HR ถูกนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อพลาสมาทำงานจะเกิดการกัดที่พื้นผิววัสดุไดอิเล็กตริกของ Al_2O_3 และ FR4 ทำให้วัสดุไดอิเล็กตริกเกิดการเสื่อมสภาพ มีงานวิจัยที่ศึกษาถึงเวลาในการทำงานของระบบพลาสมาที่ส่งผลต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัสดุไดอิเล็กตริก FR4 โดยเกิดการสึกกร่อนในบริเวณที่เกิดพลาสมาขึ้น [35] โดยทำการเปิดการทำงานของระบบพลาสมาไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดีสชาร์จเป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำการศึกษาในส่วนนี้ในการเลือกนำวัสดุไดอิเล็กตริกไปใช้งานให้มีความเหมาะสม

3.2.5 การศึกษาความเข้มข้นไอซอนของไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดีสชาร์จพลาสมา

จากหลักการทำงานของระบบพลาสมาไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดีสชาร์จที่กล่าวไปในบททฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ระบบพลาสมาไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดีสชาร์จจะสร้างไอซอนที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ในส่วนนี้เป็นการศึกษาความเข้มข้นไอซอนที่สามารถตรวจสอบได้โดยใช้ไอซอนเซ็นเซอร์รุ่น DFRobot SEN0321 Gravity I2C ซึ่งถูกติดตั้งเป็นระยะ 5 เซนติเมตร จากระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ โดยทดลองในกล่องอะคริลิกใสขนาด กว้าง × ยาว × สูง คือ $30 \times 30 \times 30$ เซนติเมตร ตามลำดับ และเปิดการทำงานของระบบพลาสมาไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดีสชาร์จพลาสมาเป็นเวลา 210 วินาที

3.2.6 การศึกษาอุณหภูมิพื้นผิววัสดุไดอิเล็กตริกของไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดีสชาร์จพลาสมา

เมื่อเกิดสภาวะพลาสมาขึ้น จะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุไดอิเล็กตริกระหว่างการสร้างพลาสมา ซึ่งวัดโดยใช้กล้องอินฟราเรด รุ่น Fluke Ti10 ทำงานที่ช่วงสเปกตรัม 7.5 ไมโครเมตร ถึง 14 ไมโครเมตร โดยทำการเปิดพลาสมาเป็นเวลา 210 วินาที งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการ

ดิสชาร์จพื้นผิวที่ใช้ไฟกระแสสลับ (AC) ในการทำงาน โดยศึกษาทดลองในอุโมงค์ลมที่มีความเร็ว 10-20 m/s และมีการทำงานความถี่ต่ำที่ 5 Hz และ 10 Hz จากการทดลองโดยใช้กล้องอินฟราเรดในการศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวพบว่า เมื่อรอบการทำงาน (Duty Cycle) สูงขึ้น จะส่งผลทำให้อุณหภูมิพื้นผิวสูงขึ้นโดยใช้กล้องอินฟราเรด [24], [36]

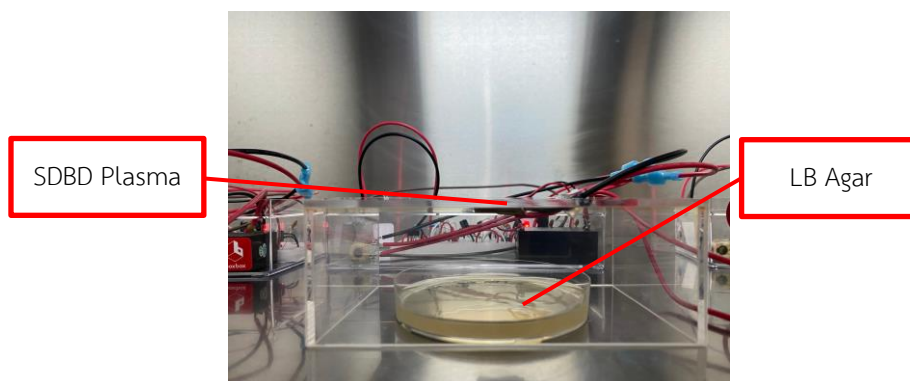
3.2.7 การศึกษาสเปกตรัมของพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

โดยทั่วไปแล้วการเกิดสถานะพลาสมาที่ความดันบรรยากาศจะใช้สนามไฟฟ้าเพื่อเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานที่สูงเพื่อเกิดกระบวนการไอออไนเซชัน ซึ่งจะทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานในรูปของโฟตอน ซึ่งจะมีลักษณะกายประจุแบบโกลด์ดิสชาร์จ ซึ่งกล่าวในหัวข้อที่ 2.2.2 และ 2.5 โดยในส่วนนี้เป็นการศึกษาสเปกโทรสโกปีของพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จโดยวัดสเปกตรัมของแสง โดยได้ทำการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เครื่องสเปกโทรมิเตอร์รุ่น HR4000 ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นระบบส่งผ่านแสงเพื่อไปจำแนกแสงจากการแผ่รังสีของอะตอมหรือไอออนของแก๊สที่ไอออไนซ์เป็นพลาสมา หัววัดของ HR4000 เป็นเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic) ส่วนที่สองเป็นระบบจำแนกความยาวคลื่นแสงซึ่งอาศัยการจำแนกแสงด้วยเกรตติงเลนส์ CCD แบบแถวสามารถวัดได้แม่นยำในย่านความยาวคลื่น 200 ถึง 1100 นาโนเมตร และสามารถวัดได้ครอบคลุมย่าน UV โดยที่เครื่องวัดสเปกตรัมรุ่นนี้ใช้ร่วมกับโปรแกรม Ocean Optic SpectraSuite ซึ่งทำหน้าที่แสดง ประมวลผล และเก็บข้อมูลสเปกตรัมตามโหมดควบคุมการทำงานที่ผู้ใช้งานกำหนด แสดงการประมวลผล ข้อมูลสเปกตรัมจากโปรแกรม Ocean Optic SpectraSuite เพื่อการวิเคราะห์อุณหภูมิของอิเล็กตรอน [17]

3.2.8 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อของไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จพลาสมา

เชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* ถูกนำมาใช้ทดสอบสำหรับการหาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ ซึ่งทดสอบบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง (LB Agar) [26] โดยเปิดการทำงานเป็นเวลา 10 นาที ภายในกล่องอะคริลิก แสดงดังรูปที่ 23

E. coli American Type Culture Collection (ATCC) 25922 ถูกเพาะเลี้ยงใน Difco™ LB 5 mL, Lennox และเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที (RPM) ภายใต้อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พร้อมด้วยแสงแหล่งกำเนิดแสงที่มีความหนาแน่นของแสง 0.98-1.10 ที่ 600 นาโนเมตร (OD600) ถูกเจือจาง 10 เท่าที่ 10^8 CFU/mL และเคลือบบนวุ้น 1.5% (LB broth; Difco™ และ Bacto-Agar; Himedia™)



รูปที่ 23 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อของระบบพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง

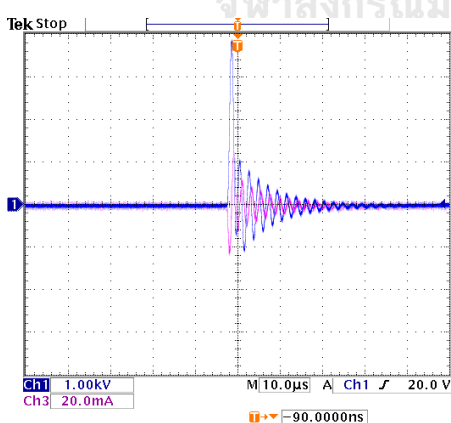
งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งในส่วนแรกจะทำการทดสอบคุณสมบัติของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ และส่วนที่สองจะเป็นการทดสอบระบบไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดิสชาร์จพลาสมาที่สร้างขึ้น

4.1 ผลการศึกษาาระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์

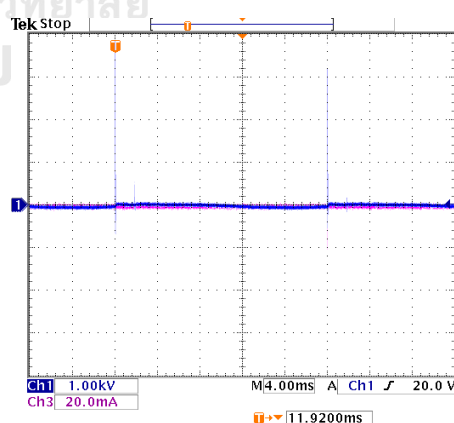
ผลการศึกษาะบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ที่ได้ทำการศึกษา ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ ปริมาณความเข้มข้นไอออน การศึกษาสเปกตรัมของพลาสมา และประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ แสดงดังต่อไปนี้

4.1.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์

จากการศึกษาสัญญาณคลื่นของระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์พบว่า แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นสัญญาณคลื่นรูปแบบ AC โดยมีแรงดันไฟฟ้า $5.0 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ กระแสไฟฟ้า $48.4 \text{ mA}_{\text{p-p}}$ ดังแสดงในรูปที่ 24 (ก) และมีค่าความถี่ 50 Hz แสดงในรูปที่ 33 (ข) ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงดันที่สูงแต่ความถี่ในการทำงานที่มีค่าน้อยเพียงแค่ 50 Hz ส่งผลให้ระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ไม่สามารถที่จะสร้างสถานะพลาสมาที่มีลักษณะการคายประจุแบบโกลด์สชาร์จ์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในหัวข้อที่ 2.2.2 ในเงื่อนไขการเกิดโกลด์สชาร์จ์ที่ใช้ความถี่สูงระดับ $10\text{-}100 \text{ kHz}$



(ก)



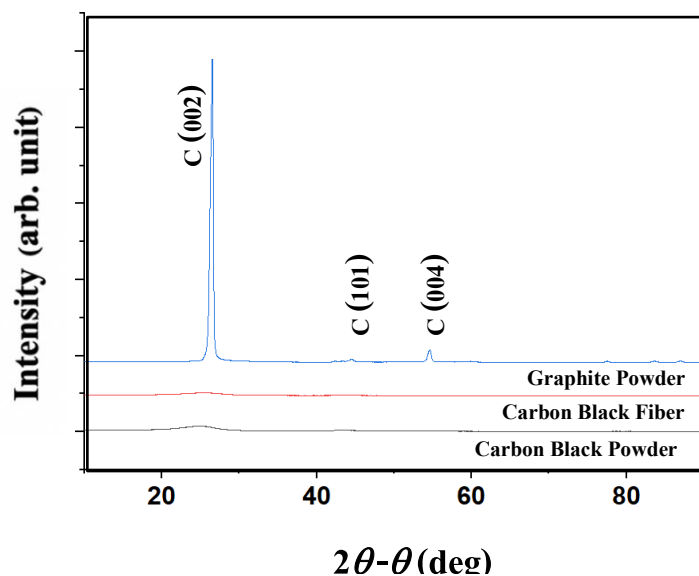
(ข)

รูปที่ 24 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรพลาสมาไอออนไนเซอร์ปัจจุบัน: (ก) ที่ Time/DIV 10 μs และ (ข) ที่ Time/DIV 4 ms

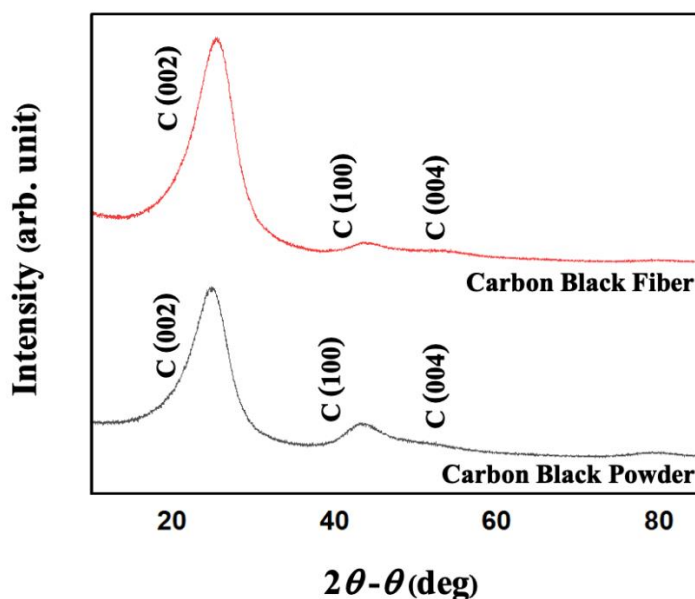
4.1.2 คุณสมบัติของวัสดุปล่อยประจุพลาสมาไอออนไนเซอร์

1) ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์ด้วย XRD โดยการเปรียบเทียบ Carbon ชนิดอื่น ๆ จากรูปที่ 25 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากการวัดแบบ $2\theta - \theta$ ของ Graphite (Sigma Aldrich), Carbon Black Powder (Sigma Aldrich) และ Carbon Black Fiber (Bitwise) อีกทั้งเปรียบเทียบขนาดที่ปรากฏกับขนาดจากข้อมูลมาตรฐานจากเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าวัสดุขนแปรง Carbon ของบริษัทคือ Carbon Black จากรูปที่ 26 ปรากฏขนาดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบระนาบ 002, 101 และ 110 ที่มุม 26.6° , 43.6° และ 79.1° ตามลำดับ แถบความกว้างของระนาบ 002 บ่งชี้ว่าโครงสร้างของอนุภาค Carbon Black Fiber เป็นอสัณฐาน มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการเปรียบเทียบหาชนิดของวัสดุ Carbon Black โดยระนาบที่พบคือ 002, 101 และ 110 ซึ่งมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน [27]



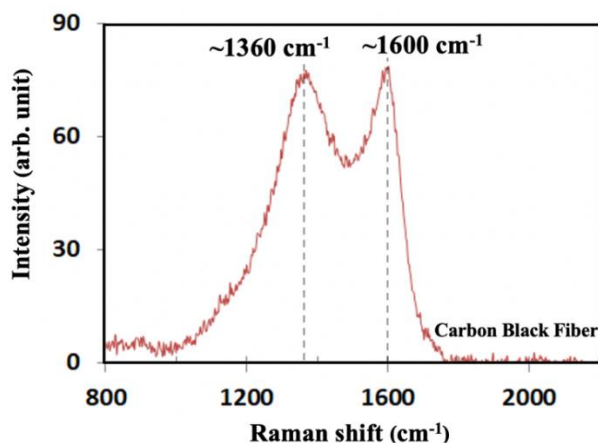
รูปที่ 25 ผลการทดลอง XRD ของ Carbon ต่าง ๆ



รูปที่ 26 ผลการทดลอง XRD ของ Carbon ขนแปรงปล่อยประกูกับ Carbon Black Powder

2) รามานสเปกโทรสโกปี

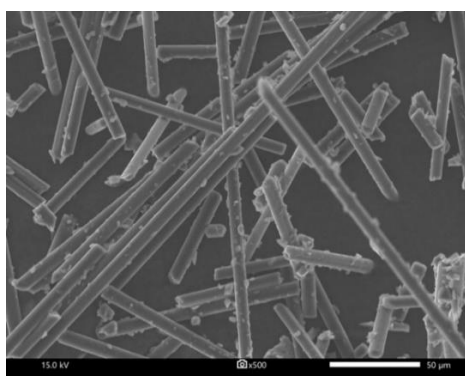
การวิเคราะห์ Raman Spectroscopy จากรูปที่ 27 พบว่ามีแถบ D ที่ 1360 cm^{-1} ค่าความเข้ม 75.85 a.u และแถบ G 1600 cm^{-1} มีความเข้ม 78.45 a.u ซึ่งมีแถบ D band และ G band เหมือนกันกับงานวิจัยที่ได้ศึกษาวัสดุ Carbon Black [27], [28] โดยมีลักษณะเช่นเดียวกันกับพันธะระหว่างอะตอมที่ยึดออกของ Carbon sp^3 และ sp^2 อัตราส่วนความเข้ม (I_d / I_g) ของยอดทั้งสองนี้สามารถใช้เพื่อประเมินระดับความผิดปกติของวัสดุคาร์บอน โดยอัตราส่วนระหว่างความเข้มของแถบ D และ G คือ 0.97 เมื่ออัตราส่วนระหว่างความเข้มของแถบ D แล G เข้าใกล้ 1 แสดงว่าสารนั้นมีความเป็น อสัณฐาน (Amorphous) โดยคาร์บอนมีการเรียงตัวแบบวงแหวนอะโรมาติก ซึ่งทำให้คาร์บอนชนิดนี้สามารถนำไฟฟ้าได้ และได้ทำการคำนวณขนาดของผลึก คือ 17.36 nm



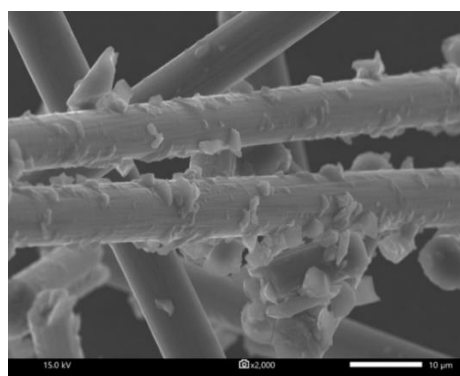
รูปที่ 27 ผลการวิเคราะห์เทคนิค Raman Spectroscopy

3) การศึกษาโครงสร้างวัสดุและส่วนประกอบของวัสดุ

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDS (IT-500HR) เพื่อศึกษาโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุที่มีขนาดเล็ก โดยเฉพาะศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยายของภาพต่าง ๆ จากรูปที่ 28 (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงภาพถ่ายพื้นผิวของ Carbon Black Fiber จาก SEM-EDS (IT-500HR) ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 2,000 เท่า จากรูปแสดงให้เห็นโครงสร้างที่เป็นเส้นใยที่เรียงซ้อนกันจำนวนมาก และมีช่องว่างระหว่างเส้นใยเหล่านั้น ที่ผิวของเส้นใยมีความขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าประมาณ 7.5 ไมโครเมตร และจากรูปที่ 29 แสดงผลของ Carbon Black Fiber จากการตรวจวัดด้วย EDS ของ Carbon Black Fiber พบว่ามีธาตุ Carbon ไม่มีธาตุอื่นประกอบด้วย

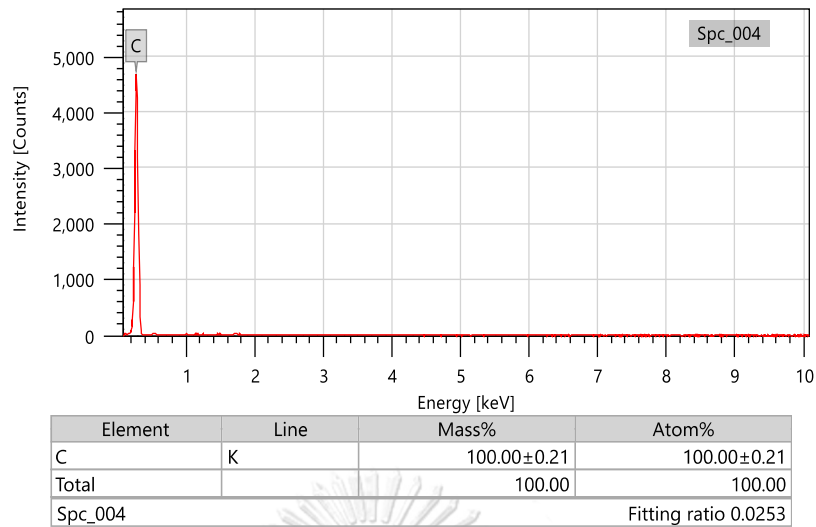


(ก)



(ข)

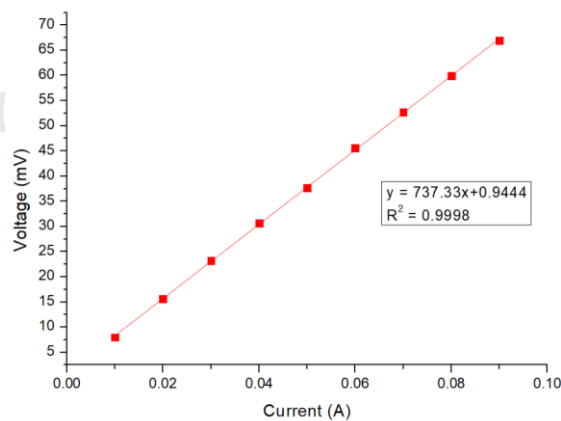
รูปที่ 28 ภาพ Carbon Black Fiber ที่ถ่ายด้วย SEM: (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 2000 เท่า



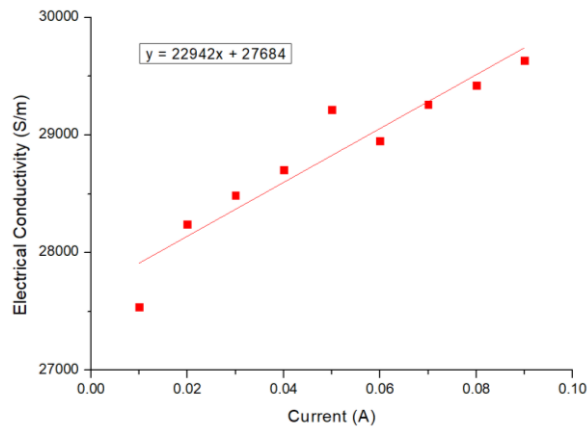
รูปที่ 29 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของ Carbon Black Fiber ด้วย EDS

4) ผลการศึกษาค่าความนำไฟฟ้า

จากการทดสอบวัดความนำไฟฟ้าของ Carbon Black Fiber ของบริษัท ซึ่งใช้ความยาว 5 เซนติเมตร จากรูปที่ 30 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าเป็นแบบเชิงเส้น จากรูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ที่กระแสไฟฟ้า 3.87 mA มีค่าความนำไฟฟ้าที่ประมาณ 27,700 S/m



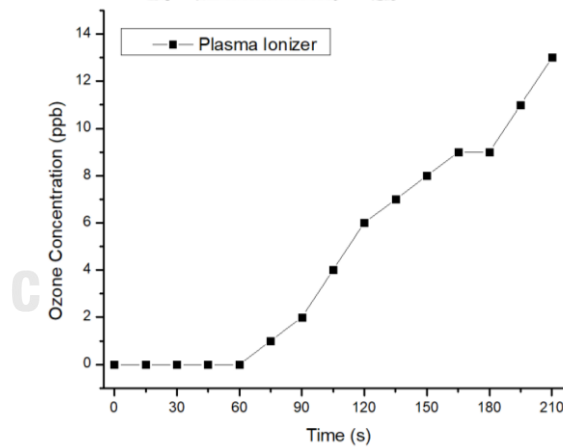
รูปที่ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า

4.1.3 ความเข้มข้นโอโซนของพลาสมาไอออนไนเซอร์

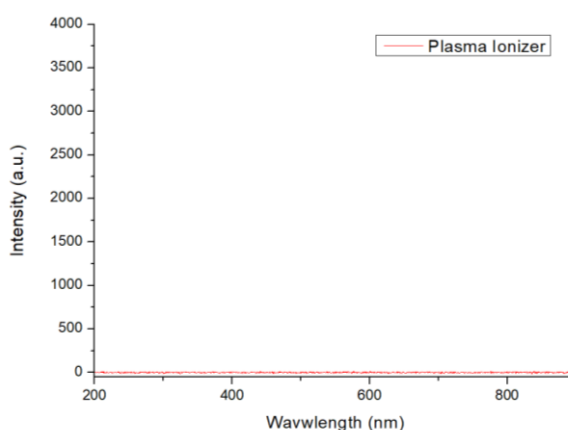
ความเข้มข้นของโอโซนได้รับการตรวจสอบโดยการเปิดระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์เป็นเวลา 210 วินาที ซึ่งพบว่ามีความเข้มข้นของโอโซน 13 ppb



รูปที่ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโอโซนกับเวลาของพลาสมาไอออนไนเซอร์

4.1.4 สเปกตรัมของพลาสมาไอออนไนเซอร์

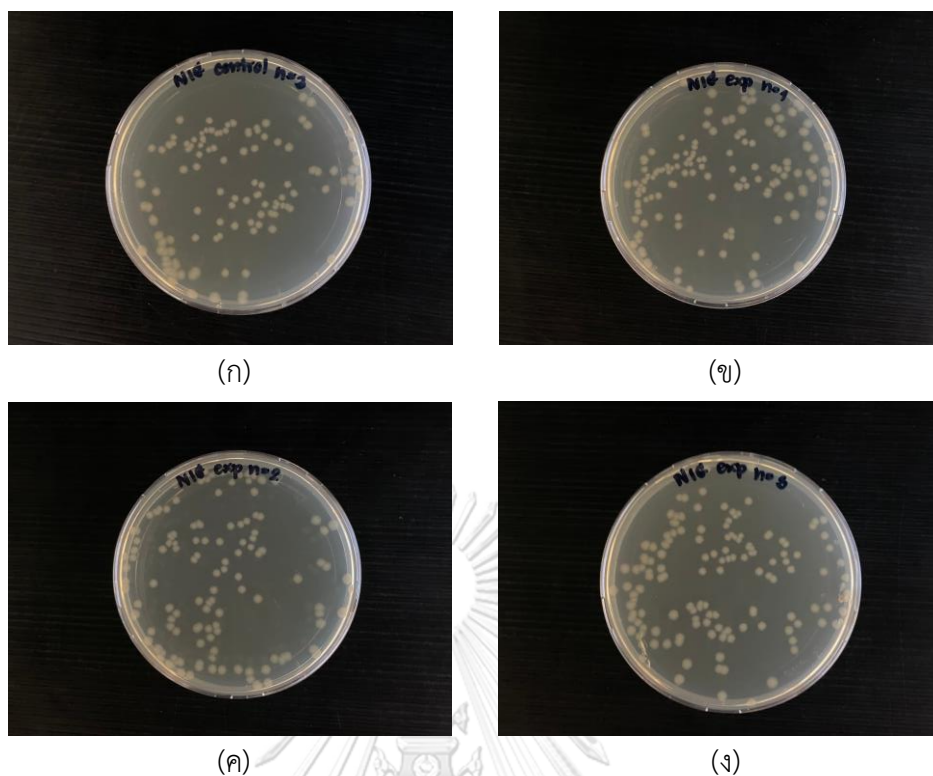
จากรูปที่ 33 แสดงสเปกตรัมแสงของพลาสมาไอออนไนเซอร์ที่วัดด้วย OES HR4000 จากรูปพบว่าไม่มีสเปกตรัมที่เกิดจากการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในหัวข้อที่ 2.2.2 ในเงื่อนไขการเกิดโกลด์สชาร์จ และในหัวข้อที่ 2.5 หลักการเปล่งแสงของอะตอม



รูปที่ 33 สเปกตรัมของพลาสมาไอออนไนเซอร์

4.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของพลาสมาไอออนไนเซอร์

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* โดยดาร์เปิดพลาสมาไอออนไนเซอร์เป็นเวลา 10 นาที จากการทดลองพบว่า ระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ไม่สามารถลดปริมาณเชื้อได้ รูปที่ 34 (ก) แสดงปริมาณเชื้อในชุดควบคุมที่ไม่เปิดพลาสมา มีปริมาณเชื้อจำนวน 120 โคโรนี รูปที่ 34 (ข)-(ง) แสดงปริมาณเชื้อเมื่อเปิดพลาสมาไอออนไนเซอร์ครั้งที่ 1, 2 และ 3 โดยมีเชื้อจำนวน 121, 122 และ 154 โคโรนี ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [33] ซึ่งทำการทดลองเกี่ยวกับ ESA, NAI และ BAI ผลการศึกษาพบว่า การสะสมของแบคทีเรียที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า +5 kV มีปริมาณใกล้เคียงและเพิ่มขึ้นจากชุดควบคุม



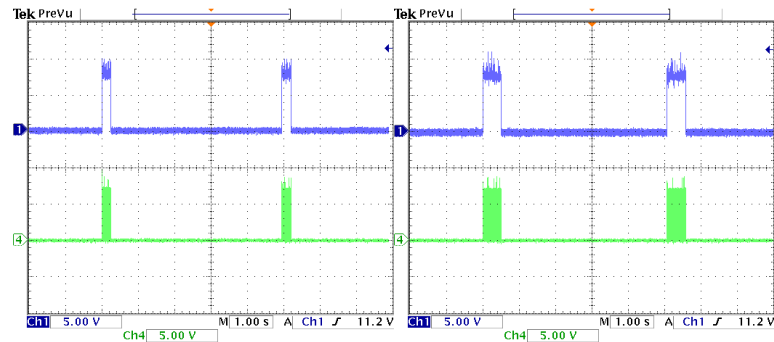
รูปที่ 34 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อ *E. coli* ของระบบพลาสมาไอออนไนเซอ์บนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง: (ก) ชุดการทดลองควบคุม (ข) ครั้งที่ 1 (ค) ครั้งที่ 2 (ง) ครั้งที่ 3

4.2 ผลการศึกษาระบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จพลาสมา

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ การศึกษาความเข้มข้นไอออน การศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวไดอิเล็กทริก การศึกษาสเปกตรัมของพลาสมา และประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ แสดงดังต่อไปนี้

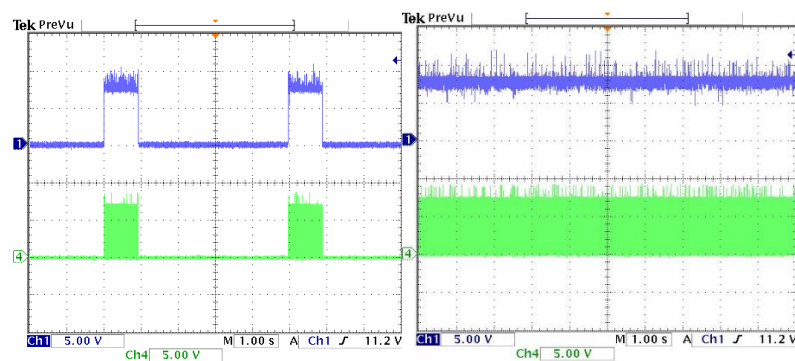
4.2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จพลาสมา

วงจรกำเนิดพลาสมาที่ออกแบบขึ้นสามารถควบคุมเวลาในการทำงานได้ จากรูปที่ 35 (ก)-(ง) แสดงการทำงานแบบความถี่ต่ำและรอบการทำงาน (Duty Cycle) ที่ต่ำ โดยมีความถี่ 0.2 Hz รอบการทำงาน 5%, 10%, 20% และ 100% ตามลำดับ เพื่อทำการศึกษาในส่วนถัดไป



(ก)

(ข)



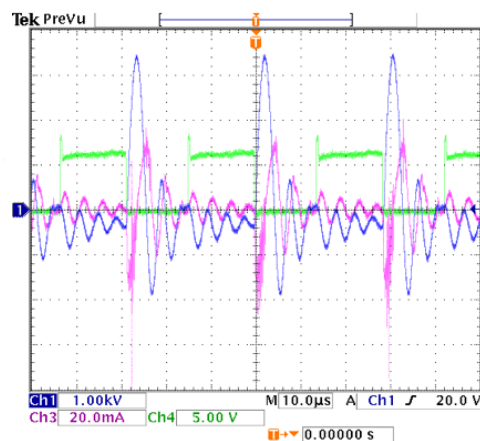
(ค)

(ง)

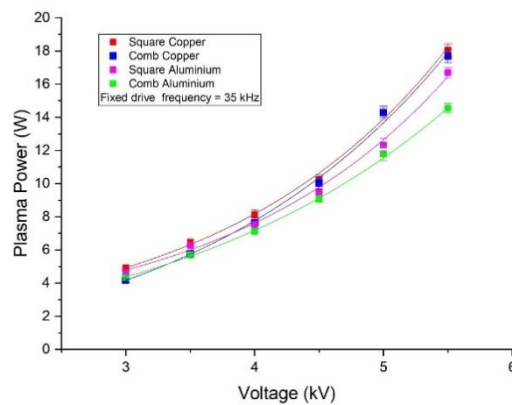
รูปที่ 35 สัญญาณตัวจับเวลาที่ความถี่ 0.2 Hz Duty Cycle : (ก) 5% (ข) 10% (ค) 20% (ง) 100%

การวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดพลาสมาไดโอดีเล็กทรอนิกส์ชาร์จ จากการวัดสัญญาณด้วย Oscilloscope Tektronix TDS-3034 ที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองโดยใช้โพรบไฟฟ้าแรงดันสูง Tektronix T3100 พบว่า เมื่อใช้กำลังไฟฟ้า 15 W แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นสัญญาณคลื่น AC โดยมีแรงดันไฟฟ้า 5.38 kV_{p-p} กระแสไฟฟ้าดิสรชาร์จ 120 mA_{p-p} ความถี่ประมาณ 35 kHz การจ่ายกระแสตรงโดย MOSFET จะถูกเปิดและปิดกะทันหันโดยระดับแรงดันไฟขาออกของตัวจับเวลา (IC Timer) ในช่วงเวลาที่ MOSFET ผ่านขดลวดปฐมภูมิทำให้เกิดกระแสแม่เหล็กเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิ เมื่อ MOSFET ถูกปิดสนามแม่เหล็กในแกนกลางและขดลวดทุติยภูมิจะยุบตัวทำให้เกิดพัลส์แรงดันไฟฟ้าขนาดใหญ่ในขดลวดทุติยภูมิตามด้วยกระแสเหนี่ยวนำที่มีเฟสช้ากว่าแรงดันไฟฟ้า 90° เมื่อ MOSFET ไม่ได้ปิดการทำงานอย่างสมบูรณ์ พฤติกรรมของแรงดันไฟและกระแสนี้จะก่อให้เกิดรูปคลื่น AC ซึ่งมีลักษณะสัญญาณคลื่นเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Law และคณะ ที่ได้ทำการออกแบบวงจรโดยใช้ MOSFET และ Flyback Transformer ในการกำเนิดพลาสมา [25] ดังรูปที่ 36 ซึ่งแสดงสัญญาณด้านเอาต์พุตของวงจรกำเนิดพลาสมาไดโอดีเล็กทรอนิกส์ชาร์จ

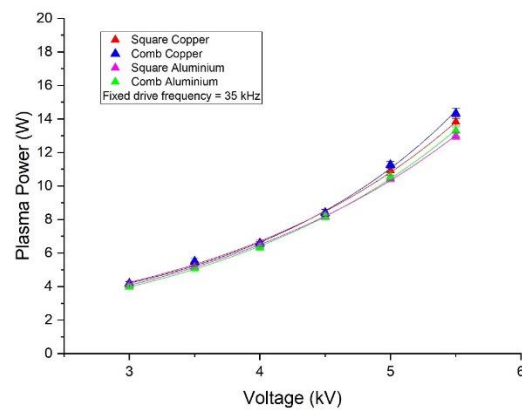
เนื่องจาก Al_2O_3 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงกว่า FR4 ดังนั้น จึงต้องใช้กำลังไฟฟ้ามกกว่าในการทำให้เกิดพลาสมา แสดงดังรูปที่ 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันเอาต์พุตของวัสดุ Al_2O_3 และ รูปที่ 38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันเอาต์พุตของวัสดุ FR4 โดยได้มีการศึกษาในส่วนวัสดุอิเล็กโทรดที่ทำมาจาก Aluminium กับ Copper และมีรูปแบบขั้วอิเล็กโทรดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าและแบบหวี มีความถี่ของแหล่งกำเนิดพลาสมา 35 kHz พบว่าวัสดุ Al_2O_3 ใช้กำลังไฟฟ้าในการเกิดกำเนิดพลาสมามากกว่า FR4 เนื่องจาก Al_2O_3 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงกว่า



รูปที่ 36 ภาพแสดงสัญญาณด้านเอาต์พุตของวงจรกำเนิดพลาสมาไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดีสชาร์จ



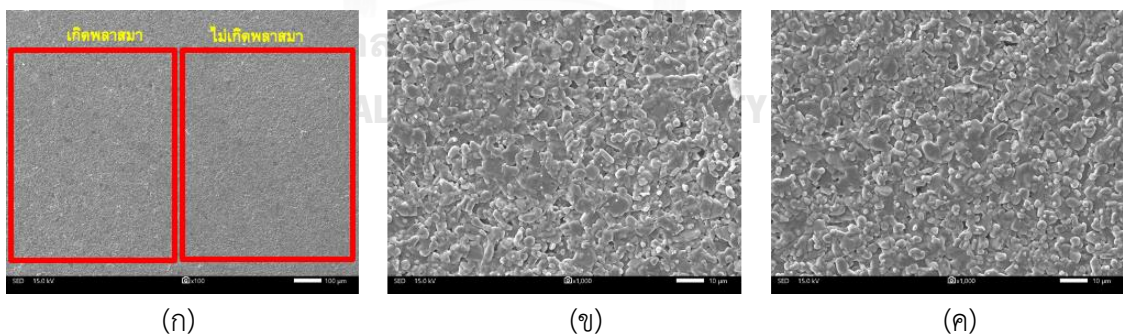
รูปที่ 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันเอาต์พุตของวัสดุ Al_2O_3



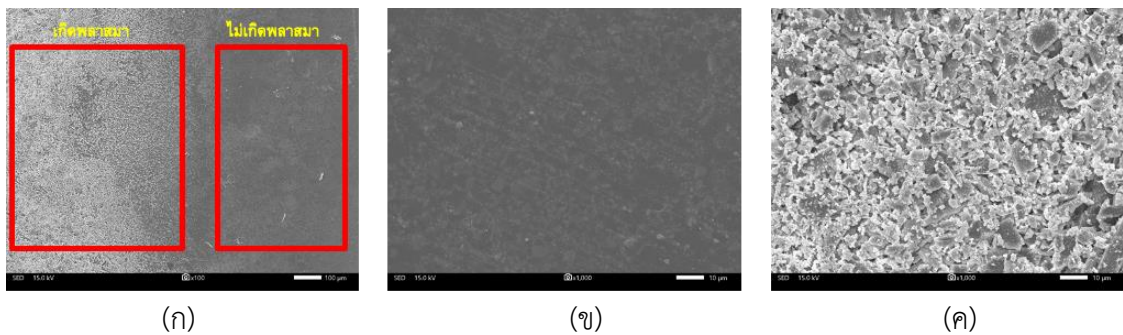
รูปที่ 38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันเอาต์พุตของวัสดุ FR4

4.2.2 ผลกระทบต่อวัสดุไดอิเล็กตริก

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDS (IT-500HR) เพื่อศึกษาพื้นผิวของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อทำการเปิดพลาสมาเป็นเวลา 10 นาที พบว่าวัสดุ FR4 เกิดความเสียหายขึ้นเนื่องจากผลของการกัดด้วยพลาสมา และความร้อนที่สะสม [35] ดังแสดงในรูปที่ 39 แต่ไม่พบความเสียหายในวัสดุ Al_2O_3 ดังแสดงในรูปที่ 40 ดังนั้นวัสดุ Al_2O_3 จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานที่ใช้ระยะเวลา



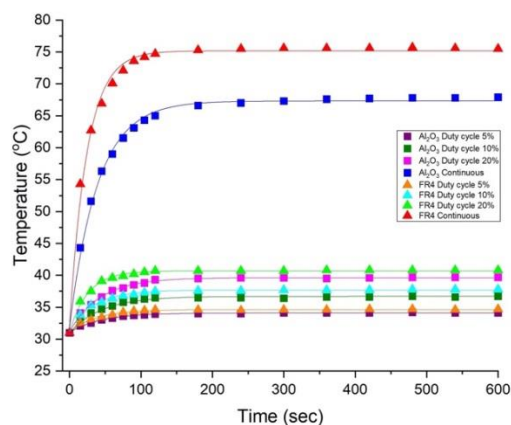
รูปที่ 39 ภาพวัสดุ Al_2O_3 : (ก) บริเวณที่เกิดพลาสมาและไม่เกิดพลาสมาที่กำลังขยาย 100 เท่า (ข) บริเวณไม่เกิดพลาสมาที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ค) บริเวณเกิดพลาสมาที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 40 ภาพวัสดุ FR4: (ก) บริเวณที่เกิดพลาสมากับไม่เกิดพลาสมาที่กำลังขยาย 100 เท่า (ข) บริเวณไม่เกิดพลาสมาที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ค) บริเวณเกิดพลาสมาที่กำลังขยาย 1000 เท่า

4.2.3 อุณหภูมิพื้นผิวไดอิเล็กตริก

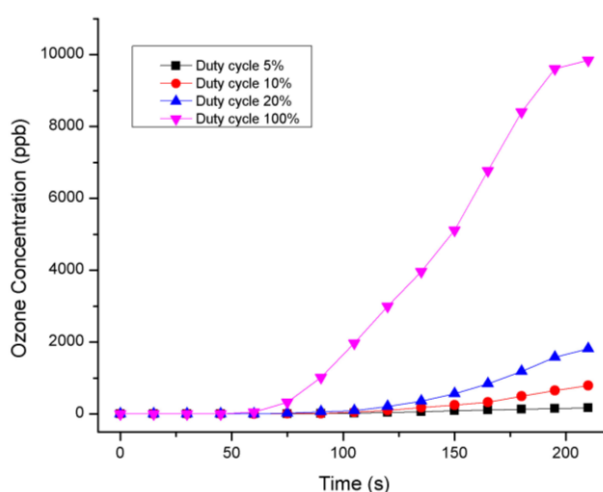
การศึกษาอุณหภูมิพื้นผิววัสดุไดอิเล็กตริก โดยการเปิดพลาสมาเป็นเวลา 10 นาที โดยโหมดการทำงานแบบต่อเนื่อง และการทำงานแบบพัลส์ที่ความถี่ 0.2 Hz Duty Cycle 5%, 10% และ 20% จากผลการทดลองในรูปที่ 41 วัสดุ Al_2O_3 มีอุณหภูมิพื้นผิววัสดุไดอิเล็กตริกต่ำกว่า FR4 เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุในด้านการนำความร้อนที่สูงกว่า และจากการเปิดการทำงานแบบต่อเนื่องจะมีอุณหภูมิกว่าการเปิดแบบพัลส์ โดยสูงถึง 75.5°C ซึ่งไม่เหมาะกับการนำไปใช้กับระบบปรับอากาศ ดังนั้นการเปิดแบบพัลส์จึงมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ โดยอุณหภูมิต่ำสุดที่ 34.1°C เมื่อค่า Duty Cycle ต่ำ [24] จากรูปที่ 52 แสดงอุณหภูมิพื้นผิวหลังจากเปิดพลาสมาเป็นเวลา 10 นาทีด้วย Infrared Camera โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดบริเวณขอบของขั้วไดอิเล็กโตรดที่เกิดพลาสมา และความร้อนจะสะสมที่วัสดุไดอิเล็กตริก [36]



รูปที่ 41 อุณหภูมิพื้นผิวไดอิเล็กตริกของ Al_2O_3 และ FR4 ขณะเกิดพลาสมาเป็นเวลา 10 นาที

4.2.4 ผลการศึกษาความเข้มข้นโอโซนไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จพลาสมา

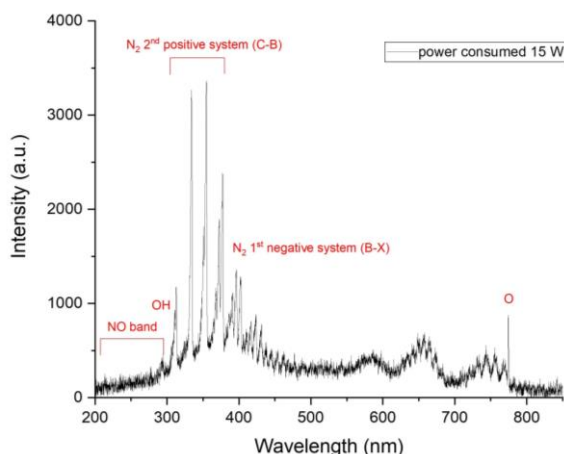
การศึกษาปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้นโดยการเปิดโหมดการทำงานแบบต่อเนื่องและแบบพัลส์พบว่า การเปิดแบบต่อเนื่องมีค่าโอโซนที่ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ ดังนั้นการใช้งานในโหมดพัลส์จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ [23] ที่ Duty Cycle 5%, 10%, 20% และ 100% มีความเข้มข้นของโอโซนเมื่อเปิดการทำงานของพลาสมาเป็นเวลา 210 วินาที คือ 174 ppb, 794 ppb, 1,820 ppb และ 9,849 ppb แสดงดังรูปที่ 42



รูปที่ 42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโอโซนกับเวลา

4.2.5 สเปกตรัมไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จพลาสมา

การศึกษาสเปกตรัมของไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จพลาสมาที่กำลังไฟฟ้า 15 W พบเส้นสเปกตรัม ได้แก่ Second Positive System (SPS), First Negative System (FNS), NO ที่ 297.58 nm, OH ที่ 309.00 nm และ O ที่ 777.32 nm ซึ่งเป็นสเปกตรัมที่พบได้เมื่อเกิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ [32] โดยสารอนุมูลอิสระ ได้แก่ OH และ NO มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งสเปกตรัมของพลาสมาของสารอนุมูลอิสระที่พบดังกล่าวจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นยูวีเกิดขึ้น ซึ่งแตกต่างจากระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ที่ไม่พบสเปกตรัมเกิดขึ้น เนื่องจากไม่เกิดการคายประจุแบบโกลว์ดีสชาร์จ



รูปที่ 43 สเปกตรัมของไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จพลาสมา

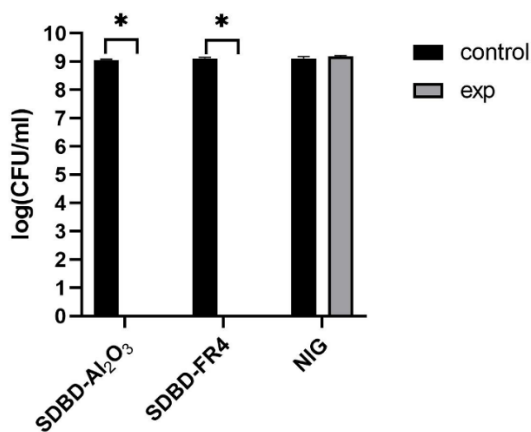
จากรูปที่ 54 นำอัตราส่วนความเข้มของสเปกตรัมของความยาวคลื่นที่ N_2^+ (FNS) ที่ 391.4 nm และ N_2 (SPS) ที่ 337.4 nm โดยฐานข้อมูลของ NIST ไปคำนวณในสมการที่ 2.11 จากการคำนวณพบว่าระบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จพลาสมาที่กำลังไฟฟ้า 15 W มีอุณหภูมิพลาสมา 0.82 eV

4.2.6 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อของไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จพลาสมา

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* โดยการเปิดพลาสมาไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ [26] เป็นเวลา 10 นาที ซึ่งเปรียบเทียบกับ Duty Cycle ที่ 5%, 10%, 20% และ 100% นอกจากนั้นยังเปรียบเทียบกับวัสดุไดอิเล็กทริกระหว่าง Al_2O_3 กับ FR4 จากการทดลองพบว่า ระบบพลาสมาไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จที่ทำมาจากวัสดุไดอิเล็กทริก Al_2O_3 กับ FR4 ที่ Duty Cycle 5%, 10%, 20% และ 100% สามารถกำจัดเชื้อได้ถึง 100%

	Control	Duty cycle			
		5%	10%	20%	100%
SDBD Al_2O_3					
SDBD FR4					

รูปที่ 44 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อของไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จพลาสมา



รูปที่ 45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อ *Escherichia coli* กับการเปรียบเทียบไดอิเล็กตริกแบรีเออร์ติสซาร์จพลาสมากับพลาสมาไอออนไนเซอร์



บทที่ 5

วิจารณ์และสรุปผล

จากการศึกษาและพัฒนาระบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จพลาสมาสำหรับการกำจัดเชื้อ เพื่อติดตั้งในระบบปรับอากาศ จากระบบเดิมคือพลาสมาไอออนไนเซอร์ มีข้อพิจารณาและข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.1 วิจารณ์ผล

5.1.1 ระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์

พลาสมาไอออนไนเซอร์มีการทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้า 5.0 kV_{p-p} กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 48.4 mA_{p-p} และความถี่แหล่งกำเนิดเพียง 50 Hz ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตอยู่ในเงื่อนไขที่สามารถสร้างการคายประจุแบบโกลว์ดิสชาร์จ ได้ แต่ไม่สามารถเกิดสถานะพลาสมาโดยการคายประจุแบบโกลว์ดิสชาร์จได้นั้น เนื่องจากความถี่จากแหล่งกำเนิดมีค่าน้อย ปกติจะใช้แรงดันไฟฟ้า 5-15 kV และความถี่ 10-100 kHz ในการสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ ส่งผลให้ไม่สามารถสร้างสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มปริมาณไม่มากพอที่จะทำให้อะตอมในอากาศเกิดกระบวนการไอออนไนเซชันได้ การที่พลาสมาไอออนไนเซอร์ไม่สามารถเกิดกระบวนการไอออนไนเซชันได้ส่งผลทำให้ไม่เกิดสถานะพลาสมาที่ระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์

5.1.2 ระบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

การออกแบบระบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จที่มีโครงสร้างแบบดิสชาร์จพื้นผิวมีขั้นตอนการก่อสร้างที่ง่ายและเหมาะสำหรับการนำไปผลิตในภาคส่วนของอุตสาหกรรม วัสดุไดอิเล็กทริกที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้คือ Al₂O₃ ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่า FR มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เนื่องจากสามารถเก็บประจุได้มาก โดยจะช่วยในเรื่องการอาร์คระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเนื่องจากหัวพลาสมามีขนาดเล็ก นอกจากนั้น Al₂O₃ ยังมีคุณสมบัติในการนำความร้อนที่ดี เหมาะสำหรับนำมาใช้ในระบบปรับอากาศ ที่กำลังไฟฟ้า 15 W ไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จพลาสมาจะมีแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 5.38 kV กระแสดิสชาร์จ 120 mA ความถี่แหล่งกำเนิดพลาสมา 35 kHz ซึ่งมีเงื่อนไขในการคายประจุแบบโกลว์ดิสชาร์จ ทำให้สามารถเกิดสถานะพลาสมาขึ้นได้ การทำงานของระบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จที่การทำงานความถี่ 0.2 Hz โดยมี Duty Cycle ที่ต่ำ 5% จะส่งผลให้ความเข้มข้นโอโซนและอนุภาคมิพินผิวไดอิเล็กทริกมีค่าที่ต่ำ จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในระบบปรับอากาศ และนอกจากนั้นยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้ 100% ในเวลา 10 นาที เมื่อเทียบกับค่า Duty Cycle ที่มากกว่านั้น

5.1.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ

จากการทดลองระบบพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อมากกว่าระบบพลาสมาไอออนไนเซอร์ การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโดยใช้ *Escherichia coli* ในการเปรียบเทียบ ผลการทดสอบยืนยันว่าระบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จพลาสมามีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อมากกว่าพลาสมาไอออนไนเซอร์ โดยสามารถลดปริมาณเชื้อได้ 100% บนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง (LB Agar)

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรออกแบบหัวกำเนิดพลาสมาให้มีความปลอดภัยมากขึ้น โดยการเพิ่มขนาดหรือความหนาของวัสดุไดอิเล็กทริก เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอาร์คขึ้น

5.2.2 ในการทดสอบสเปกตรัมพลาสมาด้วยเครื่อง OES ควรเพิ่มเลนส์สำหรับรวมแสง เพื่อให้ความเข้มแสงมีค่าสูงที่สุด ทำให้มีความแม่นยำในการคำนวณอุณหภูมิอิเล็กตรอน

5.2.3 ในการนำไปใช้งานควรลดค่าความถี่และ Duty Cycle เพื่อไม่ให้ความเข้มข้นไอออนและอุณหภูมิพื้นผิวไดอิเล็กทริกสูงเกินไป

5.2.4 วัสดุสำหรับทำขั้วอิเล็กโทรดควรนำไปเคลือบผิวกับวัสดุอื่น ๆ เพื่อไม่ให้เกิดสนิม

บรรณานุกรม

1. Morgan, N., *Atmospheric pressure dielectric barrier discharge chemical and biological applications*. International Journal of Physical Sciences, 2009. **4**(13): p. 885-892.
2. Rød, S.K., et al., *Cold atmospheric pressure plasma treatment of ready-to-eat meat: Inactivation of Listeria innocua and changes in product quality*. Food microbiology, 2012. **30**(1): p. 233-238.
3. Domonkos, M., et al., *Applications of cold atmospheric pressure plasma technology in medicine, agriculture and food industry*. Applied Sciences, 2021. **11**(11): p. 4809.
4. Brown, I.G., *The physics and technology of ion sources*. 2004: John Wiley & Sons.
5. Tendero, C., et al., *Atmospheric pressure plasmas: A review*. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2006. **61**(1): p. 2-30.
6. Go, D.B., *Gaseous ionization and ion transport: An introduction to gas discharges*. Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame, 2012.
7. Ibrahim, F., *Design and Construction of low-Pressure DC-Sputtering plasma system for preparing Gas Sensors*. University of Baghdad, PhD. Thesis, 2013.
8. Janda, M., V. Martišovič, and Z. Machala, *Transient spark: a dc-driven repetitively pulsed discharge and its control by electric circuit parameters*. Plasma Sources Science and Technology, 2011. **20**(3): p. 035015.
9. Janda, M., et al., *The streamer-to-spark transition in a transient spark: a dc-driven nanosecond-pulsed discharge in atmospheric air*. Plasma Sources Science and Technology, 2012. **21**(4): p. 045006.
10. Arnold, T. and G. Böhm, *Application of atmospheric plasma jet machining (PJM) for effective surface figuring of SiC*. Precision engineering, 2012. **36**(4): p. 546-553.
11. Subedi, D.P., U.M. Joshi, and C.S. Wong, *Dielectric barrier discharge (DBD) plasmas and their applications*, in *Plasma Science and Technology for*

- Emerging Economies*. 2017, Springer. p. 693-737.
12. Kim, J., et al., *Discharge characteristics and plasma erosion of various dielectric materials in the dielectric barrier discharges*. *Applied Sciences*, 2018. **8**(8): p. 1294.
 13. Minkin, V.I., et al., *Basic principles of the theory of dielectrics*, in *Dipole Moments in Organic Chemistry*. 1970, Springer. p. 1-40.
 14. Zulkifli, N.A.B., et al. *Review on Advances of Functional Material for Additive Manufacturing*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. IOP Publishing.
 15. Kumar, B., B.K. Kaushik, and Y.S. Negi, *Perspectives and challenges for organic thin film transistors: Materials, devices, processes and applications*. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2014. **25**(1): p. 1-30.
 16. Qureshi, A.A., et al. *Performance analysis of FR-4 substrate for high frequency microstrip antennas*. in *2011 China-Japan Joint Microwave Conference*. 2011. IEEE.
 17. Subedi, D.P., et al., *Generation and diagnostics of atmospheric pressure dielectric barrier discharge in argon/air*. *Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP)*, 2017. **55**(2): p. 155-162.
 18. Qayyum, A., et al., *Characterization of argon plasma by use of optical emission spectroscopy and Langmuir probe measurements*. *International Journal of Modern Physics B*, 2003. **17**(14): p. 2749-2759.
 19. Kittel, C., *Introduction to solid state physics.(7th edn)*, John Willey and Sons Inc. New York, 1996: p. 308.
 20. Dauskardt, R.H., D.K. Veirs, and R.O. Ritchie, *Spatially Resolved Raman Spectroscopy Study of Transformed Zones in Magnesia-Partially-Stabilized Zirconia*. *Journal of the American Ceramic Society*, 1989. **72**(7): p. 1124-1130.
 21. Hübschen, G., et al., *Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods*. 2016: Woodhead publishing.
 22. Jiang, S.-Y., A. Ma, and S. Ramachandran, *Negative air ions and their effects on human health and air quality improvement*. *International journal of molecular*

- sciences, 2018. **19**(10): p. 2966.
23. Timmermann, E., et al., *Indoor air purification by dielectric barrier discharge combined with ionic wind: physical and microbiological investigations*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018. **51**(16): p. 164003.
 24. Abbasi, A.A., et al. *Thermal Characteristics of Plasma Actuators in Turbulent Boundary Layer*. in *AIAA AVIATION 2020 FORUM*. 2020.
 25. Law, V.J., et al., *Handheld Flyback driven coaxial dielectric barrier discharge: Development and characterization*. Review of Scientific Instruments, 2008. **79**(9): p. 094707.
 26. Han, L., et al., *Mechanisms of inactivation by high-voltage atmospheric cold plasma differ for Escherichia coli and Staphylococcus aureus*. Applied and environmental microbiology, 2016. **82**(2): p. 450-458.
 27. Saravanan, M., M. Ganesan, and S. Ambalavanan, *An in situ generated carbon as integrated conductive additive for hierarchical negative plate of lead-acid battery*. Journal of Power Sources, 2014. **251**: p. 20-29.
 28. Yun, K.-S., et al., *Preparation of carbon blacks by liquid phase plasma (LPP) process*. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2013. **13**(11): p. 7381-7385.
 29. Qu, M., F. Nilsson, and D.W. Schubert, *Effect of filler orientation on the electrical conductivity of carbon Fiber/PMMA composites*. Fibers, 2018. **6**(1): p. 3.
 30. Lin, H.-F. and J.-M. Lin, *Generation and determination of negative air ions*. Journal of Analysis and Testing, 2017. **1**(1): p. 1-6.
 31. Akkara, S. and T. Jarin. *Experimental Implementation on HVDC from Single Phase AC using Multiplier Circuit*. in *2018 International Conference on Circuits and Systems in Digital Enterprise Technology (ICCSDET)*. 2018. IEEE.
 32. Bußler, S., et al., *Impact of cold atmospheric pressure plasma on physiology and flavonol glycoside profile of peas (Pisum sativum 'Salamanca')*. Food Research International, 2015. **76**: p. 132-141.
 33. Meschke, S., et al., *The effect of surface charge, negative and bipolar ionization on the deposition of airborne bacteria*. Journal of applied microbiology, 2009.

- 106(4):** p. 1133-1139.
34. Rodrigues, F., J. Pascoa, and M. Trancossi. *Experimental analysis of alternative dielectric materials for DBD plasma actuators*. in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2018. American Society of Mechanical Engineers.
35. Mastanaiah, N., J.A. Johnson, and S. Roy, *Effect of dielectric and liquid on plasma sterilization using dielectric barrier discharge plasma*. *PloS one*, 2013. **8(8):** p. e70840.
36. Ozkan, A., et al., *How do the barrier thickness and dielectric material influence the filamentary mode and CO₂ conversion in a flowing DBD?* *Plasma Sources Science and Technology*, 2016. **25(4):** p. 045016.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นฤสรณ์ แน่นหนา
วัน เดือน ปี เกิด	8 เมษายน 2540
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	1/1 หมู่ 5 ถนนพระราม 2 แขวงสามด้า เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร 10150
รางวัลที่ได้รับ	รางวัลเหรียญเงิน การประกวดผลงานนวัตกรรมสายอุดมศึกษา ประจำปี 2564 เรื่อง "การออกแบบและสร้างเครื่องฟอกอากาศสำหรับโรงพยาบาล"



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY