

การพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาความหนาแน่นสูงที่ความดันบรรยากาศ  
แบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

นางสาวลีดดา มิตรายน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DEVELOPMENT OF HIGH-DENSITY ATMOSPHERIC  
DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE PLASMA SOURCE

Miss Leeda Mitrayon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาความหนาแน่นสูงที่ ความดันบรรยากาศแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ
โดย	นางสาวลีดา มิตรายน
สาขาวิชา	นิเวศศาสตร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วัชชัย อ่อนจันทร์)

ลีดา มิตรายน: การพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาความหนาแน่นสูงที่ความดันบรรยากาศแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (DEVELOPMENT OF HIGH-DENSITY ATMOSPHERIC DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE PLASMA SOURCE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร. พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, 131 หน้า.

ปัจจุบัน พลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศเริ่มมีบทบาทเพิ่มขึ้นในอุตสาหกรรม การแพทย์ และงานวิจัยต่าง ๆ อย่างไรก็ตามพลาสมาในลักษณะนี้มักจะมีความหนาแน่นที่ค่อนข้างต่ำจึงมีข้อจำกัดทางด้านประสิทธิภาพและประเภทของงานที่นำไปใช้ งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบโคแอ็กเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จเพื่อกำเนิดพลาสมาความหนาแน่นสูงที่ความดันบรรยากาศ และการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงขนาด 30 วัตต์ ที่ความถี่ระหว่าง 20 - 100 kHz แรงดันไฟฟ้า 40 kV<sub>pp</sub> เพื่อใช้ขับเคลื่อนแหล่งกำเนิดพลาสมา ซึ่งพบว่าแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเมื่อต่อกับแหล่งกำเนิดพลาสมาที่พัฒนาขึ้นที่ 30 kV<sub>pp</sub> มีช่วงความถี่ตอบสนองอยู่ระหว่าง 67.8 - 74 kHz และที่ 20 kV<sub>pp</sub> มีช่วงระหว่าง 65.28 - 76.65 kHz สำหรับเครื่องกำเนิดพลาสมา ได้ทำการวิเคราะห์หาอุณหภูมิและความหนาแน่นอิเล็กตรอนของพลาสมาที่ได้โดยใช้เครื่องสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสง (Optical Emission Spectrometer : OES) ในการวัดสเปกตรัม ใช้วิธีการเขียนกราฟของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's Plot) ในการหาอุณหภูมิ และใช้ความสัมพันธ์ของสมการซาฮาโบลทซ์มันน์ (Saha-Boltzmann equation) ในการหาความหนาแน่น นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลกระทบของขนาดและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแหล่งกำเนิดพลาสมาที่มีต่อความเข้มของสเปกตรัม อุณหภูมิ และความหนาแน่นของพลาสมา ซึ่งพบว่า ด้วยความสามารถของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีอยู่ในขณะนี้ สเปกตรัมของอาร์กอนพลาสมาที่ได้ยังมีลักษณะคล้ายคลึงกันที่ขนาดและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ทดลอง และอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ได้อยู่ระหว่าง 1.67 eV ถึง 1.78 eV ส่วนความหนาแน่นอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง  $0.14 \times 10^{24} m^{-3}$  ถึง  $3.87 \times 10^{24} m^{-3}$

ภาควิชา..... วิศวกรรมนิวเคลียร์..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา..... นิวเคลียร์เทคโนโลยี..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา..... 2555..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# # 5270470321: MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : LOW-TEMPERATURE ATMOSPHERIC PLASMA SOURCE/  
DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE

LEEDA MITRAYON: DEVELOPMENT OF HIGH-DENSITY ATMOSPHERIC  
DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE PLASMA SOURCE. ADVISOR:  
PHONGPHAETH PENGVANICH, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST.PROF.SUVIT  
PUNNACHAIYA, 131 pp.

Low-temperature atmospheric plasma has played an increasingly important role in various industrial, medical, and research applications. Nevertheless, this type of plasma usually has low density which imposes a limit on its effectiveness and the type of work that it can be applied to. In this research, a coaxial dielectric barrier discharge plasma source has been developed to produce low-temperature atmospheric high-density plasma. A 30-W high-voltage power supply for driving the plasma source has also been developed with unloaded frequency between 20 – 100 kHz, and maximum output voltage of 40 kV<sub>pp</sub>. Its frequency response when connected to the plasma source is between 67.8 – 74 kHz at 30kV<sub>pp</sub>, and 65.28 – 76.65 kHz at 20 kV<sub>pp</sub>. The electron temperature and density of the generated plasma have been determined using the optical emissions spectroscopy (OES). The Boltzmann plot technique is used for the electron temperature calculation, whereas the electron density is determined from the Saha–Eggert equation. Effects of the driving amplitude and frequency on the temperature, density, and spectrum of the plasma have been studied. Similar plasma spectra have been obtained using different combinations of applicable driving amplitude and frequency. The electron temperatures are measured between 1.67 and 1.78 eV, and the electron densities are found between  $0.14 \times 10^{24} m^{-3}$  and  $3.87 \times 10^{24} m^{-3}$ .

Department : Nuclear Engineering

Student's Signature .....

Field of Study : Nuclear Technology

Advisor's Signature .....

Academic Year : 2012

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความช่วยเหลือของ อ.ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งได้ตรวจทานแก้ไขต้นฉบับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมนิเวศศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน

ขอขอบคุณ หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและนิเวศวิทยาริฟชั่น ที่ได้มอบทุนสนับสนุนงานวิจัย ให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ กลุ่มวิจัยพลาสมา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนให้ใช้เครื่องมือวัดสเปกตรัมสำหรับงานวิจัยนี้ ได้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ รศ.ดร. ธีรวรรณ บุญญวรรณ ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ นายพงศกร กองผัด ที่แนะนำงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และสนับสนุนช่วยเหลือในทุกด้าน อีกทั้ง นายกอบชัย จันทร์ศรี นายธิตี เรืองสีสำราญ และ นายเจตรจันท์ จันทรนุ้ย ที่คอยช่วยเหลือในทุกด้าน ณ ห้องปฏิบัติการนิเวศวิทยาริฟชั่นอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนๆ พี่ๆ แห่งภาควิชาวิศวกรรมนิเวศศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บิดา มารดา ครอบครัว และนิสิตปริญญาโท นิสิตปริญญาเอกของภาควิชานิเวศวิทยาเทคโนโลยีทุกท่านที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. ทฤษฎี.....	6
2.1 นิยามของพลาสมา.....	6
2.2 อันตรกิริยาของพลาสมา.....	9
2.3 แหล่งกำเนิดพลาสมา .....	12
2.4 ระบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ.....	13
2.5 เจ็ทพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ .....	18
2.6 คุณสมบัติพื้นฐานของสารไดอิเล็กทริก .....	19
2.7 ค่าความจุ .....	24
2.8 สเปกตรัม.....	27
2.9 สมบัติของพลาสมา .....	28
2.10 การคำนวณและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมา.....	29
2.11 ระบบการตรวจวัดสเปกตรัม .....	29
2.12 การคำนวณและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมา.....	30

บทที่	หน้า
3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมา.....	35
3.2 การคำนวณสนามไฟฟ้า.....	46
4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	52
4.1 การทดสอบสมรรถนะของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง ความถี่สูง.....	52
4.2 ผลการทดสอบลำเปลวพลาสมาของโปรบกำเนิดพลาสมา.....	54
4.3 การทดลองศึกษาอุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมาที่กำเนิดโดย แหล่งกำเนิดความถี่ต่ำ.....	56
4.4 การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสเปกตรัมของพลาสมาอาร์กอน ที่กำเนิดโดยแหล่งกำเนิดความถี่สูง .....	58
4.5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมพลาสมาของความถี่และ แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปที่อัตราไหลของก๊าซคงที่.....	65
4.6 การศึกษาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนพลาสมาของอาร์กอนที่กำเนิดโดย แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง.....	72
4.7 การศึกษาความหนาแน่นของอาร์กอนพลาสมาที่กำเนิดโดยแหล่งกำเนิด ไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง.....	74
4.8 การศึกษาการกระเจิงแสงของสเปกตรัมที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิอิเล็กตรอน ในพลาสมา.....	75
5. สรุปวิจารณ์ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	78
5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย.....	78
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	79
รายการอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก.....	84
ภาคผนวก ก ตารางแสดงฐานข้อมูลสเปกตรัม.....	85
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิและความหนาแน่นอิเล็กตรอน.....	98
ภาคผนวก ค ตัวอย่างสเปกตรัมพลาสมาที่เกิดจากความถี่.....	104



บทที่	หน้า
ภาคผนวก ง ส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความดันสูง ความถี่สูง.....	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	131

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ค่าความถี่ที่ทำให้แรงดันขาออกสูงสุดของโหลดแต่ละชนิด.....	52
4.2	ย่านความถี่ที่สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้า 30kV <sub>pp</sub> และ 20kV <sub>pp</sub> ของโหลดแต่ละชนิด.....	54
4.3	เปรียบเทียบขนาดและวัสดุของโพรบกำเนิดพลาสมาแบบที่ 1 และแบบที่ 3....	54
4.4	แสดงเงื่อนไขเพื่อหาระยะทางที่เหมาะสมในการกำเนิดพลาสมา.....	58
4.5	แสดงเงื่อนไขเพื่อหาระยะเวลาที่ใช้ในการวัดสเปกตรัมที่เหมาะสม.....	61
4.6	แสดงเงื่อนไขของอัตราไหลที่มีผลกระทบต่อสเปกตรัม.....	63
4.7	แสดงเงื่อนไขเพื่อหาความสัมพันธ์ของอัตราไหลของก๊าซอาร์กอนที่ความถี่คงที่.....	65
4.8	แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิอิเล็กตรอนที่ความถี่ 64 kHz และ 66 kHz ณ อัตราไหลก๊าซ 8 l/min โดยวัด 3 ครั้ง.....	72
4.9	แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ความถี่ 64, 66, 68 และ 70 kHz แรงดันไฟฟ้า 16 ถึง 28 kV <sub>pp</sub> อัตราไหลก๊าซ 8 l/min คงที่.....	73
4.10	การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของอิเล็กตรอน ความถี่แรงดันไฟฟ้า ที่อัตราไหลของก๊าซ 8 l/min คงที่.....	74
4.11	แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ความถี่ 64, 66, 68 และ 70 kHz แรงดันไฟฟ้า 16 ถึง 28 kV <sub>pp</sub> อัตราไหลก๊าซ 8 l/min คงที่.....	74
4.12	แสดงผลการศึกษาสเปกตรัมในส่วนที่ 1.....	76
4.13	แสดงอุณหภูมิอิเล็กตรอนเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างโพรบกำเนิดพลาสมาและหัววัด.....	76
4.14	แสดงผลการศึกษาสเปกตรัมในส่วนที่ 2.....	77
4.15	แสดงอุณหภูมิของอิเล็กตรอนเปรียบเทียบอัตราไหลของก๊าซอาร์กอน.....	77

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	การเปลี่ยนสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงาน (ก) ของแข็ง (ข) ของเหลว (ค) ก๊าซ (ง) พลาสมา.....	6
2.2	แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคก๊าซที่เป็นกลาง และภายใต้คุณสมบัติแบบ Collective Behavior ในพลาสมา (ก) การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุในพลาสมา (ข) การเคลื่อนที่ของก๊าซแบบ Brownian ของโมเลกุลของก๊าซที่เป็นกลาง.....	8
2.3	แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิด Corona Discharge .....	14
2.4	โครงสร้างของ Planar (Planar DBD Electrode) 3 แบบ.....	16
2.5	โครงสร้างของ Coaxial (Cylindrical DBD Electrode) 3 แบบ.....	16
2.6	โครงสร้างของ Dielectric Surface Discharge.....	16
2.7	โครงสร้างของ Coplanar Discharge.....	17
2.8	โครงสร้างเจ็ดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ.....	18
2.9	โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน.....	24
2.10	โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบทรงกระบอก (ก) และทรงกลม (ข).....	26
2.11	(ก) แสดงเครื่องวัดสเปกตรัมรุ่น HR4000CG (ข) หัววัดแบบเส้นใยแก้วนำแสง..	30
2.12	แสดงการประมวลผลข้อมูลสเปกตรัมจากโปรแกรม Ocean Optic SpectraSuite .....	30
2.13	ตัวอย่างกราฟโพลทซ์มันน์ของพลาสมาอาร์กอน.....	33
3.1	แผนภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลับแรงดันสูงความถี่สูง.....	36
3.2	วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าปรับค่าได้แบบสวิตชิง.....	36
3.3	วงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง.....	37
3.4	วงจรแสดงผลความถี่.....	38
3.5	แสดงส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลับแรงดันสูงความถี่.....	39
3.6	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลับแรงดันสูงความถี่สูง .....	40
3.7	แผนภาพและภาพตัดขวางของโคแอ็กเซียล DBD ที่ทำการออกแบบขึ้น.....	40

ภาพที่	หน้า
3.8	โพรบที่ใช้แก้วเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก..... 41
3.9	แผนภาพตัดขวางของโคแอ็กเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออติสซาร์จที่ทำการ ออกแบบ..... 41
3.10	โพรบที่ใช้เทฟลอนเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก..... 42
3.11	การใช้โพรบแบบที่ 1 ทดสอบกำเนิดลำพลาสมา (ก) รูปลักษณะของโพรบแบบที่ 1 วัสดุไดอิเล็กทริกเป็นแก้วโบโรซิลิเกต ใช้ไม่เป็นวัสดุอุดส่วนปลายหัวอิเล็กโทรด ด้านใน (ข) พลาสมาที่กำเนิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่ต่ำ 500 – 1000 เฮิร์ตซ์ (ค) พลาสมาที่กำเนิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูง 20 – 100 กิโลเฮิร์ตซ์..... 44
3.12	การใช้โพรบแบบที่ 2 ทดสอบกำเนิดลำพลาสมา (ก) รูปลักษณะของโพรบแบบที่ 2 วัสดุไดอิเล็กทริกเป็นแก้วไพเรกซ์ใช้อิเล็กโทรด ด้านในเป็นทองเหลืองที่ปลายมีรูปร่างต่างๆ กำเนิดพลาสมาจากแหล่งกำเนิด ความถี่สูง 20 – 40 กิโลเฮิร์ตซ์ (ข) รูปทรงของปลายอิเล็กโทรดด้านใน 3 รูปแบบที่ใช้ทดลอง (ค) ลำพลาสมาที่กำเนิดจากปลายทองเหลืองรูปร่างแหลม (ง) ลำพลาสมาที่กำเนิดจากปลายทองเหลืองรูปร่างมน (จ) ลำพลาสมาที่กำเนิดจากปลายทองเหลืองรูปร่างแบน ..... 45
3.13	การใช้โพรบแบบที่ 3 ทดสอบกำเนิดพลาสมา (ก) พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 kVpp ความถี่ 74 kHz อัตราไหลของก๊าซ อาร์กอน 6l/min (ข) พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 30 kVpp ความถี่ 74 kHz อัตราไหลของก๊าซ อาร์กอน 2l/min (ค) พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 30 kVpp ความถี่ 74 kHz อัตราไหลของก๊าซ อาร์กอน 8l/min (ง) พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 30 kVpp ความถี่ 74 kHz อัตราไหลของก๊าซ อาร์กอน 6l/min (จ) ปลายลำพลาสมาในบรรยากาศกำลังเคลื่อนเข้าหาปลายนิ้ว..... 46

ภาพที่	หน้า	
3.14	อีเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วมค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวน ชั้นที่ 1 (E <sub>1</sub> ) คือ อากาศ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 15 kV.....	47
3.15	ความสัมพันธ์ความเครียดสนามไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของอากาศและเทปลอน..	49
3.16	แผนภาพแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูงแรงดันสูงและระบบการวัดพลาสมา.....	50
3.17	ระบบการกำเนิดพลาสมาและระบบการวัดสเปกตรัมของพลาสมาด้วย OES.....	50
3.18	ระบบการวัดด้วยเครื่องวัดสเปกตรัมแบบ OES.....	51
4.1	ผลของแรงดันไฟฟ้าเมื่อแปรเปลี่ยนความถี่ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า : (ก) ไม่ใส่ไหลด (ข) ไหลดเป็นตัวต้านทาน 10 MΩ ขนาด 10 W (ค) ไหลดเป็นชุดกำเนิด พลาสมาแบบ โคแอ็กเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (ง) ไหลดเป็นชุด กำเนิดพลาสมาแบบโคแอ็กเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จโดยป้อนก๊าซ อาร์กอนที่อัตราไหล 6 l/min.....	53
4.2	ผลของย่านความถี่ที่สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าของไหลดแต่ละชนิด : (ก) ผล ของไหลด ที่สามารถรักษาแรงดันในช่วง 30 kV <sub>pp</sub> (ข) ผลของไหลดที่สามารถ รักษาแรงดันในช่วง 20 kV <sub>pp</sub> .....	54
4.3	ส่วนประกอบของโพรบกำเนิดพลาสมา.....	55
4.4	ลักษณะเปลวลำพลาสมา: (ก) โพรบกำเนิดพลาสมาแบบที่ 1 (ข) โพรบกำเนิดพลาสมาแบบที่ 2.....	55
4.5	ผลของการวิเคราะห์สเปกตรัมของอาร์กอนพลาสมา: (ก) เส้นสเปกตรัมที่ความถี่ 200 เฮิร์ตซ์ และแรงดันไฟฟ้า 1626.36 โวลต์ (ข) การคำนวณหาอุณหภูมิของ อีเล็กตรอนจากค่าความชัน.....	57
4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอีเล็กตรอนและแรงดันไฟฟ้าในย่าน ความถี่ 200, 320 และ 340 เฮิร์ตซ์.....	57
4.7	เส้นสเปกตรัมของอาร์กอนพลาสมาแรงดันไฟฟ้า 13.9 kV <sub>pp</sub> ความถี่ 73.443 kHz อัตราไหลก๊าซ 4 l/min วัด 1 sec ภาพ (ก) วัดที่ระยะห่างจากหัววัด 6 cm และ ภาพ (ข) วัดที่ระยะห่างจากหัววัด 12 cm .....	59
4.8	กราฟโบลทซ์มันน์แสดงอุณหภูมิอีเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมาที่ระยะ 6 cm จากหัววัด.....	59

ภาพที่	หน้า	
4.9	กราฟโพลทซ์มันน์แสดงอุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมาที่ระยะ 12 cm จาก หัววัด.....	60
4.10	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสเปกตรัมพลาสมาของพีค 763 nm กับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ อัตราไหลก๊าซ 6 l/min วัดครั้งที่ 1.....	61
4.11	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสเปกตรัมพลาสมาของพีค 763 nm กับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ อัตราไหลก๊าซ 6 l/min วัดครั้งที่ 2.....	62
4.12	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสเปกตรัมพลาสมาของพีค 763 nm กับความถี่ที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ อัตราไหลก๊าซ 6 l/min วัดครั้งที่ 1.....	62
4.13	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสเปกตรัมพลาสมา 763 nm กับความถี่ที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ อัตราไหลก๊าซ 6 l/min วัดครั้งที่ 2.....	63
4.14	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) ที่อัตราไหลของก๊าซต่าง ๆ ในพีคที่ความยาวคลื่น 763.25 nm .....	64
4.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) ที่อัตราไหลของก๊าซต่าง ๆ ในพีคที่ความยาวคลื่น 772.11nm .....	64
4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) แรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) เปรียบเทียบกับค่าความถี่ต่าง ๆ ที่อัตราไหล 2 l/min .....	66
4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) แรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) เปรียบเทียบกับค่าความถี่ต่าง ๆ ที่อัตราไหล 4 l/min .....	66
4.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) แรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) เปรียบเทียบกับค่าความถี่ต่าง ๆ ที่อัตราไหล 6.5 l/min .....	67
4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) แรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) เปรียบเทียบกับค่าความถี่ต่าง ๆ ที่อัตราไหล 8 l/min .....	67
4.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และความถี่ (kHz) และเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่อัตราไหลก๊าซ 2 l/min .....	68
4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และความถี่ (kHz) และเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่อัตราไหลก๊าซ 4 l/min .....	68

ภาพที่	หน้า
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และความถี่ (kHz) และเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆที่อัตราไหลก๊าซ 6.5 l/min .....	69
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และความถี่ (kHz) และเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆที่อัตราไหลก๊าซ 8 l/min .....	69
4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า (kV <sub>pp</sub> ) และเปรียบเทียบอัตราไหลต่างๆที่ความถี่ 64 kHz .....	70
4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า (kV <sub>pp</sub> ) และเปรียบเทียบอัตราไหลต่างๆที่ความถี่ 66 kHz .....	70
4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า (kV <sub>pp</sub> ) และเปรียบเทียบอัตราไหลต่างๆที่ความถี่ 68 kHz .....	71
4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า (kV <sub>pp</sub> ) และเปรียบเทียบอัตราไหลต่างๆที่ความถี่ 70 kHz .....	71
4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า (kV <sub>pp</sub> ) และเปรียบเทียบอัตราไหลต่างๆที่ความถี่ 72 kHz .....	72
4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอน (eV) และแรงดันไฟฟ้า (kV <sub>pp</sub> ) ที่ความถี่ 64, 66, 68 และ 70 kHz.....	73
4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นอิเล็กตรอน และแรงดันไฟฟ้า (kV <sub>pp</sub> ) ที่ความถี่ 64, 66, 68 และ 70 kHz.....	75

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

พลาสมา (Plasma) เป็นสถานะที่สี่ของสสารซึ่งเกิดจากการให้พลังงานแก่อะตอมของก๊าซที่เป็นกลาง จนเกิดการไอออไนซ์ (Ionize) เป็นพลาสมา โดยปกติแล้วเมื่อให้พลังงานกับสสารที่อยู่ในสถานะของแข็งจนถึงจุดหลอมเหลวจะทำให้ของแข็งกลายเป็นของเหลว จากของเหลวเมื่อให้พลังงานเพิ่มขึ้นไปอีกจะเปลี่ยนสถานะไปเป็นก๊าซและในที่สุดเมื่อให้พลังงานจนกระทั่งอะตอมของก๊าซที่เป็นกลางเกิดการไอออไนซ์เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนและไอออนประจุบวก เรียกว่า “พลาสมา” [1]

ในปัจจุบันมีการวิจัยและประยุกต์ใช้งานพลาสมากันอย่างแพร่หลาย อาทิ การเคลือบ (Coating) และการปรับปรุง (Treatment) ผิวหน้าวัสดุให้มีคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น การเพิ่มคุณสมบัติการทนต่อการขีดข่วนด้วยกระบวนการ (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) หรือ การเพิ่มคุณสมบัติการกันน้ำด้วยกระบวนการโพลิเมอร์โดยพลาสมา (Plasma Polymerizations) [2] การเชื่อมหรือตัดแผ่นโลหะ การใช้พลาสมาช่วยในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ และการผลิตพลังงานด้วยปฏิกิริยาฟิวชัน เป็นต้น นอกจากนี้การประยุกต์ใช้พลาสมาที่กำลังได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ อีกด้านหนึ่งคือการใช้พลาสมาในทางการแพทย์ หรือที่เรียกว่า “Plasma Medicine” [3] ซึ่งเป็นการนำพลาสมาไปใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันหรือการรักษาโรค เช่น การฆ่าเชื้อ การผ่าตัด และการผลิตยา เป็นต้น

ปกติแล้ววิธีการกระตุ้นให้อะตอมของก๊าซที่เป็นกลางเกิดการไอออไนซ์เป็นพลาสมาสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีการผลิตพลาสมาจากแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge หรือ DBD) [4] เนื่องจากสามารถสร้างพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศได้ (Low-Temperature Atmospheric Plasma หรือ LTAP) [5] การผลิตพลาสมาด้วยวิธีนี้เริ่มได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในปัจจุบันเนื่องจากมีข้อดีหลากหลายแต่ที่สำคัญ คือ ไม่จำเป็นต้องปฏิบัติงานภายใต้ระบบสุญญากาศ ทำให้สามารถหาอุปกรณ์ใช้งานได้ง่ายและมีราคาประหยัด และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง ปฏิกิริยาทางเคมีของพลาสมาที่จะก่อให้เกิดพลาสมาอุณหภูมิต่ำ หรือ สูง ขึ้นอยู่กับการป้อนกำลังไฟฟ้าให้แก่แหล่งกำเนิดของระบบพลาสมา ซึ่งพลาสมาอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Plasma หรือ LTP) [5] สามารถที่จะนำไปใช้ทางการแพทย์ได้โดยมีอุณหภูมิในระดับเดียวกับอุณหภูมิห้อง เนื่องจาก LTP มีการแตกตัวไม่สมบูรณ์ ภายในจึงประกอบไปด้วย



ไอออนบวก (ประจุบวก) อิเล็กตรอน (ประจุลบ) และโมเลกุลที่ไม่ได้แตกตัว (ไม่มีประจุ) อุณหภูมิโดยรวมของ LTP จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของโมเลกุลของก๊าซซึ่งมีจำนวนมากกว่าไอออนบวกและอิเล็กตรอน จุดเด่นที่ทำให้ LTP ได้รับความสนใจในการใช้ประโยชน์ทางการแพทย์เนื่องจากลักษณะเด่น 2 ประการใหญ่ คือ ประการแรกพลังงานของอิเล็กตรอนใน LTP มีระดับสูงเพียงพอที่จะสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและการเปลี่ยนแปลงดีเอ็นเอ โปรตีนและเยื่อหุ้มเซลล์ได้ ประการที่สอง คือ โมเลกุลของก๊าซมีอุณหภูมิใกล้เคียงหรืออยู่ที่ระดับเดียวกับอุณหภูมิห้อง ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อเนื้อเยื่อหรือวัสดุที่ไวต่อความร้อน

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาความหนาแน่นสูงที่ความดันบรรยากาศแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge หรือ DBD) สำหรับนำไปใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อทางการแพทย์ (Plasma Sterilization) [6] ในปัจจุบันการใช้พลาสมาอุณหภูมิต่ำเพื่อฆ่าเชื้อโรคยังมีน้อย ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการที่เครื่องมือยังมีราคาแพงเมื่อเทียบกับเครื่องมือที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคแบบอื่น และการศึกษาพบว่ายังอยู่ในขั้นเริ่มต้น ดังนั้นเพื่อการประยุกต์ใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพและได้รับประโยชน์สูงสุดจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาเพื่อพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาที่เหมาะสม ซึ่งนับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค รวมถึงความปลอดภัยและความสะดวกของผู้ใช้งาน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาความหนาแน่นสูงที่ความดันบรรยากาศแบบ Dielectric Barrier Discharge (DBD)

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ Dielectric Barrier Discharge (DBD)

1.3.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเพื่อทำการหาอุณหภูมิความหนาแน่นอิเล็กตรอน และไอออน ที่มีอยู่ในพลาสมา

1.3.3 ศึกษาความหนาแน่น อุณหภูมิ และสเปกตรัมของพลาสมา

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ทำการเลือกก๊าซและจัดหาวัสดุที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมา

1.4.3 ออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge) ที่ความดันบรรยากาศ

1.4.4 ศึกษาผลที่ได้จากการทดลอง รวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ของพลาสมา

1.4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองและประเมินผลการทดลอง

1.4.6 สรุปผลงานทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาความหนาสูงที่ความดันบรรยากาศแบบ Dielectric Barrier Discharge (DBD)

1.5.2 ทราบคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge) ที่ความดันบรรยากาศ

## 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 ปี 2005 S, Forster. C, Mohr., and W, Viol. [19] ได้ศึกษาเรื่อง Investigations of an Atmospheric Pressure Plasma Jet by Optical Emission Spectroscopy. เป็นการศึกษาเจ็ตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ และการประยุกต์ใช้พลาสมาปรับปรุงพื้นผิววัสดุโดยใช้แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ จากกระบวนการเป่าก๊าซอาร์กอนออกสู่สิ่งแวดล้อม เจ็ตพลาสมาที่กำเนิดจากแหล่งกำเนิดชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ เป็นพลาสมาจากก๊าซอุณหภูมิต่ำ อีกทั้งไม่อันตราย เนื่องจากใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ และใช้เครื่องสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสงวิเคราะห์คุณลักษณะของพลาสมา เช่น อุณหภูมิของอิเล็กตรอนและส่วนประกอบต่างๆ ของพลาสมา

1.6.2 ปี 2005 L, Xu., P, Liu., R.J, Zhan., X.H, Wen., L.L, Ding., M, Nagatsu. Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China [ 27 ] ได้ศึกษาเรื่อง Experimental Study and Sterilizing Application of Atmospheric Pressure Plasmas เป็นการสร้างพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ เพื่อนำไปประยุกต์เกี่ยวกับกระบวนการฆ่าเชื้อโรคชนิด *Escherichia Coli* โดยได้พัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จย่านความถี่ Audio Frequency ในช่วง 5 ถึง 20 kHz จากก๊าซอาร์กอนที่อัตราไหล 200 l/hr และสามารถผลิตพลาสมาที่บรรยากาศด้วยโปรบชนิดโคแอกเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ ให้ลำเปลวของพลาสมาสูง 1.5 เซนติเมตร จากปลายโปรบกำเนิดพลาสมา และได้เปรียบเทียบผลการกำเนิดพลาสมาจากโปรบสองชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งวัดอุณหภูมิของพลาสมาได้

47 และ 38 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากการทดลองโดยใช้พลาสมาในการฆ่าเชื้อโรคพบว่า โพรบชนิดที่มีอุณหภูมิพลาสมาต่ำจะมีประสิทธิภาพสูงในการทำลายและแบ่งแยกแบคทีเรีย

1.6.3 ปี 2007 Anand Kumar, Srivastava., Manoj Kumar, Garg., K. S. Ganesh, Prasad., Vinay, Kumar., Malay, Bikas Chowdhuri., and Ram, Prakash. [15] ได้ศึกษาเรื่อง Characterization of Atmospheric Pressure Glow Discharge in Helium Using Langmuir Probe, Emission Spectroscopy, and Discharge Resistivity. การวัดพารามิเตอร์ของพลาสมา ที่ความดันบรรยากาศจากก๊าซฮีเลียมและเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของพลาสมาสามเทคนิค เทคนิคแรกคือ โพรบแลงมัวร์ (Langmuir Probe) เทคนิคที่สองคือเครื่องวัดสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสง (Emission Spectroscopy) และเทคนิคที่สามคือ วัดสภาพต้านทานของการดิสชาร์จ (Discharge Resistivity) พบว่าการวัดความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากโพรบแลงมัวร์ ได้ค่าใกล้เคียงกับเครื่องวัดสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสงและเครื่องวัดสภาพความต้านทานของการดิสชาร์จ และวัดอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจากโพรบชนิดแลงมัวร์ได้ค่าสูงกว่าการวัดด้วยเครื่องวัดสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสงโดยการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าและความถี่ โดยสรุปผลการทดลอง ทั้งสามวิธีมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

1.6.4 ปี 2008 Gui-Min, Xu., Yue, Ma., and Guan-Jun, Zhang. [28] ได้ศึกษาเรื่อง DBD Plasma Jet in Atmospheric Pressure Argon เป็นการกำเนิดพลาสมาด้วยแหล่งกำเนิดชนิดโคแอ็กเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ ความถี่ 34 kHz จากก๊าซอาร์กอน ที่กำลังไฟฟ้าหลายสิบกิโลวัตต์ โดยใช้ Thermocouple วัดอุณหภูมิของพลาสมา ซึ่งอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง สามารถประยุกต์ใช้พลาสมาทางการแพทย์ในการฆ่าเชื้อโรค และการปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นผิวของวัสดุ หรือ ปรับปรุงรูปแบบของวัสดุ

1.6.5 ปี 2009 Mouinr, Laroussi., Fellow [29] ได้ศึกษาเรื่อง Low-Temperature Plasma for Medicine ซึ่งเกี่ยวกับการนำพลาสมาอุณหภูมิต่ำไปใช้ในทางการแพทย์ได้หรือไม่ โดยเป็นคำถามที่ผู้ทำการทดลองต้องการที่จะศึกษา วิศวกรและนักฟิสิกส์ได้รับความช่วยเหลือจากนักชีววิทยา เพียงเล็กน้อยในแง่ของการตั้งคำถามพื้นฐาน เช่น เกิดอะไรขึ้นกับเซลล์ทางชีววิทยา หลังจากถูกฉายโดยพลาสมาอุณหภูมิต่ำ ทำไมเซลล์ถึงตาย และถ้าเซลล์ยังมีชีวิตอยู่จะมีวิธีการกำจัด หรือทำให้เสียหายอย่างไร และถ้าเซลล์เสียหายจะทำให้เซลล์กลับมามีชีวิตเหมือนเดิมได้หรือไม่ เซลล์ชนิดไหนที่ถูกทำลาย และพลาสมาชนิดไหนเป็นตัวที่เข้าไปทำลาย ซึ่งเป็นทั้งข้อดีและข้อเสียที่ยังคงหาทางประยุกต์และปรับปรุงเพื่อนำพลาสมาไปใช้ในทางการแพทย์ ซึ่งบทความนี้

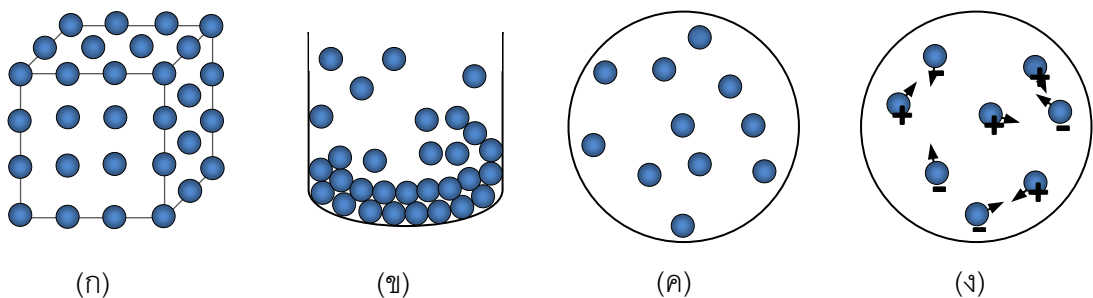
เป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของพลาสติกต่อเซลล์แบคทีเรียชนิด Prokaryote และ Mammalian

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 นิยามของพลาสมา

พลาสมา (Plasma) คือ ก๊าซที่มีสภาพนำไฟฟ้าและถือเป็นอีกสถานะหนึ่งของสสาร โดยทั่วไปประกอบด้วยอนุภาคอิสระทั้งอนุภาคที่มีประจุ ได้แก่ ไอออนบวก ไอออนลบ อิเล็กตรอน และอะตอมที่เป็นกลาง การมีสภาพเป็นไอออนดังกล่าวนี้จะมีอิเล็กตรอนอย่างน้อย 1 ตัวถูกดึงออกจากโมเลกุล เกิดประจุไฟฟ้าอิสระเกิดขึ้น [1]

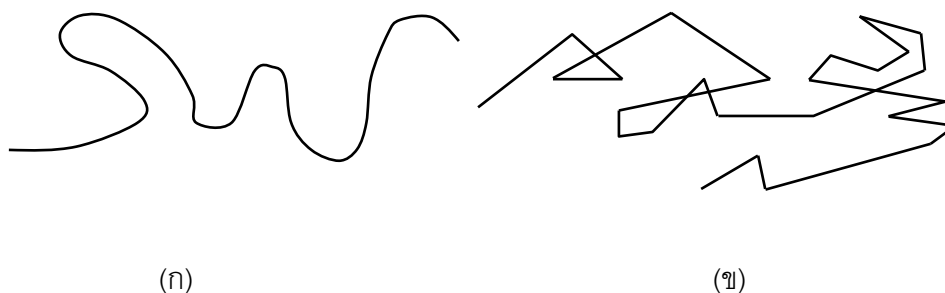
พลาสมา ถูกค้นพบโดย Sir William Crookes ในปี ค.ศ. 1879 ซึ่งพบอยู่ในรูปของประจุไฟฟ้าสามารถเห็นรังสีที่ปล่อยออกมาจากขั้วไฟฟ้าของก๊าซที่มีความดันต่ำ จึงเรียกว่า “Cathode Rays” ต่อมานักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบล Irving Langmuir ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปลดปล่อยอนุภาคของประจุจากขดลวดความร้อน (Thermionic Emission) ในปี ค.ศ. 1924 และได้นิยามความหมายของ พลาสมา ว่า คือ ก๊าซที่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionized Gases) เนื่องจากพลาสมามีคุณลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างไปจากสถานะอื่น เช่น การปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบางช่วงคลื่น หรือการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า เป็นต้น โดยปกติแล้ว เมื่อให้พลังงานกับสสารในสถานะของแข็งจะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว จากของเหลวจะเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซ และถ้ายังให้พลังงานต่อไป อะตอมของก๊าซจะเกิดการไอออไนซ์ (Ionize) จากผลของอิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่ในอากาศแตกตัวเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนและอะตอมที่มีสภาพเป็นไอออน ดังแสดงการเปลี่ยนของสถานะของสสารสู่สถานะ “พลาสมา” ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การเปลี่ยนสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงาน (ก) ของแข็ง (ข) ของเหลว (ค) ก๊าซ  
(ง) พลาสมา

พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุ ทั้งประจุบวก ประจุลบ และอนุภาคที่เป็นกลาง โดยภาพรวมแล้ว พลาสมามีคุณสมบัติบางส่วนที่เหมือนก๊าซ ดังนั้นพลาสมาโดยทั่วไปซึ่งจะอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน (Thermal Equilibrium) จึงสามารถอธิบายได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของโบลท์ซแมนน์ (Boltzmann's Relation) และบางส่วนที่เหมือนของเหลว สามารถอธิบายการเคลื่อนที่โดยใช้สมการของไหล (Fluid Equation) อนุภาคแต่ละตัวในพลาสมามีความสามารถในการเคลื่อนที่ง่ายและเคลื่อนที่ตลอดเวลาทั้งประจุบวกและประจุลบ สุดท้ายระบบพลาสมาจะมีการปรับตัวตลอดเวลาในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิของพลาสมาเป็นศูนย์ การอยู่ร่วมกันของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง (Quasi Neutral) แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมร่วม (Collective Behavior) [7] ซึ่งหมายความว่า การเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมาเป็นผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่มากกว่าจะเป็นผลมาจากการชนของอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าพฤติกรรมร่วมนี้เป็นพฤติกรรมกลุ่มของพลาสมาที่แสดงออกมารวมกัน เมื่ออนุภาคในพลาสมา มีการเคลื่อนที่ทั้งประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบ อนุภาคในพลาสมาเหล่านี้จะทำอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคด้วยกันเอง และทำอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กภายนอก แรงคูลอมบ์ที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคในพลาสมาเหล่านี้จะมีผลต่อการเคลื่อนที่โดยรวมของพลาสมา ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของประจุบวกหรือลบในบริเวณหนึ่ง ๆ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในขึ้นและทำให้เกิดแรงดึงดูดประจุบวกเคลื่อนที่เข้าหาประจุลบและประจุลบเคลื่อนที่เข้าหาประจุบวกเพื่อหักล้างประจุ จึงมีการเคลื่อนที่โค้งไปมาตามระยะทาง ดังภาพที่ 2.2 (ก) ซึ่งต่างไปจากอนุภาคในสถานะก๊าซที่เป็นกลาง เนื่องจากไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของก๊าซ จึงทำให้อนุภาคของก๊าซเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงและมีการชนแบบ (Random Brownian Motion) ดังภาพที่ 2.2 (ข)

อนุภาคที่เคลื่อนที่ในพลาสมาจะเคลื่อนที่ตามหรือสวนทางกับทิศทางของสนามไฟฟ้า และมีแรงเฉื่อย ส่งผลให้อนุภาคดังกล่าวเคลื่อนที่กลับไปกลับมาระหว่างตำแหน่งสมดุลทำให้เกิด "ความถี่ของพลาสมา (Plasma Frequency)" ส่วนใหญ่ประจุที่เคลื่อนที่ในพลาสมาจะเป็นประจุลบเนื่องจากประจุลบมีมวลน้อย นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเฉพาะที่ (Localized Electric Field) และจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กเฉพาะที่ (Localized Magnetic Field) ขึ้น



ภาพที่ 2.2 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคก๊าซที่เป็นกลาง และภายใต้คุณสมบัติแบบ Collective Behavior ในพลาสมา (ก) การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุในพลาสมา (ข) การเคลื่อนที่ของก๊าซแบบ Brownian ของโมเลกุลของก๊าซที่เป็นกลาง

### 2.1.1 ประเภทของพลาสมา (Plasma Classification)

โดยทั่วไปอาจจำแนกพลาสมาออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้โดยมีวิธีการแบ่งหลายวิธี เช่น แบ่งตามระดับการไอออไนเซชัน หรือ แบ่งตามอุณหภูมิ เป็นต้น

ในกรณีที่แบ่งตามระดับการไอออไนซ์ สามารถแบ่งพลาสมาออกเป็นสองชนิด คือ พลาสมาที่มีการไอออไนซ์แบบสมบูรณ์ (Fully Ionized Plasma) จะเกิดการไอออไนซ์เป็นพลาสมาเกือบทั้งหมด และมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูง (High Electron Density) ในช่วง  $10^{21}$ - $10^{26}$   $\text{m}^{-3}$  อีกชนิด คือ พลาสมาที่มีการไอออไนซ์ในปริมาณน้อย (Weakly Ionized Plasma) จะเกิดการไอออไนซ์เป็นพลาสมาบางส่วน ซึ่งจำนวนอนุภาคที่มีประจุจะน้อยกว่าจำนวนของก๊าซที่เป็นกลาง และจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่ำ (Lower Electron Density) น้อยกว่า  $10^{19}$   $\text{m}^{-3}$  [5]

ในกรณีที่แบ่งตามอุณหภูมิ สามารถแบ่งพลาสมาออกเป็นสองชนิด คือ พลาสมาอุณหภูมิสูง ซึ่งโดยทั่วไปเรียกว่า “Thermal plasma” เป็นพลาสมาที่มีการถ่ายเทพลังงานของอิเล็กตรอนให้แก่ไอออนปริมาณมาก ทำให้อุณหภูมิของอิเล็กตรอน ( $T_e$ ) และอุณหภูมิของไอออน ( $T_i$ ) เท่ากัน ตัวอย่างของพลาสมาชนิดนี้ ได้แก่ พลาสมาบนดวงอาทิตย์ หรือ พลาสมาในอวกาศ ซึ่งเกิดจากรังสีคอสมิกจะมี  $T_e = T_i \approx 10,000$  K (Kelvin) อีกชนิดหนึ่ง “Non-Thermal Plasma” พลาสมาเย็น หรือ พลาสมาอุณหภูมิต่ำ มีการถ่ายเทพลังงานให้ไอออนน้อยกว่า ทำให้อุณหภูมิของไอออนยังคงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสมาอุณหภูมิสูง ตัวอย่างของพลาสมาชนิดนี้ ได้แก่ Glow Discharge, RF Discharge หรือ Microwave Discharge ซึ่งมีค่า  $T_e \approx 10,000$ - $100,000$  K และ  $T_i \approx 300$ - $1,000$  K โดยในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้พลาสมาชนิดนี้

## 2.1.2 พลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Plasma)

พลาสมาความดันต่ำประมาณ  $10^{-4}$ - $10^{-2}$  kPa จัดเป็น Non-LTE (Non-Local Thermodynamic Equilibrium Plasma) ซึ่งอุณหภูมิของอนุภาคหนัก (Heavy Particles) หรือก๊าซ จะต่ำกว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน ( $T_e > T_n$ ) เนื่องจากการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Collision) ระหว่างอิเล็กตรอนและอนุภาคของก๊าซ ซึ่งจะตอมที่ถูกรุนจะอยู่ในสภาพที่ถูกรกระตุ้น หรือถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน การชนในลักษณะนี้จะไม่ทำให้อุณหภูมิของอนุภาคหนักเพิ่มขึ้น [5]

เมื่อความดันของพลาสมาสูงขึ้น มีการชนกันของอนุภาคหนักกับอิเล็กตรอนมากขึ้นและมีการแลกเปลี่ยนพลังงานซึ่งกันและกัน ภายหลังจากการชนอะตอมที่ถูกรุนไม่อยู่ในลักษณะการถูกรกระตุ้นหรือไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนซึ่งเป็นการชนแบบยืดหยุ่น เป็นเหตุให้ความแตกต่างระหว่าง  $T_e$  และ  $T_n$  ลดลง และพลาสมาเข้าสู่สภาวะที่ใกล้เคียงกับ LTE (Local Thermodynamic Equilibrium Plasma) แต่ยังมีใช้ LTE ที่เดียว

ความหนาแน่นของพลาสมาขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแหล่งกำเนิดพลาสมา (Feeding Power) ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อสภาวะของพลาสมาว่าจะเป็น LTE หรือไม่ การเลือกใช้กำลังไฟฟ้าสูง (High Power Density) จะทำให้เกิดพลาสมาที่เป็น LTE เช่น Arc Plasma ในทางกลับกันหากต้องการพลาสมาที่เป็น Non-LTE ต้องเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำ (Low-Density Feeding Power Supply)

ดังนั้นพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ อาจเป็นพลาสมาที่เป็น LTE หรือ Non-LTE ก็ได้ เช่น Arc Plasma เป็น LTE ส่วน Atmospheric Plasma Jet สามารถแยกได้สองส่วนคือ พลาสมาส่วนกลาง (Central Zone or Plasma Core) ที่เป็น LTE และพลาสมาขอบนอก (Peripheral Zone) ที่เป็น Non-LTE

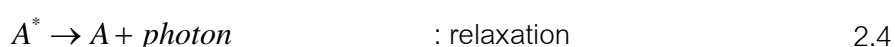
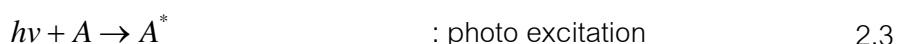
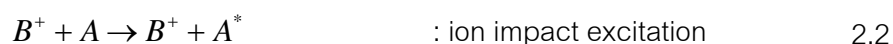
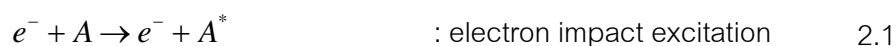
## 2.2 กระบวนการในพลาสมา (Process in Plasma)

### 2.2.1 การกระตุ้นและการผ่อนคลาย (Excitation and Relaxation)

เมื่ออิเล็กตรอน ไอออน หรือ อะตอมที่เป็นกลางถูกรุนด้วยพลังงานจากภายนอก เช่น การชนด้วยอิเล็กตรอน ไอออน หรือ โฟตอนตามสมการที่ 2.1 – 2.3 จะทำให้เวเลนซ์อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นแต่ยังโคจรอยู่ในวงโคจรของอะตอมหรือไอออน ด้วยพลังงานเฉพาะที่ตามทฤษฎีควอนตัม อะตอมและไอออนจะอยู่ในสถานะกระตุ้น ซึ่งในสมการจะแทนด้วยสัญลักษณ์ “ \* ” เช่น  $A^*$  โดยธรรมชาติแล้วอะตอมหรือไอออนจะสามารถอยู่ในสถานะกระตุ้นประมาณ  $10^{-8}$  -  $10^{-9}$  วินาที จากนั้นจะกลับสู่สถานะพื้นภายในครั้งเดียวหรือหลายครั้งพร้อมทั้งปล่อยพลังงานส่วนเกิน



ออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.4 ซึ่งสามารถตรวจวัดด้วยวิธีสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสง (Optical emission spectroscopy, OES) [8]



### 2.2.2 การแตกตัวเป็นไอออน (Ionization)

เมื่ออะตอมที่เป็นกลางได้รับพลังงานเพียงพอจนทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดหรือ เวเลนซ์สามารถเอาชนะพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระและเกิดไอออนบวกได้ เรียกพลังงานที่ทำให้อะตอมเปลี่ยนเป็นไอออนประจุ + 1 ว่า พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนลำดับที่ 1 ซึ่งสำหรับก๊าซอาร์กอน จะต้องใช้พลังงานในการกระตุ้นอะตอมเพื่อให้เวเลนซ์อิเล็กตรอน 1 ตัวหลุดออกจากอะตอมประมาณ 15.759610 eV และหลังจากนั้นเมื่ออะตอมสูญเสียอิเล็กตรอนจะทำให้แรงยึดเหนี่ยวของอะตอมมีค่ามากขึ้น ดังนั้นการที่อะตอมจะถูกกระตุ้นอีกครั้งจะต้องใช้พลังงานสูงกว่าเรียกพลังงานที่ทำให้อะตอมเปลี่ยนไปเป็นไอออนประจุ + 2 ว่า พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนลำดับที่ 2 ซึ่งสำหรับก๊าซอาร์กอนต้องใช้พลังงานประมาณ 27.62966 eV การได้รับพลังงานสามารถเกิดขึ้นได้สองแบบ คือ แบบแรกเป็นการได้รับพลังงานสูงเพียงครั้งเดียวและอะตอมของอาร์กอนสูญเสียอิเล็กตรอนสองตัวจะต้องใช้พลังงานมากถึง 45 eV ตามสมการ 2.5 แบบที่สองเป็นการได้รับพลังงานหลายครั้งอย่างเป็นลำดับ เช่น อะตอมอาร์กอนต้องการพลังงาน 15.759610 eV เพื่อใช้เป็นพลังงานในการแตกตัวเป็นประจุ + 1 และไอออนอาร์กอนประจุ + 1 ต้องการพลังงานอีกเพียง 27.62966 eV เพื่อใช้เป็นพลังงานในการแตกตัวเป็นประจุ + 1 (ซึ่งไม่ใช่พลังงานทั้งหมดในการแตกตัวลำดับที่ 2) ตามสมการที่ 2.7 จะสังเกตได้ว่าสมการที่ 2.5 ต้องใช้พลังงานกระตุ้นมากกว่าสมการที่ 2.7 ดังนั้นโอกาสเกิดไอออนแบบได้รับพลังงานสูงเพียงครั้งเดียวจึงมีโอกาสเกิดได้น้อยกว่าการได้รับพลังงานหลายครั้งพลังงานสำหรับการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม มีสาเหตุมาจากกลไกดังนี้ [30]



2.2.2.1  $A + B \rightarrow A^+ + B + e^-$  : อนุภาคของก๊าซ A และ B สามารถเกิดการชนกันเองด้วยพลังงานจลน์ที่อุณหภูมิต่ำและกลายเป็นไอออน กลไกนี้เกิดขึ้นได้ยากในห้องปฏิบัติการทั่วไป

2.2.2.2  $A + hv \rightarrow A^+ + e^-$  : เรียกว่าการแตกตัวเป็นไอออนจากพลังงานโฟตอน เมื่ออะตอมดูดกลืนโฟตอนจะส่งผลให้อิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนระดับพลังงานที่สูงกว่าและอะตอมนี้จะอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น ในทางกลับกันถ้าอิเล็กตรอนในอะตอมที่ถูกกระตุ้นเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับพลังงานสูงมายังระดับพลังงานต่ำกว่าจะปล่อยโฟตอนออกมา กระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$hv + A \leftrightarrow A^* \quad 2.8$$

เมื่อ  $A$  คือ อะตอมที่เป็นกลาง

$A^*$  คือ อะตอมที่ถูกกระตุ้น

ในกรณีที่พลังงานของโฟตอน  $h\nu$  มีค่ามากกว่าพลังงานที่ต้องใช้ในการกระตุ้นอะตอมเพื่อให้แตกตัว พลังงานส่วนที่เหลือนั้นอาจถูกปล่อยออกมาในรูปของโฟตอนซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$h(\nu_2 - \nu_1) = W_2 \quad 2.9$$

เมื่อ  $\nu_1$  คือ ความถี่ของโฟตอนที่ถูกดูดกลืน

$\nu_2$  คือ ความถี่ของโฟตอนที่ปล่อยออกมา

$W_2$  คือ พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอะตอม

หรือในอีกกรณีหนึ่งพลังงานส่วนเกินนี้อาจจะอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ของอะตอมที่ถูกกระตุ้นได้ในกรณีที่อะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออน พลังงานส่วนเกินของโฟตอนนี้จะเปลี่ยนเป็น

พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน ดังนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมจะเคลื่อนที่ด้วยพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนโดยวิธีนี้เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron)

2.2.2.3  $A + B^* \rightarrow A^+ + B + e^-$  : อะตอม A สามารถเป็นไอออนได้เมื่อถูกชนด้วยอะตอม  $B^*$  ที่อยู่ในสถานะกระตุ้น โดยพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม A ต้องน้อยกว่าพลังงานในสถานะกระตุ้นของอะตอม B

2.2.2.4  $e_{fast}^- + A \rightarrow A^+ + e_{slow}^- + e_{slow}^-$  : กลไกหลังของการแตกตัวเป็นไอออนในห้องปฏิบัติการทั่วไปเกิดจากการชนด้วยอิเล็กตรอนพลังงานสูง ซึ่งอิเล็กตรอนมีมวลน้อยเทียบกับอะตอมจึงสามารถเร่งหรือให้พลังงานกับอิเล็กตรอนได้ง่าย และอิเล็กตรอนสามารถถ่ายเทพลังงานจลน์ให้อะตอมได้ถึง 99 % ทำให้กลไกนี้เกิดขึ้นได้ง่ายกว่ากลไกอื่นๆ

## 2.3 แหล่งกำเนิดพลาสมา (Plasma Source)

พลาสมาเกิดขึ้นโดยการทำให้อะตอมที่เป็นกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแตกตัวเป็นไอออนบริเวณผิวหน้า (Surface Ionization) การแตกตัวเป็นไอออนโดยใช้แสง (Photo Ionization) และ การปลดปล่อยอิเล็กตรอนโดยสนามไฟฟ้า (Field Emission) แต่วิธีที่ใช้แพร่หลายที่สุด ได้แก่ วิธีก๊าซดิสชาร์จ (Gas Discharge) [5]

ลักษณะของการ Discharge คือ ขณะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน อากาศเปรียบเสมือนฉนวนไฟฟ้า แต่เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าสูง ๆ ระดับกิโลโวลต์ จะเกิดการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนอิสระซึ่งมีอยู่ในอากาศเคลื่อนที่เข้าชนกับโมเลกุลของอากาศจนแตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอนด้วยกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) จากนั้นอิเล็กตรอนจากการแตกตัวอาจมีพลังงานพอที่จะเคลื่อนที่ไปชนโมเลกุลอื่น ๆ จนแตกตัวได้อิเล็กตรอนตัวใหม่ต่อไปเรื่อย ๆ และหากปริมาณของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นใหม่มีมากกว่าอิเล็กตรอนที่อาจเกิดการสูญเสียจากการตั้งเข้ารวมกับไอออนบวก (Recombination) จะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Electron Avalanche และได้พลาสมาออกมาในที่สุด พลังงานน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกจากอะตอม เรียกว่า พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization Energy)

โดยทั่วไปสามารถแบ่งลักษณะของการ Discharge ตามกระแสและความต่างศักย์ได้สามแบบ ดังนี้

- Corona Discharge เป็นลักษณะของการ (Discharge) ที่ใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ ( $10^{-10}$  ถึง  $10^{-5}$  แอมแปร์) แต่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง

- Glow Discharge เกิดขึ้นที่กระแสไฟฟ้าต่ำ (น้อยกว่า 1 แอมแปร์) และใช้ความต่างศักย์สูงระดับกิโลโวลต์
- Arc Discharge ประกอบด้วยกระแสไฟฟ้าสูง (ระหว่าง 1-100,000 แอมแปร์) แต่ใช้ความต่างศักย์ต่ำกว่า Glow Discharge

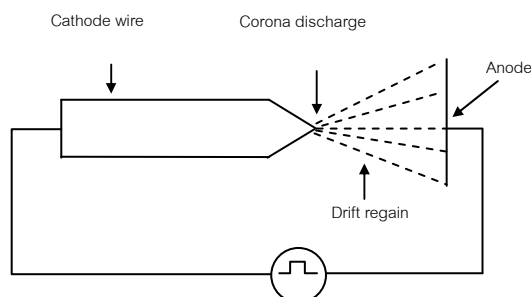
การให้พลังงานกับก๊าซอาจทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้กับก๊าซโดยตรง ด้วยการใช้สนามไฟฟ้า หรือการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation) ซึ่งการออกแบบแหล่งกำเนิดพลาสมาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge) หรือนิยมเรียกสั้น ๆ ว่า DBD ซึ่งเป็นการให้พลังงานกับก๊าซโดยใช้สนามไฟฟ้า

## 2.4 ระบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ

การก่อกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (760 mmHg) แบ่งวิธีการกำเนิดออกเป็นสองชนิดหลัก คือ

### 2.4.1 Corona Discharge

Corona Discharge สามารถเกิดได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เข้มสูงและทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นพลาสมา แต่กระแสที่ใช้้น้อยมาก [4] แหล่งกำเนิดชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าสองขั้วขนานดังภาพที่ 2.3 ความสมมาตรของสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับการจัดตำแหน่งขั้วไฟฟ้า ซึ่งบริเวณที่อยู่ใกล้ขั้วไฟฟ้าจะมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูง และในบริเวณที่ไกลออกไปจะเกิดพลาสมามากขึ้นเนื่องจากมีความเข้มสนามไฟฟ้าน้อย ทำให้พลาสมาชนิดนี้กระจายเป็นหย่อมๆไม่สม่ำเสมอ จึงเป็นข้อจำกัดของการออกแบบในลักษณะของ Corona Discharge โดยพลาสมาจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเท่านั้น พลาสมาชนิดนี้ประยุกต์ใช้ในงานด้านปรับปรุงวัสดุ และฟิล์มจำพวก Polyester, Polypropylene, Polyethylene (PET) อีกทั้งการทำให้น้ำบริสุทธิ์ และใช้ในการดักฝุ่นด้วยไฟฟ้า



ภาพที่ 2.3 แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิด Corona Discharge

## 2.4.2 Glow Discharge

Glow Discharge เกิดขึ้นได้ที่ระดับกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 1 แอมแปร์ มีความต่างศักย์สูงและความถี่สูงระดับ (5–15 kV, 10–100 kHz) สามารถเกิดได้ทั้งแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าตรงและกระแสไฟฟ้าสลับ [4] แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดนี้เป็นแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge หรือ DBD)

2.4.2.1 แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge หรือ DBD)

แหล่งกำเนิดชนิดนี้ สามารถทำงานภายใต้ความดันบรรยากาศ (~1 atm) โดยอาจใช้แหล่งจ่ายไฟชนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Voltage) หรือชนิดพัลส์ แต่อย่างไรก็ตามไม่นิยมใช้ DBD กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage) เพราะจะต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าค่อนข้างสูงในการผลิตพลาสมาเนื่องจากเกิด Capacitive Coupling ที่ขั้วไฟฟ้าขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานส่วนใหญ่จะใช้ DBD กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งก๊าซในระบบสามารถที่จะแตกตัวได้ง่ายกว่าแหล่งกำเนิดชนิดอื่น ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานจะอยู่ในช่วง 1-100 กิโลโวลต์ และมีความถี่ที่ระดับกิโลเฮิรตซ์ถึงเมกะเฮิรตซ์ ซึ่ง DBD จะได้พลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ผลิตได้ที่ความดันบรรยากาศ

DBD ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว และมีวัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric Material) กั้นอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองอย่างน้อยด้านใดด้านหนึ่ง ซึ่งเป็นข้อแตกต่างจากแหล่งกำเนิดชนิดอื่น ๆ กล่าวคือ แหล่งกำเนิดพลาสมาโดยทั่วไป ขั้วไฟฟ้าจะสัมผัสโดยตรงกับ Gas Discharge และ Plasma ซึ่งในกระบวนการ Discharge อาจทำให้ขั้วไฟฟ้าสึกกร่อนเนื่องจาก Secondary Emission และอาจเกิดการ Arcing ได้ที่แรงดันไฟฟ้าสูง ในทางกลับกันแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ

DBD ชั่วไฟฟ้าและ Discharge Gas จะถูกแยกออกจากกันด้วย Dielectric Barrier ซึ่งนอกจากจะช่วยป้องกันชั่วไฟฟ้ากร่อนแล้ว ยังช่วยป้องกันการเกิด Arcing ที่แรงดันไฟฟ้าสูง ๆ ด้วย

#### 2.4.2.2 โครงสร้างของ Dielectric Barrier Discharge

โดยทั่วไปสามารถแบ่งชนิดของ DBD ตามลักษณะโครงสร้างได้เป็นสามแบบ คือ

##### 1. แบบ Volume Discharge

Volume Discharge สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ลักษณะคือ แบบ Planar และแบบ Coaxial สำหรับแบบ Planar จะมีการจัดวางชั่วไฟฟ้าแบบแผ่นราบ 2 ชั่วขนานกัน โดยด้านหนึ่งจะต่อเข้ากับ Ground และอีกด้านหนึ่งจะต่อเข้ากับแรงดันไฟฟ้าแรงสูง (High voltage) ดังภาพที่ 2.4 (ก-ค) ระหว่างชั่วไฟฟ้าทั้งสองจะมีแผ่น Dielectric Barrier หนึ่งหรือสองส่วน DBD โครงสร้างแบบขนานเป็นที่นิยมใช้ในงานด้านการปรับปรุงคุณภาพพื้นผิววัสดุ พิล์มโลหะบาง หรือพอลิเมอร์ เนื่องจากสามารถจัดวางวัสดุที่ต้องการปรับปรุงได้ง่าย สำหรับแบบ Coaxial จะมีการจัดโครงสร้างของชั่วไฟฟ้าคล้ายกับแบบ Planar เพียงแต่ชั่วไฟฟ้ามีลักษณะเป็น Coaxial ดังในภาพตัดขวางภาพที่ 2.5 (ก-ค) ซึ่ง DBD โครงสร้างแบบโคแอกเซียลนิยมใช้ในงานผลิตไอโซนสำหรับปรับปรุงสภาพอากาศเนื่องจากมีความกะทัดรัดมากกว่า

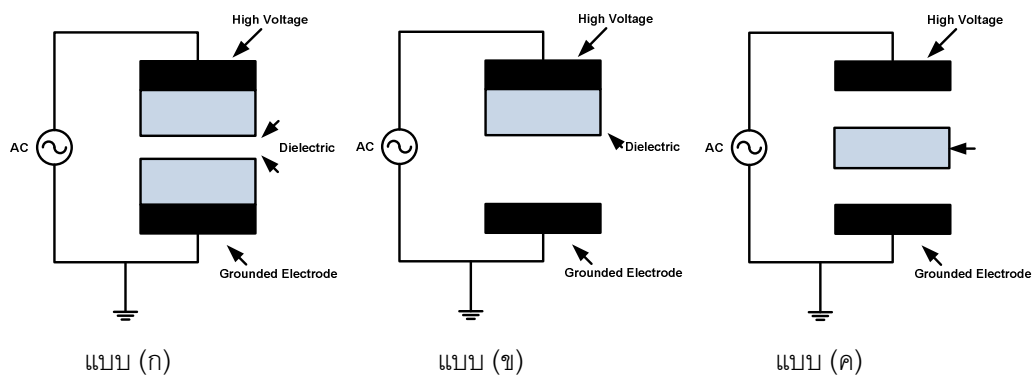
##### 2. แบบ Surface Discharge

Surface Discharge มีการจัดรูปแบบชั่วไฟฟ้างดโครงสร้างในภาพที่ 2.6 โดยพลาสมาจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของชั่วไฟฟ้า

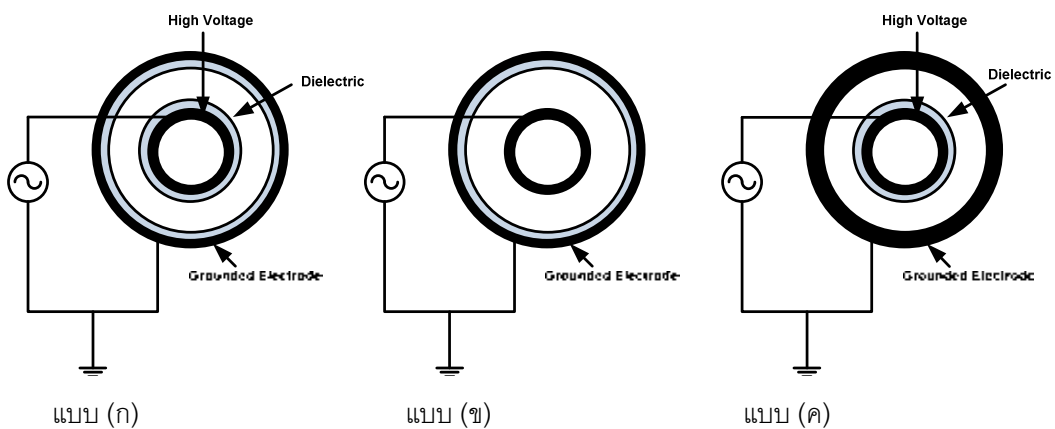
##### 3. แบบ Coplanar Discharge

Coplanar Discharge มีการจัดรูปแบบชั่วไฟฟ้างดโครงสร้างในภาพที่ 2.7 สำหรับโครงสร้างแบบ Coplanar Discharge ชั่วไฟฟ้าจะถูกฝังไว้ภายในวัสดุไดอิเล็กทริกตามระยะห่างของแต่ละชั่ว การจ่ายไฟฟ้าจะสลับกันระหว่างชั่วไฟฟ้าแต่ละคู่ พลาสมาจะเกิดขึ้นภายนอกวัสดุไดอิเล็กทริก

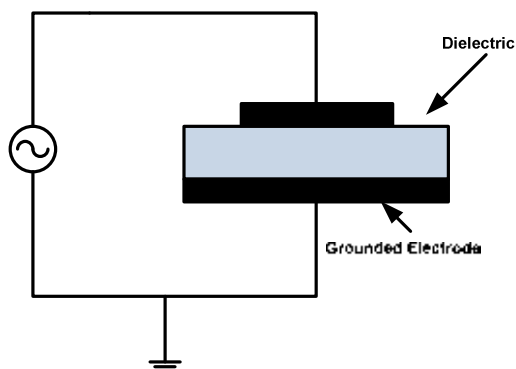
ทั้งนี้ในแต่ละรูปแบบจะเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่ต่าง ๆ กันไปตามความเหมาะสม



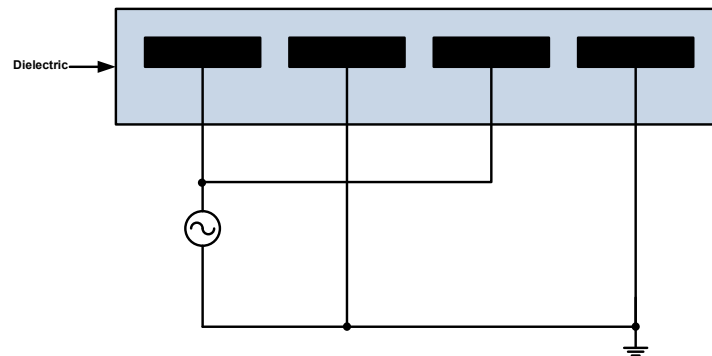
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของ Planar (Planar DBD Electrode) 3 แบบ



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของ Coaxial (Cylindrical DBD Electrode) 3 แบบ



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของ Dielectric Surface Discharge



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของ Coplanar Discharge

#### 2.4.2.3 หลักการทำงานของ DBD (Dielectric Barrier Discharge

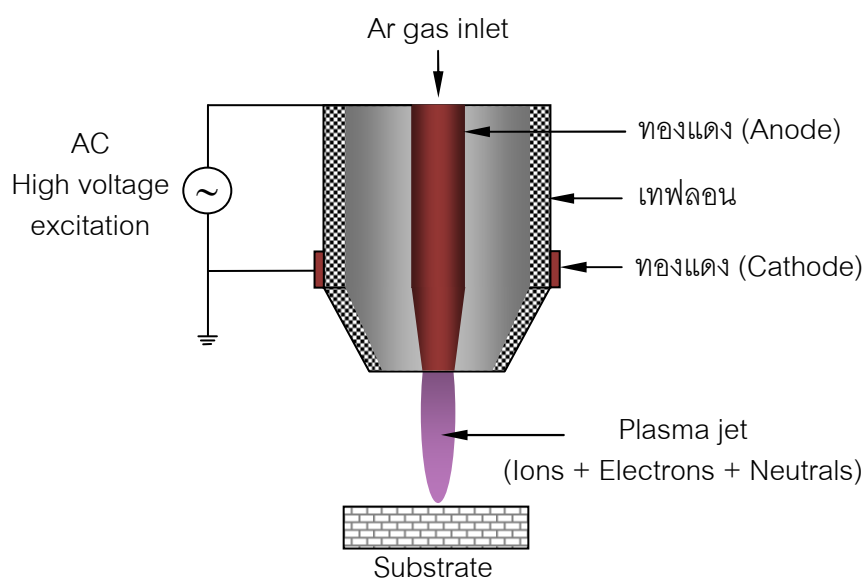
Phenomenology)

Dielectric Barrier Discharge (DBD) เป็นการเกิดพลาสมาโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงให้แก่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของ DBD และเมื่อพลังงานที่ป้อนให้แก่ขั้วไฟฟ้า (หักลบพลังงานที่สูญเสียไปในวัสดุไดอิเล็กทริก) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานไอออไนเซชันของก๊าซจะทำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชันขึ้น เป็นผลให้ก๊าซบางส่วนหรือทั้งหมดแตกตัวเป็นไอออนบวก ไอออนลบและอิเล็กตรอน เมื่อมีจำนวนอิเล็กตรอนมากขึ้นก็ทำให้การเกิดไอออไนเซชันมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอิเล็กตรอนมีมวลที่เบากว่าไอออนบวก ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ข้ามช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าแอโนด (ขั้วไฟฟ้าบวก) ได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่ของไอออนบวกไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทด (ขั้วไฟฟ้าลบ) โดยทั่วไปการเคลื่อนที่ที่จะอยู่ในระดับ  $10^{-9}$  วินาที และเมื่อกลุ่มของอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปถึงขั้วไฟฟ้าแอโนด กลุ่มอิเล็กตรอนจะแผ่ขยายไปเหนือพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า และพบกับประจุบวกที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนด้วยความเร็วที่ช้ากว่ามาก ส่วนของไอออนบวกที่ยังคงเคลื่อนที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจะก่อบริเวณสนามไฟฟ้าภายในระหว่างกลุ่มของอิเล็กตรอนที่พื้นผิวของแอโนดกับไอออนบวกที่เคลื่อนที่ช้า ซึ่งสนามไฟฟ้านี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วของ DBD จึงเกิดการหักล้างกันและทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วของ DBD ลดลง ไอออนบวกบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอน (Recombination) ที่ขั้วไฟฟ้า ทำให้ระดับพลังงานหลังการรวมตัวสูงขึ้นและอยู่ในระดับพลังงานกระตุ้น เมื่ออะตอมในสถานะกระตุ้นลดระดับสู่ภาวะเสถียรของก๊าซจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงยูวี (Ultraviolet) [32]



## 2.5 เจ็ตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Plasma Jet)

เจ็ตพลาสมาเป็นพลาสมาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแบบโคแอ็กเซียล ก๊าซจะถูกกระตุ้นโดยสนามไฟฟ้าที่ความดันบรรยากาศทำให้โมเลกุลของก๊าซหรือไอระเหย (Vapor) ที่ป้อนให้แก่แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยแรงดันของก๊าซ และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนอยู่ในสถานะพลาสมา ลักษณะของพลาสมาเป็นเปลวที่พุ่งออกจากปลายโพรบซึ่งต่างกับวิธีอาร์คที่บริเวณขั้วไฟฟ้า (Electrode) [26] ดังภาพที่ 2.8 เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าความเข้มสูงกระแสไฟฟ้าสูงสเปกตรัมของแสงตามลำของพลาสมาความเข้มสูงที่พุ่งออกมาสามารถตรวจวัดได้ โดยทั่วไปจะตรวจวัด ณ จุดกึ่งกลางลำพลาสมา อุณหภูมิที่วัดได้จะไม่เกิน 20,000 เคลวิน ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เจ็ตพลาสมาอุณหภูมิต่ำในหลายด้าน เช่น การปรับปรุงพื้นผิว การทำความสะอาดผิววัสดุ การปรับปรุงคุณสมบัติสิ่งทอ แต่ที่นิยมอย่างแพร่หลาย คือ การนำไปประยุกต์ใช้ด้านการแพทย์ เช่น เชื้อโรคลดแบคทีเรีย หรืองานทางด้านทันตกรรม ในการนำไปประยุกต์ใช้งานที่ให้ประสิทธิภาพสูง ต้องคำนึงถึงการออกแบบแหล่งกำเนิดที่เหมาะสมเพื่อให้ใช้งานง่ายและมีความปลอดภัย



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างเจ็ตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ

## 2.6 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric Material)

ไดอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่ไม่ใช่ตัวนำไฟฟ้า (Nonconducting Material) เช่น ยาง แก้ว กระดาษไข พาราฟิน (Paraffin) และเทฟลอน (Teflon) ซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐานดังนี้ [9]

### 2.6.1 ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก (Dielectric constant, $\epsilon_r$ )

โดยปกติระหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่นอาจจะเป็นอากาศหรือที่ว่าง ซึ่งมีค่าสภาพความยอมไฟฟ้า (Permittivity) เป็น  $\epsilon_0$  หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ มีค่า  $8.854 \times 10^{12}$  F/m ถ้าใส่วัสดุไดอิเล็กทริกชนิดหนึ่งแทนที่ว่างดังกล่าวจะมีผลให้คู่แผ่นตัวนำมีความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จึงเรียกอัตราส่วนของความจุไฟฟ้าหลังจากใส่ไดอิเล็กทริกเทียบกับความจุไฟฟ้าขณะไม่ได้ใส่ไดอิเล็กทริกนั้นว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant " $\epsilon_r$ ") โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนี้เป็นเลขจำนวนเท่า จึงไม่มีหน่วยดังสมการที่ 2.10 และในตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุต่าง ๆ

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad 2.10$$

การใส่ไดอิเล็กทริกระหว่างแผ่นของตัวนำจะช่วยให้สามารถจัดวางแผ่นตัวนำให้อยู่ใกล้กันมากได้โดยที่ยังไม่สัมผัสกันและยังทำให้สามารถทนสนามไฟฟ้าได้สูงโดยไม่เกิดการ Arcing ขึ้น ดังนั้นการใช้ไดอิเล็กทริกจึงทำให้ความจุของตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกกั้นระหว่างแผ่นมีค่าสูงกว่าตอนที่เป็นสุญญากาศหรืออากาศ ทำให้ตัวเก็บประจุสามารถใช้งานกับความต่างศักย์สูงๆ ได้และเก็บสะสมประจุและพลังงานได้มากกว่า โดยค่าความจุ (Capacitance) คือ อัตราส่วนของปริมาณประจุบนตัวนำต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวนำ ดังสมการที่ 2.11

$$C = \frac{Q}{V} \quad 2.11$$

เมื่อ  $C$  คือ ค่าความจุ มีหน่วยเป็น คูลอมป์ต่อโวลต์ (C/V) หรือ ฟาราด (F)

$Q$  คือ ปริมาณของประจุ มีหน่วยเป็น คูลอมป์ (C)

$V$  คือ ความต่างศักย์คร่อมแผ่นตัวนำทั้งสอง มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

วัสดุไดอิเล็กทริกแต่ละชนิดมีสภาพความยอมไฟฟ้า ( $\epsilon$ ) แตกต่างกัน โดยทั่วไปจะวัดเป็นจำนวนเท่า ( $\epsilon_r$ ) ของสภาพความยอมไฟฟ้าในสุญญากาศ ( $\epsilon_0$ ) ดังสมการ 2.12

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad 2.12$$

เมื่อแผ่นคู่ขนานปราศจากวัสดุไดอิเล็กทริก สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่นมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นประจุเชิงพื้นผิวสุทธิและค่าสภาพความยอมไฟฟ้าในสุญญากาศตามสมการ 2.13

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad 2.13$$

ความหนาแน่นประจุเชิงพื้นผิว ( $\sigma$ ) มีค่าสม่ำเสมอเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าประจุไฟฟ้า ( $Q$ ) และพื้นที่ของแผ่นขนานแผ่นหนึ่ง ( $A$ ) ดังสมการที่ 2.14

$$\sigma = \frac{Q}{A} \quad 2.14$$

และเมื่อนำสมการที่ 2.14 แทนค่าความหนาแน่นประจุเชิงพื้นผิวในสมการที่ 2.13 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.15

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 A} \quad 2.15$$

ถ้าพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนานทั้งสองจะมีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.16

$$E = \frac{V}{d} \quad 2.16$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 2.15 และสมการที่ 2.16 จะได้ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ระหว่างแผ่นคู่ขนาน ดังสมการที่ 2.17

$$V = \frac{dQ}{\epsilon_0 A} \quad 2.17$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r$ ) แปรผันตามความจุไฟฟ้า(C) ดังนั้นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะมีความสามารถในการเก็บประจุได้ดี แต่วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำจะมีความสามารถในการเก็บประจุลดลงตามสมการที่ 2.18

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon_r C_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} = \frac{\epsilon A}{d} \quad 2.18$$

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก  $\epsilon_r$  ที่ 20 องศาเซลเซียส

วัสดุ	$\epsilon_r$	วัสดุ	$\epsilon_r$
สุญญากาศ	1	พอลิไวนิลคลอไรด์	3.18
อากาศ (1 atm)	1.00059	เพล็กซิกลาส	3.40
อากาศ(100 atm)	1.0548	แก้ว	5-10
เทฟลอน	2.1	นีโอพรีน	6.70
พอลิเอทิลีน	2.25	เจอร์เมเนียม	16
เบนซีน	2.28	โกลซีรีน	42.5
ไมกา	3-6	น้ำ	80.4
ไมลาร์	3.1	สทรอนเทียมไททาเนต	310

## 2.6.2 ค่าการสูญเสียความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Breakdown Strength)

ความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength) เป็นค่าแสดงถึงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ Dielectric แต่ละชนิดสามารถทนได้ก่อนที่จะเสียสภาพความเป็นฉนวนของวัสดุเรียกว่า “Dielectric Breakdown” เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกใด ๆ อยู่ในสนามไฟฟ้าที่เข้มมากพอ จะเกิดการสูญเสียของไดอิเล็กทริกและกลายเป็นตัวนำ โดยอิเล็กตรอนที่หลุดจากโมเลกุลของวัสดุและชนกับโมเลกุลอื่นทำให้มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจำนวนมาก ประจุกลุ่มที่เคลื่อนที่นี้ก่อให้เกิดประกายไฟฟ้าซึ่งมักเกิดขึ้นทันทีทันใด

เมื่อตัวเก็บประจุได้รับแรงดันไฟฟ้าสูงเกินขนาดของตัวเก็บประจุ อาจเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนของไดอิเล็กทริกและมีประกายไฟฟ้าทะลุชั้นไดอิเล็กทริก จะเกิดการเผาหรือละลายไดอิเล็กทริกแล้วทำให้เกิดรูที่เป็นเส้นทางนำไฟฟ้า ก่อให้เกิดการลัดวงจรระหว่างตัวนำ ถ้าเส้นทางไฟฟ้านี้คงอยู่หลังประกายไฟฟ้านี้ดับแล้วตัวเก็บประจุนี้อาจเสียอย่างถาวร เรียกขนาด

แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่วัสดุทนได้ก่อนที่จะเกิดการเสียหายของไดอิเล็กทริกว่า “ค่าความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก” สิ่งที่มีผลอย่างมากต่อปริมาณนี้คือ อุณหภูมิ สารแปลกปลอม ความไม่สม่ำเสมอภายในตัวไฟฟ้าโลหะ และปัจจัยอื่นซึ่งยากต่อการควบคุม ด้วยเหตุนี้จึงได้เพียงค่าประมาณของความสามารถทนแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกสำหรับวัสดุฉนวนบางชนิด

วัสดุ	ความสามารถทนแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก $E_{max}$ (V/mm)
สูญญากาศ	$7.87 \times 10^2$
อากาศ	$7.87 \times 10^2 - 2.953 \times 10^3$
กระเบื้องพอร์ซเลน	$1.575 \times 10^3 - 7.874 \times 10^3$
พาราฟิน แวกซ์ (ซีผึ้ง)	$7.874 \times 10^3 - 1.1811 \times 10^4$
น้ำมันหม้อแปลง	$1.5748 \times 10^4$
แบ็คคาไลท์	$1.1811 \times 10^4 - 2.1654 \times 10^4$
ยาง	$1.7716 \times 10^4 - 2.7559 \times 10^4$
แซลแล็ก	$3.5433 \times 10^4$
กระดาษ	$4.9213 \times 10^4$
เทฟลอน	$5.9055 \times 10^4$
แก้ว	$7.8740 \times 10^4 - 1.18110 \times 10^4$
ไมลาร์	$1.96850 \times 10^4$

### 2.6.3 แฟกเตอร์การสูญเสียในไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss Factor, $\epsilon''$ )

แฟกเตอร์การสูญเสียในไดอิเล็กทริก คือ ค่าพลังงานที่สูญเสียหรือที่แพร่กระจายไปในวัสดุไดอิเล็กทริกเมื่อนำไปวางในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งพลังงานจะสูญเสียโดยเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนในวัสดุไดอิเล็กทริก ถ้าค่านี้สูงแสดงถึงการเกิดความร้อนสูงและกลไกความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กทริกเกิดจาก Ionic Polarization เป็นความร้อนเนื่องจากผลของการเคลื่อนที่ของไอออนในก๊าซหรือในวัสดุไดอิเล็กทริก เมื่อให้สนามไฟฟ้าภายใน ไดอิเล็กทริกจะทำให้ไอออนซึ่งมีประจุไฟฟ้าประจำตัวถูกกระตุ้นและเร่งให้มีการเคลื่อนที่ไปยังทิศทางที่มีขั้วประจุตรงข้าม ทำให้เกิดการชนและเสียดสีกันขึ้นกับไอออนอื่นๆ หรืออนุภาคข้างเคียง เกิดการเปลี่ยนพลังงานจลน์

มาเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งปริมาณที่ได้อิเล็กทริกสามารถดูดซับไว้เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.19

$$P_D = 5.56 \times 10^{-4} E^2 f \varepsilon'' \quad 2.19$$

เมื่อ  $P_D$  คือ พลังงานที่วัสดุได้อิเล็กทริกดูดซับไว้ได้ มีหน่วยวัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $W/cm^3$ )

$E$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำมีหน่วยโวลต์ต่อเซนติเมตร ( $V/cm$ )

$f$  คือ ความถี่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีหน่วยกิกะเฮิรตซ์ (GHz)

$\varepsilon''$  คือ แฟกเตอร์การสูญเสียในได้อิเล็กทริก (Dielectric Loss Factor)

การสูญเสียพลังงานในวัสดุได้อิเล็กทริก สามารถแสดงเป็นค่า Loss Tangent ( $\tan \delta$ ) หรือ Dissipation Factor ซึ่งสามารถคำนวณออกมาในรูปของมุมที่แตกต่างออกไป 90 องศา ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในสภาพปกติทั่วไปของกระแสไฟฟ้า ค่านี้มีส่วนสัมพันธ์กับค่า  $\varepsilon_r$  (Dielectric Constant) และ  $\varepsilon''$  (Dielectric Loss Factor) ดังสมการ 2.20

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{K} \quad 2.20$$

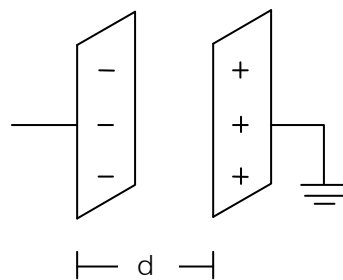
จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.20 ค่า Loss Tangent เป็นค่าที่บ่งบอกว่าวัสดุนั้นจะยอมให้สนามไฟฟ้าผ่านไปได้ดีเพียงใดและสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อนได้ดีเพียงใด ส่วนค่าคงที่ได้อิเล็กทริกแสดงถึงความสามารถของวัสดุได้อิเล็กทริกที่จะกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้เมื่อวางไว้ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ วัสดุที่มีค่าได้อิเล็กทริกสูงจะสามารถกักเก็บพลังงานไว้ได้สูง ซึ่งค่านี้จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นวัสดุได้อิเล็กทริกที่มีองค์ประกอบของน้ำในปริมาณสูงจะมีค่าคงที่ได้อิเล็กทริกสูงเนื่องจากในสถานะของเหลว ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าได้ดีและเปลี่ยนพลังงานที่ได้รับเป็นพลังงานความร้อนได้ดีเนื่องจากโมเลกุลของน้ำสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและเกิดการเสียดสีกับโมเลกุลอื่นๆ ใกล้เคียงเกิดเป็นความร้อนขึ้น [18]

## 2.7 การคำนวณค่าความจุในรูปทรงต่างๆ ของวัสดุไดอิเล็กทริก

### 2.7.1 แผ่นคู่ขนาน

พิจารณาแผ่นขนานพื้นที่  $A$  ห่างกันเป็นระยะทาง  $d$  ดังภาพที่ 2.9 แต่ละแผ่นมีประจุ  $Q$  และ  $-Q$  ถ้าตัวเก็บประจุถูกประจุโดยแบตเตอรี่ซึ่งมีความต่างศักย์คงที่ ศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นขนาน คือ  $V = Ed$  ความหนาแน่นเชิงพื้นผิวของแต่ละแผ่นเป็น  $\sigma = Q/A$  ถ้าแผ่นขนานอยู่ชิดกันมาก กล่าวได้ว่าสนามไฟฟ้ามีค่าสม่ำเสมอระหว่างแผ่นขนานและเป็นศูนย์ในบริเวณอื่น สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นขนาน ดังสมการที่ 2.21

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A} \quad 2.21$$



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน

- เมื่อ  $\epsilon_0$  คือ Permittivity Constant =  $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$   
 $C$  คือ ความจุไฟฟ้า (F)  
 $Q$  คือ ประจุไฟฟ้าโดยการเหนี่ยวนำ (C)  
 $V$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นทั้งสอง (V)  
 $A$  คือ พื้นที่ของแผ่นโลหะ ( $\text{m}^2$ )  
 $d$  คือ ระยะระหว่างแผ่นโลหะ (m)

เนื่องจากสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นขนานมีค่าคงที่ และขนาดความต่างศักย์ระหว่างแผ่นมีค่าเท่ากับ  $Ed$  ดังนั้นจะสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการที่ 2.22

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Ed} = \frac{Q}{Qd/\epsilon_0 A} \Rightarrow C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad 2.22$$

จากสมการจะเห็นว่า ค่าความจุของตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนานจะแปรผันตามขนาดพื้นที่ของแผ่นคู่ขนานและแปรผกผันกับระยะทางระหว่างแผ่น ดังนั้นเราสามารถเพิ่มค่าความจุของตัวเก็บประจุได้โดยการลดระยะทางระหว่างแผ่นขนาน  $d$  ในทางปฏิบัติค่า  $d$  จะถูกจำกัดด้วยการคายประจุผ่านวัสดุไดอิเล็กทริก สำหรับ  $d$  คงที่ค่าหนึ่ง ๆ ความต่างศักย์สูงสุดที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุโดยไม่มีการคายประจุจะขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength) ซึ่งเป็นค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ไดอิเล็กทริกยังไม่แตกตัวเป็นไอออน (ยังไม่นำไฟฟ้า) ถ้าขนาดสนามไฟฟ้าในไดอิเล็กทริกมากกว่าค่าความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก จะสูญเสียคุณสมบัติความเป็นฉนวนและวัสดุไดอิเล็กทริกจะกลายเป็นตัวนำ โดยทั่วไปวัสดุที่เป็นฉนวนจะมีค่า  $\epsilon_r$  มากกว่าหนึ่ง และค่าความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกมากกว่าของอากาศ

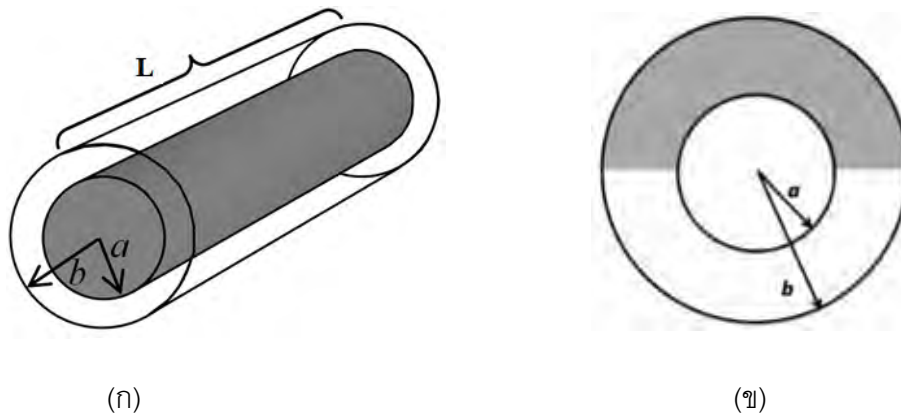
### 2.7.2 ทรงกระบอก

จากกฎของเกาส์ขนาดสนามไฟฟ้าในทรงกระบอกความยาว  $L$  ที่มีการกระจายประจุสม่ำเสมอมีความหนาแน่นประจุเชิงพื้นผิว  $E_r$  เท่ากับ  $2k_E \lambda / r$  บนพื้นที่ระหว่าง  $a < r < b$  ดังภาพที่ 2.10 ก. เมื่อใช้กฎนี้กับทรงกระบอกด้านนอก โดย  $E$  มีทิศตามแนวรัศมี  $r$  และใช้  $\lambda = Q/L$  จะได้ความต่างศักย์ระหว่างทรงกระบอกทั้งสองดังสมการที่ 2.23 และจะได้ความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุดังสมการที่ 2.24

$$V = V_b - V_a = -\int_a^b \vec{E}_r \cdot d\vec{r} = -2k_E \lambda \int_a^b \frac{dr}{r} = -2k_E \lambda \ln(b/a) \quad 2.23$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{2k_E Q}{L} \ln(b/a)} = \frac{L}{2k_E \ln(b/a)} \quad 2.24$$





ภาพที่ 2.10 โครงสร้างตัวเก็บประจุ แบบทรงกระบอก (ก) และทรงกลม (ข)

### 2.7.3 ทรงกลมสองชั้น

ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบทรงกลมที่มีรัศมีทรงกลมเล็กเป็น  $a$  และรัศมีทรงกลมกลวงบางเป็น  $b$  ดังในภาพที่ 2.10 ข. สนามไฟฟ้าภายนอกทรงกลมภายในมีประจุกระจายอย่างสม่ำเสมอมีค่าเท่ากับ  $k_E Q/r^2$  ในกรณีนี้ประยุกต์ผลที่ได้กับสนามระหว่างทรงกลม  $a < r < b$  จากกฎของเกาส์พบว่าภายในทรงกลมเท่านั้นที่มีสนาม ดังนั้นความต่างศักย์ระหว่างทรงกลมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.25 และจะได้ความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุดังสมการที่ 2.26

$$V = V_b - V_a = - \int_a^b E_r dr = -k_E Q \int_a^b \frac{dr}{r^2} \quad 2.25$$

$$= k_E Q \left[ \frac{1}{r} \right]_a^b = k_E Q \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right) = \frac{k_E Q (a - b)}{ab}$$

$$\boxed{C = \frac{ab}{k_E (b - a)}} \quad 2.26$$

## 2.8 สมบัติของพลาสมา (Plasma Properties)

พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายสมบัติของพลาสมาที่สำคัญ ๆ มีดังต่อไปนี้

### 2.8.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอนของพลาสมา (Plasma Temperature)

อุณหภูมิของพลาสมาเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการใช้อธิบายพลังงานของอนุภาคชนิดต่าง ๆ ในพลาสมา ซึ่งในทางปฏิบัตินิยมอธิบายพลังงานของพลาสมาในรูปของอุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) อนุภาคแต่ละชนิดในพลาสมาอาจมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันเนื่องจากเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากัน [7] เช่น อิเล็กตรอนอาจเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วของไอออนบวก จึงมีพลังงานและอุณหภูมิที่มากกว่า เป็นต้น แม้กระทั่งอนุภาคชนิดเดียวกันก็จะมีพลังงานที่ไม่เท่ากัน เช่น ความเร็วของอิเล็กตรอนแต่ละตัวอาจมีการแจกแจงแบบ Maxwell-Boltzmann Distribution (หรือ Gaussian Distribution) เป็นต้น อุณหภูมิของอนุภาคแต่ละชนิดจึงมักคำนวณจากพลังงานเฉลี่ย ( $E_{av}$ ) ของอนุภาคนั้น ๆ โดยสำหรับอนุภาคที่มี  $n$  degree of freedom จะมีความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานเฉลี่ยและอุณหภูมิ ( $T$ ) ดังสมการที่ 2.27

$$\bar{E}_{av} = \frac{n}{2} kT \quad 2.27$$

เมื่อ  $k$  คือค่าคงที่ของ Boltzmann ซึ่งมีหน่วยที่สอดคล้องกับ  $T$

### 2.8.2 ความหนาแน่นของพลาสมา (Plasma Density)

พลาสมาองค์ประกอบที่เป็นไอออนบวก ไอออนลบ อิเล็กตรอน และอนุภาคที่ยังไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนปะปนกันอยู่ โดยพลาสมาจะมีความหนาแน่นขององค์ประกอบต่าง ๆ แตกต่างกันไป เช่น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ( $n_e$ ) ความหนาแน่นของไอออนบวก ( $n_p$ ) และความหนาแน่นของอนุภาคที่เป็นกลาง ( $n_n$ ) ความหนาแน่นของอนุภาคทั้งสามนี้จะเป็นตัวบ่งบอกเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออน ดังสมการที่ 2.28

$$\text{เปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออน} = \frac{n_i}{(n_i + n_n)} \times 100\% \quad 2.28$$

โดยทั่วไปแล้ว ถ้าเปอร์เซ็นต์การแตกตัวมีค่ามากกว่า 10% จะถือว่าก๊าซมีการแตกตัวเป็นไอออนในปริมาณมาก ดังนั้นในการพิจารณาพฤติกรรมของตัวกลางต้องพิจารณาผลของพลาสมาเป็นหลัก แต่ถ้าเปอร์เซ็นต์การแตกตัวน้อยกว่า 1% จะต้องพิจารณาถึงผลของแรงอันตรกิริยาของอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเป็นหลัก

พารามิเตอร์อื่น ๆ ที่สำคัญของพลาสมา อาทิ ระยะเดอบาย (Debye length;  $\lambda_D$ ) ซึ่งเป็นระยะที่บอกคุณสมบัติในการ Shield หรือลดทอนสนามไฟฟ้าจากภายนอกทำให้พลาสมา มีคุณสมบัติเป็น Dielectric สามารถคำนวณได้จากอุณหภูมิและความหนาแน่นของพลาสมา ดังสมการที่ 2.29

$$\lambda_D = \frac{\epsilon_0 k_B T}{e^2 n} \quad 2.29$$

พารามิเตอร์อีกหนึ่งชนิดที่สำคัญ คือ ความถี่ของพลาสมา (Plasma Frequency;  $\omega_p$ ) เกิดจากการที่อนุภาคที่มีประจุในพลาสมา (โดยส่วนใหญ่จะเป็นอิเล็กตรอนเนื่องจากมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้มากกว่า) เคลื่อนที่ตลอดเวลาเพื่อที่จะพยายามปรับตัวให้ประจุโดยรวมของพลาสมา สมดุลหรือเป็นศูนย์ อันเป็นคุณลักษณะเฉพาะของพลาสมาซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพลาสมาดังสมการ 2.30

$$\omega_{pe} = \frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e} \quad 2.30$$

คุณลักษณะสำคัญอื่น ๆ ของพลาสมาอีกหลายอย่าง ได้แก่ ความเข้มของลำพลาสมา การกระจายตัวของก๊าซสปีชีส์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความหนาแน่นและอุณหภูมิของพลาสมา ร่วมกับการวัดสเปกตรัมของพลาสมา

## 2.9 สเปกตรัมของเจ็ตพลาสมาในบรรยากาศ (Atmospheric Plasma Jet Spectrum)

สเปกตรัมแสงจากเจ็ตพลาสมาเกิดจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานระหว่างความแตกต่างของระดับพลังงานในชั้น Ground State และ Excited State ในสถานะพลาสมา กลุ่มอิเล็กตรอนและไอออนหลากหลายสปีชีส์จะได้รับพลังงานดูดกลืนและเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับต่ำหรือสถานะพื้น (Ground State) ไปสู่สถานะกระตุ้น (Excited State) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่า อิเล็กตรอนจะอยู่ในสถานะกระตุ้น  $10^8$ - $10^9$  วินาที และจะกลับลงสู่สถานะพื้นโดยการคายแสงหรือความร้อนออกมา ซึ่งเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานของ Ground State และ Excited State ความยาวคลื่นแสงจะขึ้นกับระดับพลังงานหลากหลายกระจายเป็นสเปกตรัม โดยสเปกตรัมของเจ็ตพลาสมาบางส่วนอาจถูกดูดกลืนในบรรยากาศ ทำให้พลาสมา มีความเบาบางทางแสง (Optically Thin) ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 nm (far UV) ในการวิเคราะห์ เนื่องจากก๊าซ Oxygen Nitrogen และความชื้นในอากาศสามารถดูดกลืนแสงในความยาวคลื่นช่วงนี้ได้

## 2.10 เครื่องวัดสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสง (Optical Emission Spectroscopy, OES)

เครื่องวัดสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสง (Optical Emission Spectroscopy, OES) เป็นเครื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของสารทั้งในเชิงฟิสิกส์และเคมีด้วยวิธีวัดสเปกตรัมแสงจากกระบวนการเปล่งแสง ทำให้สามารถตรวจสอบองค์ประกอบของสาร และศึกษาสมบัติภายในของอะตอม ไอออนหรือโมเลกุลได้ สเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสงส่วนใหญ่สามารถวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ในช่วงความยาวคลื่น 100 – 900 นาโนเมตร (UV-VIS-IR) ที่เปล่งออกมาจากอะตอมโดยที่ระบบวัดจะไม่รบกวนกระบวนการเปล่งแสง เครื่องวัดสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสงจึงนำมาวัดสเปกตรัมแสงจากพลาสมาโดยไม่รบกวนระบบกำเนิดพลาสมา ค่าที่วัดได้สามารถนำไปวิเคราะห์ปริมาณต่าง ๆ อาทิ อุณหภูมิของอิเล็กตรอน อุณหภูมิของก๊าซ ความหนาแน่นของพลาสมา ความเข้มข้นของสปีชีส์ในพลาสมา [13] และในงานวิจัยนี้จะนำผลการวัดสเปกตรัมของพลาสมาไปเปรียบเทียบกับคำนวณหาความอุณหภูมิของพลาสมาเพื่อนำไปวิเคราะห์ความหนาแน่นของพลาสมาต่อไป

## 2.11 ระบบการตรวจวัดสเปกตรัม (Optical emission spectroscopy)

เครื่องสเปกโทรมิเตอร์รุ่น HR4000CG ดังแสดงในภาพที่ 2.11 (ก) ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นระบบส่งผ่านแสงเพื่อไปจำแนกแสงจากการแผ่รังสีของอะตอมหรือไอออนของแก๊สที่ไอออไนซ์เป็นพลาสมา หัววัดของ HR4000CG เป็นเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic) ดังภาพที่ 2.7 (ข) มีพื้นที่รับแสงขนาด 5 ไมโครเมตร ส่วนที่สองเป็นระบบจำแนกความยาวคลื่นแสงซึ่งอาศัยการจำแนกแสงด้วยเกรตติงเลนส์ CCD แบบแถวสามารถตรวจวัดได้ละเอียด 3648 จุด วัดได้แม่นยำในย่านความยาวคลื่น 200 ถึง 1100 นาโนเมตรและแจกแจงความละเอียดได้ถึง 0.75 นาโนเมตร (FWHM) อีกทั้งมีประสิทธิภาพที่ไวต่อความยาวคลื่นในย่าน 1070 ถึง 1100 นาโนเมตร และสามารถวัดได้ครอบคลุมย่าน Optical และ UV โดยที่เครื่องวัดสเปกตรัมรุ่นนี้ใช้ร่วมกับโปรแกรม Ocean Optic SpectraSuite ซึ่งทำหน้าที่แสดง ประมวลผล และเก็บข้อมูลสเปกตรัมตามโหมดควบคุมการทำงานที่ผู้ใช้งานกำหนด ในภาพที่ 2.8 แสดงการประมวลผลข้อมูลสเปกตรัมจากโปรแกรม Ocean Optic SpectraSuite เพื่อการวิเคราะห์อุณหภูมิของอิเล็กตรอน

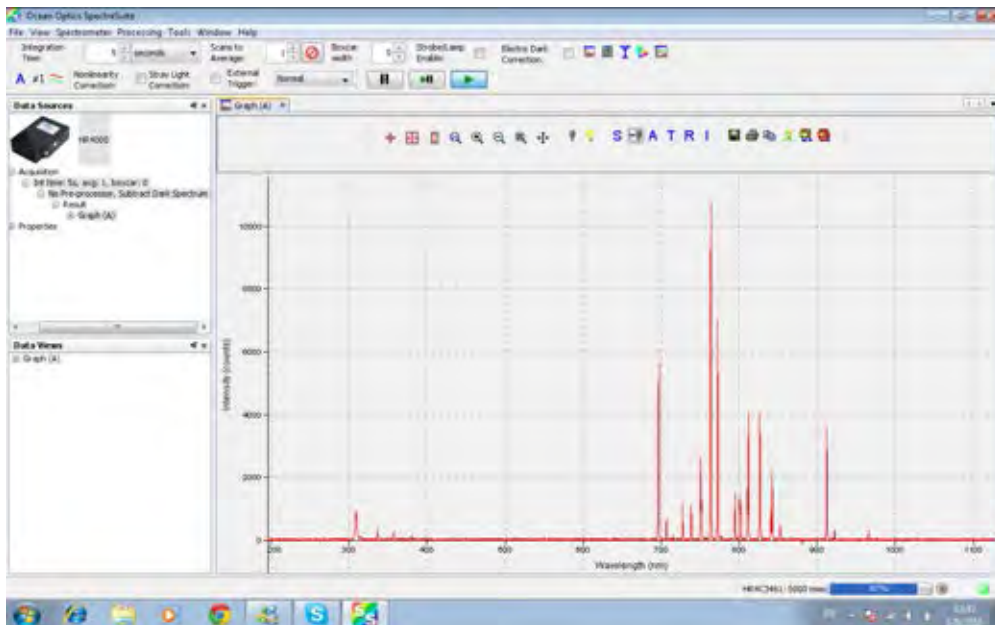


(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.11 (ก) เครื่องวัดสเปกตรัมรุ่น HR4000CG (ข) หัววัดแบบเส้นใยแก้วนำแสง



ภาพที่ 2.12 การประมวลผลข้อมูลสเปกตรัมจากโปรแกรม Ocean Optic SpectraSuite

## 2.12 การคำนวณและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมา

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมาส่วนใหญ่แบ่งออกเป็นสามวิธี คือ วิธี Mass Spectroscopy, วิธีวัดด้วยหัววัดอิเล็กโตรสแตติก (Electrostatic Probe) หรือหัววัดแลงมัวร์ (Langmuir Probe) ซึ่งเป็นการวัดทางไฟฟ้า และ วิธีวัดด้วยเครื่องวัดสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสง ในแต่ละวิธีจะมีเทคนิคการวัดทางแสงและทางไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยทั่วไปนิยมใช้ Langmuir Probe ซึ่งเป็นเทคนิคทางไฟฟ้า ในการวัดอุณหภูมิอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของอิเล็กตรอน เนื่องจากใช้งานง่ายและมีราคาถูก อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อจำกัด คือ ใช้ได้ดีและแม่นยำที่พลาสมา

ความดันต่ำเท่านั้น เนื่องจากระบบนี้จะต้องพิจารณาระยะปลอดการชน (Mean Free Path,  $\bar{\lambda}$ ) โดยจะต้องมีค่ามากกว่ารัศมีของหัววัด ( $r_p$ ) และระยะเดบาย (Debye length,  $\lambda_D$ ) และจะไม่นิยมใช้วิธีนี้กับพลาสมาความดันสูงหรือวัดที่ความดันบรรยากาศเนื่องจากมีระยะปลอดการชนสั้น มีผลให้อนุภาคจะเกิดการชนกันก่อนที่จะถึงหัววัด [15] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีวิเคราะห์สเปกตรัมที่แผ่จากพลาสมาแทน เพราะเป็นการวัดเจ็ตพลาสมาที่บรรยากาศ สเปกตรัมที่ได้เหล่านี้เกิดจากพลังงานกระตุ้นที่แตกต่างกัน และกลุ่มอนุภาคที่แผ่แสงออกมานั้นจะเป็นไปตามฟังก์ชันการกระจายตัวของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's Distribution Function) เนื่องจากพลาสมาอยู่ในสมดุลที่เรียกว่า "Partial Local Thermodynamic Equilibrium, PLTE" โดยมุ่งวัดอุณหภูมิอิเล็กตรอนเป็นหลัก เนื่องจากมีอุณหภูมิสูงกว่าไอออนในพลาสมา ในการวิเคราะห์ผลอาศัยการเขียนกราฟของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's Plot Method) โดยใช้เส้นสเปกตรัมของ ArI และ ArII เป็นหลัก เพราะเป็นสเปกตรัมที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับต่ำไประดับที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามบางสเปกตรัมอาจไม่พบ ArII เนื่องจากต้องใช้พลังงานสูงในการกระตุ้น เหตุผลในการเลือกใช้วิธีนี้เนื่องจากให้ความแม่นยำสูง

### 2.12.1 การคำนวณอุณหภูมิอิเล็กตรอนโดยวิธีการเขียนกราฟของโบลทซ์มันน์

#### (Boltzmann' Plot)

สเปกตรัมของพลาสมาจะประกอบด้วยพีคหลายพีค ซึ่งแต่ละพีคเกิดจากการปลดปล่อยพลังงานของก๊าซในพลาสมาจากระดับพลังงานหนึ่งไปอีกระดับพลังงานหนึ่งด้วยกระบวนการ Radiative Decay ในการคำนวณสเปกตรัมที่ออกมาจากพลาสมา จำเป็นที่จะต้องทราบว่าในกลุ่มก๊าซสเปกตรัมใดที่แตกตัวออกมาบ้าง และมีการกระจายตัวเป็นอย่างไร แบบจำลองของพลาสมาที่ง่ายที่สุด คือ สมมุติว่าพลาสมาอยู่ในสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถใช้แบบจำลองนี้คำนวณหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นเมื่อก๊าซเปลี่ยนระดับพลังงาน (เช่น จากระดับ p ไประดับ q) กับความหนาแน่นของก๊าซที่ระดับพลังงานเริ่มต้น (ระดับ p) [16] ดังแสดงตามสมการที่ 2.31

$$I_{pq} = \frac{hcA_{pq}}{4\pi\lambda_p} N_p \quad 2.31$$

เมื่อ  $h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ ( $4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ ),

$c$  คือ ความเร็วแสง ( $2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),

$A_{pq}$  คือ โอกาสที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับ p ไปที่ระดับ q,

$\lambda_p$  คือ ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ระดับพลังงาน p,

$N_p$  คือ ความหนาแน่นของก๊าซที่มีระดับพลังงาน p ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่

2.32

$$N_p = N_0 \frac{g_p}{U_0} \exp\left(\frac{-E_p}{kT_e}\right) \quad 2.32$$

เมื่อ  $g_p$  คือ ตัวถ่วงน้ำหนักทางสถิติ,

$U_0$  คือ Electronic Partition Function ของก๊าซแต่ละสปีชีส์,

$E_p$  คือ ระดับพลังงาน

p,  $N_0$  คือ ความหนาแน่นของก๊าซแต่ละสปีชีส์

เมื่อแทนสมการ 2.44 ใน 2.43 และหาค่า ln ของทั้งสองข้างของสมการ จะได้สมการ 2.33

$$\ln\left(\frac{I_{pq} \lambda_p}{A_{pq} g_p}\right) = \frac{-E_q}{kT_e} + \ln\left(\frac{hcN_0}{4\pi U_0}\right) \quad 2.33$$

เมื่อ  $I_{pq}$  คือ ความเข้มของสเปกตรัมที่วัดได้

$\lambda_p$  คือ ความยาวคลื่น

เมื่อใช้กระบวนการข้างต้นกับพีคแต่ละพีคในสเปกตรัมของพลาสมา จะสามารถสร้างกราฟแสดง

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_{pq} \lambda_p / A_{pq} g_p)$  กับ  $\frac{E_q}{k_B}$  ได้ ซึ่งจากสมการ 2.45 จะเห็นว่าคือค่าความ

ชันของกราฟที่มีค่าเท่ากับ  $-\frac{1}{T_e}$  นั่นเอง

2.12.1.1 หลักการในการหาอุณหภูมิอิเล็กตรอนโดยวิธีเขียนกราฟของโบลทซ์มัน  
มีดังนี้

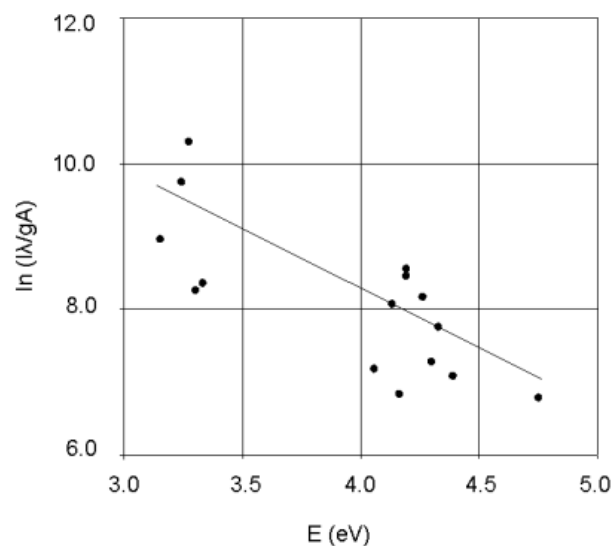
1. เลือกสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วย OES ในเงื่อนไขที่เห็นสเปกตรัมชัดที่สุดโดยตัดพีคของอาร์กอนที่ใกล้เคียงกับสเปกตรัมของไนโตรเจนและออกซิเจนออกเพื่อความแม่นยำในการเลือกพีคอาร์กอน เนื่องจากอาจมีไนโตรเจนและออกซิเจนในอากาศปนอยู่
2. นำค่าสเปกตรัมที่เลือกไปเปรียบเทียบกับค่าสเปกตรัมของ NIST Atomic Spectra Lines Form [24] ของก๊าซอาร์กอน โดยในการเลือกกลุ่มของสเปกตรัมมีวิธีการพิจารณาดังนี้
  - ต้องเป็นสเปกตรัมที่ Transition probability สูงมีค่าที่เชื่อถือได้

- เส้นสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องวัด OES จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับฐานข้อมูล NIST เพื่อหลีกเลี่ยงการคลาดเคลื่อนของหัววัด
  - ระดับพลังงานกระตุ้นที่สูงกว่า ควรมีค่าต่างกันมาก ๆ เพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่แม่นยำมากขึ้น
3. เมื่อได้ค่า  $\lambda_p, E_q, g_p, A_{pq}$  จาก NIST แล้วจึงนำค่าต่าง ๆ ไปคำนวณหา  $\ln(I_{pq}\lambda_p / A_{pq}g_p)$
  4. สร้างกราฟ Boltzmann's Plot ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_q$  กับ  $\ln(I_{pq}\lambda_p / A_{pq}g_p)$  ดังภาพที่ 2.9
  5. หาความชันของกราฟ Boltzmann's Plot
  6. นำค่าความชันมาคำนวณหาอุณหภูมิอิเล็กตรอน

จากสมการ Slope =  $-\frac{1}{k_B T_e}$  ซึ่ง  $k_B = 8.617343 \times 10^{-5} \text{ eVK}^{-1}$

หรือ  $T_e = -\frac{1}{k_B \times (\text{slope})}$  หน่วยเคลวิน(K)

และ  $T_e(\text{eV}) = (8.617343 \times 10^{-5} \text{ eVK}^{-1}) \times T_e(\text{K})$



ภาพที่ 2.13 ตัวอย่างกราฟโบลทซ์มันน์ของพลาสมาอาร์กอน [16]

ที่มา : Optical Emission and Mass Spectrometric Diagnostics of Laser-Induced Plasma



### 2.12.2 การคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพลาสมา

การคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากเส้นสเปกตรัมของไฮดรอนและอะตอมที่ปลดปล่อยออกมาจากพลาสมาสามารถคำนวณจากอุณหภูมิของอิเล็กตรอน โดยที่อุณหภูมิอิเล็กตรอนหาได้ด้วยวิธีการ Boltzmann's Plot จากสมการและวิธีการคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนดังสมการที่ 2.34 [17] [19] [20] [21] ข้างต้น เมื่อทราบอุณหภูมิอิเล็กตรอนในพลาสมาจะสามารถนำไปคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Electron Density,  $n_e$ ) โดยใช้สมการ Saha-Boltzmann Equation ดังนี้

$$n_e = \frac{I_Z^*}{I_{Z+1}^*} 6.04 \times 10^{21} (T)^{\frac{3}{2}} \times \exp\left[\frac{-E_{q,Z+1} + E_{q,Z} - \chi_Z}{k_B T}\right] \text{ cm}^{-3} \quad 2.34$$

โดยที่  $I_Z^* = I_Z \lambda_{pq,Z} / g_{q,Z} A_{pq,Z}$  และ  $\chi_Z$  เป็นค่า Ionization Energy ของสปีชีส์ในระดับพลังงานของ Z และสำหรับระดับพลังงานงานต่ำของอันตรกิริยาในพลาสมาในสมการที่ 2.34 สามารถไม่นำมาคิดได้

## บทที่ 3

### การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วิจัย

ในการศึกษาวิจัยเพื่อออกแบบระบบกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบ DBD ซึ่งให้พลาสมาความหนาแน่นสูง สำหรับนำไปใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อทางการแพทย์ จะเลือกออกแบบและสร้างโปรบกำเนิดพลาสมาในแบบเจ็ตพร้อมอุปกรณ์ประกอบ รวมทั้งออกแบบระบบทดสอบและวัดพารามิเตอร์ของพลาสมา ได้แก่ ความหนาแน่น อุณหภูมิ และสเปกตรัมของพลาสมา โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมา

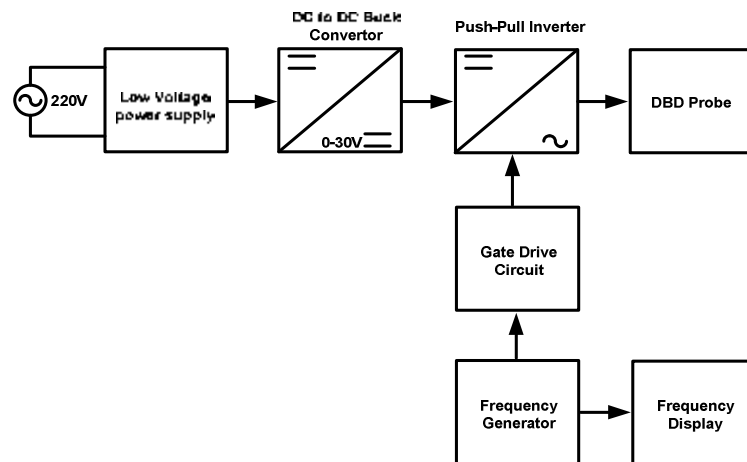
แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จความหนาแน่นสูงประกอบด้วยปัจจัยหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูงและโครงสร้างของโปรบที่มีสนามไฟฟ้าสูง โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะต้องมีสมรรถนะเพียงพอต่อการใช้งานด้านการกำเนิดพลาสมาอุณหภูมิต่ำความหนาแน่นสูงที่ความดันบรรยากาศได้อย่างต่อเนื่อง สามารถแปรเปลี่ยนพารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อการกำเนิดพลาสมา ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าแรงสูงและความถี่ เป็นต้น

##### 3.1.1 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูง

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่าแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จเพื่อผลิตพลาสมาแบบเจ็ต จะใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ที่ขนาดแรงดันไฟฟ้า 10-40 kV<sub>pp</sub> กระแสไฟฟ้าประมาณ 3 mA และความถี่ระหว่าง 20 – 40 kHz โดยข้อมูลดังกล่าวได้นำมาออกแบบโครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูงแบบประหยัดผังแผนภาพในภาพที่ 3.1 ประกอบด้วยวงจรร้อยย ดังนี้

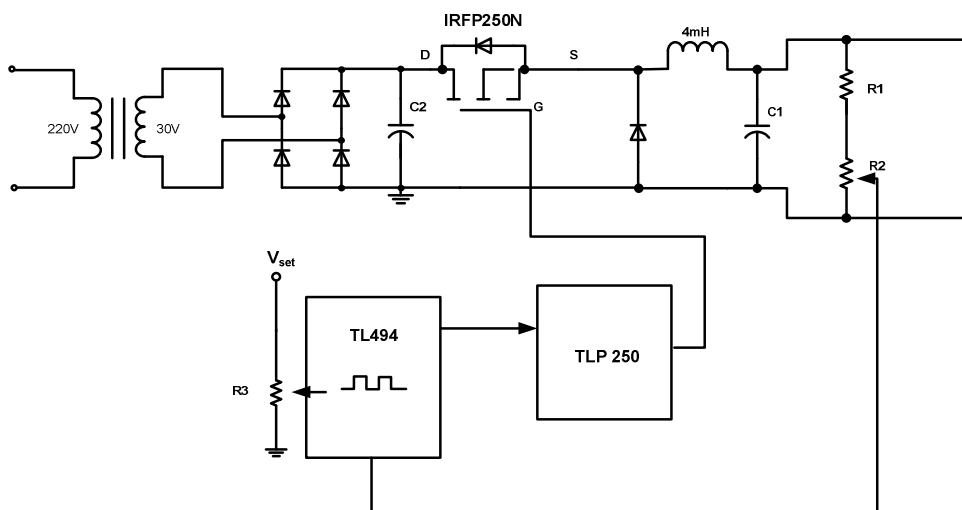
1. แหล่งจ่ายไฟฟ้าปรับค่าได้แบบสวิตซิง (DC to DC Buck converter)
2. วงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพุช-พูล (Push-Pull Inverters)
3. วงจรกำเนิดความถี่ (Frequency Generator)
4. วงจรแสดงผลความถี่ (Frequency Display )

จากแผนภาพที่ 3.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูงได้ออกแบบให้สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ระหว่าง 0-40 kV<sub>pp</sub> และปรับความถี่ได้ระหว่าง 20-100 kHz เพื่อจ่ายให้กับหัวอิเล็กโทรดของโปรบกำเนิดพลาสมา มีรายละเอียดของวงจรต่าง ๆ ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.1 แผนภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูง

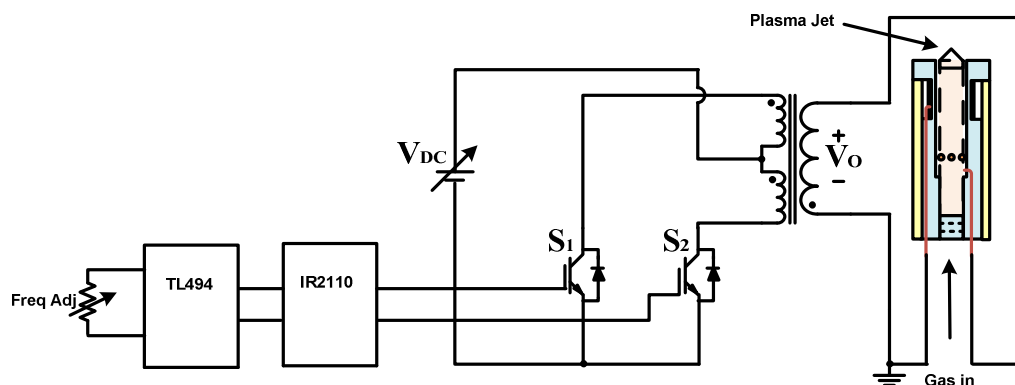
### 1. แหล่งจ่ายไฟฟ้าปรับค่าได้แบบสวิตซิง (DC to DC Buck converter)



ภาพที่ 3.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าปรับค่าได้แบบสวิตซิง

เพื่อลดการสูญเสียของกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบปรับแรงดันไฟฟ้าได้ จึงเลือกใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสตรงแบบทอนระดับ (DC-DC Buck Converter) ดังวงจรในภาพที่ 3.2 โดยนำไฟฟ้ากระแสสลับ 220V 50Hz มาลดแรงดันไฟฟ้าด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าและเรียงกระแสให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมกรองไฟฟ้าให้เรียบด้วยตัวเก็บประจุได้แรงดันไฟฟ้าที่ 43 V จากนั้นป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าวงจรทอนระดับ (Buck) เพื่อกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตช์ โดยเลือกใช้ไอซี TL494 กำเนิดสัญญาณ PWM ผ่านไอซีขับเกต (Gate drive) เบอร์ TLP250 ในการควบคุมการทำงานของมอสเฟต IRFP250N การปรับแรงดันไฟฟ้าใช้การปรับดิวตีไซเคิล(Duty Cycle) ของสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชัน (PWM) การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำให้คงที่ อาศัยการป้อนกลับแรงดันทางด้านออกไปให้ไอซี TL494 เพื่อควบคุม PWM ที่ป้อนให้กับมอสเฟตให้นำกระแสมากขึ้นหรือน้อยลงเพื่อชดเชยตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกได้ 0-30 V จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 3 A สำหรับจ่ายให้กับวงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

## 2. วงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพุช-พูล (Push-Pull Inverters)



ภาพที่ 3.3 วงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

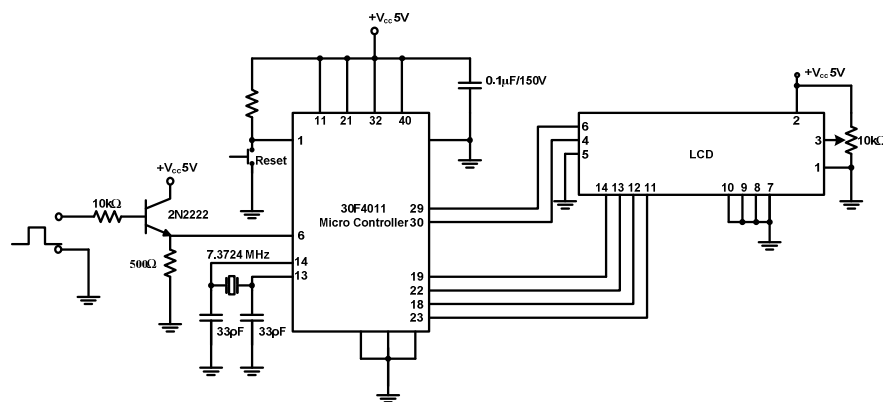
วงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพุช-พูลในภาพที่ 3.3 เพื่อกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุช-พูลและหม้อแปลงไฟฟ้า

แรงดันสูงความถี่สูง ซึ่งแกนทำด้วยเฟอร์ไรต์ โดยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุก-พุลจะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับประกอบด้วยไอจีบีที (IGBT) 2 ตัว ทำงานสลับกันด้านละครึ่งไซเคิลเพื่อขับกระแสสวิตช์ให้ขดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง โดยสัญญาณที่ใช้ควบคุมการนำกระแสของไอจีบีทีมีค่าดิวตีไซเคิล (Duty Cycle) 45% กำเนิดวงจรถ้าเนดความถี่ส่งผ่านไอซีขับเกตเบอร์ IR2110 ส่วนขนาดของไฟฟ้าแรงดันสูงปรับค่าได้จากขนาดของไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าปรับค่าได้แบบสวิตชิง ที่จ่ายให้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุก-พุล ทำให้ได้ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูงทางขดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง สำหรับจ่ายให้กับโพรบก้าเนดพลาสมา

### 3. วงจรกำเนิดความถี่ (Frequency Generator)

การกำเนิดสัญญาณความถี่สูงขับอินเวอร์เตอร์แบบพุก-พุล ได้ประยุกต์ใช้ไอซี PWM เบอร์ TL494 นอกจากกำเนิดความถี่ปรับค่าได้ในย่าน 20-100 kHz ยังสามารถปรับค่าดิวตีไซเคิล (Duty Cycle) ให้เหมาะกับการขับเกตของไอจีบีที วงจรกำเนิดความถี่จะทำงานร่วมกับวงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพุก-พุล ดังวงจรในภาพที่ 3.3

### 4. วงจรแสดงผลความถี่ (Frequency Display)



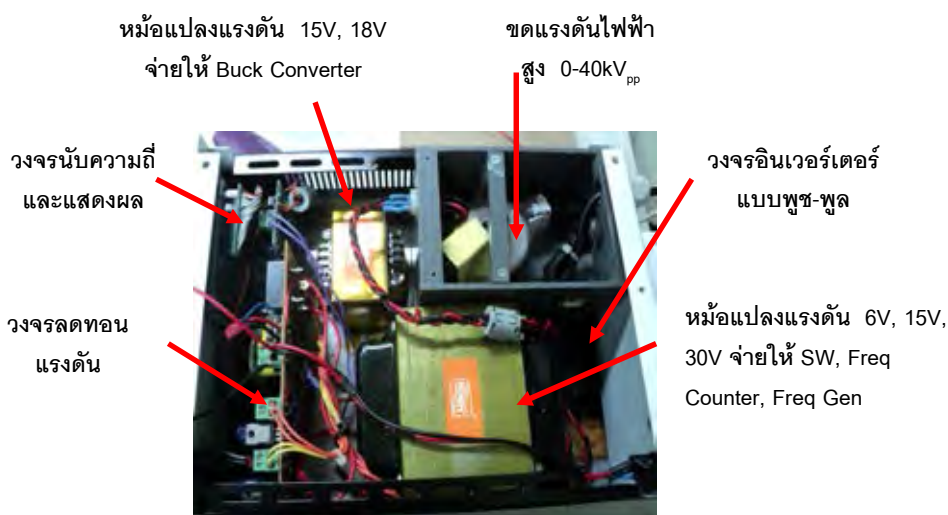
ภาพที่ 3.4 วงจรแสดงผลความถี่

วงจรแสดงผลความถี่ดังแสดงในภาพที่ 3.4 ประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนนับความถี่และส่วนแสดงผล (Display) ในส่วนของการนับความถี่ได้ออกแบบโดยใช้โมดูลตรวจจับสัญญาณ (Input Capture) ในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC 30F4011 ซึ่งจะตรวจนับความถี่ของสัญญาณจากวงจรถ้าเนดความถี่ สามารถนับความถี่สูงสุด 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่เข้ามาทางขาพอร์ต

RB4 ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจนับจำนวนพัลส์ของสัญญาณความถี่ทุก ๆ 1 วินาที และนำไปคำนวณความถี่โดยส่งข้อมูลแบบ 4 บิต เพื่อไปแสดงผลความถี่บนโมดูล LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด เนื่องจากสัญญาณจากวงจรกำเนิดความถี่มีแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 0-15 โวลต์ แต่ไมโครคอนโทรลเลอร์รับสัญญาณอินพุตได้ระหว่าง 0-5 โวลต์ จึงต้องปรับระดับสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์ 2N2222 ซึ่งจัดวงจรเป็นแบบวงจรคอลเล็กเตอร์ร่วม (Common Collector) ทำหน้าที่รับสัญญาณทางด้านเข้าระหว่าง 0-15 โวลต์ และให้สัญญาณทางด้านออกระหว่าง 0-5 โวลต์เพื่อส่งสัญญาณให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูง

วงจรที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.1.1 ได้นำมาสร้างแผ่นพิมพ์วงจรและประกอบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงแบบประหยัด ใช้ชิ้นส่วนที่หาได้ในประเทศเพื่อให้ง่ายต่อการบำรุงรักษา แหล่งจ่ายสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ในช่วง 20-100 kHz และปรับแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 40 kV<sub>pp</sub> สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า 30 W ตัว ส่วนประกอบภายในแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูงที่ประกอบพร้อมใช้ขับเคลื่อนแหล่งกำเนิดพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ แสดงในภาพที่ 3.5 และ หน้าจอแสดงผลความถี่ของแหล่งจ่ายแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.5 แสดงส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่



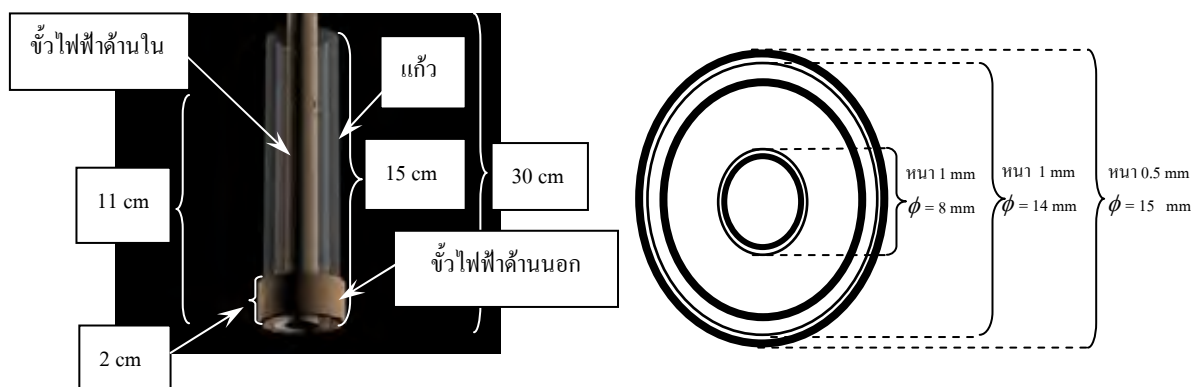
ภาพที่ 3.6 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูง

### 3.1.3 การออกแบบและสร้างโพรบกำเนิดพลาสมา

การออกแบบแหล่งกำเนิดพลาสมาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบ ซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งขนาดและวัสดุที่เป็นไดอิเล็กทริกเพื่อให้เหมาะสมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงในการผลิตพลาสมา ลักษณะของโพรบที่ให้ความเข้มข้นไฟฟ้าสูงที่นิยมใช้กันเป็นแบบโคแอกเซียล ซึ่งจะต้องมีการศึกษาเงื่อนไขของรูปทรงและระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมและสอดคล้องกับอัตราไหลของก๊าซ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลาสมาให้ดียิ่งขึ้น

#### 3.1.3.1 การออกแบบโพรบกำเนิดพลาสมาแบบที่ 1 และ แบบที่ 2

โพรบกำเนิดพลาสมาแบบที่ 1 ใช้วัสดุไดอิเล็กทริกที่ทำจากแก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate Glass) หรือแก้วแข็ง (Hard Glass) เนื่องจากห่ายราคาถูก ทนอุณหภูมิสูง ได้ออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าภายในและภายนอก 2 เซนติเมตร ดังแบบภาพที่ 3.7 และโพรบที่สร้างขึ้นในภาพที่ 3.8 ส่วนแบบที่ 2 เปลี่ยนวัสดุไดอิเล็กทริกเป็นแก้วไพเร็กซ์เพราะทนอุณหภูมิสูงกว่า



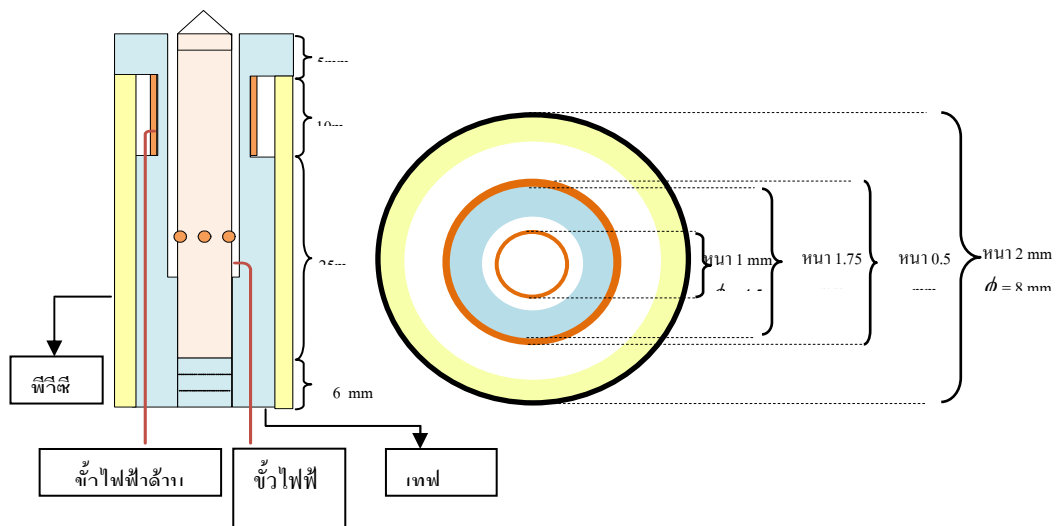
ภาพที่ 3.7 แผนภาพและภาพตัดขวางของโคแอกเซียล DBD ที่ทำการออกแบบขึ้น



ภาพที่ 3.8 โปรบที่ใช้แก้วเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก

### 3.1.3.2 ออกแบบโพรบกำเนิดพลาสมาแบบที่ 3

โพรบกำเนิดพลาสมาแบบที่ 3 ใช้วัสดุไดอิเล็กทริกที่ทำจากเทฟลอน (Teflon) เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถทนต่อความถี่สูงและออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าภายในและภายนอก 1 เซนติเมตร แสดงแบบในภาพที่ 3.9 และโพรบที่สร้างขึ้นในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.9 แผนภาพตัดขวางของโคแอกเซียลไดอิเล็กทริกแบริเอตีสซาร์จที่ทำ





ภาพที่ 3.10 โปรบที่ใช้เทฟลอนเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก

โครงสร้างของโปรบกำเนตพลาสติกทั้งสองแบบตามแผนภาพที่ 3.7 และ 3.9 มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก 2 ชั้นขนานกัน และมีวัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric material) กั้นอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเพื่อมิให้ขั้วไฟฟ้านอกสัมผัสโดยตรงกับพลาสติก จึงสามารถป้องกันการเกิด Arcing ที่แรงดันไฟฟ้าสูง ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลจากการเกิด Secondary Emission ที่ขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าด้านในทำด้วยทองแดงต่อเข้ากับไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage) และขั้วไฟฟ้าด้านนอกทำจากทองแดงเช่นกันต่อเข้ากับกราวด์ (Ground) ซึ่งข้อแตกต่างระหว่างโปรบทั้งสองคือวัสดุที่ใช้เป็นไดอิเล็กทริกและขนาดโครงสร้างของโปรบที่ได้ออกแบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

**โปรบแบบที่ 1** ขั้วไฟฟ้าด้านใน ขั้วไฟฟ้าด้านนอก และวัสดุไดอิเล็กทริกถูกประกอบเข้าด้วยกันตามแบบในภาพที่ 3.7 ส่วนปลายของขั้วไฟฟ้าด้านในซึ่งเป็นท่อกลวงเชื่อมต่อกับระบบก๊าซ โดยก๊าซจะถูกป้อนเข้าไปทางปลายของขั้วไฟฟ้าที่ด้านในได้เจาะรูจำนวน 4 รูไว้รอบ ๆ เว้นระยะห่างระหว่างแต่ละรูเท่า ๆ กัน เพื่อให้ก๊าซสามารถไหลผ่านรูทั้ง 4 จากผนังด้านในของขั้วไฟฟ้าออกสู่ด้านนอก ตำแหน่งของรูจะอยู่ห่างจากส่วนหัวของท่อประมาณ 11 เซนติเมตร เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอของลำก๊าซที่ออกมา ส่วนหัวของขั้วไฟฟ้าด้านในจะถูกปิดไว้เพื่อให้ก๊าซมีทางออกทางเดียว (ผ่านรูที่เจาะไว้) ขั้วไฟฟ้าด้านในถูกยึดติดกับท่อแก้วโดยใช้ยางโอรังรองรับไว้ที่ส่วนท้าย โดยรอบและช่วยรักษาช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและท่อแก้ว (Air Gap) ให้มีระยะห่างสม่ำเสมอและให้ก๊าซไหลออกทางส่วนหัวเท่านั้น ขั้วไฟฟ้าด้านนอก (Outer Electrode) หุ้มติดไว้บริเวณส่วนหัวของผนังนอกท่อแก้ว และใช้กาว Epoxy หุ้มทับไว้เพื่อป้องกันการ Arcing ข้ามผ่านระหว่าง

ขั้วไฟฟ้าด้านนอกสู่ขั้วไฟฟ้าด้านใน ซึ่งโพรบกำเนิดพลาสมาชนิด DBD ที่ใช้วัสดุไดอิเล็กทริกเป็น แก้วโบโรซิลิเกตที่สร้างขึ้นแสดงในภาพที่ 3.8

**โพรบแบบที่ 2** มีโครงสร้างเหมือนกับแบบที่ 1 แต่เปลี่ยนวัสดุไดอิเล็กทริกจากแก้วโบโรซิลิเกตเป็นแก้วไฟเร็กซ์เนื่องจากสามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่า

**โพรบแบบที่ 3** เป็นแบบที่พัฒนามาจากแบบที่ 1 และแบบที่ 2 หลังจากได้มีการศึกษา ข้อมูลเบื้องต้นเพื่อให้เหมาะกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง โพรบชนิดนี้เลือกใช้เทพลอน เป็นวัสดุไดอิเล็กทริกและลดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเพื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าให้กับแหล่งกำเนิด พลาสมาให้มีความเข้มสูงขึ้นและเนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวที่เทพลอนไม่สามารถที่จะยึดติดกับ วัสดุใดๆ ได้ จึงไม่สามารถใช้กาว Epoxy ในการยึดวัสดุและหุ้มป้องกันการ Arcing ระหว่าง ขั้วไฟฟ้าด้านในและด้านนอก การออกแบบจึงใช้ความยืดหยุ่นของวัสดุในการอัดขึ้นส่วนของโพรบ ประกอบเข้าด้วยกันเพื่อแก้ปัญหาการ Arcing ระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยการออกแบบโครงสร้างของ เทพลอนจะมีขอบบ่าป้องกันไม่ให้สนามไฟฟ้าด้านในข้ามผ่านไปยังขั้วไฟฟ้าด้านนอกได้ ก๊าซจะถูก ส่งเข้าไปทางด้านในของขั้วไฟฟ้า ซึ่งได้ทำการเจาะรูจำนวน 4 รูไว้รอบ ๆ โดยเว้นระยะห่างระหว่าง แต่ละรูเท่า ๆ กัน เพื่อให้ก๊าซสามารถไหลผ่านรูทั้ง 4 จากด้านในของขั้วไฟฟ้าออกสู่ด้านนอก ตำแหน่งของรูก๊าซจะอยู่ห่างจากส่วนปลายของขั้วไฟฟ้าด้านในประมาณ 25 mm เพื่อเพิ่มความ สม่ำเสมอของลำก๊าซที่ออกมา ส่วนปลายของขั้วไฟฟ้าด้านในจะถูกปิดไว้เพื่อให้ก๊าซมีทางออก ทางเดียว (ผ่านรูที่เจาะไว้) เช่นเดียวกับแบบที่ 1

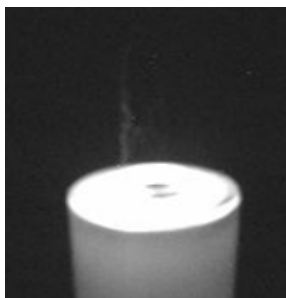
### 3.1.3.3 รูปแบบของโพรบและรูปร่างของเปลวพลาสมา

หลังจากสร้างโพรบแบบที่ 1 และ 2 ได้ทดสอบการกำเนิดพลาสมาในเบื้องต้น เพื่อศึกษา ข้อมูลทั้งด้าน วัสดุไดอิเล็กทริก ความเข้มสนามไฟฟ้า การทนการเกิด Arcing อัตราการไหลก๊าซ และรูปร่างปลายของขั้วอิเล็กโทรดด้านในที่มีผลต่อการกระจายสนามไฟฟ้าและรูปร่างของลำ พลาสมา โดยผลการทดสอบการกำเนิดพลาสมาของโพรบแบบที่ 1, 2 และ 3 ที่เงื่อนไขต่างๆ แสดง ในภาพที่ 3.11, 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ

### โพรบแบบที่ 1



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3.11 การใช้โพรบแบบที่ 1 ทดสอบกำเนิดลำพลาสมา

- (ก) รูปลักษณะของโพรบแบบที่ 1 วัสดุไดอิเล็กทริกเป็นแก้วโบโรซิลิเกต ใช้ไม้เป็นวัสดุอุด ส่วนปลายหัวอิเล็กโทรดด้านใน
- (ข) พลาสมาที่กำเนิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่ต่ำ 500 – 1000 เฮิร์ตซ์
- (ค) พลาสมาที่กำเนิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูง 20 – 100 กิโลเฮิร์ตซ์

ข้อมูลเบื้องต้นพบว่าพลาสมาที่กำเนิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่ต่ำ 500 – 1000 เฮิร์ตซ์ ใช้อัตราไหลก๊าซอาร์กอนสูง ให้ความเข้มของลำพลาสมาน้อยดังในภาพ (ข) เมื่อเปลี่ยนมาใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูง 20 – 40 กิโลเฮิร์ตซ์ สังเกตว่าความเข้มของลำพลาสมาสูงขึ้น แต่ต้องใช้อัตราไหลของก๊าซอาร์กอนสูง มีลำพลาสมาพื้นที่กว้าง อีกทั้งมีข้อจำกัดของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ไม่สามารถทนความถี่สูงได้ ขณะเดียวกันโครงสร้างไม่สามารถทนไฟฟ้าแรงดันสูงเกิน 20 kV<sub>pp</sub> ได้ จึงปรับโครงสร้างโพรบเป็นแบบที่ 2 พร้อมศึกษาผลของรูปทรงปลายอิเล็กโทรดด้านในต่อรูปทรงลำพลาสมา

## โปรบแบบที่ 2



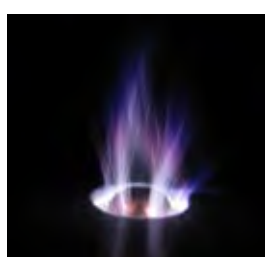
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 3.12 การใช้โปรบแบบที่ 2 ทดสอบกำเนิดลำพลาสมา

- (ก) รูปลักษณะของโปรบแบบที่ 2 วัสดุไดอิเล็กทริกเป็นแก้วไพเรกซ์ใช้อิเล็กโทรดด้านในเป็นทองเหลืองที่ปลายมีรูปร่างต่าง ๆ กำเนิดพลาสมาจากแหล่งกำเนิดความถี่สูง 20 – 40 กิโลเฮิร์ตซ์
- (ข) รูปทรงของปลายอิเล็กโทรดด้านใน 3 รูปแบบที่ใช้ทดลอง
- (ค) ลำพลาสมาที่กำเนิดจากปลายทองเหลืองรูปร่างแหลม
- (ง) ลำพลาสมาที่กำเนิดจากปลายทองเหลืองรูปร่างมน
- (จ) ลำพลาสมาที่กำเนิดจากปลายทองเหลืองรูปร่างแบน

ข้อมูลจากการทดลองพบว่าพลาสมาที่กำเนิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูง 20 – 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ให้ความเข้มของลำพลาสมามากกว่า และลำพลาสมาที่กำเนิดจากปลายทองเหลืองรูปร่างมนมีรูปทรงเจ็ตที่ดีกว่า แต่ข้อจำกัดของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ไม่สามารถทนความถี่สูง นำไปสู่การสร้างโปรบแบบที่ 3

### โปรบแบบที่ 3



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

(จ)

ภาพที่ 3.13 การใช้โปรบแบบที่ 3 ทดสอบกำเนิดพลาสมา

- (ก) พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 kVpp ความถี่ 74 kHz อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน 6l/min
- (ข) พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 30 kVpp ความถี่ 74 kHz อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน 2l/min
- (ค) พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 30 kVpp ความถี่ 74 kHz อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน 8l/min
- (ง) พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 30 kVpp ความถี่ 74 kHz อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน 6l/min
- (จ) ปลายลำพลาสมาในบรรยากาศกำลังเคลื่อนเข้าหาปลายนิ้ว

ข้อมูลจากการทดลองพบว่าพลาสมาที่กำเนิดจากโปรบแบบที่ 3 ใช้ปลายทองเหลืองรูปร่างมนมีรูปทรงเจ็ตที่ดีกว่า วัสดุไดอิเล็กทริกเป็นเทปลอนทนความถี่สูงและแรงดันไฟฟ้าแรงสูงได้ดี และให้ความเข้มของลำพลาสมามากกว่า และพบว่าลำพลาสมาที่กำเนิดในบรรยากาศจะเคลื่อนเข้าวัสดุที่มีสภาวะสนามไฟฟ้าเป็นกลางที่มาเหนี่ยวนำ

### 3.2 การคำนวณสนามไฟฟ้า

ค่าสนามไฟฟ้าและค่าคาปาซิแตนซ์ในแต่ละชั้นฉนวนของโครงสร้างโปรบแบบที่ 3 ในภาพที่ 3.18 สำหรับกำเนิดพลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกดิสชาร์จ สามารถคำนวณโดยกำหนดให้

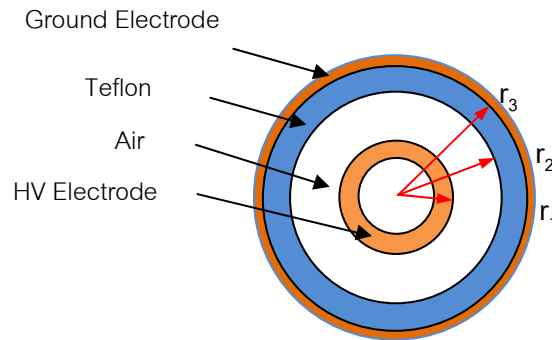
$r_1$  เป็นรัศมีของอิเล็กโตรดภายใน มีค่าเท่ากับ 0.225 เซนติเมตร

$r_2$  เป็นรัศมีของฉนวนชั้นที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.325 เซนติเมตร

$r_3$  เป็นรัศมีของฉนวนชั้นที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.675 เซนติเมตร

ระยะช่องว่างอากาศสำหรับดิสชาร์จ คือ 0.1 เซนติเมตร ความยาวของช่องที่ดิสชาร์จมีระยะประมาณ 1 เซนติเมตร ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเทปลอนเท่ากับ 2.1 และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ของอากาศเท่ากับ 1 สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้นที่ 1 ( $E_1$ ) คือ อากาศ และสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้นที่ 2 ( $E_2$ ) คือ เทฟลอน ที่ระดับแรงดัน 0-15 kV ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.14 อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันสามชั้น

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้นที่ 1 ( $E_1$ ) คือ อากาศ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 15 kV

$$E_{1\max} = \frac{\epsilon_2 U}{r_1 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad 3.1$$

$$= \frac{2.1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 15 \times 10^3}{0.225 \times \left[ \left( 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times \ln \frac{0.675}{0.325} \right) + \left( 2.1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times \ln \frac{0.325}{0.225} \right) \right]}$$

$$= 93.14 \text{ kV/cm}$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้นที่ 2 ( $E_2$ ) คือ เทฟลอน ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 15 kV

$$E_{2\max} = \frac{\epsilon_1 U}{r_2 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad 3.2$$

$$= \frac{1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 15 \times 10^3}{0.325 \times \left[ \left( 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times \ln \frac{0.675}{0.325} \right) + \left( 2.1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times \ln \frac{0.325}{0.225} \right) \right]}$$

ค่าคาปาซิแตนซ์รวม = 32.362 kV/cm

$$C_t = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad 3.3$$

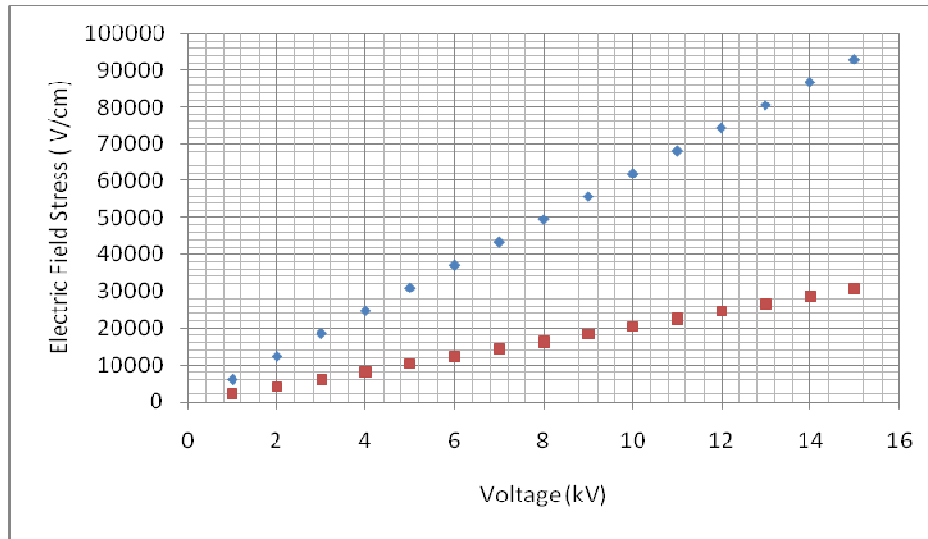
$$= \frac{2\pi \times 8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 2.1}{1 \times \ln \frac{0.675}{0.325} + 2.1 \times \ln \frac{0.325}{0.225}}$$

$$= 77.7 \text{ pF}$$

เมื่อ	$C_t$	คือ ค่าคาปาซิแตนซ์รวม (F/m)
	$C_1$	คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ของอากาศ (F/m)
	$C_2$	คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ของเทปลอน (F/m)
	$\epsilon_1$	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศ มีค่า 1
	$\epsilon_2$	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเทปลอน มีค่าเท่ากับ 2.1
	$\epsilon_0$	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ หรือที่ว่าง มีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{12} \text{ F/m}$

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าในอากาศและเทปลอนมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0-15 kV แสดงดังภาพที่ 3.19 จะเห็นได้ว่าในฉนวนชั้นที่ 1 ซึ่งเป็นอากาศจะเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าประมาณ 5 kV เนื่องจากอากาศมีค่าความคงทนของอากาศประมาณ 30 kV/cm เมื่ออากาศเกิดการแตกตัวแล้วแรงดันไฟฟ้าทั้งหมดจะตกคร่อมฉนวนชั้นที่ 2 ซึ่งเป็นฉนวนชนิดเทปลอนที่มีค่าความคงทนประมาณ 590 kV/cm ดังตารางที่ 2.2 ดังนั้นจึงไม่เกิดการเบรกดาวน์ หรือ เกิดการเสียหายของฉนวนที่เป็นเทปลอน ส่วนที่เป็นอากาศ ย่านแรงดันไฟฟ้าที่จะเกิดการแตกตัว คือ ย่าน

แรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 5 kV ขึ้นไป จึงสามารถใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง 0-15 kV ในการทดลองนี้ได้



ภาพที่ 3.15 ความสัมพันธ์ความเครียดสนามไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของอากาศและเทปลอน

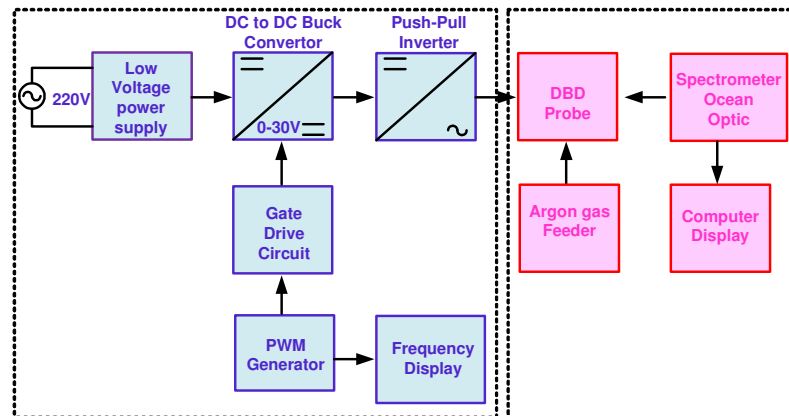
- E1 ค่าสนามไฟฟ้าในเทปลอน
- E2 ค่าสนามไฟฟ้าในอากาศ

### 3.3 การออกแบบอุปกรณ์ทดลอง

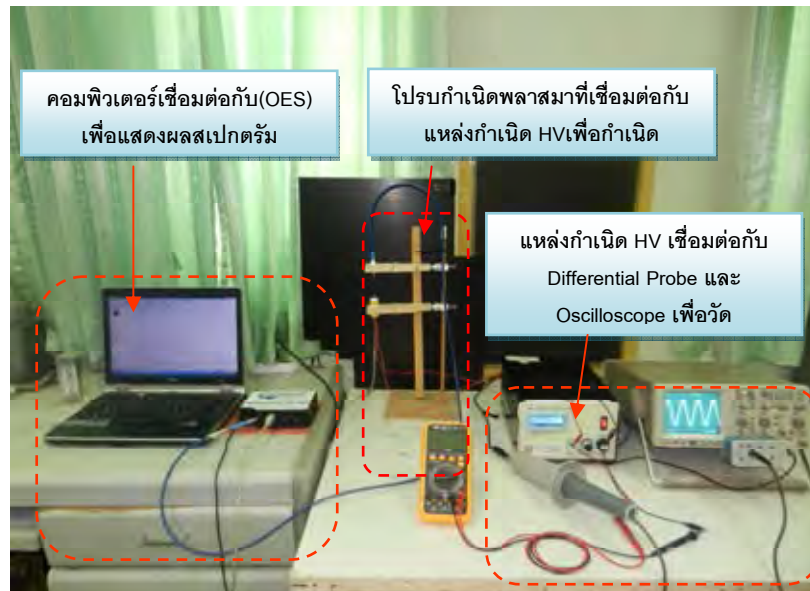
#### 3.3.1 ระบบกำเนิดพลาสมา

อุปกรณ์กำเนิดพลาสมาประกอบด้วยโพรบกำเนิดลำพลาสมา แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูง เครื่องมือในการวัดไฟฟ้าแรงดันสูงและอ่านรูปสัญญาณ โดยมีการจัดระบบวัดเพื่อการทดลองดังแผนภาพในภาพที่ 3.15 และรูปถ่ายระบบวัดในภาพที่ 3.16





ภาพที่ 3.16 แผนภาพแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูงแรงดันสูงและระบบการวัดพลาสมา



ภาพที่ 3.17 ระบบการกำเนตพลาสมาและระบบการวัดสเปกตรัมของพลาสมาด้วย OES

### 3.3.2 ระบบวัดสเปกตรัมด้วยหัววัดสเปกตรัมแบบเปล่งแสง (OES)

ระบบวัดสเปกตรัมใช้เครื่องวัดสเปกตรัมแบบเปล่งแสง OES รุ่น HR4000CG เพื่อนำข้อมูลวัดไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล NIST เพื่อหาพารามิเตอร์ในการคำนวณหาอุณหภูมิอิเล็กตรอนโดยวิธีการสร้างกราฟของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann' Plot) และนำ

คุณหมุมิที่คำนวณได้ไปคำนวณหาความหนาแน่นของพลาสมาจากความสัมพันธ์ของ Saha equation ดังแสดงขั้นตอนในภาพที่ 3.17



พลาสมา  $\implies$  หัววัดแสง  $\implies$  สเปกโทรสโคปี  $\implies$  โปรแกรม SpectraSuit

ภาพที่ 3.18 ระบบการวัดด้วยเครื่องวัดสเปกตรัมแบบ OES

### 3.3.3 โปรแกรมควบคุมระบบการวัดสเปกตรัม SpectraSuit

โปรแกรม SpectraSuit เป็นโปรแกรมที่ใช้ร่วมกับเครื่องวัดสเปกตรัมรุ่น HR4000CG ของบริษัท Ocean Optic โดยเทคนิค OES เป็นการศึกษาวิเคราะห์หาค่าสเปกตรัม ในสถานะพลาสมาจากการไอออไนซ์ของอะตอมก๊าซในบรรยากาศและก๊าซอาร์กอนที่ป้อนเข้าไป สเปกตรัมที่วัดได้อยู่ในช่วง 200 - 1100 nm

## บทที่ 4

### วิธีการวิจัยและผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งในส่วนแรกจะทำการทดสอบสมรรถนะของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูงในการกำเนิดพลาสมา และ ส่วนที่สองจะทำการวัดสเปกตรัมเพื่อนำข้อมูลไปคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอน และทำการวิเคราะห์หาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพลาสมา

#### 4.1 การทดสอบสมรรถนะของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูง

การทดสอบสมรรถนะของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูง โดยแปรเปลี่ยนความถี่ที่ประมาณ 50 kHz ถึง 110 kHz ใช้แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 8.5, 12.5 และ 22.4 kV<sub>pp</sub> รักษาแรงดันไฟฟ้าคงที่ตลอดย่านความถี่และวัดแรงดันไฟฟ้าขาออก แบ่งการทดสอบเป็น 4 กรณี ดังนี้

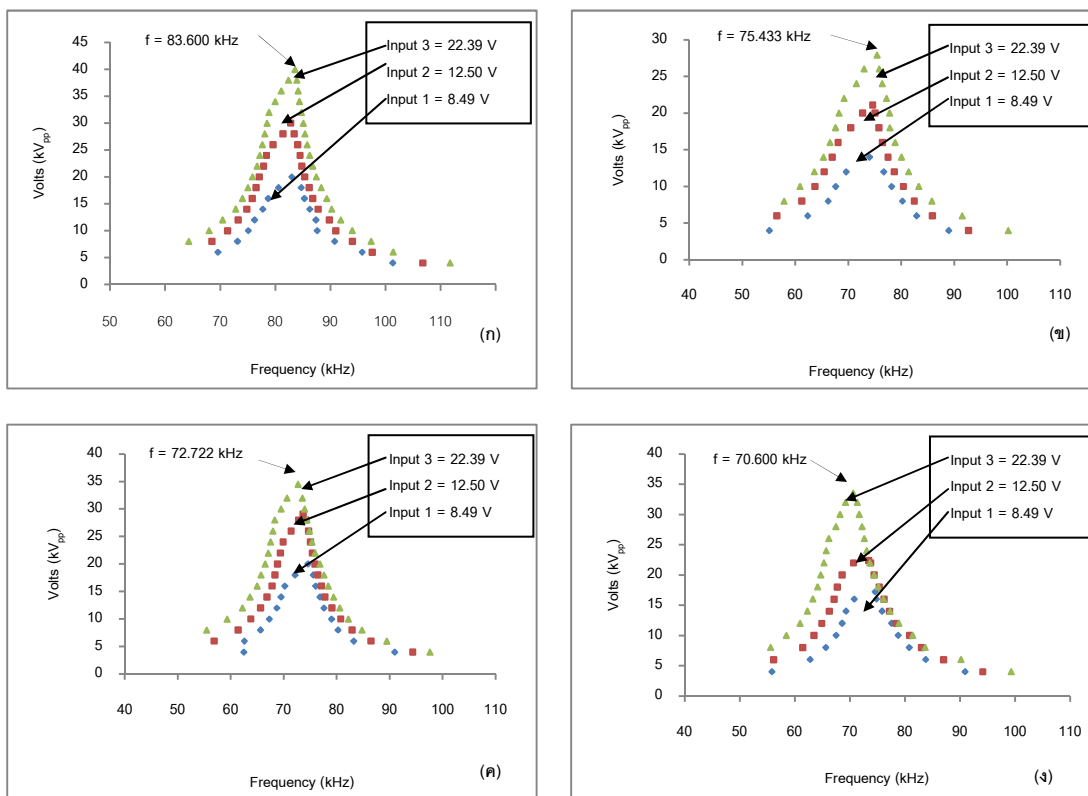
1. การทดสอบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไม่ต่อโหลด (Open Circuit)
2. การทดสอบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดตัวต้านทาน 10M  $\Omega$  ขนาด 10 วัตต์ ที่บรรจุในถังฉนวนน้ำมัน
3. การทดสอบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดที่เป็นชุดกำเนิดพลาสมาแบบโคแอกเซียล ไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จโดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าภายใน (Inner Electrode) และขั้วไฟฟ้าภายนอก (Outer Electrode) ห่างกัน 1 มิลลิเมตร ใช้เทฟลอน เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก และป้อนก๊าซอาร์กอนด้วยอัตราการไหล 6 l/min
4. การทดสอบเหมือนกรณีที่สามแต่ไม่ป้อนก๊าซอาร์กอน

การทดลองนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ของความถี่และแรงดันไฟฟ้า พบว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามารถขับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดขณะไม่ต่อโหลดต่อโหลดชนิดต่างๆ ได้ผลดังตารางที่ 4.1 และกราฟในภาพที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความถี่ที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดของโหลดแต่ละชนิด

ผลการทดลอง	ชนิดของโหลด	$f_1$ (kHz)	แรงดันขาเข้า (V)	แรงดันขาออก (V <sub>rms</sub> )
ภาพที่ 4.1 (ก)	ไม่ต่อโหลด	83.6	22.39	14142.14
ภาพที่ 4.1 (ข)	ตัวต้านทาน 10M $\Omega$	75.43	22.39	9864.14
ภาพที่ 4.1 (ค)	DBD without gas	72.72	22.39	12197.59
ภาพที่ 4.1 (ง)	DBD with gas	70.60	22.39	11844.04

$f_1$  = ค่าความถี่ที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าสูงสุดของโหลดแต่ละชนิด



ภาพที่ 4.1 ผลของแรงดันไฟฟ้าเมื่อแปรเปลี่ยนความถี่ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า :

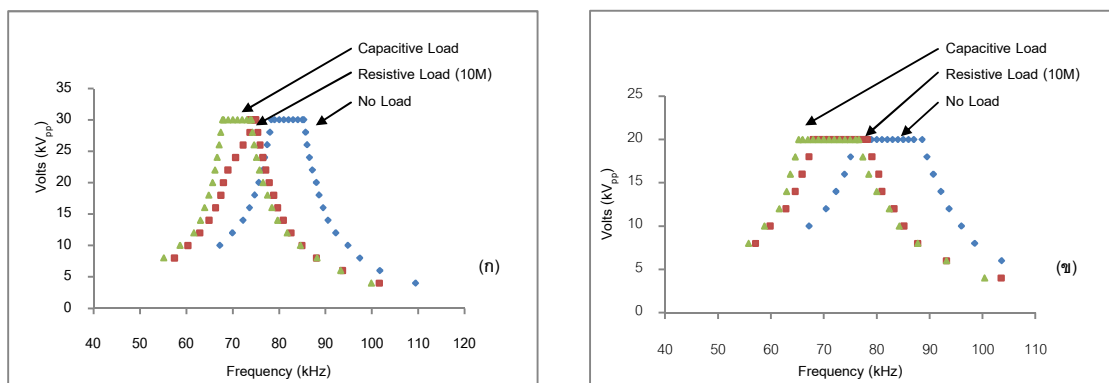
(ก) ไม่ใส่โหลด

(ข) โหลดเป็นตัวต้านทาน  $10\text{ M}\Omega$  ขนาด  $10\text{ W}$

(ค) โหลดเป็นชุดกำเนิดพลาสมาแบบโคแอ็กเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

(ง) โหลดเป็นชุดกำเนิดพลาสมาแบบโคแอ็กเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จโดย  
ป้อนก๊าซอาร์กอนที่อัตราไหล  $6\text{ l/min}$

การทดลองเพื่อศึกษาการตอบสนองความถี่เมื่อต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับโหลดแต่ละชนิด พบว่าการตอบสนองความถี่สามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยการปรับสัญญาณชดเชยเพื่อรักษาค่าแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ ขึ้นอยู่กับชนิดของโหลดที่เลือกใช้งาน โดยย่านความถี่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าสูงจะแคบกว่าย่านความถี่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่า ดังความสัมพันธ์จากกราฟในภาพที่ 4.2 (ก) และ (ข) และผลการทดลองในตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ผลของย่านความถี่ที่สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าของโหลดแต่ละชนิด : (ก) ผลของโหลดที่สามารถรักษาแรงดันในช่วง 30 kV<sub>pp</sub> (ข) ผลของโหลดที่สามารถรักษาแรงดันในช่วง 20 kV<sub>pp</sub>

ตารางที่ 4.2 ย่านความถี่ที่สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้า 30 kV<sub>pp</sub> และ 20 kV<sub>pp</sub> ของโหลดแต่ละชนิด

ผลการทดลอง	ชนิดของโหลด	f <sub>1</sub> (30 kV <sub>pp</sub> )	f <sub>2</sub> (20 kV <sub>pp</sub> )
1	ไม่ต่อโหลด	78 - 85 kHz	75.960 – 88.60 kHz
2	ตัวต้านทาน 10MΩ	73.8 – 75 kHz	68.03 – 78.23 kHz
3	DBD with gas	67.8 – 74 kHz	65.28 – 76.65 kHz

f<sub>1</sub> = ย่านความถี่ที่สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้า 30kV<sub>pp</sub>

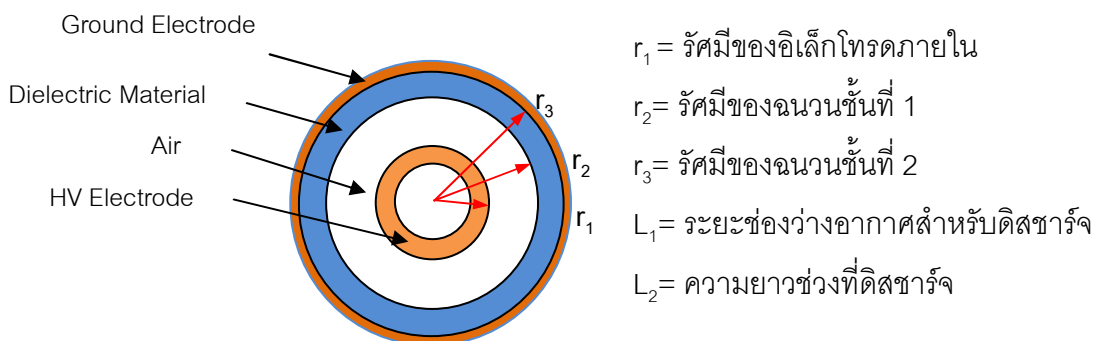
f<sub>2</sub> = ย่านความถี่ที่สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้า 20kV<sub>pp</sub>

#### 4.2 ผลการทดสอบลำเปลวพลาสมาของโพรบกำเนิดพลาสมา

การทดสอบเพื่อสังเกตลักษณะลำเปลวพลาสมาที่กำเนิดโดยโพรบแบบที่ 1 และแบบที่ 3 ซึ่งมีข้อแตกต่างกันดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบขนาดและวัสดุของโพรบกำเนิดพลาสมาแบบที่ 1 และแบบที่ 3

ชนิดโพรบ	ไดอิเล็กทริก	r <sub>1</sub> (mm)	r <sub>2</sub> (mm)	r <sub>3</sub> (mm)	L <sub>1</sub> (mm)	L <sub>2</sub> (mm)
แบบที่ 1	แก้ว	4	6	7	2	20
แบบที่ 3	เทฟลอน	2.25	3.25	6.75	1	10



ภาพที่ 4.3 ส่วนประกอบของโพรบกำเนิดพลาสมา

การทดสอบโพรบกำเนิดพลาสมาในแบบที่ 1 กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่ต่ำที่พัฒนาขึ้น เพื่อผลิตอาร์กอนพลาสมาที่ย่านความถี่ 200, 320 และ 340 เฮิร์ตซ์ และแรงดันไฟฟ้าขาออก ประมาณ 1 ถึง 8 กิโลโวลต์ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนถูกจำกัดไว้ที่ 8 ลิตรต่อนาที โดยเก็บข้อมูลสเปกตรัมของพลาสมาที่ความถี่และแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งติดตั้ง หัววัดไว้ห่างจากโพรบกำเนิดพลาสมาในแนวตั้งประมาณ 5 cm



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.4 ลักษณะเปลวลำพลาสมา: (ก) โพรบกำเนิดพลาสมาแบบที่ 1

(ข) โพรบกำเนิดพลาสมาแบบที่ 2

ผลการทดลองพบว่าลำเปลวของพลาสมาที่สังเกตได้ด้วยตามีความเข้มน้อยมาก ดังแสดงในภาพที่ 4.4 (ก) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้การกำเนิดพลาสมาจึงได้ทำการออกแบบแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูงแรงดันสูงและได้ทำการทดสอบกับโพรบกำเนิดพลาสมาแบบที่ 1 พบว่าโพรบแบบที่ 1 ซึ่งใช้วัสดุไดอิเล็กทริกที่ทำด้วยแก้วไม่สามารถทนต่อสภาพความถี่สูงได้จึงได้ทำการออกแบบและสร้างโพรบแบบที่ 2 ขึ้นและ เปลี่ยนวัสดุไดอิเล็กทริกจากแก้วเป็นเทฟลอนโดยมี ปัจจัยสำคัญในการออกแบบค่านึงถึงปัจจัยดังนี้

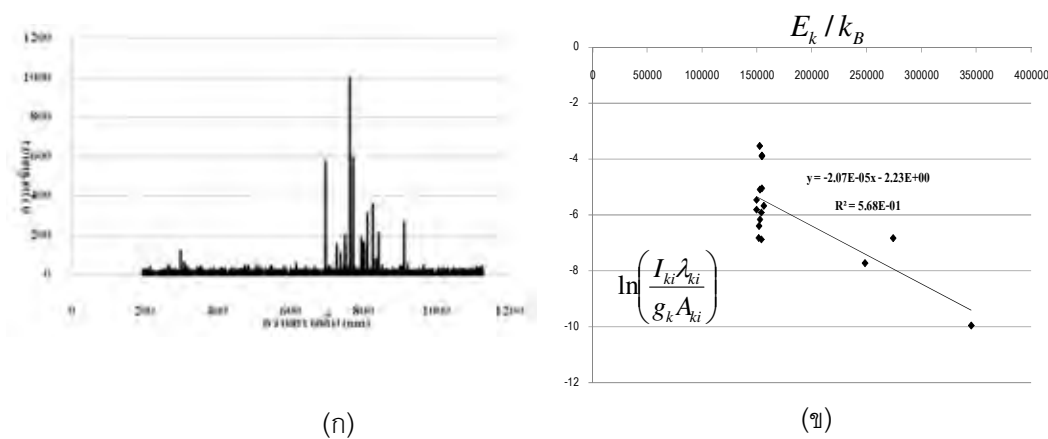
1. แก้วมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก 5-10 สูงกว่าเทฟลอนซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก 2.1 ดังนั้นเมื่อแก้วอยู่ในสนามไฟฟ้าจะกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้มากกว่าเทฟลอนและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ปริมาณพลังงานที่ไดอิเล็กทริกดูดซับไว้ได้ คือ  $P_D$  ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และความถี่สูงยิ่งจะทำให้วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงมีปริมาณความร้อนสูง
2. ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของแก้วมีค่า 3.3 ซึ่งต่ำกว่าเทฟลอนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว 126 – 216 ดังนั้น พลังงานที่สะสมอยู่ในแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเปลี่ยนแปลงเมื่อพลังงานที่สะสมเพิ่มขึ้น ความยาวของพันธะก็จะมากขึ้นตาม แก้วจึงขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน และหดเมื่อเย็นตัวลงในสองบริเวณที่อุณหภูมิแตกต่างกันโดยฉับพลัน ทำให้แก้วแตก
3. กาว Epoxy ไม่สามารถทนอุณหภูมิสะสมระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารไดอิเล็กทริกที่เป็นแก้วซึ่งมีความร้อนสะสมมาก ทำให้การใช้กาว Epoxy ยึดและหุ้มไว้เพื่อป้องกันการ Arcing ข้ามผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าด้านนอกสู่ขั้วไฟฟ้าด้านในไม่ได้ผลตามต้องการ
4. ออกแบบให้มีช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าด้านในและขั้วไฟฟ้าด้านนอกน้อยลงเพื่อเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าให้ได้ความเข้มของพลาสมาที่สูงขึ้น
5. แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงจะต้องออกแบบไม่ให้ขั้วไฟฟ้าภายในและขั้วไฟฟ้าภายนอกเหนี่ยวนำถึงกันได้ แต่เทฟลอนเป็นวัสดุที่ไม่สามารถยึดติดกับวัสดุใด ๆ ได้ ทำให้มีช่องว่างที่จะให้สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำถึงกันได้และเกิดการ Arcing ขึ้น ดังนั้นจึงออกแบบและกลึงเทฟลอนโดยใช้ความถี่ของเกลียวในการยึดเข้ากับวัสดุอื่น

ผลการทดสอบโปรบกำเนิดพลาสมาแบบที่ 2 โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง 60-80 KHz ในการกระตุ้นให้เกิดพลาสมา ซึ่งผลที่ได้พบว่าพลาสมาที่กำเนิดจากโปรบกำเนิดพลาสมาแบบที่ 2 ให้ความเข้มสูงมากขึ้นเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดพลาสมาในแบบที่ 1 สังเกตได้จากความชัดเจนของลำเปลวของพลาสมาในภาพที่ 4.4 (ข) จะเห็นได้ว่าชนิดของแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีผลต่อคุณสมบัติของพลาสมา

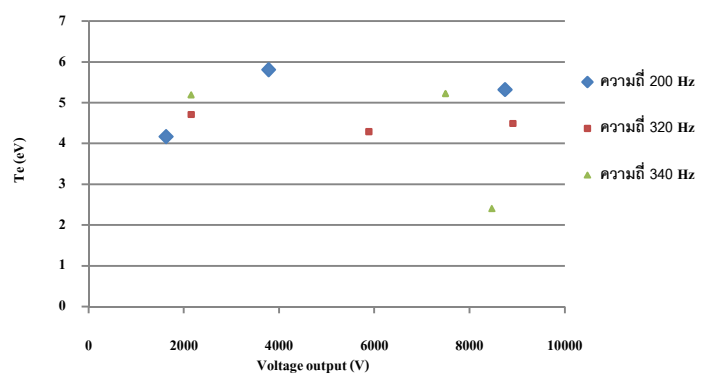
#### 4.3 การทดลองศึกษาอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์ของอาร์กอนพลาสมาที่กำเนิดโดยแหล่งกำเนิดความถี่ต่ำ

จากการทดลองปรับให้ก๊าซอาร์กอนมีอัตราการไหลคงที่ 8 ลิตรต่อนาที ทดสอบกำเนิดพลาสมาที่ย่านความถี่คงที่ 200, 320, และ 340 เฮิรตซ์ โดยปรับแรงดันไฟฟ้าขาออกตั้งแต่ 1 ถึง 8 กิโลโวลต์ ตั้งหัววัดห่างจากพลาสมาที่ระยะ 5 เซนติเมตร สังเกตและบันทึกผลชุดสเปกตรัมของ

พลาสมาที่ได้ในแต่ละเงื่อนไขผ่านจอกคอมพิวเตอร์ ดังภาพที่ 4.5 (ก) นำผลสเปกตรัมไปคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจากวิธีเขียนกราฟของโบลทซ์มันน์ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและแรงดันไฟฟ้าในย่าน 200, 320 และ 340 เฮิรตซ์ ดังภาพที่ 4.5 (ข)



ภาพที่ 4.5 ผลของการวิเคราะห์สเปกตรัมของอาร์กอนพลาสมา: (ก) เส้นสเปกตรัมที่ความถี่ 200 เฮิรตซ์ และแรงดันไฟฟ้า 1626.36 โวลต์ (ข) การคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจากค่าความชัน



ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและแรงดันไฟฟ้าในย่านความถี่ 200, 320 และ 340 เฮิรตซ์

จากการทดลองพบว่าแหล่งกำเนิดแบบโคเอ็กซีลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จสามารถผลิตพลาสมาได้สูง 3 cm จากส่วนหัวของแหล่งกำเนิดดังแสดงในภาพที่ 4.4 (ก) และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลสเปกตรัมของพลาสมาในแต่ละย่านความถี่พบว่ามีความถี่พบว่ามีภาพแบบของสเปกตรัมที่



คล้ายคลึงกันดังตัวอย่างในภาพที่ 4.5 (ก) และเมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น ความเข้มแสงจะมากขึ้น ซึ่งสเปกตรัมของอาร์กอนพลาสมาที่ได้จากการทดลองส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 600 ถึง 900 เฮิร์ตซ์ และเมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าความถี่ของกราฟภาพที่ 4.5 (ข) ที่ย่านความถี่ 200 , 320 และ 340 เฮิร์ตซ์ จะได้คุณสมบัติของอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง 4 ถึง 5 eV ดังภาพที่ 4.6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมากเนื่องจากช่วงความถี่ที่สามารถเลือกใช้ในการทดลองนั้นยังคงแคบอยู่ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในขณะนี้

อย่างไรก็ตามวิธีการคำนวณคุณสมบัติของอิเล็กตรอนจากสเปกตรัมอาจมีข้อผิดพลาด ซึ่งสามารถสังเกตได้จากกราฟในภาพ 4.4 (ข) จะเห็นว่า ค่า  $R^2$  ของเส้นแนวโน้มยังต่ำกว่า 1 มากแต่วิธีการนี้เป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการหาคุณสมบัติของอิเล็กตรอน นอกจากนี้ การคำนวณยังสมมุติว่าประสิทธิภาพของการวัดสเปกตรัมไม่ขึ้นกับความถี่ (หรือความยาวคลื่น) อีกด้วย

#### 4.4 การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสเปกตรัมของพลาสมาอาร์กอนที่กำเนิดโดยแหล่งกำเนิดความถี่สูง

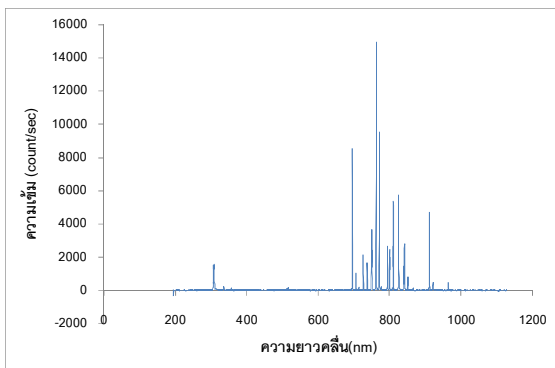
4.4.1 การศึกษาเงื่อนไขของระยะทางระหว่างหัววัดสเปกตรัมและโพรบกำเนิดพลาสมาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของสเปกตรัมที่ระยะระหว่างโพรบกำเนิดพลาสมาในแนวตั้ง 6 cm และ 12 cm ดังนั้นพารามิเตอร์อื่น ๆ ในการทดลองจะปรับให้คงที่แต่เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องวัด OES ที่ไม่สามารถวัดความเข้มของสเปกตรัมที่เกินกว่า 15,000 au ซึ่งจะทำให้เครื่องวัด OES อยู่ในสถานะอิ่มตัว ดังนั้นเมื่อปรับระยะที่ใกล้ พารามิเตอร์ต่างๆที่เลือกใช้จะต้องไม่ทำให้เครื่องวัดอยู่ในสถานะอิ่มตัวโดยปรับก๊าซให้ก๊าซอาร์กอนมีอัตราไหลคงที่ 4 ลิตรต่อนาที และทำการทดสอบปรับระยะห่างระหว่างโพรบกำเนิดพลาสมาและหัววัดในแนวตั้งเป็นระยะ 6 cm และ 12 cm , ปรับแรงดันไฟฟ้า 13.9 kVpp คงที่ , ความถี่ 73.433 kHz คงที่ และใช้เวลาในการวัด count / sec ดังแสดงในตารางที่ 3.2

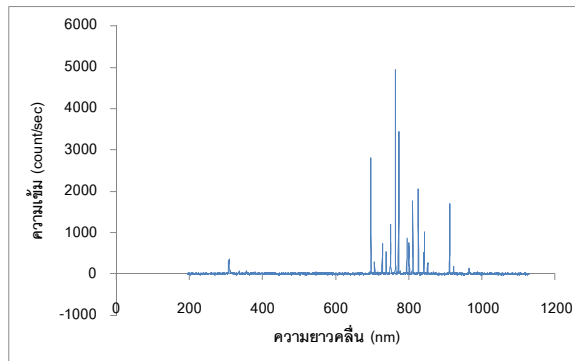
ตารางที่ 4.4 แสดงเงื่อนไขเพื่อหาระยะทางที่เหมาะสมในการกำเนิดพลาสมา

การทดลอง	$L_1$ คงที่	แรงดันไฟฟ้า	ความถี่	อัตราไหลก๊าซ	เวลาวัด
1	6 cm	13.9kVpp	73.443kHz	4 l/min	count/sec
2	12 cm	13.9kVpp	73.443kHz	4 l/min	count/sec

$L_1$  = ระยะจากระหว่างจากโพรบถึงแหล่งกำเนิดพลาสมา

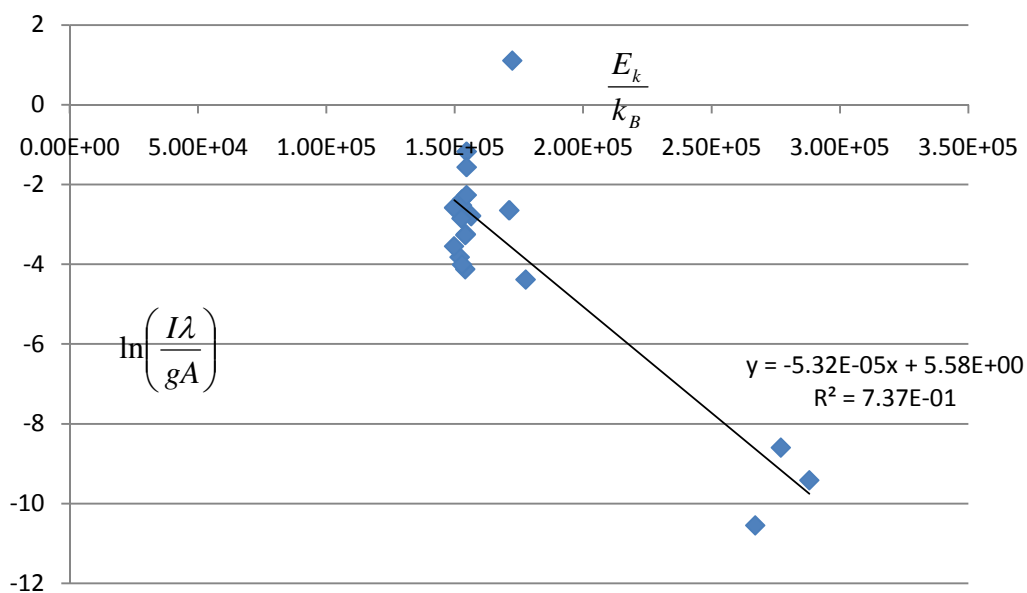


(ก)

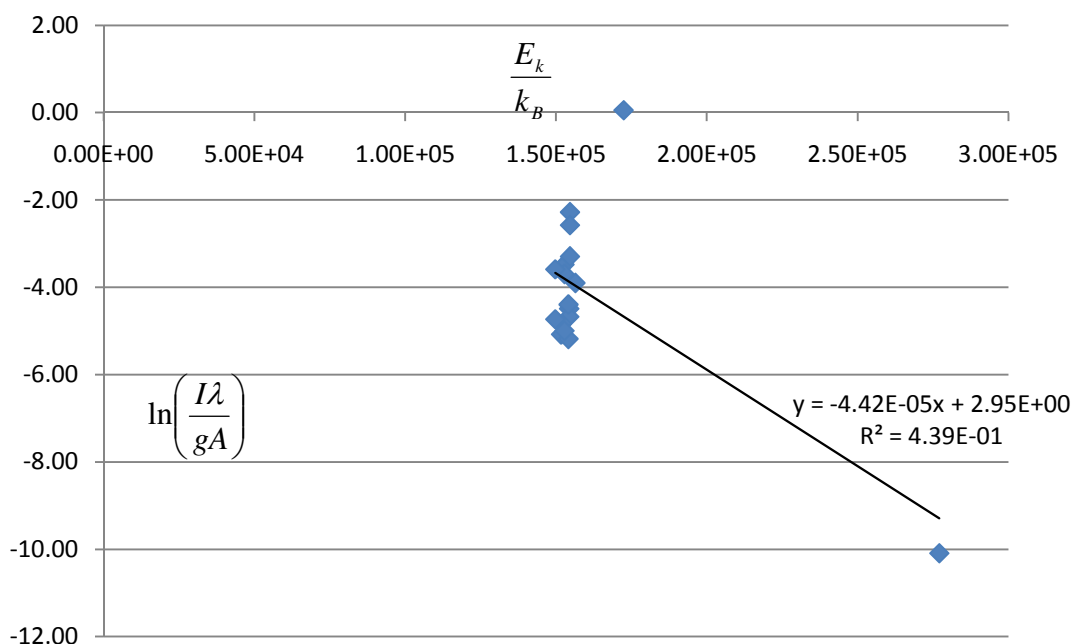


(ข)

ภาพที่ 4.7 เส้นสเปกตรัมของอาร์กอนพลาสมาแรงดันไฟฟ้า 13.9 kV<sub>pp</sub> ความถี่ 73.443 kHz ชัตตาไหลก๊าซ 4 l/min วัด 1 sec ภาพ (ก) วัดที่ระยะห่างจากหัววัด 6 cm และภาพ (ข) วัดที่ระยะห่างจากหัววัด 12 cm



ภาพที่ 4.8 กราฟโบลทซ์มันน์แสดงอุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมาที่ระยะ 6 cm จากหัววัด



ภาพที่ 4.9 กราฟโพลทซ์มันน์แสดงอุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมาที่ระยะ 12 cm จากหัววัด

จากผลการศึกษพบว่า ณ ตำแหน่งหัวโพรบที่ห่างจากหัววัด 6 cm และ 12 cm จะมีความเข้มของแสงเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 4.7 (ก) และ (ข) ในแต่ละความยาวคลื่นที่นำมาพิจารณา อุณหภูมิอิเล็กตรอน ความเข้มของสเปกตรัมจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเดียวกัน เมื่อลำของพลาสมาใกล้หัววัดมากขึ้น แต่เมื่อนำพลาสมาออกห่างจากหัววัดเป็นระยะ 12 cm ทำให้ความเข้มของบางพีคที่วัดได้อาจจะมีความเข้มน้อยมากจึงไม่สามารถวัดได้เช่น 335 nm , 357.66 nm , 516.22 nm และ 714.20 nm เป็นผลทำให้ค่าความชันจากกราฟโพลทซ์มันน์มีค่าต่างกัน และทำให้อุณหภูมิอิเล็กตรอนมีค่าต่างกัน คือ ณ ตำแหน่งหัวโพรบที่ห่างจากหัววัด 6 cm อุณหภูมิอิเล็กตรอนมีค่า 1.62 eV และ ตำแหน่งหัวโพรบที่ห่างจากหัววัด 12 cm อุณหภูมิอิเล็กตรอนมีค่า 1.95 eV ดังภาพที่ 4.8 และ 4.9

#### 4.4.2 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการวัดสเปกตรัม

การทดลองนี้เพื่อหาระยะเวลาวัดสเปกตรัม การที่จะวัดผลให้มีความแม่นยำสูงจะต้องวัดนาน ๆ ดังนั้นจะเลือกทำการทดลองที่ระดับ  $c/100$  msec โดยทำการทดลอง ซ้ำกัน 2 ครั้ง เพื่อ

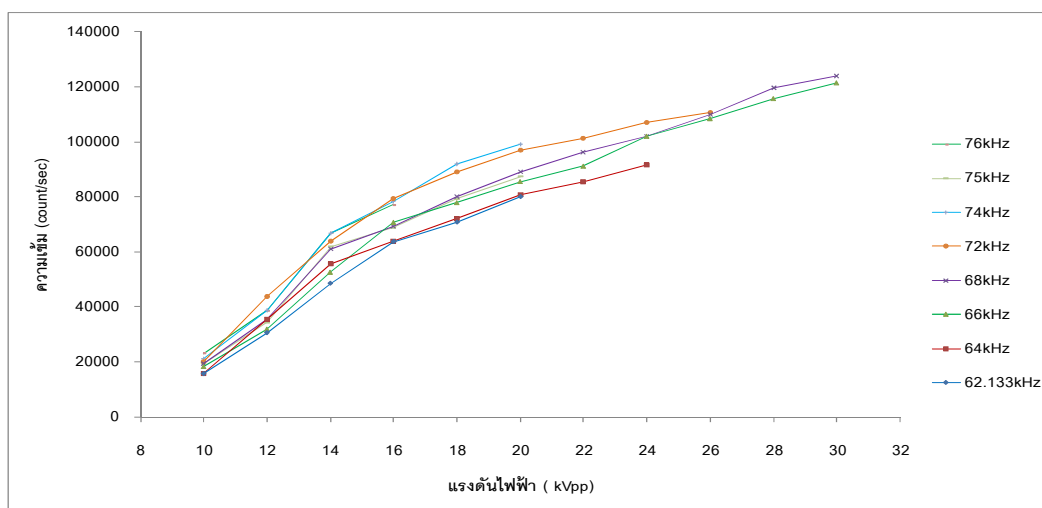
สังเกตความเสถียรของสเปกตรัม และถ้าวัดในระดับ second อาจจะต้องคำนึงถึงสถานะอิ่มตัวของ OES อีกทั้งต้องเลือกพารามิเตอร์ต่ำสุดในการทดลองโดยมีขั้นตอนการทดลองโดยปรับก๊าซให้ก๊าซอาร์กอนมีอัตราไหลคงที่ 6 ลิตรต่อนาทีและปรับระยะห่างระหว่างโพรบกำเนิดพลาสมาและหัววัดในแนวตั้งเป็นระยะ 4.5 cm ปรับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 10 - 30 kV<sub>pp</sub> ปรับความถี่คงที่ 62.13 , 64,66,68,70.6,72,74,75,76 kHz และใช้เวลาในการวัด count / 100msec ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงเงื่อนไขเพื่อหาระยะเวลาที่ใช้ในการวัดสเปกตรัมที่เหมาะสม

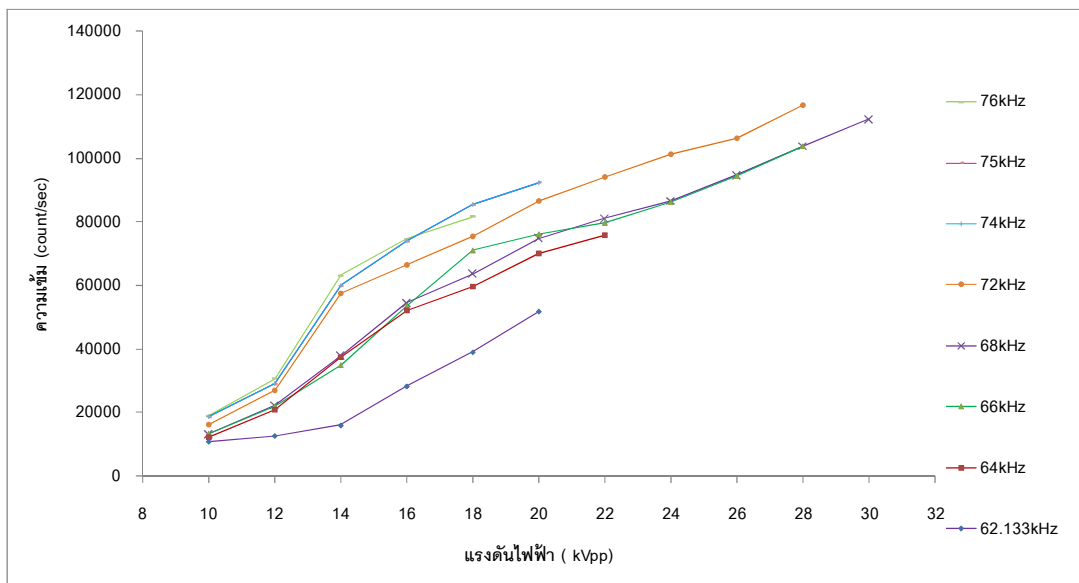
การทดลอง	ความถี่คงที่	แรงดันไฟฟ้า	อัตราไหลก๊าซ	ระยะ L <sub>1</sub>	เวลาวัด
ครั้งที่ 1	62-78 kHz	10-30 kVpp	6 l/min	4.5 cm	c/100msec
ครั้งที่ 2	62-78 kHz	10-30 kVpp	6 l/min	4.5 cm	c/100msec

จากการทดลองในส่วนที่ 1 และ 2 เป็นการทดลองเดียวกันแต่เป็นการสร้างกราฟแสดงผลการทดลองที่แตกต่างกัน สำหรับส่วนที่ 1 แสดงความถี่คงที่ของความเข้มฟลูออเรสเซนซ์สูงสุดในสเปกตรัมคือ 763 nm ดังภาพที่ 4.10 วัดครั้งที่ 1 และ ภาพที่ 4.11 วัดครั้งที่ 2 สำหรับส่วนที่ 2 เป็นการสร้างกราฟที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ ดังภาพที่ 4.12 วัดครั้งที่ 1 และ ภาพที่ 4.13 วัดครั้งที่ 2 ซึ่งในการทดลองวัดครั้งที่ 1 และ 2 จะมีความคลาดเคลื่อนกันเพียงเล็กน้อย

4.4.2.1 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการวัดสเปกตรัม (ส่วนที่ 1)

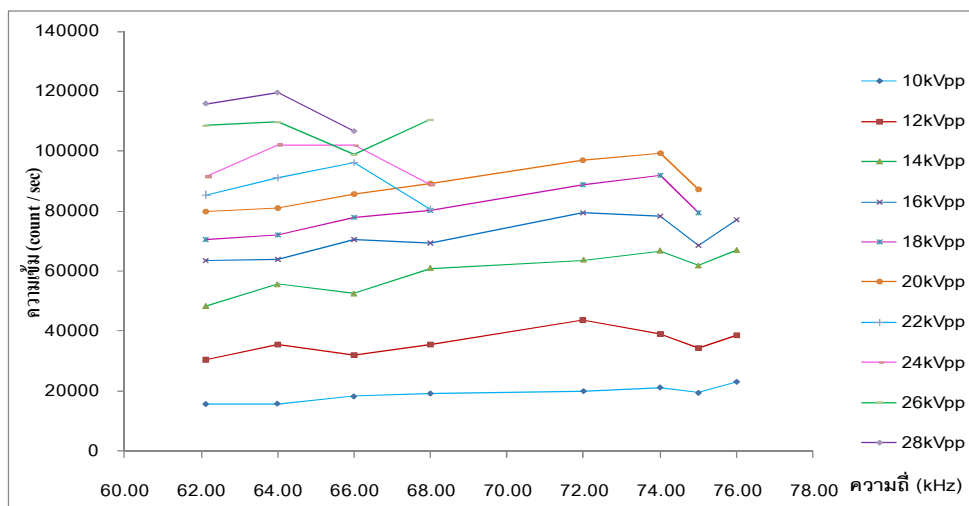


ภาพที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสเปกตรัมพลาสมาของพีค 763 nm กับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ อัตราไหลก๊าซ 6 l/min วัดครั้งที่ 1

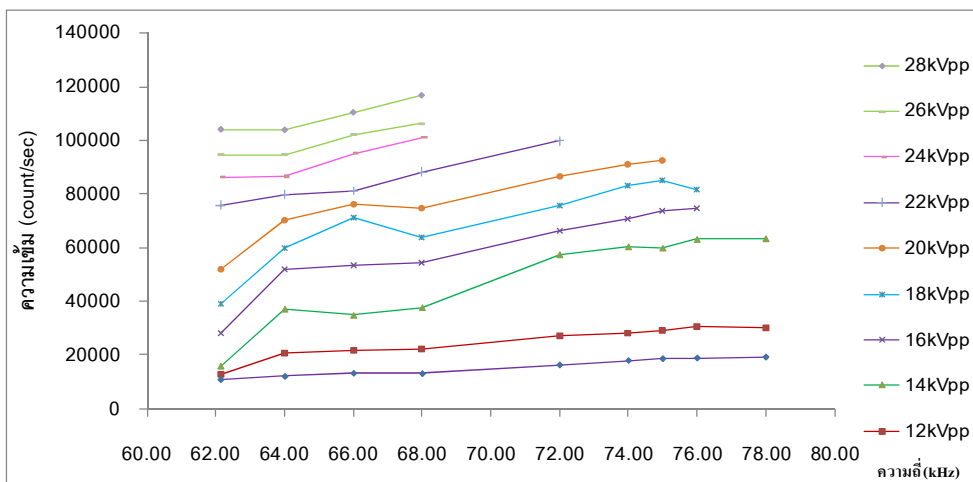


ภาพที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์ของพีค 763 nm กับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ อัตราไหลก๊าซ 6 l/min วัดครั้งที่ 2

#### 4.4.2.2 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการวัดสเปกตรัม (ส่วนที่ 2)



ภาพที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์ของพีค 763 nm กับความถี่ที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ อัตราไหลก๊าซ 6 l/min วัดครั้งที่ 1



ภาพที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสเปกตรัมพลาสมา 763 nm กับ ความถี่ที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ อัตราไหล่ก๊าซ 6 l/min วัดครั้งที่ 2

ผลการทดลองพบว่าเวลาในการวัดสเปกตรัมระดับ millisecond ในครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีความคลาดเคลื่อนสูง ทั้งที่เป็นการทดลองเดียวกัน ดังนั้นต้องเพิ่มระยะเวลาในการวัดที่สูงขึ้นที่ไม่ทำให้การวัดความเข้มของสเปกตรัมของอาร์กอนพลาสมาด้วยเครื่อง OES แสดงสถานะอิ่มตัว

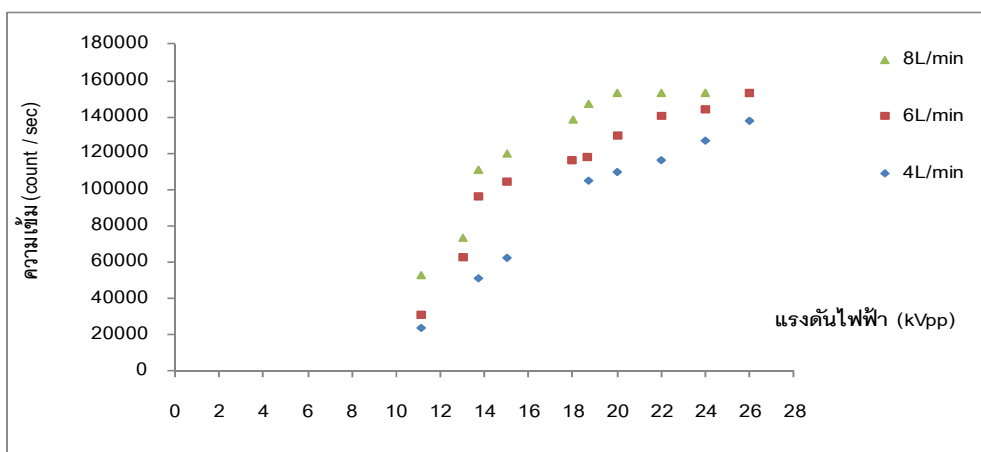
#### 4.4.3 การศึกษาผลของอัตราการไหล่ของก๊าซอาร์กอนที่มีผลต่อสเปกตรัม

การทดลองนี้เพื่อศึกษาอัตราไหล่ของก๊าซอาร์กอนที่มีผลต่อความเข้มของสเปกตรัมและเปลวของพลาสมา โดยทำการทดลองปรับค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 11.1 – 26 kV<sub>pp</sub> ความถี่คงที่ 78 kHz ปรับระยะห่างระหว่างโพรบกำเนิดพลาสมาและหัววัดในแนวตั้งเป็นระยะ 5 cm และใช้เวลาในการวัด c/100 msec ปรับอัตราไหล่ของก๊าซอาร์กอนที่ ระดับ 4, 6, 8 l/min โดยมีเงื่อนไขแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงเงื่อนไขของอัตราไหล่ที่มีผลกระทบต่อสเปกตรัม

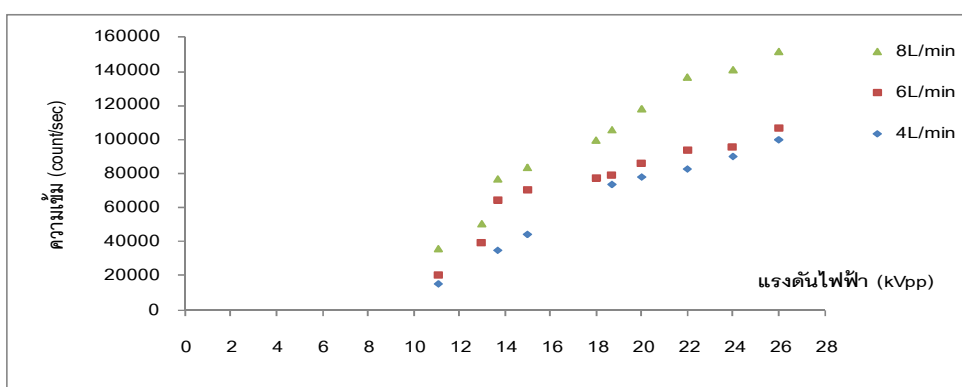
การทดลอง	ก๊าซคงที่	ความถี่	แรงดันไฟฟ้า	ระยะ L <sub>1</sub>	เวลาวัด
1	4 l/min	78 kHz	11.1-26kV <sub>pp</sub>	5 cm	c/100msec
2	6 l/min	78 kHz	11.1-26kV <sub>pp</sub>	5 cm	c/100msec
3	8 l/min	78 kHz	11.1-26kV <sub>pp</sub>	5 cm	c/100msec

ผลการศึกษาความเข้มของสเปกตรัมอาร์กอนพลาสมาที่พีค 763.25 nm และ 772.11 ดังภาพที่ 4.14 และ 4.15 กับแรงดันไฟฟ้าที่อัตราไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน พีค 763.25 nm ซึ่งเป็นพีคที่มีความเข้มของอาร์กอนพลาสมาที่สูงที่สุดในสเปกตรัมพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราไหลของก๊าซที่ระดับ 8 l/min ทำให้เกิดการอิมิตัวขณะวัดที่แรงดันไฟฟ้า 20 kV<sub>pp</sub>



ภาพที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า (kV<sub>pp</sub>) ที่อัตราไหลของก๊าซต่าง ๆ ในพีคที่มีความยาวคลื่น 763.25 nm

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมที่มีความยาวคลื่น 763.25 nm ทำให้เกิดสมมุติฐานว่าก๊าซที่ 8 l/min อาจจะมีมากเกินไปในการกำเนิดพลาสมา หรืออีกสมมุติฐานคือ เครื่อง OES อาจจะมีการอิมิตัวขณะวัด ดังนั้นเพื่อยืนยันผลการทดลองจึงทำการวิเคราะห์พีค 772.11 nm ซึ่งเป็นพีคที่มีความเข้มมากที่สุดรองจากพีคสูงสุดพบว่าความเข้มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่ออัตราไหลของก๊าซมากขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นแสดงว่าเครื่องวัด OES เกิดสถานะอิมิตัว



ภาพที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า (kV<sub>pp</sub>) ที่อัตราไหลของก๊าซต่าง ๆ ในพีคที่มีความยาวคลื่น 772.11nm

#### 4.5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมพลาสมาของความถี่และแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปที่อัตราไหลของก๊าซคงที่

เนื่องจากได้หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อสเปกตรัม คือระยะห่างระหว่างโพรบกำเนิดพลาสมาและหัววัดในแนวตั้ง อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน โดยการปรับค่าความถี่และแรงดันไฟฟ้าและเวลาในการวัดสเปกตรัม จึงได้ออกแบบการทดลองที่เหมาะสมเพื่อหาความสัมพันธ์ของความเข้มแสงของสเปกตรัมโดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 10 – 30 kV<sub>pp</sub> ความถี่คงที่ 60,62,64,66,68,70,72,74,76,78 kHz และปรับระยะห่างระหว่างโพรบกำเนิดพลาสมาและหัววัดในแนวตั้งเป็นระยะ 26 cm ใช้เวลาในการวัด c/ 2sec และ ปรับอัตราการไหล 2,4,6,8 l/min ตามเงื่อนไขดังตารางที่ 3.5 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละครั้งที่ทำการวัดสเปกตรัมสังเกตแนวโน้มสเปกตรัมของก๊าซอาร์กอนที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงระดับอัตราไหลก๊าซอาร์กอน

ตารางที่ 4.7 แสดงเงื่อนไขเพื่อหาความสัมพันธ์ของอัตราไหลของก๊าซอาร์กอนที่ความถี่คงที่

การทดลอง	ก๊าซคงที่	ความถี่	แรงดันไฟฟ้า	ระยะ L1	เวลาวัด
1	2 l/min	62-78 kHz	10-30 kV <sub>pp</sub>	26 cm	c/2sec
2	4 l/min	62-78 kHz	10-30 kV <sub>pp</sub>	26 cm	c/2sec
3	6.5 l/min	62-78 kHz	10-30 kV <sub>pp</sub>	26 cm	c/2sec
4	8 l/min	62-78 kHz	10-30 kV <sub>pp</sub>	26 cm	c/2sec

เนื่องจากการวัดที่ระดับ millisecond ผลการทดลองไม่แน่นอนเกิดการคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นจึงต้องเพิ่มระยะเวลาในการวัดมากขึ้นซึ่งวัดที่ c/2sec พบว่าผลการทดลองเสถียรมากจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้งในการทดลองนี้ เมื่อเพิ่มเวลาในการวัดทำให้เครื่องวัด OES อยู่ในสถานะอิ่มตัวจึงเพิ่มระยะจากโพรบกำเนิดพลาสมาถึงหัววัดสเปกตรัม OES เป็นระยะ 26 cm

การทดลองทั้งสามส่วนเป็นการทดลองเดียวกันของสเปกตรัมที่มีความเข้มสูงที่สุด คือ 763 และ 763.25 nm ความถี่คงที่ ปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 10-30 kV<sub>pp</sub> ทำที่อัตราไหล 2,4,6 และ 8 l/min และแบ่งการแสดงผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ

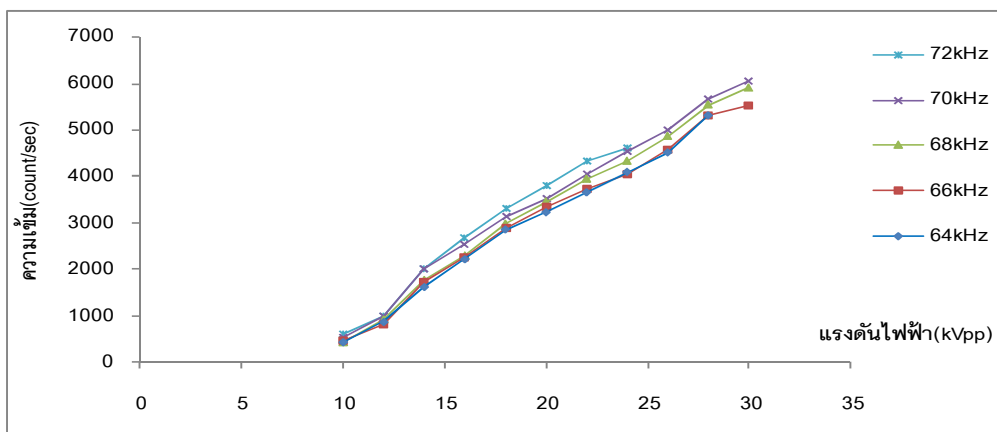
ส่วนที่ 1 แสดงความเข้มของสเปกตรัมเมื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า ความถี่คงที่ อัตราไหลของก๊าซ 2,4, 6.5 และ 8 l/min ในภาพที่ 4.16 , 4.17 , 4.18 และ 4.19

ส่วนที่ 2 แสดงความเข้มของสเปกตรัมเมื่อเปลี่ยนความถี่ แรงดันไฟฟ้าคงที่ อัตราไหลของก๊าซ 2,4, 6.5 และ 8 l/min ในภาพที่ 4.20 , 4.21 , 4.22 และ 4.23

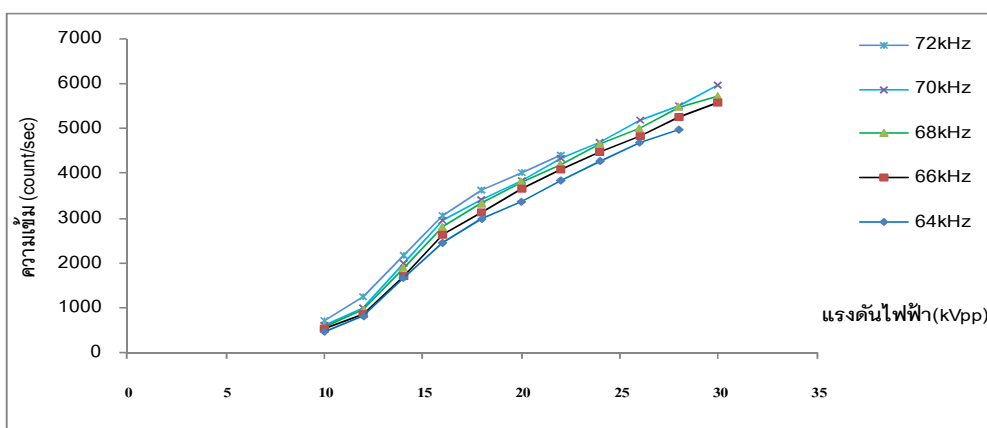


ส่วนที่ 3 แสดงความเข้มของสเปกตรัมเมื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่คงที่ 64,66,68,70 และ 72 kHz อัตราไหลของก๊าซ 2,4, 6.5 และ 8 l/min ในภาพที่ 4.24 , 4.25 , 4.26 ,4.27 และ 4.28

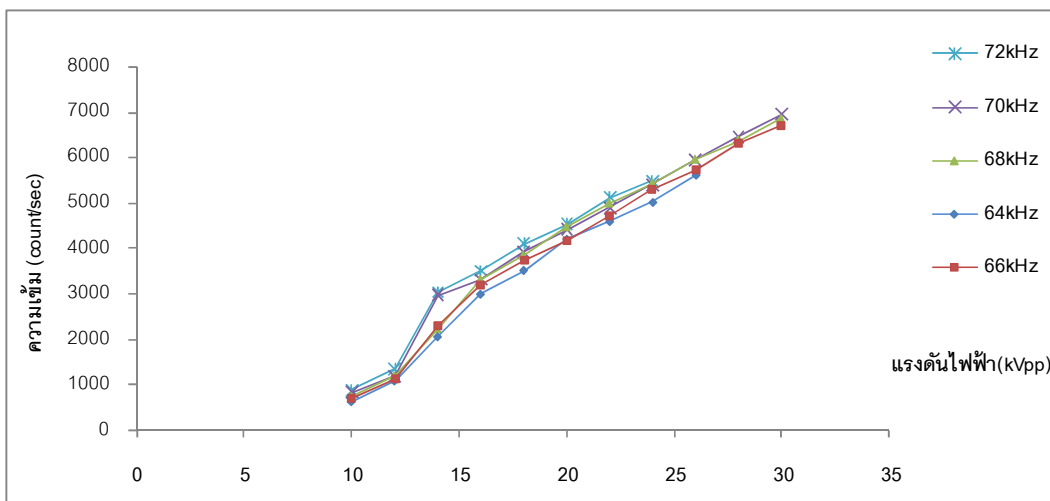
ส่วนที่ 1 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) แรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) เปรียบเทียบกับค่าความถี่ต่าง ๆ ที่อัตราไหลคงที่



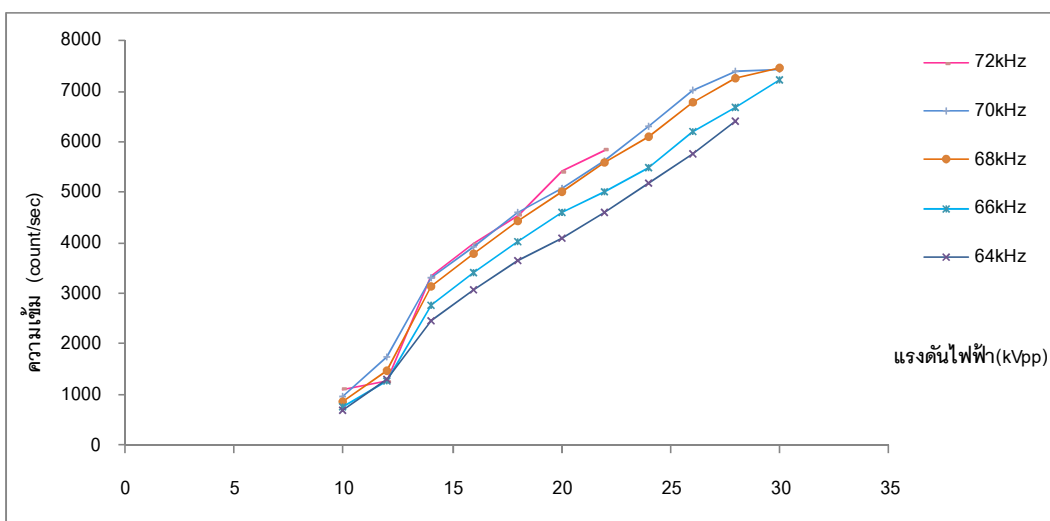
ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) แรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) เปรียบเทียบกับค่าความถี่ต่าง ๆ ที่อัตราไหล 2 l/min



ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) แรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) เปรียบเทียบกับค่าความถี่ต่าง ๆ ที่อัตราไหล 4 l/min

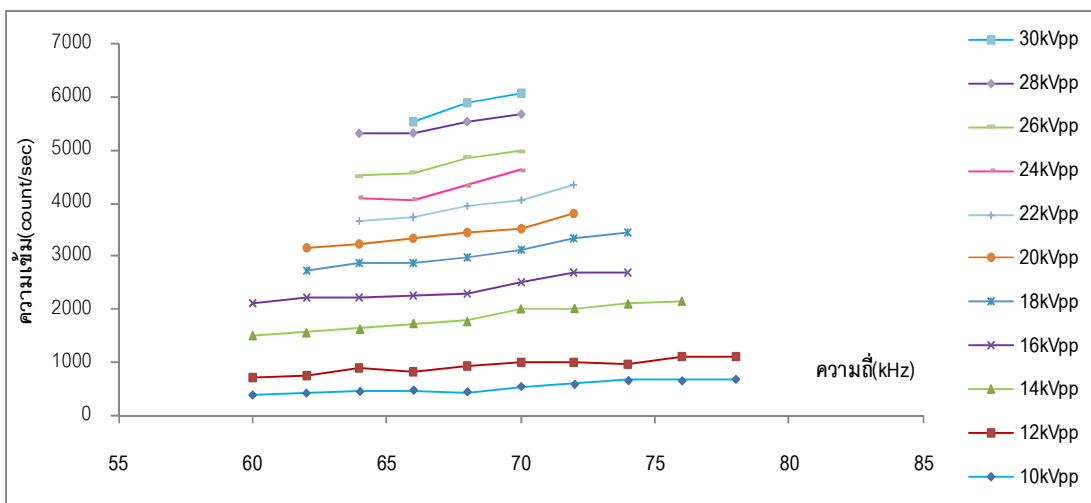


ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) แรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) เปรียบเทียบกับค่าความถี่ต่าง ๆ ที่อัตราไหล 6.5 l/min

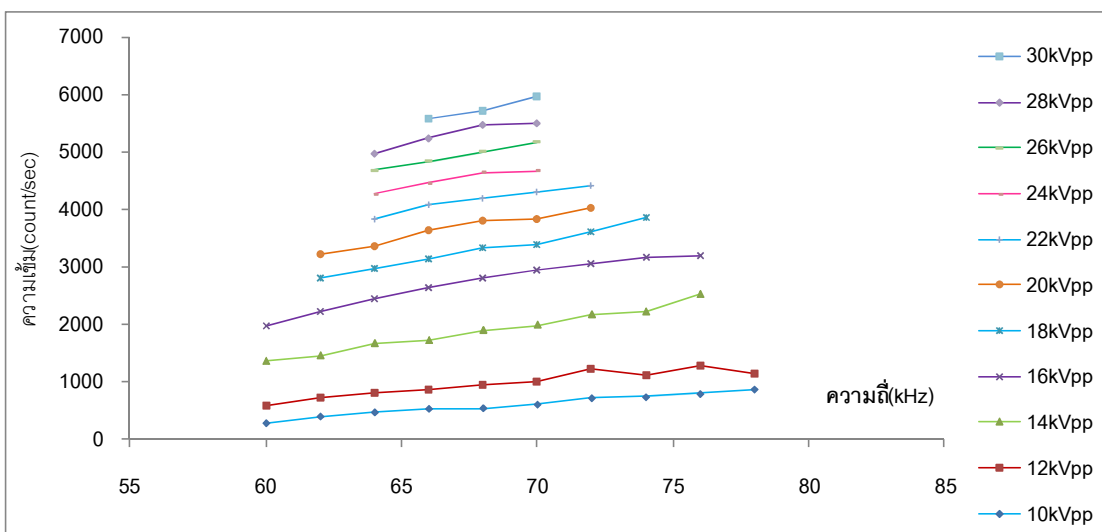


ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) แรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) เปรียบเทียบกับค่าความถี่ต่าง ๆ ที่อัตราไหล 8 l/min

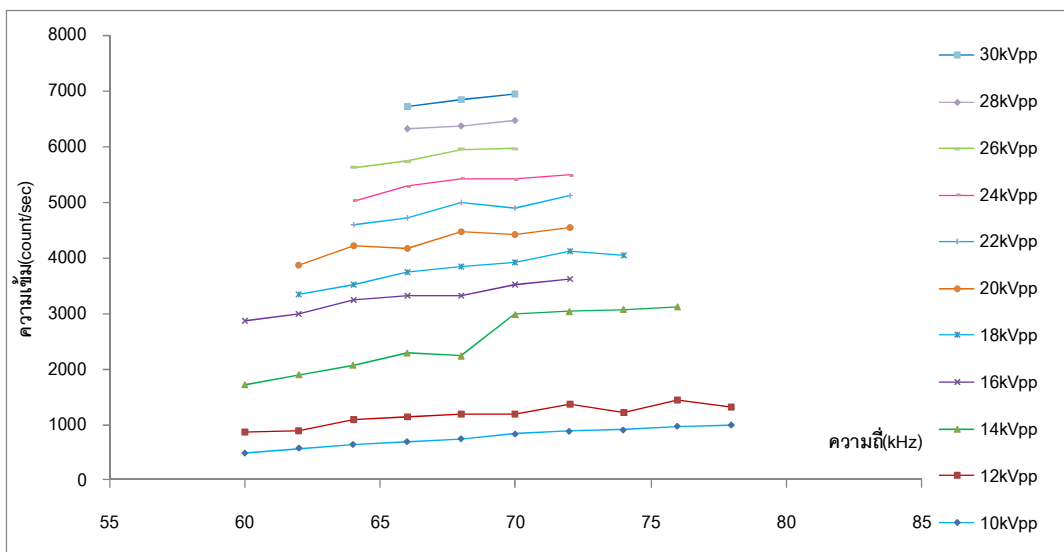
**ส่วนที่ 2** ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และความถี่ (kHz) และเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆที่อัตราไหลก้ำซคงที่



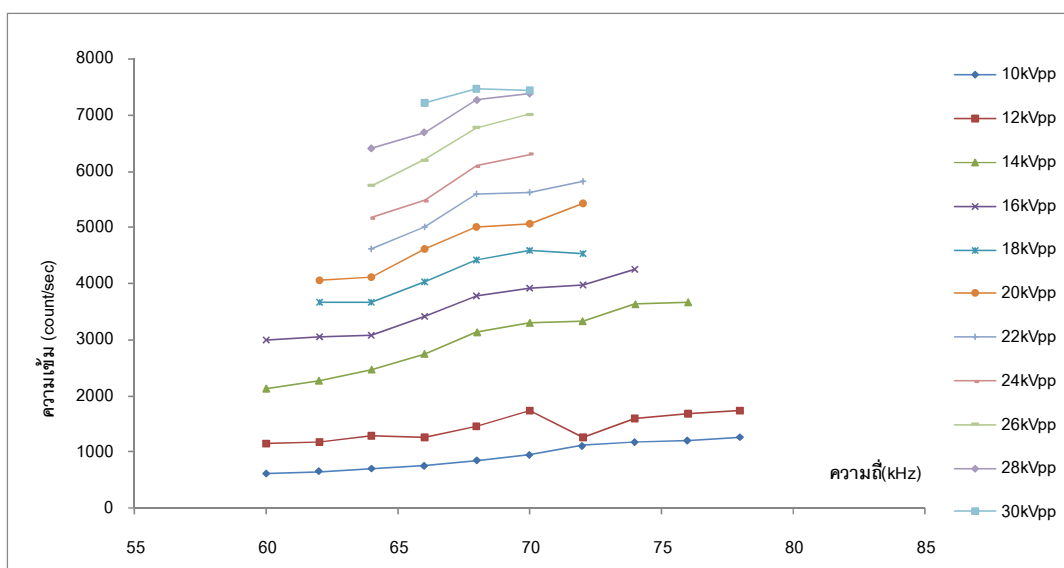
ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และความถี่ (kHz) และเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่อัตราไหลก๊าซ 2 l/min



ภาพที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และความถี่ (kHz) และเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่อัตราไหลก๊าซ 4 l/min

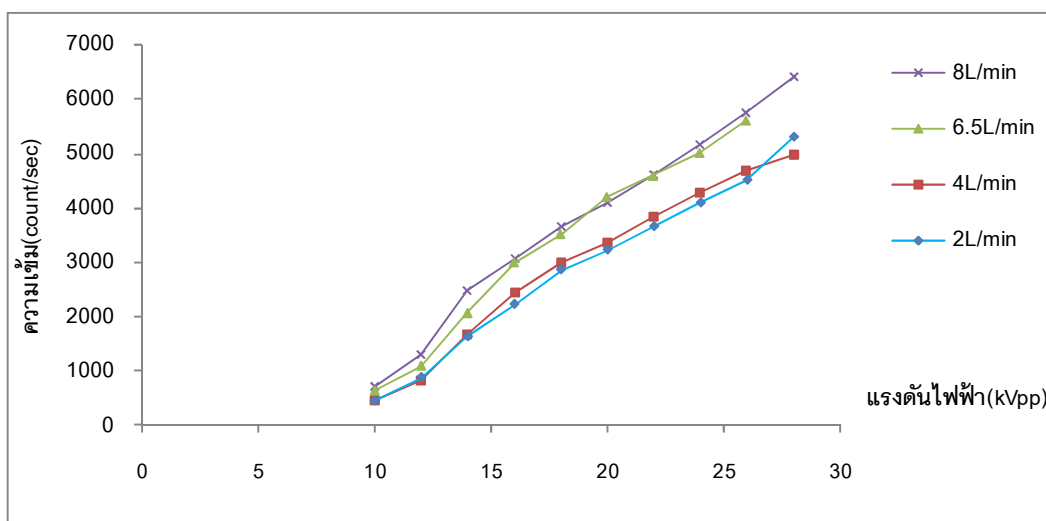


ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และความถี่ (kHz) และเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่อัตราไหลก๊าซ 6.5 l/min

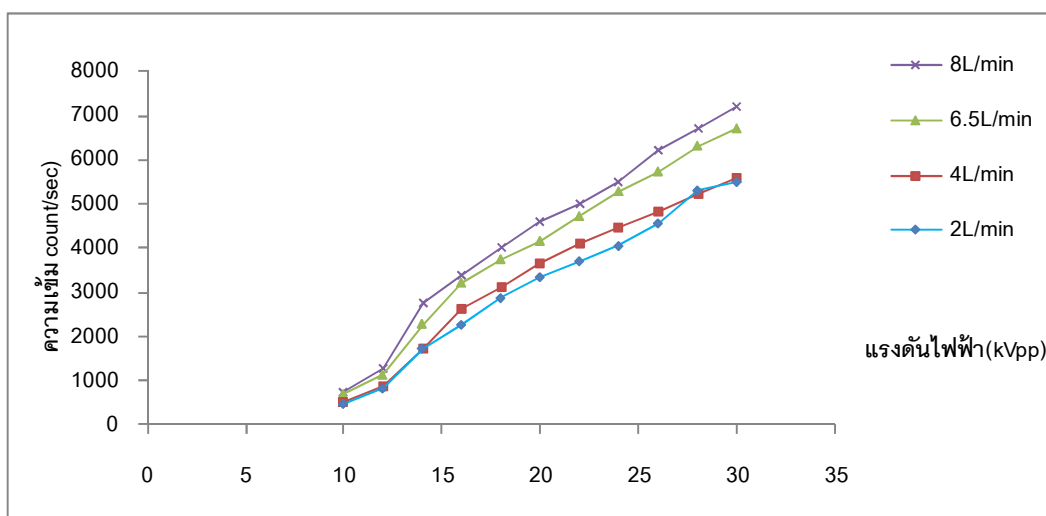


ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และความถี่ (kHz) และเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่อัตราไหลก๊าซ 8 l/min

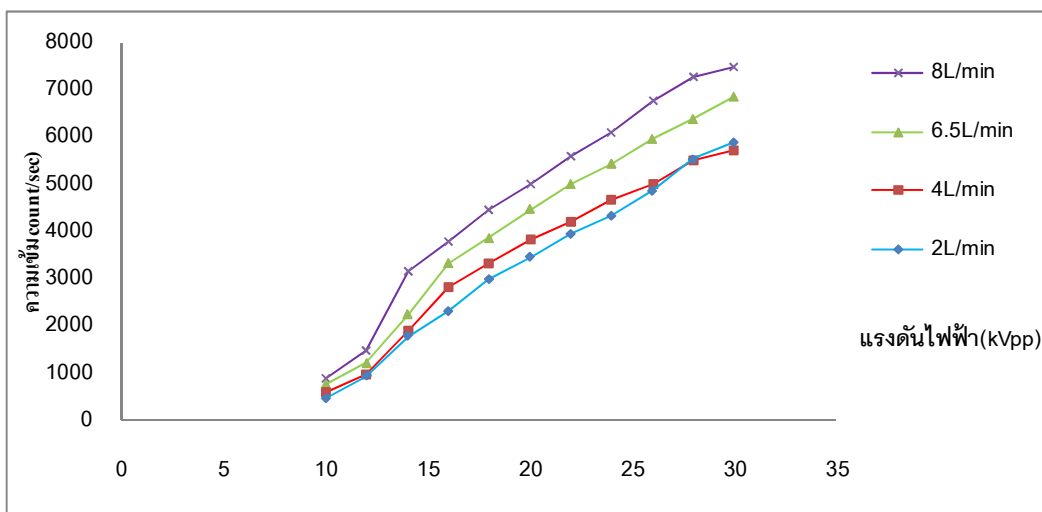
**ส่วนที่ 3** ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) และเปรียบเทียบความถี่ต่างๆ ที่อัตราไหลคงที่



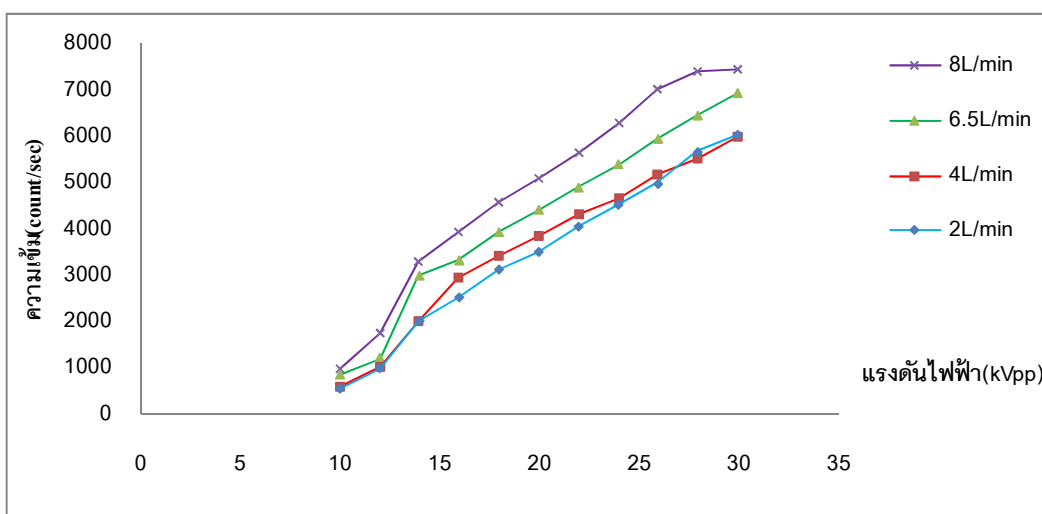
ภาพที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) และเปรียบเทียบอัตราไหลต่างๆ ที่ความถี่ 64 kHz



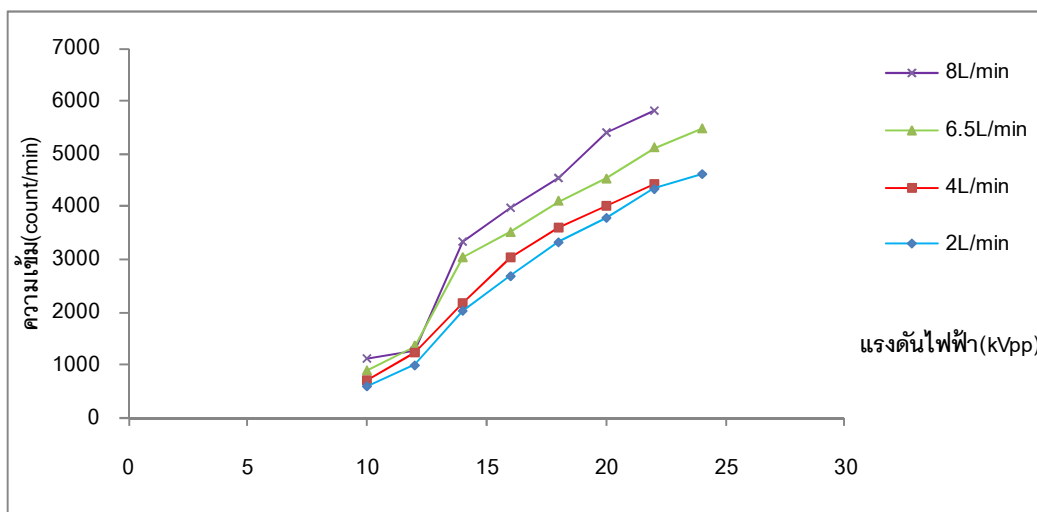
ภาพที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) และเปรียบเทียบอัตราไหลต่างๆ ที่ความถี่ 66 kHz



ภาพที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า (kV<sub>pp</sub>) และเปรียบเทียบอัตราไหลต่างๆ ที่ความถี่ 68 kHz



ภาพที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า (kV<sub>pp</sub>) และเปรียบเทียบอัตราไหลต่างๆ ที่ความถี่ 70 kHz



ภาพที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัม (count/sec) และแรงดันไฟฟ้า ( $kV_{pp}$ ) และเปรียบเทียบอัตราไหลต่างๆ ที่ความถี่ 72 kHz

การทดลองการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมพลาสมาอาร์กอนของความถี่และแรงดันที่เปลี่ยนไปที่อัตราไหลของก๊าซคงที่ พบว่าความเข้มของสเปกตรัมมีแนวโน้มตามแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และอัตราไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้น

#### 4.6 การศึกษาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนพลาสมาของอาร์กอนที่กำเนิดโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

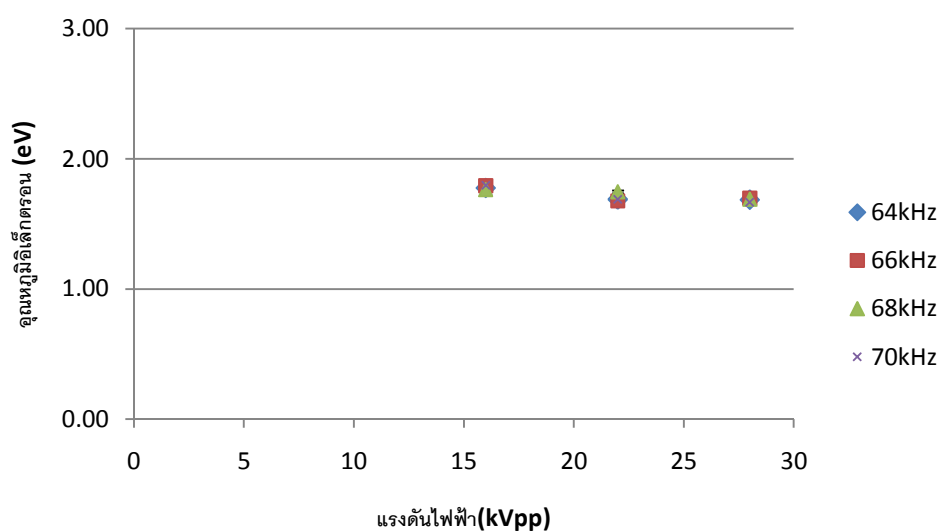
การทดลองนี้เพื่อหาความหนาแน่นของพลาสมาที่ผลิตขึ้นจากระบบที่พัฒนาขึ้น โดยใช้การหาอุณหภูมิโดยวิธีการเขียนกราฟของโบลทซ์มันน์ จากผลการวัดสเปกตรัมที่อัตราไหลของก๊าซ 8 l/min และเลือกค่าความถี่ 64, 66, 68 และ 70 kHz มาพิจารณาเนื่องจากเป็นช่วงความถี่ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าได้กว้างตั้งแต่ 16, 22 และ 28  $kV_{pp}$  ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิอิเล็กตรอนที่ความถี่ 64 kHz และ 66 kHz ณ อัตราไหลก๊าซ 8 l/min โดยวัด 3 ครั้ง

การทดลอง	ความถี่คงที่	แรงดันไฟฟ้า
1	64 kHz	16-28 $kV_{pp}$
2	66 kHz	16-28 $kV_{pp}$
3	68 kHz	16-28 $kV_{pp}$
4	70 kHz	16-28 $kV_{pp}$

ตารางที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ความถี่ 64, 66, 68 และ 70 kHz แรงดันไฟฟ้า 16 ถึง 28 kV<sub>pp</sub> อัตราไหล่ก๊าซ 8 l/min คงที่

ความถี่ (kHz)	แรงดันไฟฟ้า (kV <sub>pp</sub> )	อุณหภูมิอิเล็กตรอน (eV)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
64	16	1.76	1.79	1.78	1.78±0.0153
	22	1.69	1.69	1.69	1.69
	28	1.69	1.68	1.69	1.69±0.0058
66	16	1.80	1.79	1.79	1.79±0.0058
	22	1.69	1.68	1.66	1.68±0.0153
	28	1.70	1.70	1.69	1.70±0.0058
68	16	1.72	1.78	1.79	1.76±0.0375
	22	1.76	1.74	1.74	1.75±0.0115
	28	1.71	1.69	1.67	1.69±0.0200
70	16	1.79	1.80	1.80	1.80±0.0058
	22	1.69	1.69	1.69	1.69
	28	1.66	1.67	1.67	1.67±0.0058



ภาพที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอน (eV) และแรงดันไฟฟ้า (kV<sub>pp</sub>) ที่ความถี่ 64, 66, 68 และ 70 kHz



จากผลการทดลอง พบว่า ปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าในช่วง 16, 22 และ 28 kV<sub>pp</sub> ที่ความถี่ 64, 66, 68 และ 70 kHz มีอุณหภูมิอิเล็กตรอนประมาณ 1.72 eV ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน

#### 4.7 การศึกษาความหนาแน่นของอาร์กอนพลาสมาที่กำเนิดโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

จากการการคำนวณอุณหภูมิอิเล็กตรอนในหัวข้อที่ 4.6 เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน  $n_e$  (m<sup>-3</sup>) จาก Saha Equation ดังสมการที่ 2.4 ดังตารางที่ 4.10

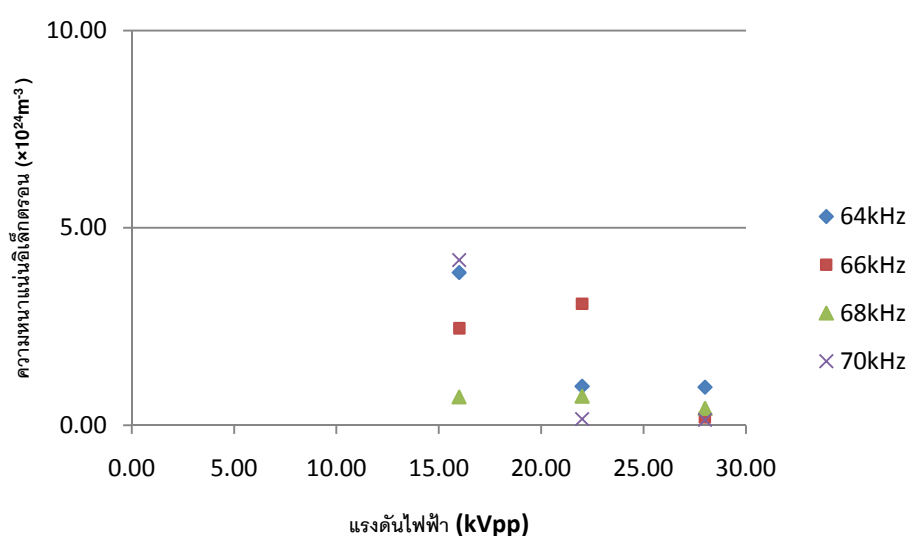
ตารางที่ 4.10 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของอิเล็กตรอน ความถี่ แรงดันไฟฟ้า ที่ อัตราไหลของก๊าซ 8 l/min คงที่

การทดลอง	ความถี่คงที่	แรงดันไฟฟ้า
1	64 kHz	14 – 24 kV <sub>pp</sub>
2	66 kHz	14 – 24 kV <sub>pp</sub>
3	68 kHz	14 – 24 kV <sub>pp</sub>
4	70 kHz	14 – 24 kV <sub>pp</sub>

ตารางที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ความถี่ 64, 66, 68 และ 70 kHz แรงดันไฟฟ้า 16 ถึง 28 kV<sub>pp</sub> อัตราไหลก๊าซ 8 l/min คงที่

ความถี่ (kHz)	แรงดันไฟฟ้า (kV <sub>pp</sub> )	ความหนาแน่นอิเล็กตรอน ( $\times 10^{24}$ m <sup>-3</sup> )			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
64	16	4.18	2.76	4.66	3.87±0.9879
	22	0.99	0.97	0.99	0.99±0.0122
	28	0.99	0.91	0.98	0.96±0.0398
66	16	5.51	0.94	0.93	2.46±2.6422
	22	8.15	0.95	0.14	3.08±4.4107
	28	0.34	0.104	0.163	0.20±0.1228
68	16	0.62	0.60	0.93	0.72±0.1868

70	22	0.80	0.69	0.71	$0.74 \pm 0.0576$
	28	0.97	0.17	0.14	$0.43 \pm 0.4706$
	16	6.43	1.01	5.11	$4.18 \pm 2.8263$
	22	0.16	0.16	0.16	$0.16 \pm 0.0015$
	28	0.13	0.14	0.14	$0.14 \pm 0.0055$



ภาพที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นอิเล็กตรอน และแรงดันไฟฟ้า (kV<sub>pp</sub>) ที่ความถี่ 64, 66, 68 และ 70 kHz

จากผลการทดลอง พบว่า ปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าในช่วง 16, 22 และ 28 kV<sub>pp</sub> ที่ความถี่ 64, 66, 68 และ 70 kHz มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ  $1.49 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน

#### 4.8 การศึกษาการกระเจิงแสงของสเปกตรัมที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิลำอิเล็กตรอนในพลาสมา

การศึกษากการกระเจิงแสงของสเปกตรัมที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิลำอิเล็กตรอนในพลาสมาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

**ส่วนที่ 1** เพื่อศึกษาสเปกตรัมและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ระยะห่างระหว่างโปรบกำเนิดพลาสมาและหัววัด OES ที่แตกต่างกันโดย นำ Aperture ขนาด 150 ไมครอนมาใช้กันระหว่าง

พลาสติกกับหัววัดเพื่อจำกัดแสงที่เข้าไปยังหัววัด Fiber Optic ปรับ กำลังไฟฟ้าให้สูงที่สุดเท่าที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำได้ ตั้งระยะเวลาในการวัด 2 วินาที ที่อัตราไหลก๊าซ 6 l/min และปรับความถี่ที่ 70.466 kHz และแรงดันไฟฟ้าคงที่ 30 kV<sub>pp</sub> ใช้ระยะเวลาวัด 2 วินาที ที่อัตราไหลของก๊าซ 6 l/min โดยจัดระยะระหว่างหัววัดพลาสติกและโพรบกำเนิดพลาสติกให้มีระยะห่างประมาณ 4.5 cm, 5 cm, 6cm, และ 7 cm ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการศึกษาสเปกตรัมในส่วนที่ 1

การทดลอง	ระยะห่างระหว่างโพรบและหัววัด
1	4.5 cm
2	5 cm
3	6 cm
4	7 cm

ผลการทดลองส่วนที่ 1 พบว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่คำนวณได้จากวิธีการสร้างกราฟของโบลซ์มันน์มีค่าเท่ากันเนื่องจากค่าความชันมีค่าใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 แสดงอุณหภูมิอิเล็กตรอนเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างโพรบกำเนิดพลาสติกและหัววัด

การทดลอง	ระยะห่างระหว่างโพรบและหัววัด	Te (eV)
1	4.5 cm	1.72
2	5 cm	1.72
3	6 cm	1.72
4	7 cm	1.72

**ส่วนที่ 2** เพื่อศึกษาสเปกตรัมและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับอัตราไหลของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงโดยมีขั้นตอนการทดลองโดย นำ Aperture ขนาด 150 ไมครอนมาใช้กั้นระหว่างพลาสติกกับหัววัดเพื่อจำกัดแสงที่เข้าไปยังหัววัด Fiber Optic ปรับกำลังไฟฟ้าให้สูงที่สุดเท่าที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำได้ ปรับตั้งค่าระยะห่างระหว่างหัววัดและโพรบกำเนิดพลาสติกที่

ระยะ 5 cm คงที่ และใช้ระยะเวลาในการวัด 2 sec และ ปรับความถี่คงที่ 70.466 kHz และ แรงดันไฟฟ้าคงที่ 30 kV<sub>pp</sub> ใช้ระยะเวลาวัด 2 วินาที ที่อัตราไหลของก๊าซ 6 l/min การทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยการปรับอัตราไหลที่ 2, 4, 6 และ 8 l/min ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการศึกษาสเปกตรัมในส่วนที่ 2

การทดลอง	อัตราไหลของก๊าซ (l/m)
T <sub>e1</sub>	2
T <sub>e2</sub>	4
T <sub>e3</sub>	6
T <sub>e4</sub>	8

การทดลองพบว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่คำนวณได้จากวิธีการสร้างกราฟของโบลซ์มันน์มีค่าเท่ากันเนื่องจากค่าความชันมีค่าใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 แสดงอุณหภูมิของอิเล็กตรอนเปรียบเทียบอัตราไหลของก๊าซอาร์กอน

การทดลอง	อัตราไหลของก๊าซ (l/min)	Te (eV)
1	4	1.72
2	6	1.72
3	8	1.72

## บทที่ 5

### สรุปวิจารณ์ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จความหนาแน่นสูง และแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูงแรงดันสูงสำหรับขับเคลื่อนแหล่งกำเนิดพลาสมา ได้ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

5.1.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูง มีสองกรณีที่พิจารณา ในกรณีแรกพบว่าขณะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดทางด้านออกหรือเปลี่ยนแหล่งกำเนิดพลาสมา แรงดันไฟฟ้าทางด้านออกจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามสภาพของโหลดที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งขณะไม่ต่อโหลดจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงที่สุด เนื่องจากยังไม่มี การควบคุมแรงดันทางออกในแบบ Close-loop ในกรณีที่สองพบว่าย่านความถี่ที่สามารถใช้งานของโหลดแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการตอบสนองของความถี่ของแกนหม้อแปลงกับชนิดของโหลดที่เลือกใช้งาน ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้โหลดชนิดโคเอ็กเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จที่มีย่านตอบสนองความถี่สูงสุด 58 – 76 kHz ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 10 – 16 kV<sub>pp</sub> และย่านตอบสนองความถี่ต่ำสุด 64 – 70 kHz ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดช่วง 10 – 30 kV<sub>pp</sub> ซึ่งช่วงที่สามารถปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุดจะมีย่านตอบสนองความถี่ใช้งานแคบ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พัฒนาขึ้น

5.1.2 ผลการศึกษาแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบโคเอ็กเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ เนื่องจากการทดลองได้ออกแบบโพรบ 3 แบบโดยทั้งสามแบบมีความแตกต่างกันทั้งขนาดระยะช่องว่างอากาศสำหรับดีสชาร์จ และวัสดุไดอิเล็กทริกที่ใช้ ซึ่งการออกแบบโพรบแบบที่ 3 พัฒนามาจากข้อเสียของแบบแบบที่ 1 และ 2 เนื่องจากการทดลองในเบื้องต้นได้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่ต่ำระดับ 500 – 1000 เฮิร์ต ใช้งานกับโพรบแบบที่ 1 และ 2 พบว่าพลาสมาที่กำเนิดได้มีความเข้มข้นน้อยมาก จึงได้ทำการออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำเนิดพลาสมาและนำมาทดสอบกับโพรบแบบที่ 1 และ 2 พบว่าโพรบแบบที่ 1 และ 2 ไม่สามารถทนต่อแหล่งกำเนิดแรงดันสูงความถี่สูงได้ จึงได้มีการศึกษาและหาวัสดุที่สามารถทนต่อความถี่สูงได้เพื่อใช้ในโพรบแบบที่ 3 ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทพลอนเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกแทนแก้ว และเพื่อให้โพรบมีความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงจึงลดขนาดของช่องว่างอากาศสำหรับดีสชาร์จของโพรบแบบที่ 3 จาก 2 mm เป็น 1mm ซึ่งจากการปรับปรุงพบว่า โพรบแบบที่ 3 สามารถทนต่อ

ไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงได้และสามารถผลิตพลาสมาซึ่งมีความเข้มสูงเมื่อเทียบกับไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่ต่ำ โดยสังเกตจากลักษณะทางกายภาพของพลาสมา

5.1.3 จากการวิเคราะห์สเปกตรัม พบว่าหากตำแหน่งความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นเป็นตำแหน่งเดิมแต่ความเข้มเพิ่มขึ้น จะมีแนวโน้มของอุณหภูมิอิเล็กตรอนใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน แต่สิ่งที่ทำให้อุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่คำนวณได้มีความแตกต่างกัน คือ พลังงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูงในการกำเนิดพลาสมา ถ้าป้อนพลังงานไม่เพียงพออาจจะทำให้บางพีคในสเปกตรัมหายไปมีผลทำให้ความชันของกราฟโบลทซ์มันน์ในแต่ละสเปกตรัมไม่เท่ากัน และเมื่อนำมาคำนวณหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน ( $T_e$ ) อาจมีค่าแตกต่างและความคลาดเคลื่อน

5.1.4 เมื่อนำอุณหภูมิของอิเล็กตรอนไปหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากสมการ “Saha-Boltzmann equation” พบว่าที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอนสูง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงเช่นเดียวกันทั้งนี้ความหนาแน่นอาจจะมีแนวโน้มอย่างชัดเจนเนื่องจากข้อจำกัดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าและโพรบ โดยที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูงประกอบกับโพรบกำเนิดพลาสมาชนิดนี้สามารถผลิตพลาสมาที่มีความหนาแน่นในช่วง  $10^{24} \text{ m}^{-3}$

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาความถี่สูงแรงดันสูงให้มีประสิทธิภาพและใช้งานง่ายให้ดียิ่งขึ้น โดยการพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหาในสองกรณี คือ

กรณีแรกเพื่อให้ใช้งานกับโหลดได้หลาย ๆ ชนิด เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงโหลดทางด้านออก ทำให้แรงดันไฟฟ้าออกไม่เสถียร ดังนั้นจึงต้องมีระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่แบบปิด เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีเสถียรภาพโดยไม่ขึ้นกับโหลดที่ใช้งาน

กรณีที่สองเพื่อตอบสนองในแง่ของการทดลองและให้ได้พารามิเตอร์ในงานทดลองเพิ่มขึ้น ควรออกแบบให้มีย่านตอบสนองความถี่สำหรับใช้งานที่กว้างขึ้น ส่วนกำลังไฟฟ้าน่าจะเพียงพอ

ดังนั้นต้องพัฒนาในส่วนของการออกแบบหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าสูงซึ่งเป็นส่วนที่ยุ่งยาก และต้องศึกษาหลายองค์ประกอบ อาทิ การคำนวณพารามิเตอร์ที่จะใช้งานในการเลี้ยววัสดุเพื่อทำหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าสูง การพันขดลวดและการฉนวน การเลือกขนาดและชนิดของแกนหม้อแปลง ชนิดของลวดที่จะใช้พันหม้อแปลง การคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ รวมทั้งการออกแบบและสร้างบอบบินเพื่อใช้งานกับหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าสูงได้ซึ่งเป็นหัวข้อที่น่าสนใจ นอกจากนี้ยังอาจพัฒนาให้แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำให้เป็นแบบสวิตชิงเต็มระบบเพื่อลดขนาดและน้ำหนักของระบบจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง ถ้าต้องการเพิ่ม

กำลังไฟฟ้าให้มากขึ้นน่าจะไปออกแบบและพัฒนาในส่วนของโพรบแทนเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง โดยหาวัสดุที่ใช้ในการสร้างโพรบที่ให้ความเข้มลำพลาสมาสูงที่กำลังไฟฟ้าต่ำ

5.2.2 ควรออกแบบโพรบกำเนิดพลาสมาให้มีประสิทธิภาพในการกำเนิดพลาสมาให้ดียิ่งขึ้น โดยอาจลดขนาดของช่องว่างอากาศสำหรับดิสชาร์จเพื่อทำให้สนามไฟฟ้าสูงขึ้น การออกแบบลักษณะของโพรบให้มีช่องทางออกของก๊าซอาร์กอนแบบเจ็ต หรือออกแบบหัวโพรบให้ก๊าซที่ป้อนเข้าออกภายในโพรบมีความสม่ำเสมอและไหลออกมาง่าย ซึ่งการออกแบบลักษณะของหัวโพรบอาจจะต้องทำการทดลองเปรียบเทียบเปลวของพลาสมากับโพรบในแต่ละชนิด ทั้งนี้เปลวของพลาสมาขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อัตราไหลของก๊าซและกำลังในการผลิตพลาสมาที่เหมาะสม สิ่งสำคัญของงานวิจัยนี้คือ จะต้องเลือกโพรบที่สามารถทนต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่นำมาใช้งานได้ ซึ่งโดยปกติควรออกแบบโพรบให้มีประสิทธิภาพในการกำเนิดพลาสมามากกว่าที่จะไปพัฒนาเครื่องกำเนิดทางไฟฟ้า ถึงแม้ว่าผู้วิจัยสามารถที่จะออกแบบเครื่องกำเนิดทางไฟฟ้าที่มีกำลังสูงในการผลิตพลาสมาแต่ไม่สามารถที่จะหาวัสดุที่ทนต่อความถี่สูงแรงดันสูงได้ส่วนใหญ่ อาจจะต้องเป็นวัสดุนำเข้าจากต่างประเทศหรือไม่สามารถหาได้ รวมไปถึงความปลอดภัยของผู้ใช้งานเองซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญที่สุด

5.2.3 ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการคำนวณขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของผู้ทำการทดลองเป็นหลัก เนื่องจากผู้ทำการทดลองเป็นผู้กำหนดและเป็นผู้เลือกพิกัดจากสเปกตรัมที่ปรากฏขึ้นโดยวิจรรณญาณของผู้ทำการทดลองเอง ซึ่งน่าจะมีโปรแกรมที่ระบุว่าช่วงพิกัดที่เกิดขึ้น เป็นพิกัดของธาตุชนิดไหน ซึ่งโปรแกรมมีความสามารถที่จะระบุค่าพลังงานและความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นแบบอัตโนมัติ เพื่อใช้ระบบมาแก้ไขการเลือกอาจจะทำให้ผลการทดลองผิดพลาดน้อยลง

การวัดพลาสมาในอากาศเป็นเรื่องที่ยากที่จะสามารถหาวิธีการวัดพลาสมาเพื่อมายืนยันกับผลการทดลองที่คำนวณอุณหภูมิอิเล็กตรอนได้โดยทางอ้อม ซึ่งในอนาคตอาจจะต้องพัฒนา High Voltage Langmuir Probe เพื่อทำการวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาในอากาศเพื่อนำผลการทดลองมายืนยันต่อไป

5.2.4 ข้อจำกัดของเครื่องวัดพารามิเตอร์พลาสมาซึ่งงานทดลองนี้ใช้เครื่องวัดสเปกตรัม OES ในการวัดสเปกตรัมซึ่งมีข้อจำกัดของเครื่องมือคือ ไม่สามารถวัดความเข้มแสงเกินกว่า 15,000 au. เพื่อหลีกเลี่ยงเครื่องวัดในสถานะอิ่มตัวจึงต้องปรับระยะระหว่างหัววัดและโพรบกำเนิดพลาสมาไกลและออกแบบการทดลองให้เหมาะสมกับเครื่องมือที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

## รายการอ้างอิง

- [1] Wikipedia. Plasma (Physics). [Online]. 2011. Available from : [http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma\\_\(physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_(physics)) [2011, June 10]
- [2] Chaivan, P., Pasaja, N., Boonyawan, D., Suanpoot, P. and Vilaithong, T. Low-temperature plasma treatment for hydrophobicity improvement of silk. Surface & Coatings Technology 193 (2005) : 356 – 360.
- [3] Morfill, G.E., Kon, M.G. and Zimmermann, J.L. Focus on Plasma Medicine. New Journal of Physics 11 (2009) : 115011 (8pp).
- [4] Nehra, V., Kumar, A. and Dwivedi, H.K. Atmospheric Non-Thermal Plasma Sources. International Journal of Engineering. 2,1.
- [5] Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmaison, J. and Leprince, P. Atmospheric pressure plasmas. Spectrochimica Acta Part B 61 (2006) : 2 – 30.
- [6] Moisan, M., and others. Plasma sterilization. Methods and mechanisms. Lecture presented at the 15<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Chemistry, pp. 317 – 492. France : 2001.
- [7] Grill, A. Cold Plasma in Materials Fabrication. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York : IEEE Press, 1994.
- [8] พงษ์ระวี พันธุ์บุญปลูก. การศึกษาสเปกตรัมพลาสมาของสารประกอบซิลิกอน (HMDSO) ด้วยวิธีสเปกโทรสโคปีแบบเปล่งแสงสำหรับพลาสมาระนาบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2554.
- [9] Young and Freedman. ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา. 2, 3. เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า, 2548.
- [10] Google, บทที่ 26 ความจุไฟฟ้า. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา : [www.crma.ac.th/phsdept/data/learning/capacitance.pdf](http://www.crma.ac.th/phsdept/data/learning/capacitance.pdf) [3 สิงหาคม 2554]
- [11] ว 432 มัธยมศึกษาปีที่ 4, โครงสร้างอะตอม [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา : [http://krudaowiki.spaces.com/file/view/Unit\\_2.1-2.8.pdf](http://krudaowiki.spaces.com/file/view/Unit_2.1-2.8.pdf) [11 กันยายน 2554]
- [12] Google. Spectra of gas discharge. [Online]. 2011. Available from : [astro.u-strasbg.fr/~koppen/discharge/argon.html](http://astro.u-strasbg.fr/~koppen/discharge/argon.html) [2011 July 20]



- [13] Boffard, J.B., Lin, C.C. and DeJoseph, C.A. Application of excitation cross sections to optical plasma diagnostics. Journal of Physics. 37 (2004) : R143–R161
- [14] Installation and Operation Manual Document Number 000-20000-300-02-0607  
DRAFT [2007, June 6]
- [15] Kumar, A. and others. Characterization of Atmospheric Pressure Glow Discharge in Helium Using Langmuir Probe, Emission Spectroscopy, and Discharge Resistivity IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE. 35, 4. (AUGUST 2007)
- [16] Cowpe, J. Stephen. Optical Emission and Mass Spectrometric Diagnostics of Laser-Induced Plasmas School of Computing, Science & Engineering (CSE) Institute for Materials Research (IMR) University of Salford, UK, Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements of the Degree of Doctor of Philosophy, (August 2008)
- [17] Unnikrishnan, V.K. Measurements of plasma temperature and electron density in laser-induced copper plasma by time-resolved spectroscopy of neutral atom and ion emissions. Pramana Journal of Physics. 74, 6. pp. 983 – 993.
- [18] Google. บทที่ 8 การใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหาร (Microwave in Food Processing) [Online]. 2554. Available from : [http://conf.agi.nu.ac.th/agmis/download/publication/204\\_file.pdf](http://conf.agi.nu.ac.th/agmis/download/publication/204_file.pdf) [11 ธันวาคม 2554]
- [19] Forster, S., Mohr, C. and Viol, W. Investigations of an atmospheric pressure plasma jet by optical emission spectroscopy. Surface & Coatings Technology. 200 (2005) :827 – 830.
- [20] Gomba, J.M., D'Angelo, C., Bertuccelli, D. and Bertuccelli, G. Spectroscopic characterization of laser induced breakdown in aluminium\_lithium alloy samples for quantitative determination of traces. Spectrochimica Acta Part B. 56(2001) : 695 – 705.
- [21] Bradt, H. Saha Equation Supplement to Chapter 4 of Astrophysics Processes (AP) by Hale Bradt, Camb. U. Press, 2008.
- [22] Ghassemi, M. and others. Dielectric Barrier Discharge (DBD) Dynamic Modeling for High Voltage Insulation. 2011 Electrical Insulation Conference, Annapolis, Maryland, (2011, June 5 - 8)

- [23] Wong, C.S. Plasma Diagnostic Elements of Plasma Technology. Physics Department, Malaysia, University of Malaya, 2002.
- [24] Google. NIST Atomic Spectra Database Lines Form. [Online]. 2011. Available from : [http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html) [2011, November 11]
- [25] GRIEM, H. R. Principles of Plasma Spectroscopy. 2<sup>nd</sup> ed. United Kingdom : CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1997.
- [26] Wikipedia. Atmospheric-pressure plasma. [Online]. 2011. Available from : [http://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric-pressure\\_plasma](http://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric-pressure_plasma) [2011, December 19]
- [27] Xu, L. and others. Experimental study and sterilizing application of atmospheric pressure plasmas. Thin Solid Films. 506– 507 (2006) : 400 – 403.
- [28] Gui-Min, Xu., Yue, Ma., and Guan-Jun, Zhang. DBD Plasma Jet in Atmospheric Pressure Argon. IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE. 36, 4.(AUGUST 2008)
- [29] Laroussi, M. Low-Temperature Plasmas for Medicine? IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE. 37, 6. (JUNE 2009)
- [30] Fridman, A. Plasma Chemistry CAMBRIDGE.
- [31] Kunze, H.-Joachim. Introduction to plasma spectroscopy. Springer series atomic, Optical and Plasma Physics 56.
- [32] Roth, J. Reece. Industrial Plasma Engineering. Applications to Nonthermal Plasma Processing. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia.
- [33] Wikipedia. Electromagnetic Spectrum. [Online]. 2011. Available from : [http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\\_spectrum](http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum) [2011, December 19]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ตารางฐานข้อมูลสเปกตรัมของอาร์กอน

ตารางที่ ก-1 ตารางฐานข้อมูลสเปกตรัมพลาสมาอาร์กอนจาก (NIST) [24]

Ion	$I_{nm}$ Observed	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$
Ar II	289.1612	1.82E+07	21.4264882	2
Ar II	294.2893	5.30E+07	21.3517985	4
Ar II	297.905	4.16E+07	21.4264882	2
Ar II	303.3508	9.90E+06	21.3517985	4
Ar II	309.3402	4.40E+08	23.8740138	6
Ar II	324.3689	1.06E+08	23.0823021	2
Ar II	329.364	1.70E+08	23.6304234	4
Ar II	330.7228	3.40E+08	23.5488916	2
Ar II	335.0924	1.50E+08	24.8259692	6
Ar II	337.6436	1.50E+08	24.8140633	8
Ar II	338.8531	1.90E+08	23.6304234	4
Ar I	346.107	6.70E+04	15.2048079	5
Ar II	347.6747	1.25E+08	22.7879777	6
Ar II	349.1244	1.79E+08	22.811357	4
Ar II	349.1536	2.31E+08	22.7728782	8
Ar II	350.9778	2.55E+08	22.8368703	2
Ar II	351.4388	1.36E+08	22.7879777	6
Ar II	354.5596	3.40E+08	23.2581123	6
Ar II	354.5845	3.90E+08	24.6226401	8
Ar I	355.4306	2.70E+05	15.0356393	5
Ar II	355.9508	2.88E+08	23.1622367	8
Ar II	356.103	4.00E+08	24.6237745	10
Ar II	357.6616	2.75E+08	23.0145441	8
Ar II	358.1608	1.76E+08	23.1032837	4

Ion	$I_{nm}$ Observed	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$
Ar II	358.2355	2.53E+08	23.0702885	6
Ar II	358.8441	3.03E+08	22.9486467	10
Ar I	360.6522	7.60E+05	15.0603891	1
Ar II	362.2138	6.40E+07	22.683064	2
Ar II	363.9833	1.40E+08	24.7571439	6
Ar II	371.8206	2.00E+08	24.8259692	6
Ar II	372.9309	4.80E+07	19.9674978	4
Ar II	373.7889	2.30E+08	24.8140633	8
Ar II	376.527	9.80E+07	22.5148025	6
Ar II	376.6119	7.40E+06	21.3517985	4
Ar I	377.0369	7.00E+04	15.0106092	3
Ar II	377.052	4.10E+07	22.5926622	4
Ar II	378.084	7.70E+07	22.7728782	8
Ar II	380.3172	1.50E+08	24.7571439	6
Ar II	380.9456	4.40E+07	22.5148025	6
Ar I	383.4679	7.50E+05	15.0603891	1
Ar II	385.0581	3.87E+07	19.9674978	4
Ar II	386.8528	1.40E+08	23.1715343	6
Ar II	392.5719	1.40E+08	24.2843928	4
Ar II	392.8623	2.44E+07	19.9674978	4
Ar II	393.2547	9.30E+07	23.1193767	4
Ar II	394.6097	1.40E+08	24.28413	6
Ar I	394.7505	5.60E+04	14.6882894	5
Ar I	394.8979	4.55E+05	14.6871173	3
Ar II	397.9356	9.80E+07	23.0823021	2
Ar II	399.4792	1.60E+08	23.8463131	2

Ion	$I_{nm}$ Observed	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$
Ar II	401.3857	1.05E+07	19.4945327	8
Ar II	403.3809	9.80E+07	22.683064	2
Ar II	403.546	4.40E+06	21.4980485	6
Ar II	404.2894	4.06E+07	21.492401	4
Ar I	404.4418	3.33E+05	14.6882894	5
Ar II	405.2921	6.70E+07	23.8018128	4
Ar II	407.2005	5.80E+07	21.4980485	6
Ar II	407.6628	8.00E+07	22.683064	2
Ar II	407.9574	1.19E+07	21.492401	4
Ar II	408.2387	2.90E+06	19.6800477	6
Ar II	410.3912	1.20E+08	22.5148025	6
Ar II	413.1724	8.50E+07	21.4264882	2
Ar II	415.6086	3.90E+07	22.5926622	4
Ar I	415.859	1.40E+06	14.5289126	5
Ar I	416.418	2.88E+05	14.5249124	3
Ar II	417.9297	1.30E+07	22.5148025	6
Ar I	418.1884	5.61E+05	14.6871173	3
Ar I	419.0713	2.80E+05	14.5060667	5
Ar I	419.1029	5.39E+05	14.6806494	3
Ar I	419.8317	2.57E+06	14.5759479	1
Ar I	420.0674	9.67E+05	14.4990527	7
Ar II	421.8665	3.60E+07	22.7003761	4
Ar II	422.2637	6.90E+07	22.8025082	2
Ar II	422.6988	4.10E+07	24.28413	6
Ar II	422.8158	1.31E+07	19.6800477	6
Ar II	423.722	1.12E+07	21.3517985	4

Ion	$\lambda_{nm}$ Observed	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$
Ar I	425.1185	1.11E+05	14.4639949	3
Ar I	425.9362	3.98E+06	14.7381144	1
Ar I	426.6286	3.12E+05	14.5289126	5
Ar II	426.6527	1.64E+07	19.5490106	6
Ar I	427.2169	7.97E+05	14.5249124	3
Ar II	427.7528	8.00E+07	21.3517985	4
Ar II	428.2898	1.32E+07	19.6425808	2
Ar I	430.0101	3.77E+05	14.5060667	5
Ar II	430.065	5.70E+06	21.4980485	6
Ar II	433.12	5.74E+07	19.6103067	4
Ar II	433.203	1.92E+07	19.3053437	2
Ar I	433.3561	5.68E+05	14.6882894	5
Ar I	433.5338	3.87E+05	14.6871173	3
Ar I	434.5168	2.97E+05	14.6806494	3
Ar II	434.8064	1.17E+08	19.4945327	8
Ar II	435.2205	2.12E+07	19.3053437	2
Ar II	436.2066	5.50E+06	21.4980485	6
Ar II	437.0753	6.60E+07	21.492401	4
Ar II	437.1329	2.21E+07	19.261083	4
Ar II	437.5954	2.05E+07	19.9725369	2
Ar II	437.9667	1.00E+08	19.6425808	2
Ar II	440.0097	1.60E+07	19.261083	4
Ar II	440.0986	3.04E+07	19.222901	6
Ar II	442.6001	8.17E+07	19.5490106	6
Ar II	443.0189	5.69E+07	19.6103067	4
Ar II	443.0996	1.09E+07	19.222901	6



Ion	$I_{nm}$ Observed	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$
Ar II	444.8879	6.50E+07	24.28413	6
Ar II	447.4759	2.90E+07	21.4264882	2
Ar II	448.1811	4.55E+07	21.4980485	6
Ar I	451.0733	1.18E+06	14.5759479	1
Ar I	452.2323	8.98E+04	14.4639949	3
Ar II	453.0552	2.10E+06	21.3517985	4
Ar II	454.5052	4.71E+07	19.8671558	4
Ar II	456.4405	2.90E+07	22.683064	2
Ar II	457.935	8.00E+07	19.9725369	2
Ar II	458.9898	6.64E+07	21.1270321	6
Ar I	459.6097	9.47E+04	14.5249124	3
Ar II	460.9567	7.89E+07	21.1430741	8
Ar I	462.8441	3.83E+04	14.5060667	5
Ar II	463.7233	7.10E+06	21.1270321	6
Ar II	465.7901	8.92E+07	19.8010853	2
Ar I	470.2316	1.09E+05	14.4639949	3
Ar II	472.1591	1.50E+07	22.5926622	4
Ar II	472.6868	5.88E+07	19.7622598	4
Ar II	473.2053	6.70E+06	21.3517985	4
Ar II	473.5906	5.80E+07	19.261083	4
Ar II	476.4865	6.40E+07	19.8671558	4
Ar II	480.602	7.80E+07	19.222901	6
Ar II	484.781	8.49E+07	19.3053437	2
Ar II	486.591	1.50E+07	22.5148025	6
Ar II	487.9864	8.23E+07	19.6800477	6
Ar II	488.9042	1.90E+07	19.8010853	2

Ion	$I_{nm}$ Observed	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$
Ar II	490.4752	3.70E+06	21.1430741	8
Ar II	493.3209	1.44E+07	19.261083	4
Ar II	496.508	3.94E+07	19.7622598	4
Ar II	500.9334	1.51E+07	19.222901	6
Ar II	501.7163	2.07E+07	21.1270321	6
Ar II	506.2037	2.23E+07	19.261083	4
Ar II	514.1783	8.10E+06	21.1430741	8
Ar II	514.5308	1.06E+07	19.5490106	6
Ar I	515.1391	2.39E+06	15.3131543	1
Ar I	516.2285	1.90E+06	15.3080767	3
Ar I	518.7746	1.38E+06	15.2962923	5
Ar I	522.1271	8.80E+05	15.4496521	9
Ar I	542.1352	6.00E+05	15.3620404	5
Ar I	545.1652	4.70E+05	15.1806326	5
Ar I	549.5874	1.69E+06	15.3310391	9
Ar I	550.6113	3.60E+05	15.346002	7
Ar I	555.8702	1.42E+06	15.1368475	5
Ar I	557.2541	6.60E+05	15.319167	7
Ar I	560.6733	2.20E+06	15.1177454	3
Ar I	565.0704	3.20E+06	15.1005428	1
Ar I	573.952	8.70E+05	15.3127282	5
Ar I	583.4263	5.20E+05	15.2962923	5
Ar I	586.031	2.85E+05	15.0220874	3
Ar I	588.2624	1.23E+06	15.0140645	1
Ar I	588.8584	1.29E+06	15.1806326	5
Ar I	591.2085	1.05E+06	15.0035649	3

Ion	$I_{nm}$ Observed	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$
Ar I	592.8813	1.10E+06	15.185507	3
Ar I	594.2669	1.80E+05	15.1806326	5
Ar I	598.7302	1.20E+05	15.1459273	7
Ar I	599.8999	1.40E+05	15.1610477	5
Ar I	602.515	9.00E+05	15.3594347	3
Ar I	603.2127	2.46E+06	15.1305434	9
Ar I	604.3223	1.47E+06	15.1459273	7
Ar I	605.2723	1.90E+05	14.9548511	5
Ar I	605.9372	4.20E+05	14.9526038	5
Ar I	609.8803	5.20E+05	15.185507	3
Ar I	610.5635	1.21E+06	15.3127282	5
Ar II	611.4923	2.00E+07	21.1430741	8
Ar I	614.5441	7.60E+05	15.319167	7
Ar I	617.0174	5.00E+05	15.1806326	5
Ar II	617.2278	2.00E+07	21.1270321	6
Ar I	617.3096	6.70E+05	15.1610477	5
Ar I	621.2503	3.90E+05	15.1669454	7
Ar I	621.5938	5.70E+05	15.2962923	5
Ar II	624.312	3.00E+06	19.6800477	6
Ar I	629.6872	9.00E+05	15.2962923	5
Ar I	630.7657	6.00E+05	15.1368475	5
Ar I	636.9575	4.20E+05	15.1177454	3
Ar I	638.4717	4.21E+05	14.848368	3
Ar I	641.6307	1.16E+06	14.8388101	5
Ar II	648.3082	1.06E+07	19.9725369	2
Ar I	660.4853	1.30E+04	14.9715214	7

Ion	$I_{nm}$ Observed	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$
Ar II	663.8221	1.37E+07	19.6103067	4
Ar II	663.974	1.69E+07	19.6425808	2
Ar II	664.3698	1.47E+07	19.4945327	8
Ar I	666.0676	7.80E+05	15.0140645	1
Ar I	666.4051	1.50E+05	14.9548511	5
Ar II	666.6359	8.80E+06	19.8010853	2
Ar I	667.7282	2.36E+05	13.479886	1
Ar II	668.4293	1.07E+07	19.5490106	6
Ar I	675.2834	1.93E+06	14.7425399	5
Ar I	675.6163	3.60E+05	15.1368475	5
Ar I	676.6612	4.00E+05	15.0035649	3
Ar II	686.1269	2.40E+06	19.8671558	4
Ar I	687.1289	2.78E+06	14.7108972	3
Ar I	687.9582	1.80E+05	14.9548511	5
Ar I	688.8174	2.50E+05	14.9526038	5
Ar I	693.7664	3.08E+06	14.6936388	1
Ar I	695.1478	2.20E+05	14.9548511	5
Ar I	696.025	2.40E+05	14.9526038	5
Ar I	696.5431	6.39E+06	13.3278562	3
Ar I	703.0251	2.67E+06	14.8388101	5
Ar I	706.7218	3.80E+06	13.3022266	5
Ar I	706.8736	2.00E+06	14.848368	3
Ar I	710.7478	4.50E+05	14.8388101	5
Ar I	712.582	6.00E+05	15.0220874	3
Ar I	714.7042	6.25E+05	13.2826382	3
Ar I	715.8839	2.10E+06	15.0140645	1

Ion	$\lambda_{nm}$ Observed	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$
Ar I	720.698	2.48E+06	15.0220874	3
Ar I	726.5172	1.70E+05	14.859229	3
Ar I	727.0664	1.10E+05	14.780511	7
Ar I	727.2936	1.83E+06	13.3278562	3
Ar I	731.1716	1.70E+06	14.848368	3
Ar I	731.6005	9.60E+05	15.0220874	3
Ar I	735.0814	1.20E+06	15.0140645	1
Ar I	735.3293	9.60E+05	14.780511	7
Ar I	737.2118	1.90E+06	14.7570507	9
Ar II	738.0426	5.60E+06	19.9674978	4
Ar I	738.398	8.47E+06	13.3022266	5
Ar I	739.298	7.20E+05	14.848368	3
Ar I	741.2337	3.90E+05	14.9548511	5
Ar I	742.5294	3.10E+05	14.9715214	7
Ar I	743.5368	9.00E+05	14.8388101	5
Ar I	743.6297	2.70E+05	14.7425399	5
Ar I	750.3869	4.45E+07	13.479886	1
Ar I	751.4652	4.02E+07	13.2730373	1
Ar I	763.5106	2.45E+07	13.1717769	5
Ar I	772.3761	5.18E+06	13.153143	3
Ar I	772.4207	1.17E+07	13.3278562	3
Ar I	789.1075	9.50E+05	14.7425399	5
Ar I	794.8176	1.86E+07	13.2826382	3
Ar I	800.6157	4.90E+06	13.1717769	5
Ar I	801.4786	9.28E+06	13.0948717	5
Ar I	805.3308	8.60E+05	14.7108972	3

Ion	$I_{nm}$ Observed	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$
Ar I	810.3693	2.50E+07	13.153143	3
Ar I	811.5311	3.31E+07	13.0757149	7
Ar I	826.4522	1.53E+07	13.3278562	3
Ar I	840.821	2.23E+07	13.3022266	5
Ar I	842.4648	2.15E+07	13.0948717	5
Ar I	852.1442	1.39E+07	13.2826382	3
Ar I	860.5776	1.04E+06	14.7425399	5
Ar I	866.7944	2.43E+06	13.153143	3
Ar I	907.5394	1.20E+06	14.6936388	1
Ar I	912.2967	1.89E+07	12.9070145	3
Ar I	919.4638	1.76E+06	14.2550847	3
Ar I	922.4499	5.03E+06	13.1717769	5
Ar I	929.1531	3.26E+06	14.2410268	1
Ar I	935.422	1.06E+06	13.153143	3
Ar I	965.7786	5.43E+06	12.9070145	3
Ar I	978.4503	1.47E+06	13.0948717	5
Ar I	1 047.0054	9.80E+05	12.9070145	3
Ar I	1 047.8034	2.44E+06	14.0899676	3
Ar I	1 050.650	1.58E+06	15.0832017	7
Ar I	1 067.3565	4.90E+06	14.0682968	5
Ar I	1 107.8869	8.30E+05	14.2136706	5
Ar I	1 144.1832	1.39E+06	14.2550847	3
Ar I	1 148.8109	1.90E+05	12.9070145	3
Ar I	1 166.8710	3.76E+06	14.2340217	5
Ar I	1 171.9488	9.52E+05	14.1525142	3
Ar I	1 211.2326	3.10E+06	14.099055	7

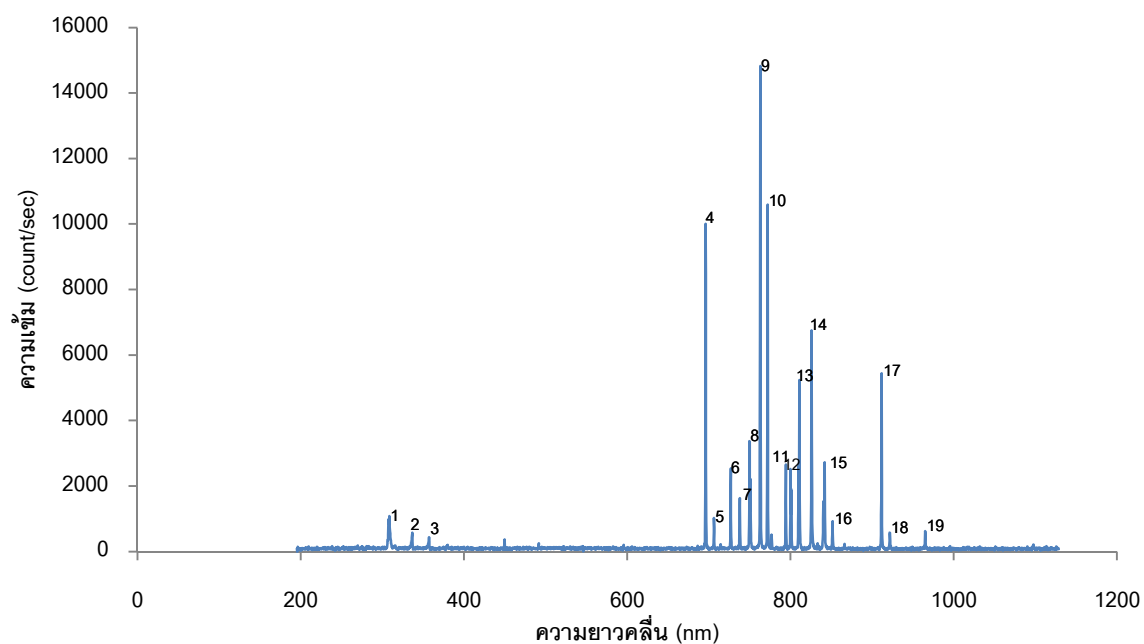
Ion	$I_{nm}$ Observed	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$
Ar I	1 213.9738	4.50E+06	14.3036675	3
Ar I	1 234.3393	2.00E+06	14.099055	7
Ar I	1 240.2827	1.10E+07	14.1525142	3
Ar I	1 243.9321	4.90E+06	13.9034537	5
Ar I	1 245.612	8.90E+06	14.0899676	3
Ar I	1 248.7663	1.10E+07	14.0682968	5
Ar I	1 270.2281	7.10E+06	14.3036675	3
Ar I	1 273.3418	1.10E+06	14.0682968	5
Ar I	1 274.6232	2.00E+06	14.2550847	3
Ar I	1 280.2739	5.70E+06	14.0630263	5
Ar I	1 293.3195	1.00E+07	14.2410268	1
Ar I	1 295.6659	7.40E+06	13.8636677	3
Ar I	1 300.8264	8.90E+06	14.2550847	3
Ar I	1 321.399	8.10E+06	13.8450376	1
Ar I	1 323.090	4.60E+06	14.0899676	3
Ar I	1 327.264	1.50E+07	14.2361052	7
Ar I	1 331.3210	1.30E+07	14.2136706	5
Ar I	1 349.941	2.70E+06	14.0899676	3
Ar I	1 350.4191	1.10E+07	14.0127372	7
Ar I	1 357.3617	5.10E+06	14.2410268	1
Ar I	1 359.9333	2.20E+06	14.2136706	5
Ar I	1 362.2659	7.30E+06	14.0630263	5
Ar I	1 367.8550	6.20E+06	14.2340217	5
Ar I	1 382.5715	3.30E+06	14.0682968	5
Ar I	1 409.3640	4.30E+06	14.1525142	3
Ar I	1 504.650	5.20E+06	14.3036675	3

Ion	$I_{nm}$ Observed	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$
Ar I	1 517.269	1.30E+06	14.0899676	3
Ar I	1 532.934	1.20E+05	13.9034537	5
Ar I	1 598.949	1.90E+06	14.2550847	3
Ar I	1 651.986	2.60E+05	13.9034537	5
Ar I	1 694.058	2.50E+06	13.9034537	5
Ar I	2 062.186	3.90E+05	13.9034537	5
Ar I	2 313.951	1.70E+05	13.8636677	3
Ar I	2 397.306	3.60E+05	13.8450376	1



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณหาอุณหภูมิและความหนาแน่นของอิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ ข-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัมพลาสมาอาร์กอนและความยาวคลื่น ที่ ความถี่ 70 kHz. แรงดันไฟฟ้า 28 kV<sub>pp</sub> อัตราไหลก๊าซอาร์กอน 8L/min ที่ระยะ 26 cm

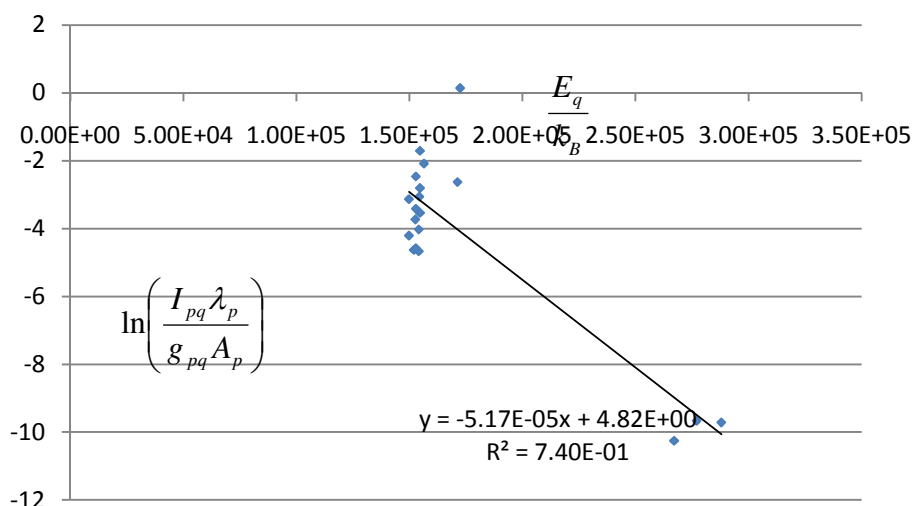
ตารางที่ ข-1 ตารางความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆที่ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอน

no	c/sec	ION	$\lambda_{nm(obs)}$	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$	$\ln((I)/(gA))$	$E_k/k_B$
1	541	Ar II	309.3402	4.40E+08	23.87401	6	-9.66618	2.77E+05
2	215	Ar II	337.6436	1.50E+08	24.81406	8	-9.71296	2.88E+05
3	217	Ar II	357.6616	2.75E+08	23.01454	8	-10.2545	2.67E+05
4	5001	Ar I	696.5431	6.39E+06	13.32786	3	-1.70533	1.55E+05
5	1268	Ar I	706.7218	3.80E+06	13.30223	5	-3.05412	1.54E+05
6	815	Ar I	726.5172	1.70E+05	14.85923	3	0.148671	1.72E+05
7	1683	Ar I	737.2118	1.90E+06	14.75705	9	-2.62368	1.71E+05
8	7410	Ar I	750.3869	4.45E+07	13.47989	1	-2.07983	1.56E+05
9	5297	Ar I	763.5106	2.45E+07	13.17178	5	-3.4108	1.53E+05
10	1329	Ar I	772.4207	1.17E+07	13.32786	3	-3.53238	1.55E+05

no	c/sec	ION	$\lambda_{nm(obs)}$	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$	$\ln((I)/(gA))$	$E_k/k_B$
11	1258	Ar I	794.8176	1.86E+07	13.28264	3	-4.02189	1.54E+05
12	2615	Ar I	800.6157	4.90E+06	13.17178	5	-2.45978	1.53E+05
13	2228	Ar I	810.3693	2.50E+07	13.15314	3	-3.72665	1.53E+05
14	3374	Ar I	826.4522	1.53E+07	13.32786	3	-2.80113	1.55E+05
15	1248	Ar I	842.4648	2.15E+07	13.09487	5	-4.62777	1.52E+05
16	460	Ar I	852.1442	1.39E+07	13.28264	3	-4.66703	1.54E+05
17	2722	Ar I	912.2967	1.89E+07	12.90701	3	-3.1282	1.50E+05
18	281	Ar I	922.4499	5.03E+06	13.17178	5	-4.57498	1.53E+05
19	252	Ar I	965.7786	5.43E+06	12.90701	3	-4.2037	1.50E+05

### ตอนที่ 1 หาอุณหภูมิของอิเล็กตรอน

1. ระบุพิกัด ดังภาพที่ ข-1 และนำค่าความยาวคลื่นที่ปรากฏไปเทียบกับฐานข้อมูล (NIST) ในตารางที่ ก-1 โดยที่ให้ตัดพิกัดที่ใกล้เคียงกับพิกัดของไนโตรเจนและออกซิเจนออก
2. สร้างกราฟโดยวิธีการเขียนกราฟของโบลต์มันน์ดังภาพที่ ข-2



ภาพที่ ข-2 กราฟโบลต์มันน์แสดงอุณหภูมิอิเล็กตรอนของพลาสมาอาร์กอน ที่ความถี่ 70 kHz. แรงดันไฟฟ้า 28 kV<sub>pp</sub> อัตราไหลก๊าซอาร์กอน 8L/min ที่ระยะ 26 cm

3. จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.45

$$\ln\left(\frac{I_{pq}\lambda_p}{A_{pq}g_p}\right) = \frac{-E_q}{kT_e} + \ln\left(\frac{hcN_0}{4\pi U_0}\right)$$

โดยที่  $k_B = 8.617343 \times 10^{-5} \frac{eV}{K^\circ}$

ดังนั้น ความชันของกราฟ คือ  $-\frac{1}{T_e} (K^\circ)$

$$\text{ความชัน} = -5 \times 10^{-5} = -\frac{1}{T_e}$$

$$T_e = \frac{1}{5.17 \times 10^{-5}} = 19,342.36 K^\circ$$

4. จาก  $1eV = 11,600 K^\circ$  ดังนั้น  $T_e = 1.67 eV$

## ตอนที่ 2 หาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

หลังจากที่ได้คุณสมบัติของอิเล็กตรอนสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากสมการ 2.46

$$n_e = \frac{I_Z^*}{I_{Z+1}^*} 6.04 \times 10^{21} (T_e)^{\frac{3}{2}} \times \exp\left[\frac{-E_{q,Z+1} + E_{q,Z} - \chi_Z}{k_B T_e}\right] \text{ cm}^{-3}$$

โดยที่  $I_Z^* = \frac{I_z \lambda_{pq,z}}{q_{q,z} A_{pq,z}}$  และ  $\chi_z$  พลังงานไอออไนเซชันของระดับพลังงาน Z คือ 15.75961 eV

$T_e$  (eV) ของสเปกตรัมนี้คือ 1.67 eV แทนค่าทั้งหมดลงในสมการ 2.46 จะได้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนดังตารางที่ ข-3

ตารางที่ ๗-2 ตารางแสดงการคำนวณค่า  $I_{z+1}^*$  และ  $I_z^*$

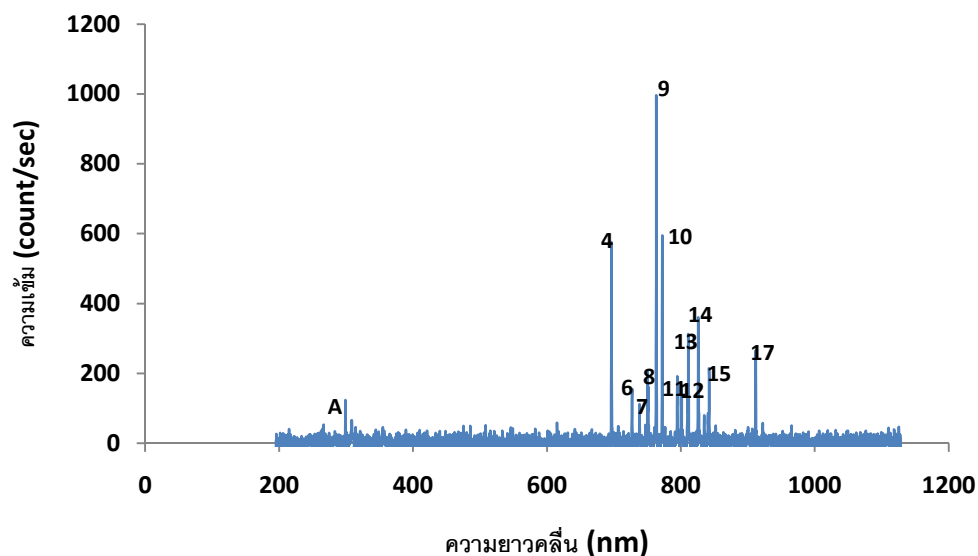
no	c/sec	ION	$\lambda_{nm(obs)}$	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$	$I_{z+1}^*, I_z^*$
1	541	Ar II	309.3402	4.40E+08	23.87401	6	6.33913E-05
2	215	Ar II	337.6436	1.50E+08	24.81406	8	6.04945E-05
3	217	Ar II	357.6616	2.75E+08	23.01454	8	3.51972E-05
4	5001	Ar I	696.5431	6.39E+06	13.32786	3	0.181711635
5	1268	Ar I	706.7218	3.80E+06	13.30223	5	0.047164381
6	815	Ar I	726.5172	1.70E+05	14.85923	3	1.160290705
7	1683	Ar I	737.2118	1.90E+06	14.75705	9	0.072535605
8	7410	Ar I	750.3869	4.45E+07	13.47989	1	0.124952066
9	5297	Ar I	763.5106	2.45E+07	13.17178	5	0.033014822
10	1329	Ar I	772.4207	1.17E+07	13.32786	3	0.029235353
11	1258	Ar I	794.8176	1.86E+07	13.28264	3	0.017919006
12	2615	Ar I	800.6157	4.90E+06	13.17178	5	0.085453472
13	2228	Ar I	810.3693	2.50E+07	13.15314	3	0.024073371
14	3374	Ar I	826.4522	1.53E+07	13.32786	3	0.060741536
15	1248	Ar I	842.4648	2.15E+07	13.09487	5	0.00977651
16	460	Ar I	852.1442	1.39E+07	13.28264	3	0.009400152
17	2722	Ar I	912.2967	1.89E+07	12.90701	3	0.043796678
18	281	Ar I	922.4499	5.03E+06	13.17178	5	0.010306498
19	252	Ar I	965.7786	5.43E+06	12.90701	3	0.014940221

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแต่ละความยาวคลื่นเปรียบเทียบกับ All ในแต่ละความยาวคลื่น

no	c/sec	Ar Species	l(nm)	$n_{e \text{ All},309.3402}$	$n_{e \text{ All},337.6436}$	$n_{e \text{ All},357.6616}$	STDEV (m-3)
4	5001	Ar I	696.5431	6.5915E+18	6.91E+18	1.79451E+19	6.47E+24
5	1268	Ar I	706.7218	1.02258E+18	1.76E+18	2.56421E+17	7.5062E+23
6	814.5	Ar I	726.5172	3.04348E+20	5.9E+16	6.13228E+19	1.6094E+26
7	1682.5	Ar I	737.2118	9.69478E+17	3.74E+18	5.90562E+16	1.9145E+24
8	7410	Ar I	750.3869	3.10807E+18	1.26E+17	8.18575E+17	1.5605E+24
9	5297	Ar I	763.5106	1.12867E+16	1.81E+17	2.21282E+17	1.1136E+23
10	1328.5	Ar I	772.4207	1.85777E+17	1.08E+17	9.72907E+17	4.7854E+23
11	1258	Ar I	794.8176	1.35291E+17	5.12E+17	5.98623E+17	2.4634E+23
12	2615	Ar I	800.6157	2.73857E+18	3.09E+18	4.48221E+18	9.2165E+23
13	3373.5	Ar I	810.3693	1.19174E+18	1.94E+18	4.23128E+17	7.6063E+23
14	3373.5	Ar I	826.4522	3.68207E+18	7.72E+17	1.85092E+18	1.4711E+24
15	1247.5	Ar I	842.4648	1.15755E+17	2.71E+17	1.4085E+17	8.3549E+22
16	460	Ar I	852.1442	2.94193E+17	1.77E+17	1.07614E+18	4.8897E+23
17	2722	Ar I	912.2967	5.97306E+17	3.71E+18	3.75094E+18	1.8093E+24
18	281	Ar I	922.4499	1.1664E+18	1.21E+18	2.75515E+17	5.2835E+23
19	252	Ar I	965.7786	1.3517E+18	2.9E+17	1.24519E+18	5.8459E+23

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างสเปกตรัมสำหรับพลาสติกที่กำเนิดจากเครื่องกำเนิดความถี่  
ต่ำและการคำนวณอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์



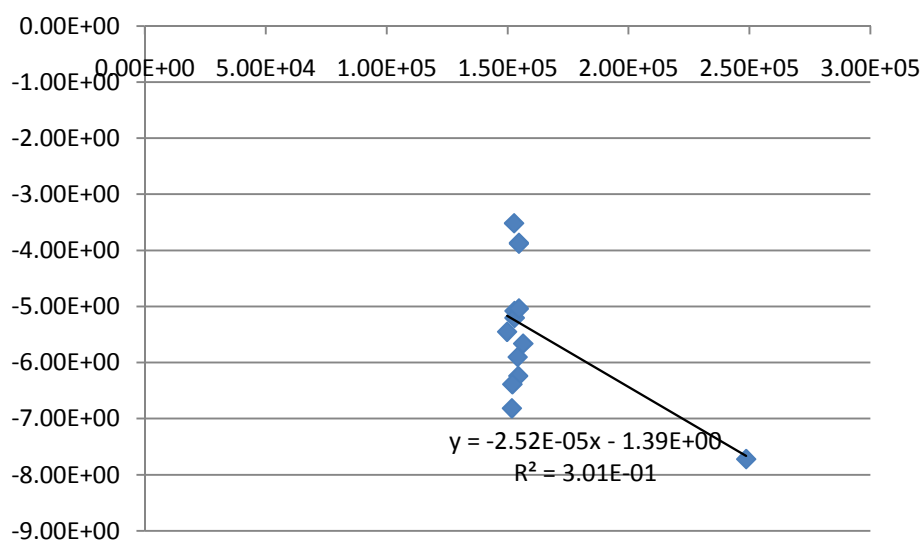
ภาพที่ ค-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสเปกตรัมพลาสมาอาร์กอน และความยาวคลื่นที่ ความถี่ 200 kHz. แรงดันไฟฟ้า 1,626.36 kV<sub>rms</sub> อัตราไหลก๊าซ อาร์กอน 8 l/min ที่ระยะ 5cm (สเปกตรัมเครื่องกำเนิดความถี่ต่ำ โปรมแบบที่ 1 Gap electrode 2mm)

ตารางที่ ค-1 ตารางความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆที่ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอน

no	c/sec	ION	$\lambda_{nm(obs)}$	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$	$\ln((I)/(gA))$	$E_k/k_B$
a	124	Ar II	297.905	4.16E+07	21.426488	2	-7.72E+00	2.49E+05
4	576	Ar I	696.5431	6.39E+06	13.327856	3	-3.87E+00	1.55E+05
6	155	Ar I	727.2936	1.83E+06	13.327856	3	-3.89E+00	1.55E+05
7	112	Ar I	738.398	8.47E+06	13.302227	5	-6.24E+00	1.54E+05
8	206	Ar I	750.3869	4.45E+07	13.479886	1	-5.66E+00	1.56E+05
9	996	Ar I	763.5106	2.45E+07	13.171777	5	-5.08E+00	1.53E+05
10	595	Ar I	772.3761	5.18E+06	13.153143	3	-3.52E+00	1.53E+05
11	192	Ar I	794.8176	1.86E+07	13.282638	3	-5.90E+00	1.54E+05
12	168	Ar I	800.6157	4.90E+06	13.171777	5	-5.20E+00	1.53E+05
13	313	Ar I	811.5311	3.31E+07	13.075715	7	-6.82E+00	1.52E+05



no	c/sec	ION	$\lambda_{nm(obs)}$	$A_{ki}$	$E_k$	$g_k$	$\ln((II)/(gA))$	$E_k/k_B$
14	360	Ar I	826.4522	1.53E+07	13.327856	3	-5.04E+00	1.55E+05
15	215	Ar I	842.4648	2.15E+07	13.094872	5	-6.39E+00	1.52E+05
17	266	Ar I	912.2967	1.89E+07	12.907015	3	-5.45E+00	1.50E+05



ภาพที่ ค-2 กราฟโบลต์มันน์แสดงอุณหภูมิอิเล็กตรอนของพลาสมาอาร์กอน ที่ความถี่ 200 kHz. แรงดันไฟฟ้า 1,626.36 kV<sub>rms</sub> อัตราไหลก๊าซอาร์กอน 8 l/min ที่ระยะ 5cm (สเปกตรัมเครื่องกำเนิดความถี่ต่ำ โปรบบแบบที่ 1 Gap electrode 2mm)

$$\text{ความชัน} = -3 \times 10^{-5} = -\frac{1}{T_e}$$

$$T_e = \frac{1}{2.52 \times 10^{-5}} = 39,682.54 K^\circ$$

จาก  $1eV = 11,600 K^\circ$  ดังนั้น  $T_e = 3.42 eV$

ภาคผนวก ง

ส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูง

## HIGH AND LOW SIDE DRIVER

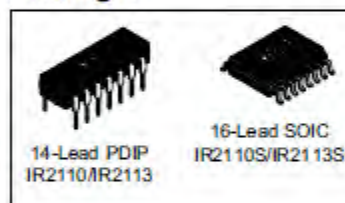
### Features

- Floating channel designed for bootstrap operation  
 Fully operational to +500V or +600V  
 Tolerant to negative transient voltage  
 dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible  
 Separate logic supply range from 3.3V to 20V  
 Logic and power ground  $\pm 5V$  offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs

### Product Summary

$V_{\text{OFFSET}}$ (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
$I_{\text{O+/-}}$	2A / 2A
$V_{\text{OUT}}$	10 - 20V
$t_{\text{on/off}}$ (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

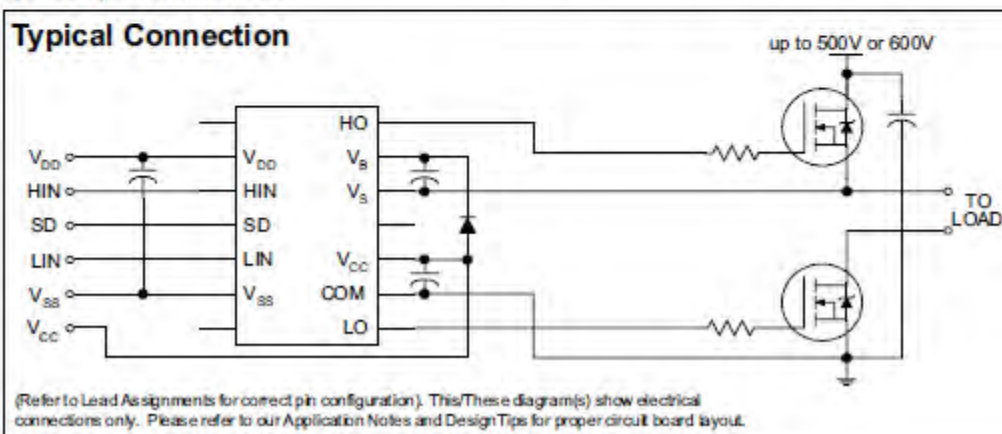
### Packages



### Description

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

### Typical Connection



## IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

International  
IR Rectifier

### Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions. Additional information is shown in Figures 28 through 35.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units	
V <sub>B</sub>	High side floating supply voltage (IR2110)	-0.3	525	V	
	(IR2113)	-0.3	625		
V <sub>S</sub>	High side floating supply offset voltage	V <sub>B</sub> - 25	V <sub>B</sub> + 0.3		
V <sub>HO</sub>	High side floating output voltage	V <sub>S</sub> - 0.3	V <sub>B</sub> + 0.3		
V <sub>CC</sub>	Low side fixed supply voltage	-0.3	25		
V <sub>LO</sub>	Low side output voltage	-0.3	V <sub>CC</sub> + 0.3		
V <sub>DD</sub>	Logic supply voltage	-0.3	V <sub>SS</sub> + 25		
V <sub>SS</sub>	Logic supply offset voltage	V <sub>CC</sub> - 25	V <sub>CC</sub> + 0.3		
V <sub>IN</sub>	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V <sub>SS</sub> - 0.3	V <sub>DD</sub> + 0.3		
dV <sub>S</sub> /dt	Allowable offset supply voltage transient (figure 2)	—	50	V/ns	
P <sub>D</sub>	Package power dissipation @ T <sub>A</sub> ≤ +25°C	(14 lead DIP)	—	1.6	W
		(16 lead SOIC)	—	1.25	
R <sub>THJA</sub>	Thermal resistance, junction to ambient	(14 lead DIP)	—	75	°C/W
		(16 lead SOIC)	—	100	
T <sub>J</sub>	Junction temperature	—	150	°C	
T <sub>S</sub>	Storage temperature	-55	150		
T <sub>L</sub>	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300		

### Recommended Operating Conditions

The input/output logic timing diagram is shown in figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V<sub>S</sub> and V<sub>SS</sub> offset ratings are tested with all supplies biased at 15V differential. Typical ratings at other bias conditions are shown in figures 36 and 37.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V <sub>B</sub>	High side floating supply absolute voltage	V <sub>S</sub> + 10	V <sub>S</sub> + 20	V
V <sub>S</sub>	High side floating supply offset voltage (IR2110)	Note 1	500	
	(IR2113)	Note 1	600	
V <sub>HO</sub>	High side floating output voltage	V <sub>S</sub>	V <sub>B</sub>	
V <sub>CC</sub>	Low side fixed supply voltage	10	20	
V <sub>LO</sub>	Low side output voltage	0	V <sub>CC</sub>	
V <sub>DD</sub>	Logic supply voltage	V <sub>SS</sub> + 3	V <sub>SS</sub> + 20	
V <sub>SS</sub>	Logic supply offset voltage	-5 (Note 2)	5	
V <sub>IN</sub>	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V <sub>SS</sub>	V <sub>DD</sub>	
T <sub>A</sub>	Ambient temperature	-40	125	°C

Note 1: Logic operational for V<sub>S</sub> of -4 to +500V. Logic state held for V<sub>S</sub> of -4V to -V<sub>SS</sub>. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Note 2: When V<sub>DD</sub> < 5V, the minimum V<sub>SS</sub> offset is limited to -V<sub>DD</sub>.



**Dynamic Electrical Characteristics**

$V_{BIAS}$  ( $V_{CC}$ ,  $V_{BS}$ ,  $V_{DD}$ ) = 15V,  $C_L$  = 1000 pF,  $T_A$  = 25°C and  $V_{SS}$  = COM unless otherwise specified. The dynamic electrical characteristics are measured using the test circuit shown in Figure 3.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$t_{on}$	Turn-on propagation delay	7	—	120	150	ns	$V_S = 0V$
$t_{off}$	Turn-off propagation delay	8	—	94	125		$V_S = 500V/600V$
$t_{sd}$	Shutdown propagation delay	9	—	110	140		$V_S = 500V/600V$
$t_r$	Turn-on rise time	10	—	25	35		
$t_f$	Turn-off fall time	11	—	17	25		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	(IR2110) (IR2113)	—	—	—		10 20

**Static Electrical Characteristics**

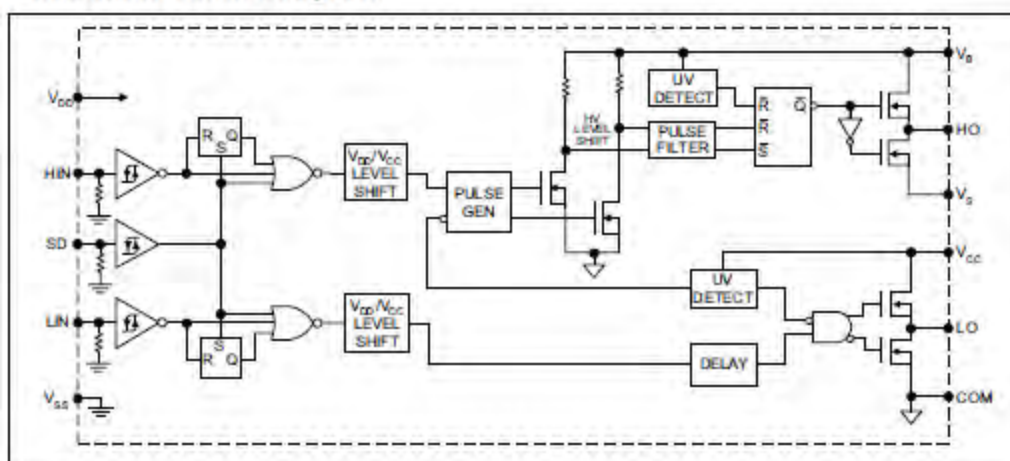
$V_{BIAS}$  ( $V_{CC}$ ,  $V_{BS}$ ,  $V_{DD}$ ) = 15V,  $T_A$  = 25°C and  $V_{SS}$  = COM unless otherwise specified. The  $V_{IN}$ ,  $V_{TH}$  and  $I_{IN}$  parameters are referenced to  $V_{SS}$  and are applicable to all three logic input leads: HIN, LIN and SD. The  $V_O$  and  $I_O$  parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{IH}$	Logic "1" input voltage	12	9.5	—	—	V	
$V_{IL}$	Logic "0" input voltage	13	—	—	6.0		
$V_{OH}$	High level output voltage, $V_{BIAS} - V_O$	14	—	—	1.2		$I_O = 0A$
$V_{OL}$	Low level output voltage, $V_O$	15	—	—	0.1		$I_O = 0A$
$I_{LK}$	Offset supply leakage current	16	—	—	50	$\mu A$	$V_B = V_S = 500V/600V$
$I_{QBS}$	Quiescent $V_{BS}$ supply current	17	—	125	230		$V_{IN} = 0V$ or $V_{DD}$
$I_{QCC}$	Quiescent $V_{CC}$ supply current	18	—	180	340		$V_{IN} = 0V$ or $V_{DD}$
$I_{QDD}$	Quiescent $V_{DD}$ supply current	19	—	15	30		$V_{IN} = 0V$ or $V_{DD}$
$I_{IN+}$	Logic "1" input bias current	20	—	20	40	$\mu A$	$V_{IN} = V_{DD}$
$I_{IN-}$	Logic "0" input bias current	21	—	—	1.0		$V_{IN} = 0V$
$V_{BSUV+}$	$V_{BS}$ supply undervoltage positive going threshold	22	7.5	8.6	9.7	V	
$V_{BSUV-}$	$V_{BS}$ supply undervoltage negative going threshold	23	7.0	8.2	9.4		
$V_{CCUV+}$	$V_{CC}$ supply undervoltage positive going threshold	24	7.4	8.5	9.6		
$V_{CCUV-}$	$V_{CC}$ supply undervoltage negative going threshold	25	7.0	8.2	9.4		
$I_{O+}$	Output high short circuit pulsed current	26	2.0	2.5	—	A	$V_O = 0V$ , $V_{IN} = V_{DD}$ $PW \leq 10 \mu s$
$I_{O-}$	Output low short circuit pulsed current	27	2.0	2.5	—		$V_O = 15V$ , $V_{IN} = 0V$ $PW \leq 10 \mu s$

## IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

International  
**IR** Rectifier

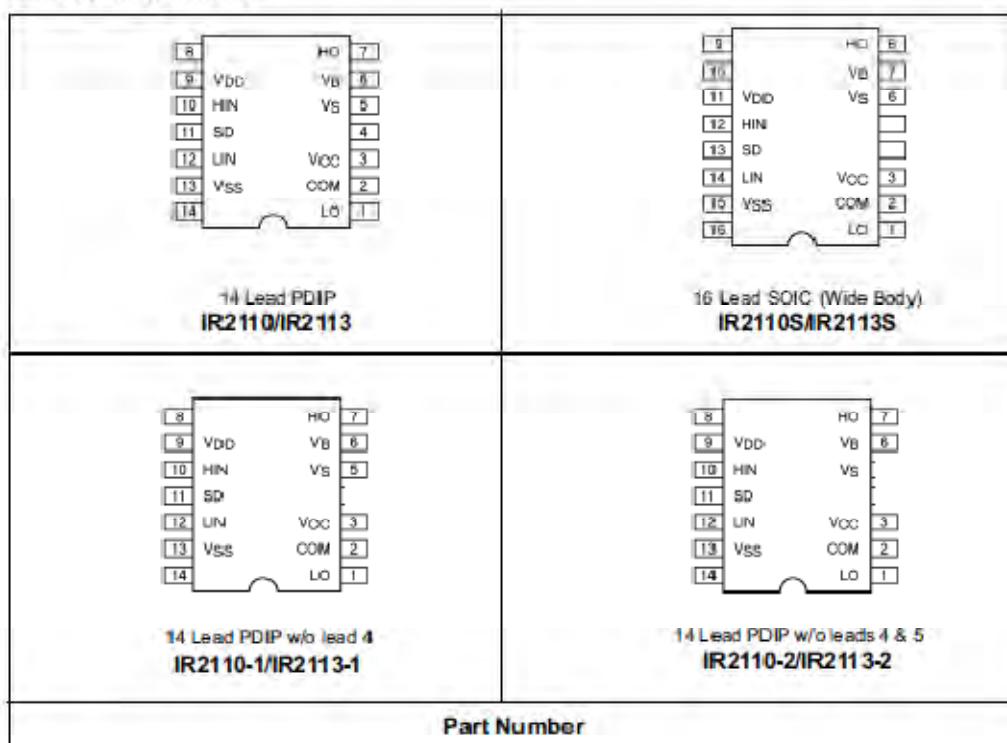
### Functional Block Diagram



### Lead Definitions

Symbol	Description
VDD	Logic supply
HIN	Logic input for high side gate driver output (HO), in phase
SD	Logic input for shutdown
LIN	Logic input for low side gate driver output (LO), in phase
VSS	Logic ground
VB	High side floating supply
HO	High side gate drive output
VS	High side floating supply return
VCC	Low side supply
LO	Low side gate drive output
COM	Low side return

## Lead Assignments



# IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

International  
**IR** Rectifier

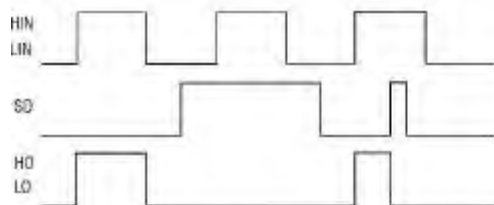


Figure 1. Input/Output Timing Diagram

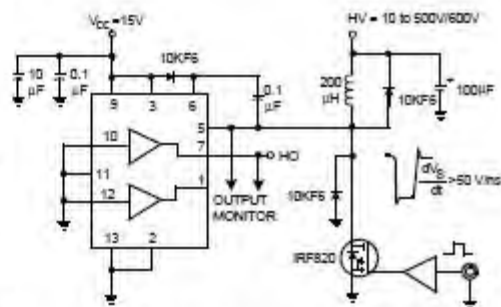


Figure 2. Floating Supply Voltage Transient Test Circuit

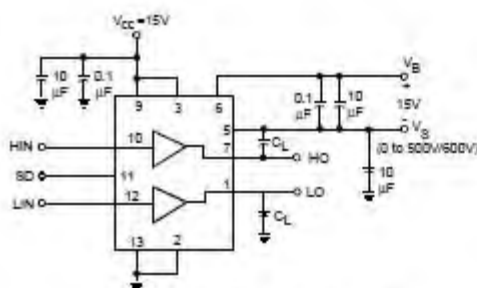


Figure 3. Switching Time Test Circuit

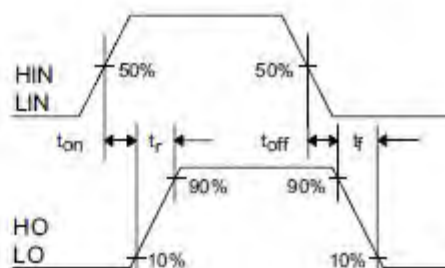


Figure 4. Switching Time Waveform Definition

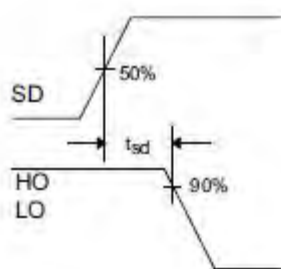


Figure 5. Shutdown Waveform Definitions

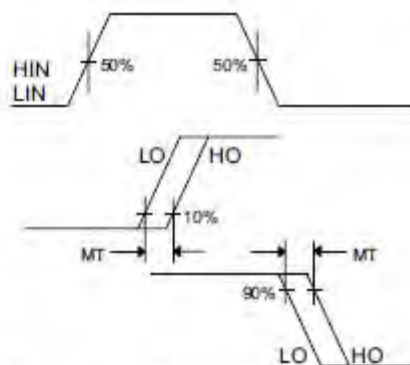


Figure 6. Delay Matching Waveform Definitions



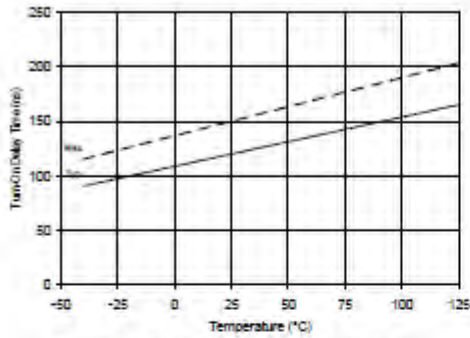


Figure 7A. Turn-On Time vs. Temperature

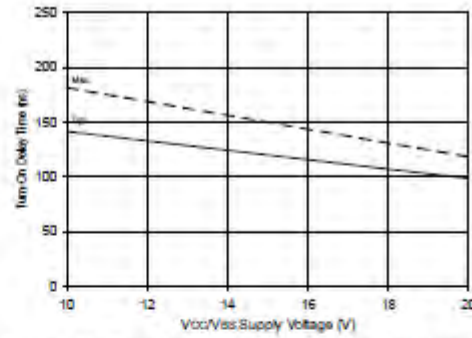


Figure 7B. Turn-On Time vs. Vcc/Vss Supply Voltage

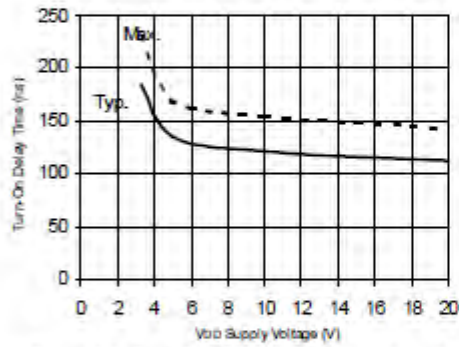


Figure 7C. Turn-On Time vs. VDD Supply Voltage

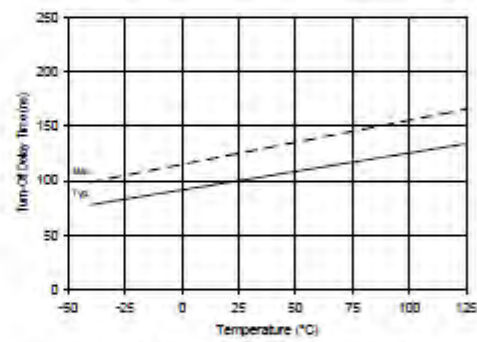


Figure 8A. Turn-Off Time vs. Temperature

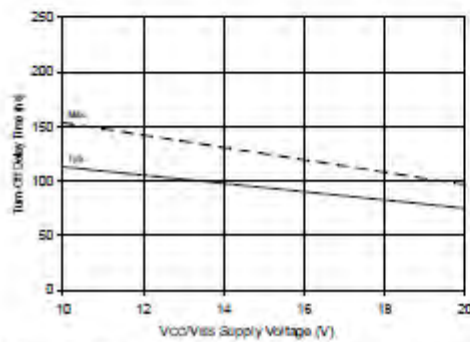


Figure 8B. Turn-Off Time vs. Vcc/Vss Supply Voltage

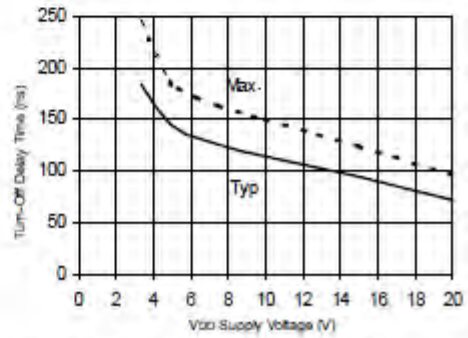


Figure 8C. Turn-Off Time vs. VDD Supply Voltage

# IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

International  
IR Rectifier

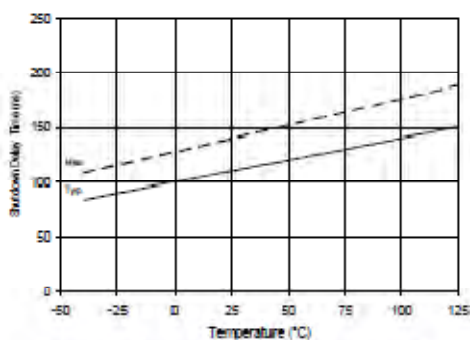


Figure 9A. Shutdown Time vs. Temperature

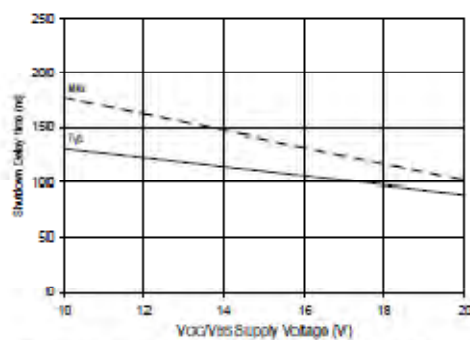


Figure 9B. Shutdown Time vs. Vcc/Vas Supply Voltage

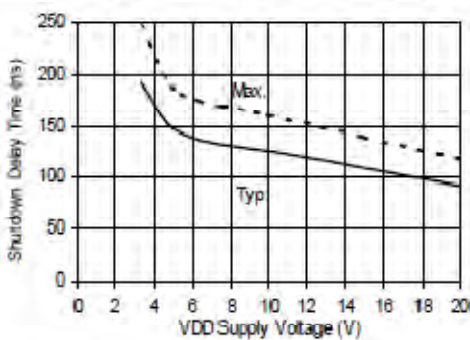


Figure 9C. Shutdown Time vs. Voo Supply Voltage

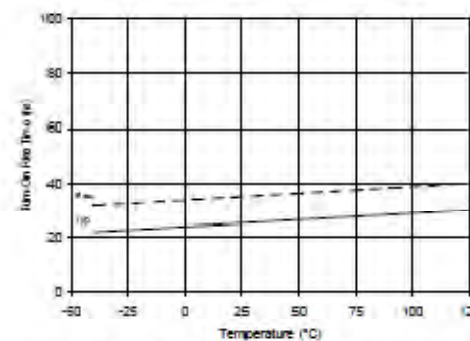


Figure 10A. Turn-On Rise Time vs. Temperature

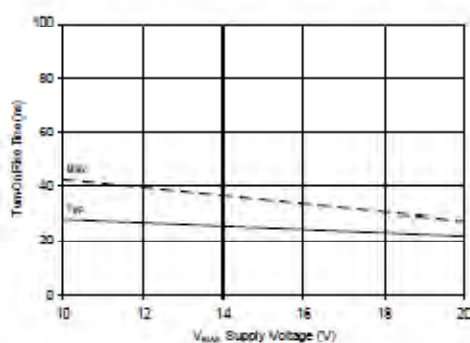


Figure 10B. Turn-On Rise Time vs. Voltage

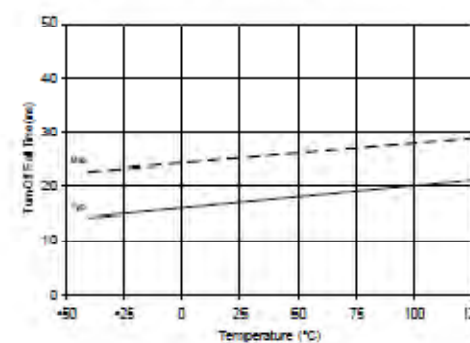


Figure 11A. Turn-Off Fall Time vs. Temperature

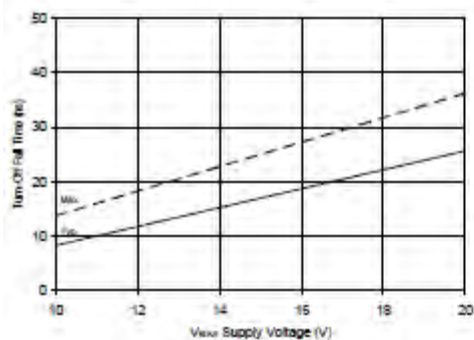


Figure 11B. Turn-Off Fall Time vs. Voltage

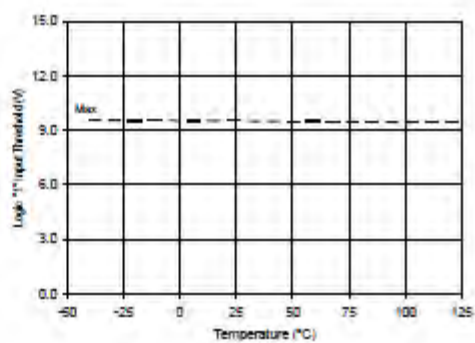


Figure 12A. Logic "1" Input Threshold vs. Temperature

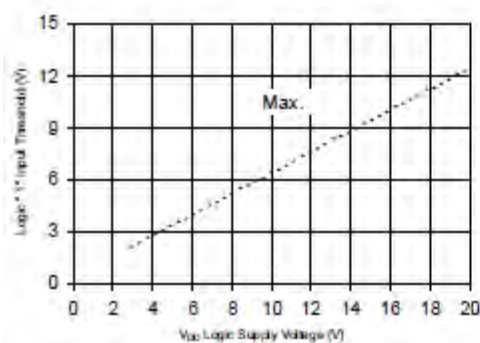


Figure 12B. Logic "1" Input Threshold vs. Voltage

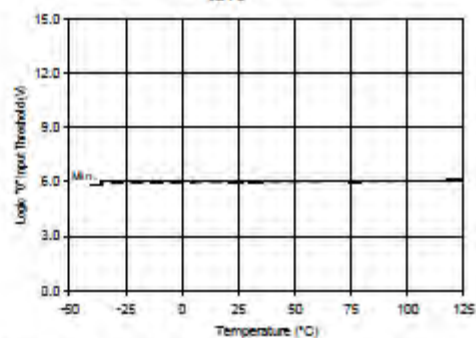


Figure 13A. Logic "0" Input Threshold vs. Temperature

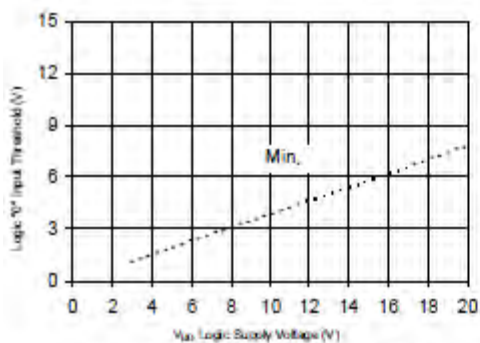


Figure 13B. Logic "0" Input Threshold vs. Voltage

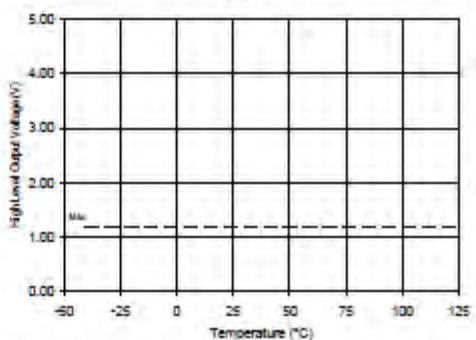


Figure 14A. High Level Output vs. Temperature

IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

International  
IR Rectifier

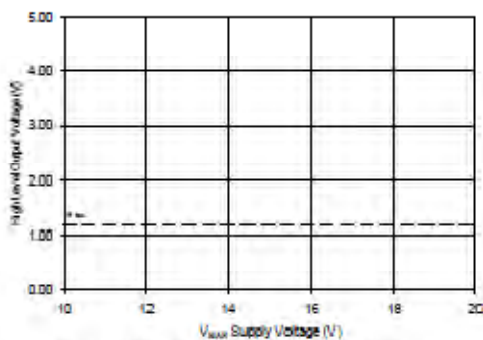


Figure 14B. High Level Output vs. Voltage

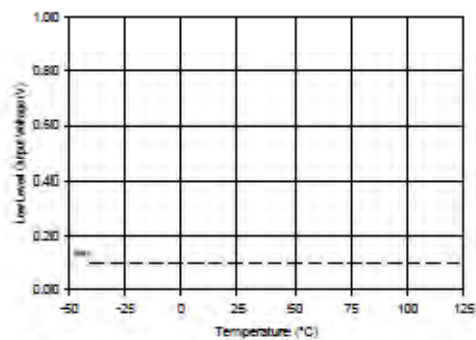


Figure 15A. Low Level Output vs. Temperature

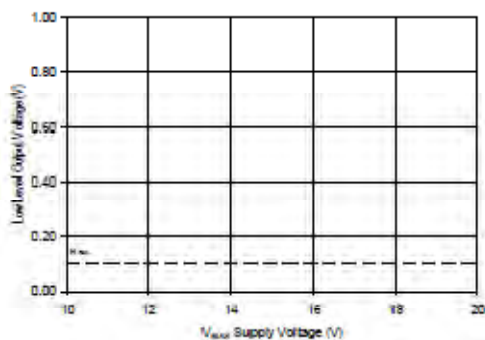


Figure 15B. Low Level Output vs. Voltage

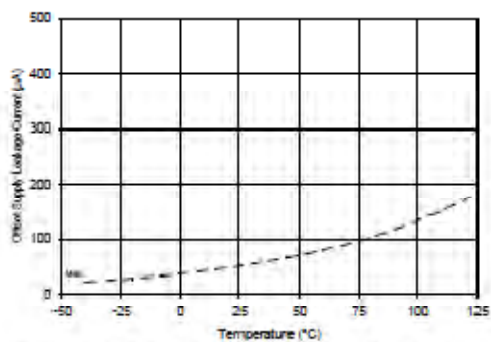


Figure 16A. Offset Supply Current vs. Temperature

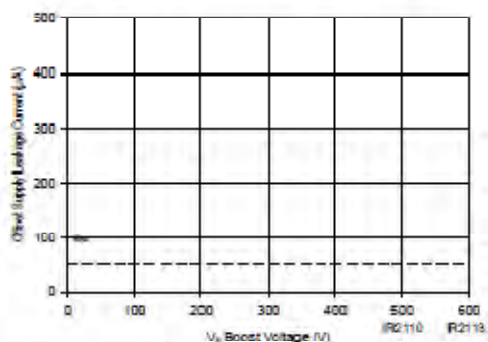


Figure 16B. Offset Supply Current vs. Voltage

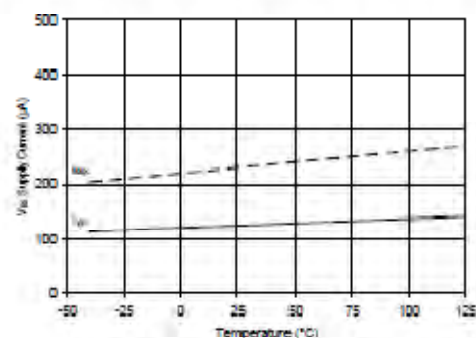


Figure 17A. V<sub>bs</sub> Supply Current vs. Temperature

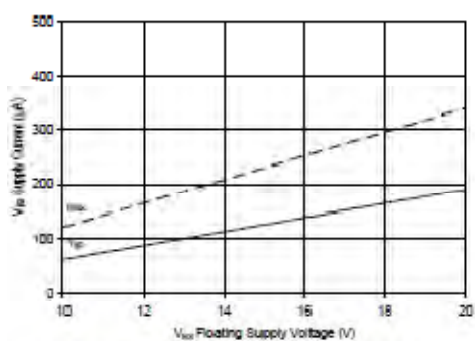
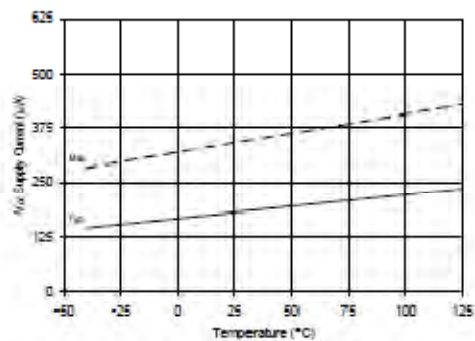
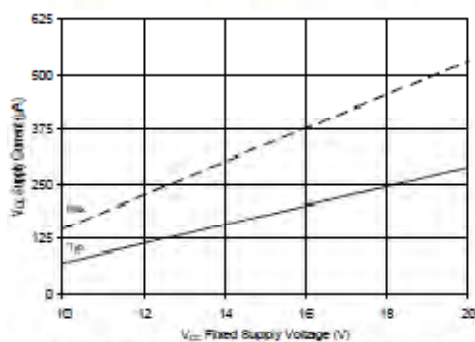
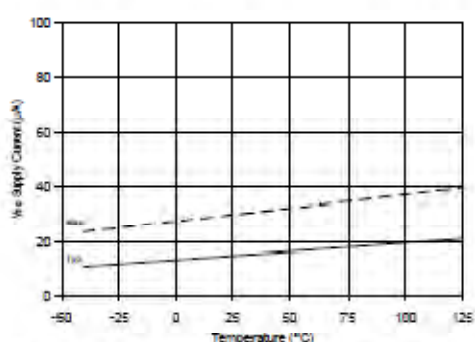
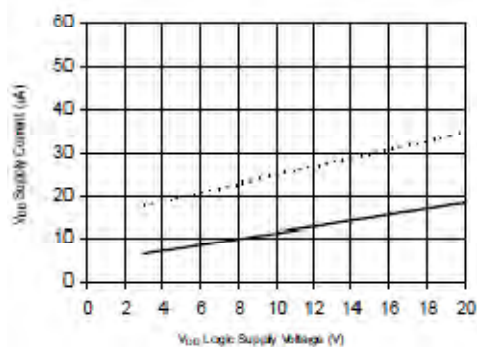
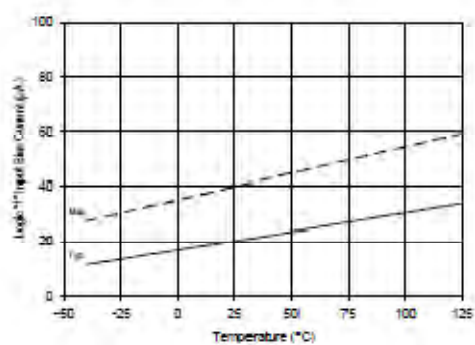
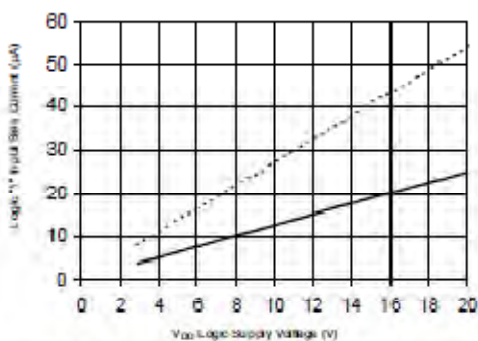
Figure 17B. V<sub>BS</sub> Supply Current vs. VoltageFigure 18A. V<sub>CC</sub> Supply Current vs. TemperatureFigure 18B. V<sub>CC</sub> Supply Current vs. VoltageFigure 19A. V<sub>DD</sub> Supply Current vs. TemperatureFigure 19B. V<sub>DD</sub> Supply Current vs. V<sub>DD</sub> Voltage

Figure 20A. Logic "1" Input Current vs. Temperature

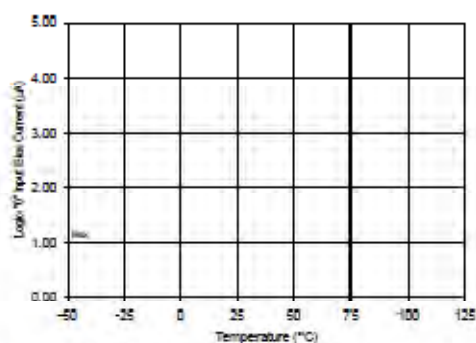


**IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF**

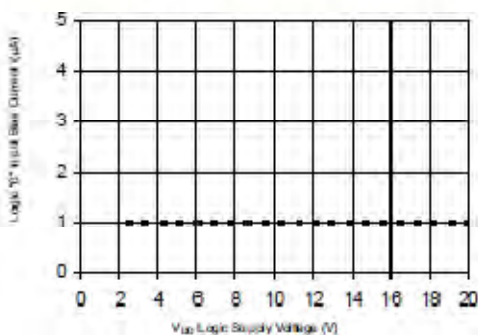
International  
**IR** Rectifier



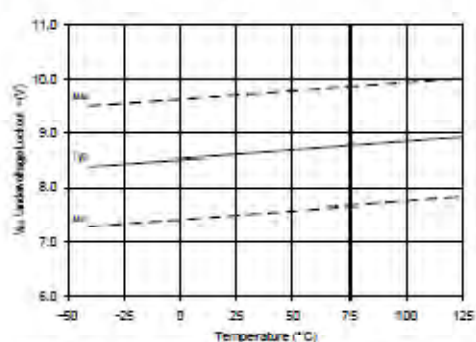
**Figure 20B. Logic "1" Input Current vs. V<sub>DD</sub> Voltage**



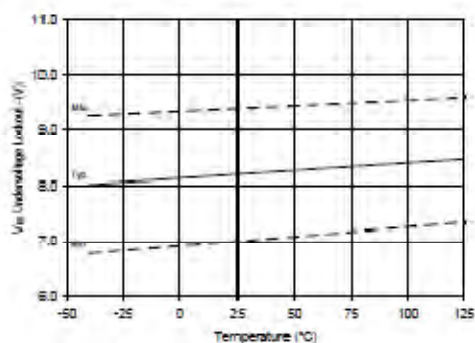
**Figure 21A. Logic "0" Input Current vs. Temperature**



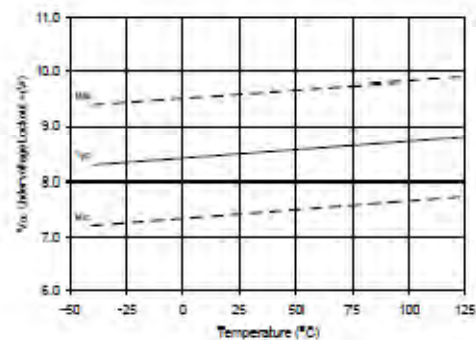
**Figure 21 B. Logic "0" Input Current vs. V<sub>DD</sub> Voltage**



**Figure 22. V<sub>SS</sub> Undervoltage (+) vs. Temperature**



**Figure 23. V<sub>SS</sub> Undervoltage (-) vs. Temperature**



**Figure 24. V<sub>CC</sub> Undervoltage (+) vs. Temperature**

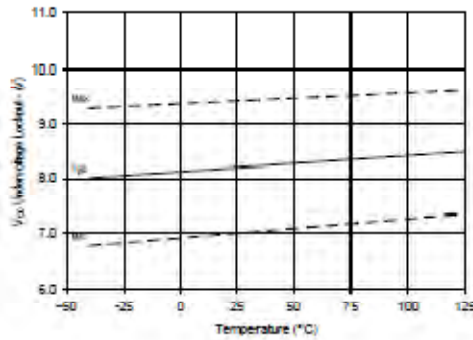


Figure 25. V<sub>CC</sub> Undervoltage (-) vs. Temperature

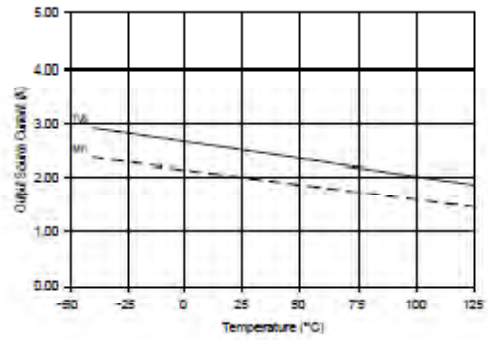


Figure 26A. Output Source Current vs. Temperature

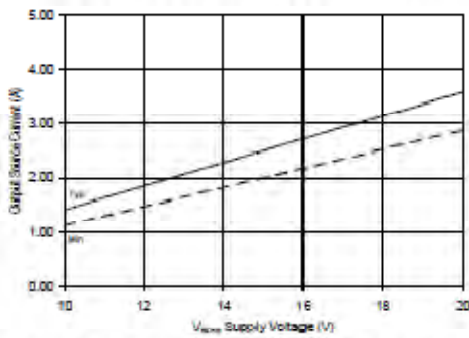


Figure 26B. Output Source Current vs. Voltage

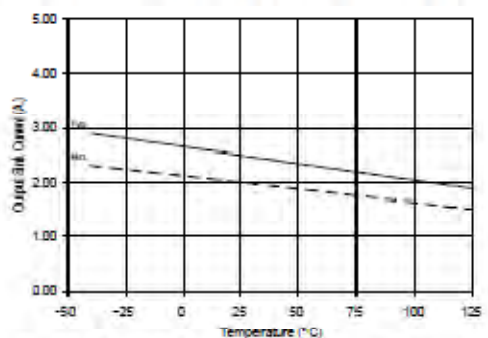


Figure 27A. Output Sink Current vs. Temperature

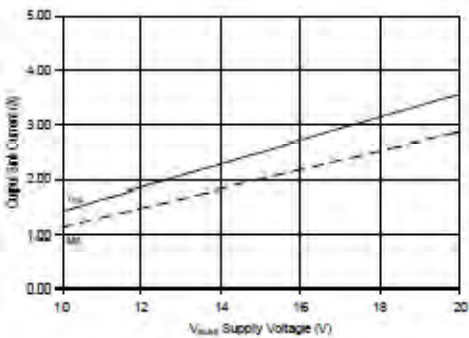


Figure 27B. Output Sink Current vs. Voltage

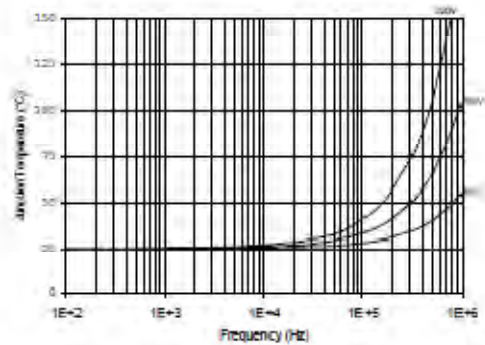
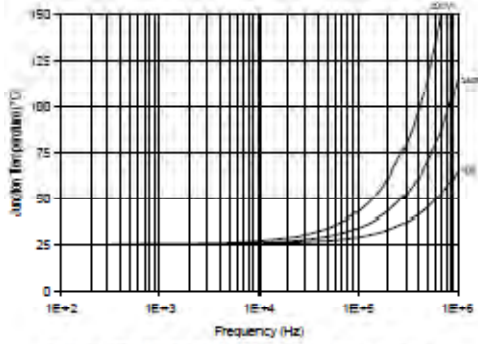


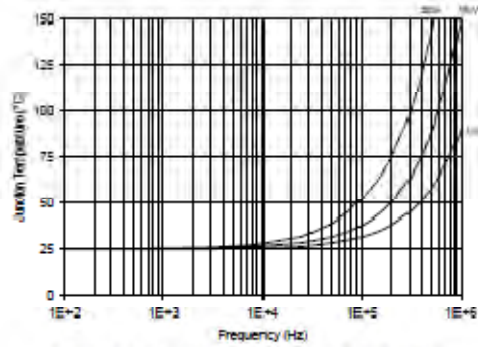
Figure 28. IR2110/IR2113 T<sub>J</sub> vs. Frequency (IRFBC20) R<sub>GATE</sub> = 33Ω, V<sub>CC</sub> = 15V

**IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF**

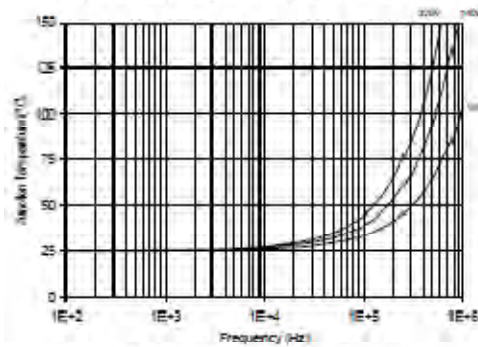
International  
**IR** Rectifier



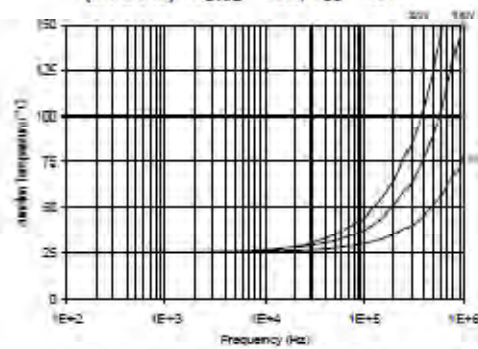
**Figure 29. IR2110/IR2113  $T_J$  vs. Frequency (IRFBC30)  $R_{GATE} = 22\Omega$ ,  $V_{CC} = 15V$**



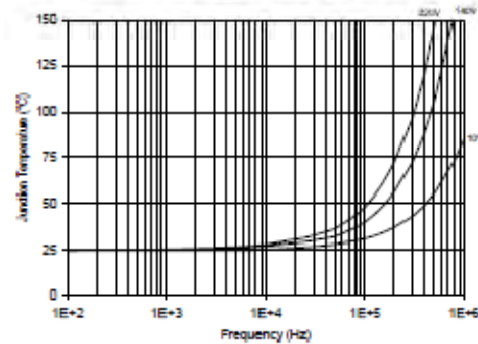
**Figure 30. IR2110/IR2113  $T_J$  vs. Frequency (IRFBC40)  $R_{GATE} = 15\Omega$ ,  $V_{CC} = 15V$**



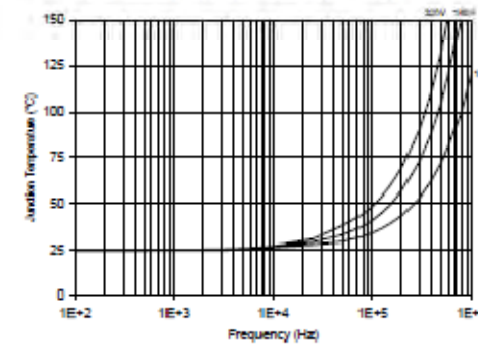
**Figure 31. IR2110/IR2113  $T_J$  vs. Frequency (IRFPE50)  $R_{GATE} = 10\Omega$ ,  $V_{CC} = 15V$**



**Figure 32. IR2110S/IR2113S  $T_J$  vs. Frequency (IRFBC20)  $R_{GATE} = 33\Omega$ ,  $V_{CC} = 15V$**



**Figure 33. IR2110S/IR2113S  $T_J$  vs. Frequency (IRFBC30)  $R_{GATE} = 22\Omega$ ,  $V_{CC} = 15V$**



**Figure 34. IR2110S/IR2113S  $T_J$  vs. Frequency (IRFBC40)  $R_{GATE} = 15\Omega$ ,  $V_{CC} = 15V$**



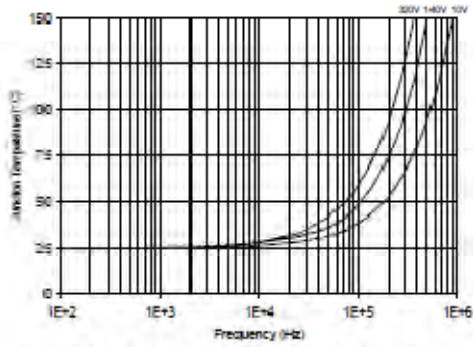


Figure 35. IR2110S/IR2113S  $T_j$  vs. Frequency (IRFPE50)  $R_{GATE} = 10\Omega$ ,  $V_{CC} = 15V$

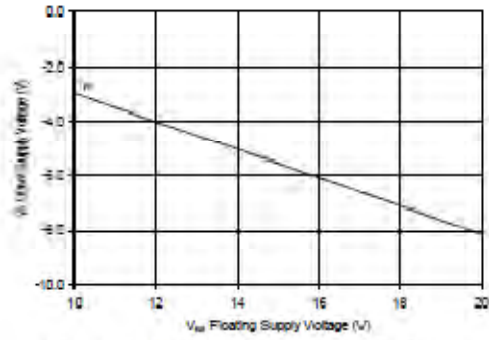


Figure 36. Maximum  $V_s$  Negative Offset vs.  $V_{SS}$  Supply Voltage

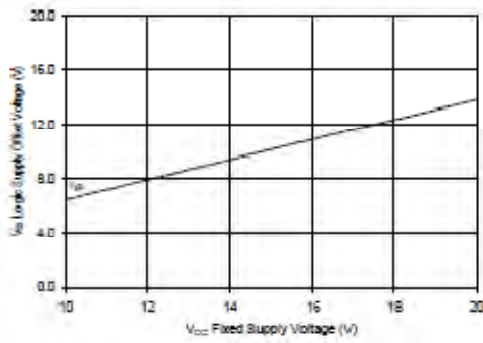


Figure 37. Maximum  $V_{SS}$  Positive Offset vs.  $V_{CC}$  Supply Voltage

## FEATURES

- Complete PWM Power-Control Circuitry
- Uncommitted Outputs for 200-mA Sink or Source Current
- Output Control Selects Single Ended or Push-Pull Operation
- Internal Circuitry Prohibits Double Pulse at Either Output
- Variable Dead Time Provides Control Over Total Range
- Internal Regulator Provides a Stable 5-V Reference Supply With 5% Tolerance
- Circuit Architecture Allows Easy Synchronization

## DESCRIPTION

The TL494 incorporates all the functions required in the construction of a pulse-width-modulation (PWM) control circuit on a single chip. Designed primarily for power-supply control, this device offers the flexibility to tailor the power-supply control circuitry to a specific application.

The TL494 contains two error amplifiers, an on-chip adjustable oscillator, a dead-time control (DTC) comparator, a pulse-steering control flip-flop, a 5-V, 5%-precision regulator, and output-control circuits.

The error amplifiers exhibit a common-mode voltage range from  $-0.3\text{ V}$  to  $V_{CC} - 2\text{ V}$ . The dead-time control comparator has a fixed offset that provides approximately 5% dead time. The on-chip oscillator can be bypassed by terminating R1 to the reference output and providing a sawtooth input to C1, or it can drive the common circuits in synchronous multiple-rail power supplies.

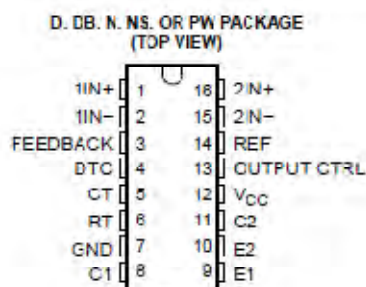
The uncommitted output transistors provide either common-emitter or emitter-follower output capability. The TL494 provides for push-pull or single-ended output operation, which can be selected through the output-control function. The architecture of this device prohibits the possibility of either output being pulsed twice during push-pull operation.

The TL494C is characterized for operation from  $0^{\circ}\text{C}$  to  $70^{\circ}\text{C}$ . The TL494I is characterized for operation from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $85^{\circ}\text{C}$ .

## AVAILABLE OPTIONS

$T_A$	PACKAGED DEVICES <sup>(1)</sup>				
	SMALL OUTLINE (D)	PLASTIC DIP (N)	SMALL OUTLINE (NS)	SHRINK SMALL OUTLINE (DB)	THIN SHRINK SMALL OUTLINE (PW)
$0^{\circ}\text{C}$ to $70^{\circ}\text{C}$	TL494CD	TL494CN	TL494CNS	TL494CDB	TL494CPW
$-40^{\circ}\text{C}$ to $85^{\circ}\text{C}$	TL494ID	TL494IN	—	—	—

(1) The D, DB, NS, and PW packages are available taped and reeled. Add the suffix R to device type (e.g., TL494CDR).



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1983–2005, Texas Instruments Incorporated

**TL494**  
**PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS**

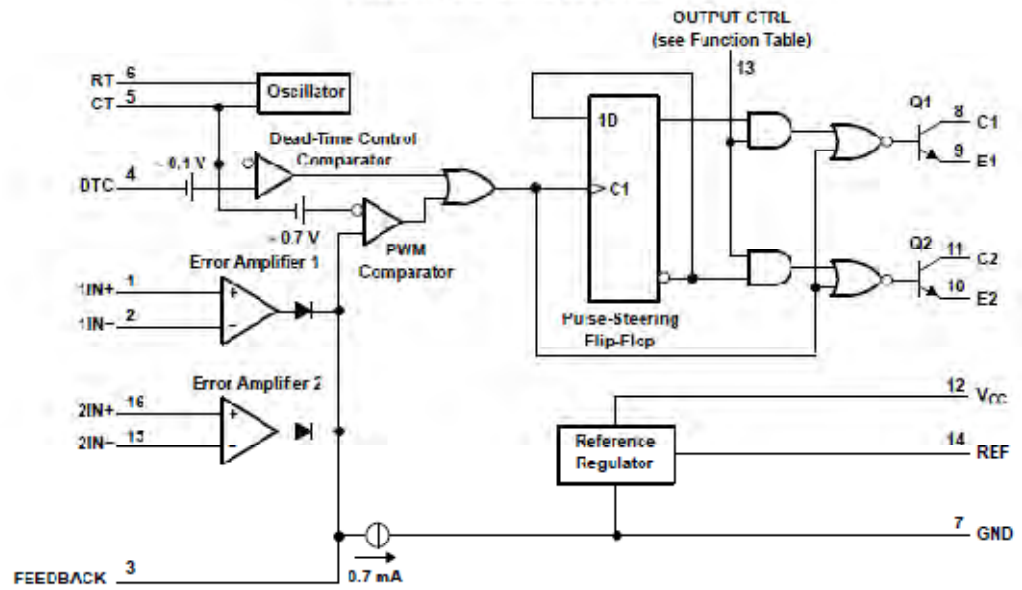
SI US074F—JANUARY 1983—REVISED FEBRUARY 2005



**FUNCTION TABLE**

INPUT TO OUTPUT CTRL	OUTPUT FUNCTION
$V_i = \text{GND}$	Single-ended or parallel output
$V_i = V_{\text{ref}}$	Normal push-pull operation

**FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM**



**Absolute Maximum Ratings<sup>(1)</sup>**

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	MAX	UNIT
$V_{CC}$	Supply voltage <sup>(2)</sup>		41	V
$V_i$	Amplifier input voltage		$V_{CC} + 0.3$	V
$V_O$	Collector output voltage		41	V
$I_O$	Collector output current		250	mA
$\theta_{JA}$	Package thermal impedance <sup>(3)(4)</sup>	D package	73	°C/W
		DB package	82	
		N package	87	
		NS package	84	
		PW package	108	
Lead temperature 1,8 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds			260	°C
$T_{stg}$	Storage temperature range	-65	150	°C

- (1) Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
- (2) All voltages are with respect to the network ground terminal.
- (3) Maximum power dissipation is a function of  $T_J(\text{max})$ ,  $\theta_{JA}$ , and  $T_A$ . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is  $P_D = (T_J(\text{max}) - T_A)/\theta_{JA}$ . Operating at the absolute maximum  $T_J$  of 150°C can affect reliability.
- (4) The package thermal impedance is calculated in accordance with JEDEC 51-7.

**Recommended Operating Conditions**

		MIN	MAX	UNIT	
$V_{CC}$	Supply voltage	7	40	V	
$V_i$	Amplifier input voltage	-0.3	$V_{CC} - 2$	V	
$V_O$	Collector output voltage		40	V	
	Collector output current (each transistor)		200	mA	
	Current into feedback terminal		0.3	mA	
$f_{OSC}$	Oscillator frequency	1	300	kHz	
$C_T$	Timing capacitor	0.47	10000	nF	
$R_T$	Timing resistor	1.8	500	kΩ	
$T_A$	Operating free-air temperature	TL494C	0	70	°C
		TL494I	-40	85	



## TL494 PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

SLVSD74E—JANUARY 1983—REVISED FEBRUARY 2005



### Electrical Characteristics

over recommended operating free-air temperature range,  $V_{CC} = 15\text{ V}$ ,  $f = 10\text{ kHz}$  (unless otherwise noted)

### Reference Section

PARAMETER	TEST CONDITIONS <sup>(1)</sup>	TL494C, TL494I			UNIT
		MIN	TYP <sup>(2)</sup>	MAX	
Output voltage (REF)	$I_O = 1\text{ mA}$	4.75	5	5.25	V
Input regulation	$V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$	2	25		mV
Output regulation	$I_O = 1\text{ mA to }10\text{ mA}$	1	15		mV
Output voltage change with temperature	$\Delta T_A = \text{MIN to MAX}$	2	10		mV/V
Short-circuit output current <sup>(3)</sup>	REF = 0 V	25			mA

(1) For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

(2) All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

(3) Duration of short circuit should not exceed one second.

### Oscillator Section

$C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ ,  $R_T = 12\ \text{k}\Omega$  (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS <sup>(1)</sup>	TL494C, TL494I			UNIT
		MIN	TYP <sup>(2)</sup>	MAX	
Frequency			10		kHz
Standard deviation of frequency <sup>(3)</sup>	All values of $V_{CC}$ , $C_T$ , $R_T$ , and $T_A$ constant		100		Hz/kHz
Frequency change with voltage	$V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$		1		Hz/kHz
Frequency change with temperature <sup>(4)</sup>	$\Delta T_A = \text{MIN to MAX}$			10	Hz/kHz

(1) For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

(2) All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

(3) Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

(4) Temperature coefficient of timing capacitor and timing resistor are not taken into account.

### Error-Amplifier Section

See Figure 2

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TL494C, TL494I			UNIT
		MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX	
Input offset voltage	$V_O$ (FEEDBACK) = 2.5 V		2	10	mV
Input offset current	$V_O$ (FEEDBACK) = 2.5 V		25	250	nA
Input bias current	$V_O$ (FEEDBACK) = 2.5 V		0.2	1	$\mu\text{A}$
Common-mode input voltage range	$V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$		-0.3 to $V_{CC} - 2$		V
Open-loop voltage amplification	$\Delta V_O = 3\text{ V}$ , $V_O = 0.5\text{ V to }3.5\text{ V}$ , $R_L = 2\ \text{k}\Omega$		70	95	dB
Unity-gain bandwidth	$V_O = 0.5\text{ V to }3.5\text{ V}$ , $R_L = 2\ \text{k}\Omega$		800		kHz
Common-mode rejection ratio	$\Delta V_O = 40\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$		65	80	dB
Output sink current (FEEDBACK)	$V_O = -15\text{ mV to }-5\text{ V}$ , $V$ (FEEDBACK) = 0.7 V		0.3	0.7	mA
Output source current (FEEDBACK)	$V_O = 15\text{ mV to }5\text{ V}$ , $V$ (FEEDBACK) = 3.5 V		-2		mA

(1) All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

### Electrical Characteristics

over recommended operating free-air temperature range,  $V_{CC} = 15\text{ V}$ ,  $f = 10\text{ kHz}$  (unless otherwise noted)

#### Output Section

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX	UNIT
Collector off-state current		$V_{CE} = 40\text{ V}$ , $V_{CC} = 40\text{ V}$		2	100	$\mu\text{A}$
Emitter off-state current		$V_{CC} = V_C = 40\text{ V}$ , $V_E = 0$			-100	$\mu\text{A}$
Collector-emitter saturation voltage	Common emitter	$V_E = 0$ , $I_C = 200\text{ mA}$		1.1	1.3	V
	Emitter follower	$V_{O1(C1)} \text{ or } C2 = 15\text{ V}$ , $I_E = -200\text{ mA}$		1.5	2.5	
Output control input current		$V_I = V_{ref}$			3.5	mA

(1) All typical values, except for temperature coefficient, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

#### Dead-Time Control Section

See Figure 1

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX	UNIT
Input bias current (DEAD-TIME CTRL)		$V_I = 0$ to $5.25\text{ V}$		-2	-10	$\mu\text{A}$
Maximum duty cycle, each output		$V_I$ (DEAD-TIME CTRL) = 0, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ , $R_T = 12\text{ k}\Omega$		45		%
Input threshold voltage (DEAD-TIME CTRL)	Zero duty cycle			3	3.3	V
	Maximum duty cycle		0			

(1) All typical values, except for temperature coefficient, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

#### PWM Comparator Section

See Figure 1

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX	UNIT
Input threshold voltage (FEEDBACK)		Zero duty cycle		4	4.5	V
Input sink current (FEEDBACK)		$V$ (FEEDBACK) = $0.7\text{ V}$	0.3	0.7		mA

(1) All typical values, except for temperature coefficient, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

#### Total Device

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX	UNIT
Standby supply current	$R_T = V_{ref}$ , All other inputs and outputs open	$V_{CC} = 15\text{ V}$		6	10	mA
		$V_{CC} = 40\text{ V}$		9	15	
Average supply current		$V_I$ (DEAD-TIME CTRL) = $2\text{ V}$ , See Figure 1		7.5		mA

(1) All typical values, except for temperature coefficient, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

#### Switching Characteristics

$T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX	UNIT
Rise time	Common-emitter configuration, See Figure 3			100	200	ns
Fall time				25	100	ns
Rise time	Emitter-follower configuration, See Figure 4			100	200	ns
Fall time				40	100	ns

(1) All typical values, except for temperature coefficient, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

**TL494**  
**PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS**

SI US074F—JANUARY 1983—REVISED FEBRUARY 2005



**PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION**

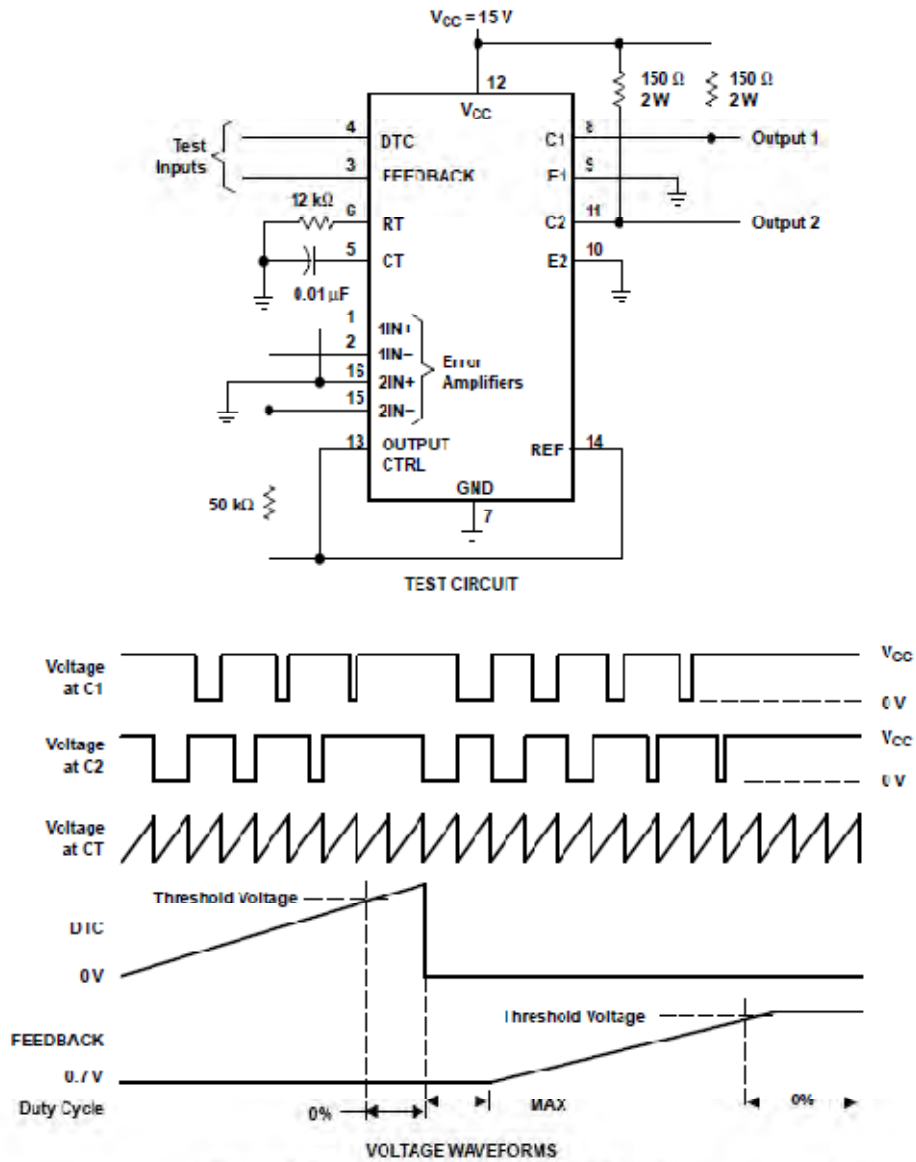
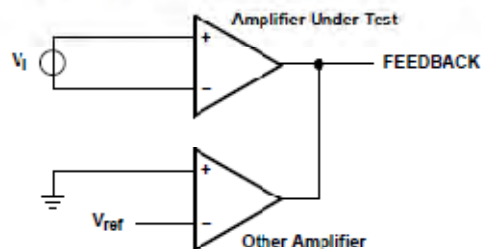
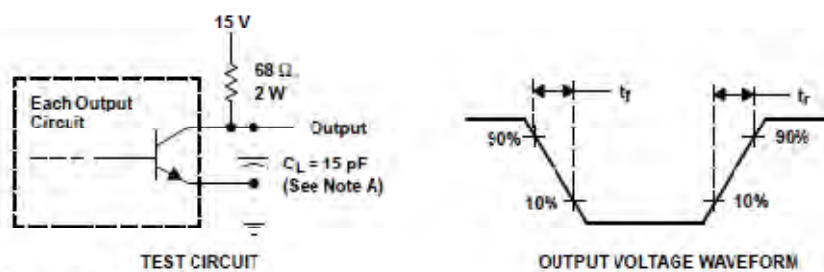
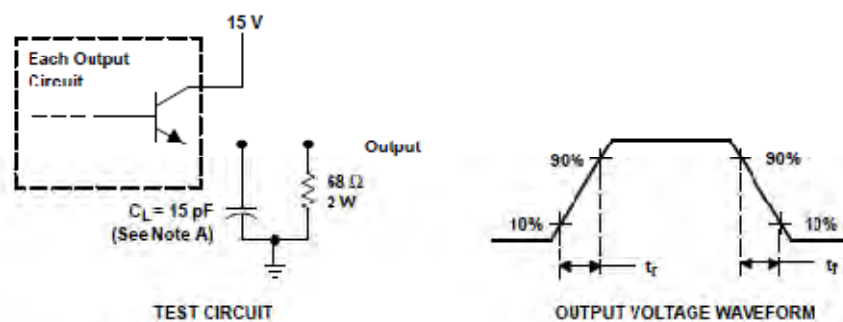


Figure 1. Operational Test Circuit and Waveforms

**PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION**

**Figure 2. Amplifier Characteristics**


NOTE A:  $C_L$  includes probe and jig capacitance

**Figure 3. Common-Emitter Configuration**


NOTE A:  $C_L$  includes probe and jig capacitance.

**Figure 4. Emitter-Follower Configuration**



**TL494**  
**PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS**

SLVS074E—JANUARY 1983—REVISED FEBRUARY 2005



**TYPICAL CHARACTERISTICS**

**OSCILLATOR FREQUENCY AND  
 FREQUENCY VARIATION†**

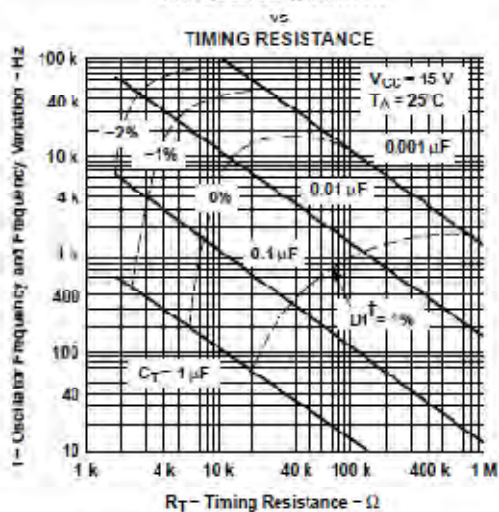


Figure 5.

**AMPLIFIER VOLTAGE AMPLIFICATION  
 vs  
 FREQUENCY**

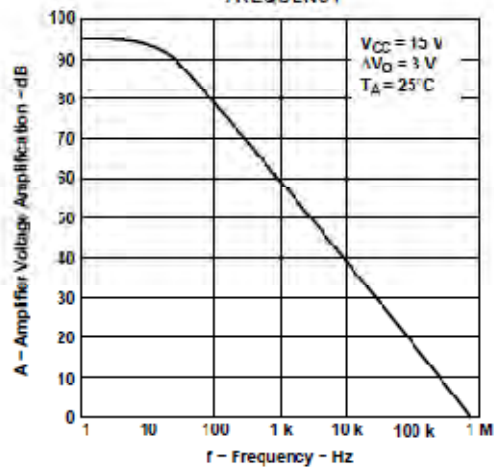


Figure 6.

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวลีดา มิตรายน เกิดเมื่อวันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2526 จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์-โซลิตสเตทฟิสิกส์) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548 และต่อมาได้เข้า ทำงานที่บริษัท Ricoh Thailand ในตำแหน่ง Help Desk Service Engineer หลังจากนั้นในปี 2549 – 2552 ได้เข้าทำงานที่บริษัท Utac Thai Company Limited ตำแหน่ง Process Engineer และในปี 2552 ได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552