เครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง

DC Atmospheric Non-Thermal Plasma Jet

นายจิรัฏฐ์ เกตุภู่

นายวราวุธ ศรีบุรินทร์

นายสรุต โรจนอุดมวุฒิกุล

นายอมรพงศ์ อมฤก

โครงงานวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2557

เครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง

DC Atmospheric Non Thermal Plasma Jet

นายจิรัฏฐ์ เกตุภู่

นายวราวุธ ศรีบุรินทร์

นายสรุต โรจนอุดมวุฒิกุล

นายอมรพงศ์ อมฤก

โครงงานวิศวกรรมไฟฟ้านี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2557

หัวข้อโครงงานวิศวกรรม สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

เรื่อง เครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง

โดย	นายจิรัฏฐ์ เกตุภู่
	นายวราวุธ ศรีบุรินทร์
	นายสรุต โรจนอุดมวุฒิกุล
	นายอมรพงศ์ อมฤก
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อนุมัติให้นับโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้า เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. เวคิน ปิยรัตน์)

คณะกรรมการสอบโครงงานวิศวกรรม

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์)

P. Thepsuthi .....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พินิจ เทพสาธร)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา)

เครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง
ปีการศึกษา 2557

โดย
นายจิรัฏฐ์ เกตุภู่
นายวราวุธ ศรีบุรินทร์
นายสรุต โรจนอุดมวุฒิกุล
นายอมรพงศ์ อมฤก

อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.คณิศร์ มาตรา

บทคัดย่อ

โครงงานวิศวกรรมนี้นำเสนอการออกแบบเครื่องต้นแบบของเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง โดยโครงงานนี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆ ได้แก่ ทฤษฎีการเบรกดาวน์ของแก๊ส (Breakdown of gas) กฎของพาสเชน (Pashen's law) และความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับลำพลาสมา เพื่อใช้ในการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมาใน 2 รูปแบบ คือ ลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ (Self-pulsing discharge mode) และ ลำพลาสมารูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง (Continuous discharge mode) จากนั้นจะได้พิจารณาลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ได้แก่ ลักษณะของกระแสดิสชาร์จและแรงดันดิสชาร์จ ซึ่งจะถูกนำมาพิจารณาเพื่อใช้ในการควบคุมคุณสมบัติของลำพลาสมา เพื่อให้ได้ลำพลาสมาที่มีคุณสมบัติตามต้องการ ซึ่งค่ากระแสดิสชาร์จและแรงดันดิสชาร์จนี้ ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ชนิดของแก๊ส และความดันแก๊ส

คำสำคัญ : ลำพลาสมา/ ไฟฟ้ากระแสตรง/ ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า/ ลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์/ ลำพลาสมารูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง

DC Non - Thermal Atmospheric – Pressure Plasma Jet

Academic Year 2014

By

Mr.Jirath Katepou

Mr. Warawut Sriburin

Mr.sarut Rodjanaudomwuttikul

Mr.Amornpong ammaruek

Advisor

Dr. Khanit Matra

ABSTRACT

This project presents the study of dc non-thermal atmospheric-pressure plasma jet. Many theories are used for designing and analyzing the plasma jet model, which are the breakdown of gas theory, Paschen's law and basic knowledge of plasma. There are two discharge modes observed during the experiment, which are continuous discharge mode and self-pulsing discharge mode. The electrical characteristics of plasma jet are analyzed by consideration of the discharge current and discharge voltage, which are depended on electrode gap distance, electrode voltage, gas type, and gas pressure.

Keywords : Plasma Jet/ Direct Current/ Voltage - Current Characteristics/ Self-Pulsing discharge Mode/ Continuous discharge Mode

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานเรื่อง เครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงนี้ ได้สำเร็จลุล่วงผ่านไปได้ด้วยดีนั้นทางคณะผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบุคคลต่างๆดังนี้

อาจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา ที่เป็นบุคคลริเริ่มและให้คำแนะนำต่างๆของทำให้เกิดโครงงานนี้ พร้อมทั้งยังเป็นที่ปรึกษาของโครงงาน เพื่อเป็นการแนะนำและให้ข้อมูลทางด้านพลาสมาตลอดจนกระบวนการทำงานและหาข้อมูลในหัวข้อโครงงานไม่ว่าจะเป็นการเลือกตัวแปรต้นตัวแปรตามตามหลักการวิทยาศาสตร์ รวมถึงข้อมูลของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการปฏิบัติงานจนสำเร็จลุล่วง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์ ที่ให้คำปรึกษาปัญหาเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าแรงดันสูงไปประยุกต์ใช้ในโครงงานดังกล่าว รวมถึงชี้แนะข้อผิดพลาดในโครงงาน

อาจารย์ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่เป็นผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้เพื่อเป็นแนวทางในการทำงานโครงงานครั้งนี้ และขอขอบคุณเพื่อนๆร่วมภาควิชาทุกคนที่คอยเป็นห่วงดูแล และมอบความรู้สึกดีๆให้แก่กันเสมอ รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และเป็นสถานที่ที่ให้การศึกษาแก่เราในทุกๆเรื่อง

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้การสนับสนุนเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้สำหรับการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บุคคลที่ให้ความเอื้อเฟื้อในการศึกษาและความช่วยเหลือ ในด้านต่างๆ ตลอดจนผู้จัดทำตำราเอกสารและเว็บไซต์ต่างๆที่ทางคณะผู้จัดทำได้ค้นคว้าศึกษาข้อมูลมาใช้ประโยชน์ จนกระทั่งทำให้ทางคณะผู้จัดทำมีโอกาสทำโครงงานชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงผ่านไปได้ด้วยดี หากวิจัยนี้มีข้อผิดพลาดประการใดทางคณะผู้จัดทำขอน้อมรับไว้ ณ. โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตโครงงานวิศวกรรม	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 การเบรกดาวน์ของแก๊ส (Breakdown of gas)	4
2.3 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ	12
2.4 การแบ่งประเภทของพลาสมา	13
2.5 ลำพลาสมา	14
2.6 ประโยชน์ที่ได้จากลำพลาสมา	15
บทที่ 3 การออกแบบโครงสร้างและออกแบบการทดลอง	
3.1 ออกแบบโครงสร้างเครื่องสร้างลำพลาสมา	17
3.2 หลักการทำงาน	20
3.3 การเลือกขนาดของตัวต้านทาน	21
3.4 การเลือกชนิดแก๊ส	24

สารบัญ(ต่อ)

หน้าที่

บทที่ 4 ผลการทดลองการสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ

4.1 ผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์การเกิดลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ 27

4.2 ช่วงเวลาของการเก็บประจุและการเกิดกระแสดิสชาร์จ 30

4.3 ผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์การเกิดลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ ที่อัตราการไหลของแก๊สต่างกัน 35

4.4 ผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์การเกิดลำพลาสมาที่ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน 37

4.5 การสร้างลำพลาสมาภายในหลอดแก้ว 43

4.6 ผลการวัดอุณหภูมิของลำพลาสมา 45

4.7 การประยุกต์เพื่อนำลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ 46

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง 50

5.2 ปัญหาและอุปสรรค 52

5.3 ข้อเสนอแนะ 52

เอกสารอ้างอิง 53

ประวัติผู้จัดทำโครงงาน 55

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งประเภทของลำพลาสมาตามอุณหภูมิของพลาสมา	14
3.1 แสดงอุปกรณ์และหน้าที่เครื่องต้นแบบเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง	18
4.1 ตารางเปรียบเทียบผลการสร้างลำพลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายต่างกัน	29
4.2 ตารางเปรียบเทียบช่วงเวลาของการเก็บประจุที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายต่างกัน	32
4.3 ตารางเปรียบเทียบช่วงเวลาของการเกิดกระแสดิสชาร์จที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายต่างกัน	34
4.4 ตารางเปรียบเทียบผลการสร้างลำพลาสมาที่ได้จากการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊ส	36
4.5 ตารางเปรียบเทียบผลการสร้างลำพลาสมาที่ได้จากการเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด	41
4.6 ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสัญญาณต่อเนื่องและกระแสไฟฟ้าสัญญาณต่อเนื่อง	42

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ	2
2.1 กราฟแสดงการเบรกดาวน์ของทาวน์เซน	5
2.2 เครื่องสร้างพลาสมาในหลอดสุญญากาศโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง	6
2.3 กราฟของพาสเชน ของแก๊สอิสระระหว่างระนาบคู่ขนานขั้วไฟฟ้า	10
2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ	12
2.5 โครงสร้างของเครื่องสร้างลำพลาสมา	15
3.1 โครงสร้างของเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ออกแบบไว้	17
3.2 โครงสร้างของเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ใช้สร้างลำพลาสมา	19
3.3 ตัวต้านทานขนาด 800 กิโลโอห์ม 1 และ 2.5 เมกะโอห์ม	21
3.4 แรงดันและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในแรงดันรูปแบบสัญญาณพัลส์และ รูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง ของตัวต้านทานขนาด 800 kΩ.	22
3.5 แรงดันและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในแรงดันรูปแบบสัญญาณพัลส์และ รูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง ของตัวต้านทานขนาด 1 M	22
3.6 แรงดันและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในแรงดันรูปแบบสัญญาณพัลส์และ รูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง ของตัวต้านทานขนาด 2.5 MΩ.	23
3.7 แรงดันและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในแรงดันรูปแบบสัญญาณพัลส์และ รูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง ของอาร์กอนพลาสมา	25
3.8 แรงดันและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในแรงดันรูปแบบสัญญาณพัลส์และ รูปแบบสัญญาณพัลส์ความถี่สูง ของออกซิเจนพลาสมา	25
4.1 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมาในแรงดันรูปแบบสัญญาณพัลส์ และรูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง ที่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที	27
4.2 แสดงวงจรอนุกรมของตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ	28
4.3 กราฟแสดงช่างเวลาของการเก็บประจุ ที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1200 โวลต์	31
4.4 กราฟแสดงช่างเวลาของการเก็บประจุ ที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1350 โวลต์	31
4.5 กราฟแสดงช่างเวลาของการเก็บประจุ ที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1500 โวลต์	32

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟแสดงช่างเวลาของการเกิดกระแสพัลส์ดิสชาร์จ ที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1200 โวลต์	33
4.7 กราฟแสดงช่างเวลาของการเกิดกระแสพัลส์ดิสชาร์จ ที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1350 โวลต์	33
4.8 กราฟแสดงช่างเวลาของการเกิดกระแสพัลส์ดิสชาร์จ ที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1500 โวลต์	34
4.9 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมาที่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที 3 ลิตรต่อนาที 5 ลิตรต่อนาที	35
4.10 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ที่แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของแต่ละระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที	37
4.11 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์และแรงดันไฟฟ้าฟื้นตัวสัญญาณพัลส์	38
4.12 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์และแรงดันไฟฟ้าฟื้นตัวสัญญาณพัลส์	38
4.13 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 5 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์และแรงดันไฟฟ้าฟื้นตัวสัญญาณพัลส์	39
4.14 ลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร	39
4.15 ลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 มิลลิเมตร	40
4.16 ลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 5 มิลลิเมตร	40
4.17 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ที่แรงดันไฟฟ้าต่อเนื่อง ของแต่ละระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที	42
4.18 แสดงโครงสร้างเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำภายในหลอดแก้ว	43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 แสดงโครงสร้างภายในหลอดแก้ว	44
4.20 ลำพลาสมาที่สร้างในหลอดแก้วหลอดแก้ว ยาว 1.5 เซนติเมตร	44
4.21 การวัดอุณหภูมิของลำพลาสมาที่สร้างจากไฟฟ้ากระแสตรง	45
4.22 โครงสร้างเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำเพื่อใช้ในการสปัตเตอร์ริ่งผิวแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิม	46
4.23 แผ่นสังกะสีที่เกิดสนิมก่อนทำการการสปัตเตอร์ริ่งผิวด้วยลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ	47
4.24 ลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำเพื่อการสปัตเตอร์ริ่งผิวแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิม	47
4.25 ผลการการสปัตเตอร์ริ่งผิวแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิมออก	48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

พลาสมา (Plasma) จัดเป็นสถานะที่สี่ของสสาร ซึ่งพลาสมานั้นเกิดจากแก๊สที่ถูกกระตุ้นอย่างต่อเนื่องให้เกิดกระบวกการแตกตัวเป็นไอออน คือ ทำให้โมเลกุลของแก๊ส ซึ่งเดิมอยู่ในสถานะเป็นกลางกลายเป็นไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอน ซึ่งอนุภาคอิสระเหล่านี้จะมีค่าประจุรวมเท่ากับศูนย์

โดยพลาสมาถูกพูดถึงครั้งแรก โดย เซอร์ วิลเลียม ครูกส์ (Sir William Crookes) เมื่อ ค.ศ. 1879 และพลาสมาซึ่งถูกนำมาใช้ครั้งแรกประมาณปี ค.ศ. 1929 โดย ลีวี ทองส์ (Lewi Tonks) และ เออร์วิน แลงเมอร์ (Irvin Langmuir) ที่ค้นพบสภาวะพลาสมาในหลอดคายประจุ (Discharge Tube) โดยบังเอิญ

ที่มา : ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์ (2551)

สสารประมาณ 99% ที่มีในจักรวาลส่วนใหญ่ อยู่ในสถานะพลาสมา ซึ่งพลาสมาที่เกิดเองตามธรรมชาติ ได้แก่ ฟ้าผ่า ปรากฏการออโรรา ดาวฤกษ์ และ ดวงอาทิตย์ก็ประกอบด้วยพลาสมาเช่นเดียวกับดาวฤกษ์ ดังนั้นจักรวาลมีสถานะส่วนใหญ่อยู่ในสถานะพลาสมา สำหรับพลาสมาที่มนุษย์สร้างขึ้นนั้น ถือว่ามีอยู่ประมาณ 1% ของพลาสมาที่มีในจักรวาล

พลาสมาสามารถสร้างได้หลายวิธี ได้แก่ วิธีการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ไฟฟ้ากระแสสลับ การใช้กำลังความถี่คลื่นวิทยุ (RF Power) วิธีทางความร้อน ไปจนถึง วิธีการทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา : Yoshiki.H (2006)

ตัวอย่างพลาสมาที่มนุษย์สร้างขึ้น ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนท์ที่บรรจุแก๊สปรอทความดันต่ำ เมื่อถูกกระตุ้นด้วย ความต่างศักย์ที่เหมาะสมจะทำให้แก๊สปรอทจะทำให้เกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน อิเล็กตรอนบางส่วนเข้าชนกับ สารเรืองแสงที่ฉาบอยู่ด้านในของหลอดฟลูออเรสเซนท์ ทำให้เกิดการเรืองแสงขึ้นมา การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจรวด หรือทีวีพลาสมา เป็นการนำเอาหลักการ ขณะที่พลาสมาเกิดกระบวนการกลับสู่สถานะแก๊ส ซึ่งจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปแสงมาใช้กับจอภาพ เป็นต้น

วิธีการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการสร้างพลาสมา เมื่อแก๊สที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดถูกกระตุ้นด้วยความต่างศักย์ที่มากกว่าค่าศักย์แตกตัว หรือแรงดันเบรกดาวน์ (Breakdown Voltage) ทำให้แก๊สเปลี่ยนสถานะเป็นสถานะพลาสมา ซึ่งประกอบด้วย ไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอน โดยค่าศักย์แตกตัวจะขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส ผลคูณระหว่างความดันแก๊สกับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ตามกฎของพาสเชน (Pashen's low)

การสร้างพลาสมาในปัจจุบันยังถูกจำกัดอยู่ในสภาวะสุญญากาศเป็นส่วนมาก ซึ่งมีค่าใช้จ่ายด้านระบบสุญญากาศและการบำรุงรักษาที่ค่อนข้างสูงมาก การพัฒนาการสร้างพลาสมาที่ความดันบรรยากาศประสบความสำเร็จ จะทำให้ข้อจำกัดเรื่องสภาวะสุญญากาศหมดไป
ที่มา : http://www.sc.mahidol.ac.th

พลาสมาสามารถผลิตได้ หลายวิธี เช่น วิธีทางกล วิธีทางความร้อน วิธีทางนิวเคลียร์ หรือการกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้า และวิธีการตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ก็ได้เช่นกัน

ลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ จะมีลักษณะคล้ายๆกับ ลำแสงของเลเซอร์ โดยเกิดจากเส้นทางการไหลของแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ปัจจุบัน ลำพลาสมาได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากประโยชน์ต่างๆของลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ เช่น สามารถสร้างได้ที่ความดันบรรยากาศ นอกจากนี้ ยังเป็นพลาสมาที่สามารถสัมผัสได้ไม่เป็นอันตราย ใช้พลังงานต่ำ การจัดการง่ายและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ต่ำ
ที่มา : http://www.sc.mahidol.ac.th

ในโครงงานนี้สนใจที่จะศึกษาวิธีการสร้างลำพลาสมาโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยนำผลที่ได้ไปศึกษาวิธีการควบคุมลำพลาสมาเพื่อประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆตามคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมาที่มีคุณสมบัติการนำไปใช้งานต่างกัน

รูปที่ 1.1 ลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ
ที่มา : ThEP Center

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 สร้างเครื่องกำเนิดลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้หลักการกระตุ้นแก๊สด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

1.2.2 ศึกษาคุณสมบัติของพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ ตรวจสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติและพฤติกรรมทางไฟฟ้าของพลาสมาอุณหภูมิต่ำ ที่ได้จากการออกแบบจากข้อ (1.2.1)

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 ศึกษา ออกแบบและสร้างเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ ที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง

1.3.2 วิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา โดยพิจารณาจากลักษณะของกระแสดิสชาร์จ และแรงดันดิสชาร์จ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง

1.4.2 ได้เครื่องต้นแบบของเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการช่วยกระตุ้นแก๊ส

1.4.3 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติและพฤติกรรมทางไฟฟ้าของพลาสมาอุณหภูมิต่ำ

1.4.4 เพื่อเป็นแนวทางสำหรับบุคคลที่สนใจ ในการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเกี่ยวกับการสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 กล่าวนำ

คำว่าพลาสมา (Plasma) มาจากภาษากรีก **πλασμα** แปลว่าสิ่งที่สามารถหล่อขึ้นได้ (Mouldable) หรือ เจลลี่ (Jelly) ซึ่งพลาสมาได้ถูกนำมาใช้อย่างเป็นทางการในปี ค.ศ. 1929 โดย ลีวี ทองส์ (Lewi Tonks) และ เออร์วิน แลงเมอร์ (Irvin Langmuir) ที่ค้นพบสภาวะพลาสมาในหลอดคายประจุโดยบังเอิญ พลาสมา เป็นสถานะของสสารที่ได้จากแก๊สเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน เมื่ออิเล็กตรอนของแก๊สอย่างน้อยหนึ่งตัวถูกทำให้แยกตัวออกมาจากอะตอมหรือโมเลกุล เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นนั้นเอง โดยพลาสมาประกอบด้วยไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอน ซึ่งเรียกอนุภาคเหล่านี้โดยรวมว่า อนุภาคอิสระมีประจุ ซึ่งมีผลรวมทางประจุไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ โดยอนุภาคอิสระเหล่านี้จะทำให้พลาสมาสามารถนำไฟฟ้าได้ และตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า แต่สถานะที่พบนี้มีคุณสมบัติการเกิดและมีลักษณะเฉพาะตัวแตกต่างไปจาก 3 สถานะของสสารที่เรารู้จักกันทั่วไป คือ สถานะของแข็ง สถานะของเหลว และสถานะแก๊ส ดั้งนั้น พลาสมาจึงถูกเรียกว่าเป็น สถานะที่ 4 ของสสาร (The Fourth State of Matter)

2.2 การเบรกดาวน์ของแก๊ส (Breakdown of gas)

การเบรกดาวน์ในทางไฟฟ้านั้น หมายถึง การป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ค่าๆหนึ่งให้กับฉนวน ซึ่งมีค่าเกินความสามารถของฉนวนที่จะทนแรงดันไฟฟ้านั้นๆ หรือทนต่อสนามไฟฟ้านั้นได้ จึงทำเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านฉนวนอย่างรุนแรงจนกระทั่งฉนวนนั้นๆทนต่อแรงดันไฟฟ้าไม่ไหว จึงทำให้เกิดการเบรกดาวน์ไปในที่สุด

การเบรกดาวน์นั้นจะสามารถแบ่งได้ 3 แบบ ตามสถานะของสสาร คือ การเบรกดาวน์ของแก๊ส (Breakdown of gas) การเบรกดาวน์ของของแข็ง (Breakdown of Solid) การเบรกดาวน์ของของเหลว (Breakdown of liquid) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาการเบรกดาวน์ของแก๊ส

ที่มา : สำรวย สังข์สะอาด (2549)

การเบรกดาวน์ของแก๊ส (Breakdown of gas) หมายถึง การที่แก๊สนั้นเกิดการเปลี่ยนสภาพจากคุณสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าไปสู่คุณสมบัติความเป็นนำไฟฟ้า (Transition) ถูกกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับความเครียดสนามไฟฟ้า ยิ่งความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดแคบการเบรกดาวน์ของแก๊สที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดการเบรกดาวน์ได้ง่าย ลักษณะการเบรกดาวน์ของแก๊สจะมี 2 แบบ คือ

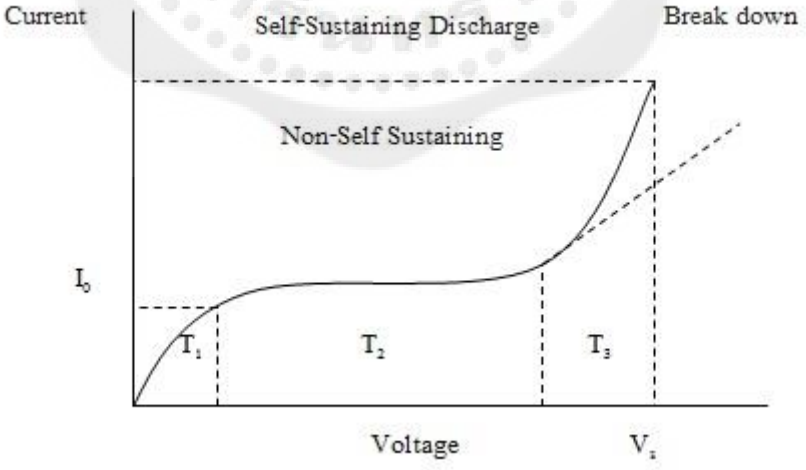
1. การเบรกดาวน์โดยตรง ซึ่งจะเกิดขึ้นที่สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยสนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากันตลอดทั้งขั้วอิเล็กโทรด ลักษณะการเบรกดาวน์จะเป็นการเบรกดาวน์โดยตรง

2. การเบรกดาวน์แบบโคโรนา ซึ่งจะเกิดขึ้นที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีค่าน้อย โดยจะมีโคโรนาเกิดขึ้นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงและเกิดขึ้นที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์ ที่ระยะห่างออกไปความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำเกินไปจึงไม่เกิดการเบรกดาวน์ จึงมีโคโรนาเกิดขึ้นที่บริเวณผิวอิเล็กโทรด ก่อนที่จะเกิดการเบรกดาวน์และจัดเป็นการเบรกดาวน์แบบโคโรนา

ที่มา : สำรวย สังข์สะอาด (2549)

2.2.1 กราฟแสดงการเบรกดาวน์ของทาวน์เซน

จะอธิบายถึงลักษณะก่อนการเบรกดาวน์ของแก๊ส โดยแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงการเบรกดาวน์ของทาวน์เซน

ที่มา : Dr. Pramin Artrit ,2008

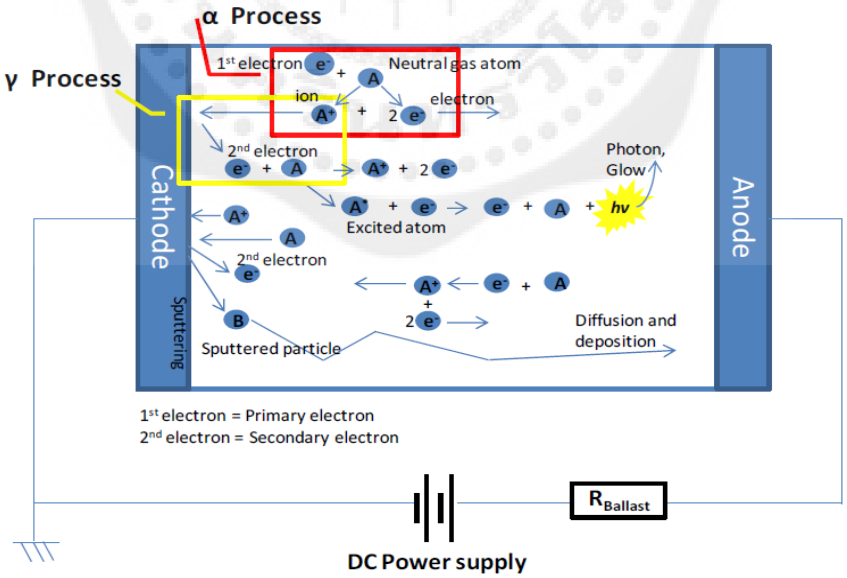
กราฟแสดงการเบรกดาวน์ของแก๊สแบ่งออกเป็น 3 ระยะ คือ

ที่ระยะ T_1 จะเห็นว่ากระแส (i_0) เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เพราะว่า แก๊สเริ่มมีการแตกตัวเป็นไอออนมากพอที่จะเริ่มนำไฟฟ้าได้ โดยอิเล็กตรอนและไอออนลบวิ่งเข้าหาแอโนด และไอออนบวกวิ่งเข้าหาแคโทด การเคลื่อนที่ของอนุภาคเช่นนี้จะทำให้เกิดกระแสไหนตามกฎของโอห์ม

ที่ระยะ T_2 กระแส (i_0) ที่ไหลค่อนข้างคงที่ เพราะว่า กระแสไม่เพิ่มขึ้นตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น เกิดจากอิเล็กตรอนที่ออกจะแคโทดเคลื่อนที่ไปแอโนดจนหมดหรืออาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการป้อนแก๊ส

ที่ระยะ T_3 กระแส (i_0) จะไหลอย่างรวดเร็วและมีปริมาณมาก เพราะอิเล็กตรอนเข้าชนโมเลกุลที่เป็นกลาง เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนบวก กระแสที่เพิ่มขึ้นเป็นเอกซโปเนนเชียลเกิดจากอิเล็กตรอนและไอออนบวกมีจำนวนมากขึ้น เมื่อแรงดันที่จ่ายให้เพิ่มถึงค่าวิกฤตจะเกิดการเบรกดาวน์ขึ้น และในที่สุดก็จะเกิดการเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ (Completely Breakdown)

ในรูปภาพที่ 2.2 เป็นเครื่องสร้างพลาสมาในหลอดสุญญากาศโดยใช้ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะเรียบๆ 2 แผ่น อยู่ห่างกันในหลอดสุญญากาศซึ่งมีความดันต่ำและบรรจุแก๊สอาร์กอนไว้เพียงเล็กน้อย และใช้ตัวต้านทานเพื่อควบคุมการไหลของกระแสในวงจร โดยต่ออนุกรมเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะอธิบายวิธีการที่ทำให้เกิดอนุภาคอิสระที่มีประจุ



รูปที่ 2.2 เครื่องสร้างพลาสมาในหลอดสุญญากาศโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มา : MATRA, Khanit. 2013

2.2.2 วิธีการที่ทำให้เกิดอนุภาคอิสระที่มีประจุ

จากรูปที่ 2.2 ขณะที่แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อิเล็กตรอนตัวแรก (background electron) ที่เกิดจากแหล่งจ่ายภายนอก เช่น รังสีคอสมิก รังสีอัลตราไวโอเลต และ รังสีเอกซ์ ที่อยู่ในหลอดสุญญากาศจะวิ่งไปที่ขั้วแอโนด และการให้ความต่างศักย์ที่สูงพอจะทำให้อิเล็กตรอนตัวแรกที่มีพลังงานสูงมีโอกาสที่จะวิ่งไปชนอะตอมหรือโมเลกุลอื่น การชนที่สำคัญที่สุดคือการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ซึ่งทำให้เกิดการแตกตัวของประจุ การชนแบบนี้จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานแบบไม่อนุรักษ์พลังงาน ในระหว่างการชนและการกระตุ้น อย่างไรก็ตามอะตอมที่แตกตัว ไอออนและอิเล็กตรอนอาจมีการลดพลังงานลงในระหว่างการชนได้เช่นกัน อิเล็กตรอนตัวแรกจะส่งผ่านพลังงานไปยังอะตอม ที่เป็นกลางผ่านทางการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ไอออนบวกและอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ภายในอะตอมที่เป็นกลางหรือโมเลกุลที่เป็นกลางได้รับพลังงานเพียงพอ (เป็นพลังงานที่สูงกว่าพลังงานการแตกตัวของประจุ) ในระหว่างการชน หรือที่เรียกว่า การแตกตัวของประจุเนื่องจากอิเล็กตรอน (Electron impact ionization)

แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ให้ความต่างศักย์ไม่สูงมากพอ กระบวนการแตกตัวเป็นประจุจำเป็นต้องอาศัยแหล่งพลังงานภายนอกในการให้พลังงานกับอะตอมหรือโมเลกุลแก๊ส ดังที่กล่าวมาข้างต้น การที่กระบวนการแตกตัวเป็นประจุไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นน้อยเรียกว่า การดิสชาร์จแบบไม่ประทังตัวเอง (Non-self-sustaining Discharge)

โดยวิธีการที่ทำให้เกิดอนุภาคอิสระที่มีประจุนั้น จะมีกระบวนการที่สำคัญอยู่ 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการเกิดอิเล็กตรอนขั้นที่ 1 (Primary Electron) และ การบวนการเกิดอิเล็กตรอนขั้นที่ 2 (Secondary Electron) โดยกระบวนการเหล่านี้จะนำไปสู่การการแตกตัวของประจุจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์ที่สมบูรณ์

2.2.2.1 กระบวนการเกิดอิเล็กตรอนขั้นที่ 1

สมมติว่าอิเล็กตรอนตัวแรก (background electron) 1 ตัว ทำให้เกิดอนุภาคประจุบวก 1 ตัว และอิเล็กตรอน 1 ตัว ในการชน 1 ครั้งสรุปได้ว่ามีอนุภาคประจุบวก 1 ตัว กับ อิเล็กตรอน 2 ตัว นี้คือ กระบวนการเกิดอิเล็กตรอนขั้นที่ 1 อนุภาคประจุบวกจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด ขณะที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนดนี้อาจจะไปชนกับอะตอมที่เป็นกลางและทำให้เกิดการแตกตัวของประจุได้อีกต่อไปเรื่อยๆกลุ่มของอนุภาคประจุบวกและอิเล็กตรอนที่เกิดในขบวนการนี้ เรียกว่า การเพิ่มทวีคูณของประจุบวกและอิเล็กตรอน (Electron Avalanches) ที่เกิดจากจากอิเล็กตรอนอิสระเรียกว่า การบวนการแอลฟา (α-process) หรือ Primary Ionization process electrons ที่เกิดจากกระบวนการนี้เรียกว่า แอลฟาอิเล็กตรอน (α-electron)

α คือ ตัวเลขของค่าเฉลี่ยของการชนที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนตัวแรก 1 ตัวต่อหน่วยที่เคลื่อนที่จากขั้วลบไปยังขั้วบวกในสนามไฟฟ้า (Townsend's First Ionization Coefficient) การไหลของอิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวกการแตกตัวของประจุทำให้เกิดไฟฟ้าในวงจรและกระแสไฟฟ้าคำนวณได้จาก

$$I = I_0 e^{\alpha d} \tag{2.1}$$

I_0 คือ กระแสเริ่มต้นไหลระหว่างขั้วไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอนตัวแรก

d คือ ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า

$e^{\alpha d}$ คือ จำนวนอิเล็กตรอนเกิดจากอิเล็กตรอน 1 ตัวที่วิ่งชนอะตอมระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

2.2.2.2 กระบวนการเกิดอิเล็กตรอนขั้นที่ 2

เนื่องจากสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมีความเข้มสูง (High Electric Density) ทำให้ประจุบวกที่เกิดจากกระบวนการแอลฟาจะเคลื่อนที่ไปชนเข้ากับแผ่นโลหะที่เป็นขั้วแคโทด ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแผ่นโลหะ และอิเล็กตรอนนี้จะเคลื่อนที่ไปยังแผ่นโลหะที่เป็นขั้วแอโนด ระหว่างที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนดนั้นจะเกิดการชนกับอะตอมและโมเลกุลอื่นจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมและโมเลกุลเหล่านั้น ซึ่งจะนำไปสู้กระบวนการขั้นต่อไป ที่เรียกว่า กระบวกการเกิดอิเล็กตรอนขั้นที่ 2 (Secondary Electron)

เมื่อ γ คือ ค่าเฉลี่ยของอิเล็กตรอนขั้นที่ 2 (Townsends Secondary Ionization Coefficiency) ที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดต่อการชนของอนุภาคประจุบวก ดังนั้น อิเล็กตรอนขั้นที่ 2 สามารถเรียกว่า แกมมาอิเล็กตรอน (γ-electron)

แกมมาอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดเนื่องจากมีมวลน้อยจึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงในสนามไฟฟ้า ไปยังขั้วแอโนดและทำหน้าที่เป็น อิเล็กตรอนขั้นที่ 1 (Primary Electron) ในการเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น จะทำให้เกิดเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณของอิเล็กตรอน นั่นหมายถึง กระบวกการแอลฟา และ กระบวนการแกมมา จะเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันหรือเวลาเวลาที่ใกล้เคียงกันมาก จะเห็นได้ชัดเจนว่า กระบวกการแอลฟา และกระบวนการแกมมา มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มของอิเล็กตรอนอย่างทวีคูณ จำนวนของอิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวกการแอลฟาและกระบวนการแกรมมา จะเกิดขึ้นตามความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเข้มสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย อิเล็กตรอนเหล่านี้จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด และกระแสไฟฟ้าเพิ่มในอัตราที่สอดคล้องตามสมการ (2.2)

$$\gamma[exp^{\alpha d} - 1] = 1 \quad (2.2)$$

เมื่อเกิดการเบรกดาวน์ หรือมีกระแสไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด สมการ (2.2) จะเป็นจริงตามเงื่อนไขการเบรกดาวน์ของทาวน์เซน โดยสภาพการเกิดการดิสชาร์จของแก๊สที่สอดคล้องตามเงื่อนไขการเบรกดาวน์ของทาวน์เซนนี้ จะเรียกว่า การดิสชาร์จแบบประทังตัวเองได้ (self - sustaining discharge) หมายถึง แม้เอาแหล่งจ่ายพลังงานภายนอกที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนตัวแรกออกจากระบบ การดิสชาร์จของแก๊สก็จะสามารถดิสชาร์จต่อไปได้ จะเห็นว่า ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมีความสำคัญต่อกระบวนการการดิสชาร์จของแก๊ส

2.2.3 กฎของพาสเชน

ตามกฎการเบรกดาวน์ของทาวน์เซน จากหัวข้อ 2.2.1 ทำให้เราทราบค่าโดยประมาณแรงดันเบรกดาวน์ของแก๊ส (Gas Breakdown Voltage) ได้สำหรับสนามไฟฟ้าแบบมาตรฐาน

สนามไฟฟ้าสามารถหาได้ จากสูตร

$$E = V/d \quad (2.3)$$

เมื่อค่า

E คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วไฟฟ้า

V คือ แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย

d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

จากสมการ (2.2) สามารถจัดค่าได้

$$d = ln(1/\gamma + 1)/\alpha \quad (2.4)$$

หาค่า V_{BR} สามารถใช้สมการ (2.3) แทนที่ในสมการ (2.4)

$$V_{BR} = E \cdot [ln(1/\gamma + 1)]/\alpha \quad (2.5)$$

ตามความสัมพันธ์ของ E และ d

$$\alpha/\gamma = A \cdot exp(-Bp/E) \quad (2.6)$$

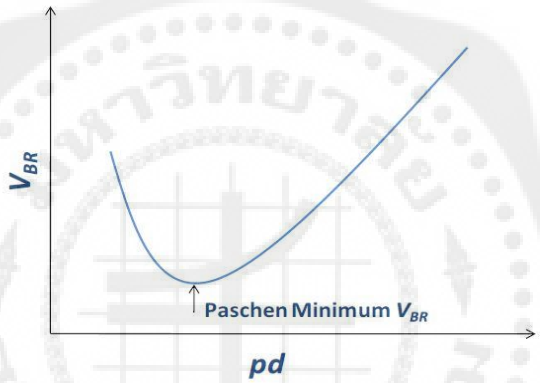
เมื่อค่า P คือ ความดันของแก๊ส

A และ B เป็น แก๊สที่มีค่าคงที่

จากสมการ (2.5) และ (2.6) ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ (V_{BR}) สามารถแสดงค่าได้ดังนี้

$$V_{BR} = E \cdot [Bpd\ /ln[Apd/\ln(1/\gamma\ +1)]] \qquad (2.7)$$

สมการนี้เรียกว่า สมการของพาสเชน (Paschen's equation) ตั้งชื่อตาม Friedrich Paschen นักฟิสิกส์ที่ค้นพบในปี 1889 จากสมการนี้จะสังเกตเห็นว่าค่าศักย์แตกตัว จะขึ้นอยู่กับผลคูณระหว่าง $p{\cdot}d$ รูปที่ 2.3 แสดง กราฟของพาสเชน (Paschen's curve) ของ V_{BR} ซึ่งได้จากการคำนวณได้จากสมการ (2.7) ที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง $p{\cdot}d$



รูปที่ 2.3 กราฟของพาสเชน ของแก๊สอิสระระหว่างระนาบคู่ขนานขั้วไฟฟ้า
ที่มา : MATRA, Khanit. 2013

จากสมการของของพาสเชน (Paschen's equation) และรูปที่ 2.3 จะเห็นว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ ($V_{BR,min}$) ที่มีค่าน้อยที่สุด จะสามารถหาค่าโดยประมาณได้จากความสัมพันธ์ $p{\cdot}d$ กราฟของพาสเชนจะพิจารณาโดยแบ่งกราฟออกเป็น 2 กรณี โดยให้จุดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่มีค่าน้อยที่สุด ($V_{BR,min}$) เป็นจุดแบ่ง ถ้าพิจารณากราฟของพาสเชนทางด้านซ้ายของ ($V_{BR,min}$) กำหนดให้ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (d) เป็นค่าคงที่ และให้ความดันแก๊ส (p) เพิ่มขึ้นจากซ้ายไปขวาของกราฟแกนนอน จะเห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ (V_{BR}) จะลดลงตามความดันแก๊สที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง $p{\cdot}d$ เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (d) เป็นค่าคงที่ และเพิ่มความดันแก๊ส (p) จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ (V_{BR}) ลดลงจากซ้ายไปขวาตามแนวแกนนอนของกราฟของพาสเชน โดยจุดที่มีความดันแก๊สต่ำๆจะทำให้ความหนาแน่นของแก๊สที่เบาบางมาก ปริมาณของอะตอมและโมเลกุลของแก๊สมีน้อย ทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการชนอาจจะไม่เพียงพอ จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์มีค่าสูงกว่าจุดที่มีความดันแก๊สสูง

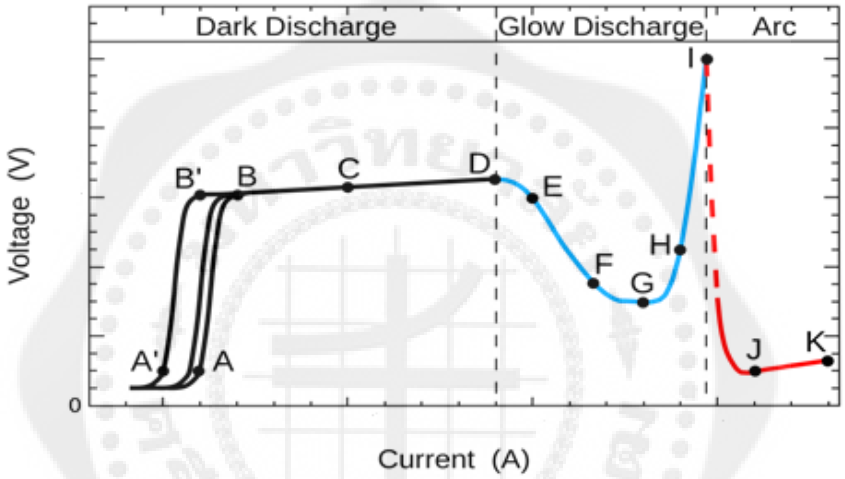
ถ้าพิจารณาด้านขวาของค่าของ ($V_{BR,min}$) กำหนดให้ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (d) ลดลงจากขวาไปซ้ายของกราฟแกนนอน และให้ความดันแก๊ส (p) เป็นค่าคงที่ จะเห็นว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ (V_{BR}) ที่มีค่าลดลงตามระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ลดลงจากขวาไปซ้ายตามแนวแกนนอนของกราฟของพาสเชน โดยจุดที่มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกว้างๆจะมีระยะทางในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สที่ยาวกว่า และ มีความหนาแน่นของแก๊สที่น้อยมาก ซึ่งทำให้โอกาสที่อิเล็กตรอนจะชนกับอะตอมและโมเลกุลแก๊สอื่นๆมีน้อยมาก จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์มีค่าสูงกว่าที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแคบๆ จากการพิจารณากราฟของพาสเชนทั้ง 2 กรณีแล้ว ถ้าต้องการที่จะเพิ่มความเป็นไปได้ในการเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) จำเป็นต้องให้ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระบบเพื่อที่จะเร่งความเร็วของอิเล็กตรอนและประจุบวก เพื่อให้เกิดการชนกับอะตอมและโมเลกุลอื่นๆให้มีความรุนแรงจะนำไปสู้การเบรกดาวน์เร็วขึ้น

2.2.4 กฎความคล้าย

จากกราฟของพาเชนนั้นใช้อธิบายการเกิดแรงดันเบรกดาวน์ต่ำที่สุดของแก๊ส ($V_{BR,min}$) ที่ผลคูณของแรงดัน (p) และระยะห่างของขั้นอิเล็กโทรด (d) นั้นๆ ซึ่งจากกฎความคล้ายจะอ้างอิงถึงการหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่อัตราส่วนของสนามไฟฟ้ากับแรงดัน (E/p) เท่ากัน ถ้าอัตราส่วน ของ สนามไฟฟ้ากับแรงดัน เป็นอัตราส่วนที่คงที่จะส่งผลทำให้ แรงดันเบรกดาวน์มีค่าเท่าเดิม โดยจากกฎความคล้าย ถ้าทำการสร้างพลาสมาที่บรรยากาศของโลก ซึ่งมีค่าแรงดันที่สูงมาก จะต้องทำการลดระยะของขั้วอิเล็กโทรดลง เพื่อทำให้อัตราส่วนระหว่างค่าสนามไฟฟ้ากับแรงดันมีค่าเท่าเดิม ซึ่งจากความสัมพันธ์นี้ในกฎของความคล้ายจะทำให้สามารถสร้างพลาสมาที่แรงดันก๊าซสูงๆได้โดยทำการลดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเพื่อให้อัตราส่วนระหว่างค่าสนามไฟฟ้ากับค่าแรงดันคงที่ซึ่งจะทำให้ได้แรงดันเบรกดาวน์ยังคงไม่สูงมาก ดังกฎความคล้ายจึงมีสำคัญในการนำมาให้ในการสร้างพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ

2.3 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ

เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด แก๊สที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดการดิสชาร์จนั้นเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดการเปลี่ยนคุณสมบัติของแก๊ส จากคุณสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าไปสู่คุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้า โดยคุณลักษณะของการดิสชาร์จนั้นจะถูกกำหนดด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันดิสชาร์จ และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับความเครียดสนามไฟฟ้า รูปที่ 2.4 จะใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันดิสชาร์จ



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ
ที่มา : http://commons.wikimedia.org/wiki/File:GlowDischargeVoltAmpere.jpg

ช่วงที่ 1 การดิสชาร์จแบบไม่เรืองแสง (Dark Discharge)

การดิสชาร์จแบบไม่เรืองแสง หรือที่เรียกว่า การดิสชาร์จแบบทาวเซน เป็นช่วงที่เกิดการดิสชาร์จแบบประทังตัวเองไม่ได้ (non - self sustained) ช่วงจุด A-D เป็นช่วงที่เริ่มป้อนแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น (threshold – voltage) โดยในช่วงจุด A-B กระแสจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน เพราะแก๊สเริ่มเริ่มแตกตัวเป็นไอออนมากพอที่จะนำไฟฟ้าได้ โดยอิเล็กตรอนและไอออนลบเคลื่อนที่เข้ามาขั้วแอโนดและไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด การเคลื่อนที่ของอนุภาคเช่นนี้จะทำให้มีกระแสไหลตามกฎของโอห์ม แล้วกระแสจะเริ่มอิ่มตัวในช่วงก่อนถึงจุด B อาจเกิดจากอิเล็กตรอนที่ออกจากขั้วแคโทดไปถึงแอโนดจนหมด กระแสไม่เพิ่มขึ้นตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง หลังจากจุด B ที่ทำให้กระแสจะเพิ่มขึ้นอีกรอบในลักษณะเอกโปเนนเชียล เพราะเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนชนกับอะตอม

หรือโมเลกุลอื่นรุนแรงขึ้น ทำให้เกิดอนุภาคอิสระต่างๆมากขึ้น การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิสระเหล่านั้น จะทำให้มีกระแสไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นจนถึงค่าวิกฤต คือจุด D แก๊สจะเกิดการเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ จนเป็นการดิสชาร์จแบบเรืองแสง

ช่วงที่ 2 การดิสชาร์จแบบเรืองแสง (Glow Discharge)

จาก ช่วงจุด C ถ้าเราทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นไปอีกกระแสที่ได้จะเพิ่มขึ้นมากกว่าเอกซโปเนนเชียล ดังอธิบายไว้ในช่วงการดิสชาร์จแบบไม่เรืองแสง จนถึง จุด D เรียกจุดนี้ว่า จุดเบรกดาวน์ (breakdown) เมื่อเกิดการเบรกดาวน์แล้ว แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรดจะลดลง แต่กระแสไหลเพิ่มขึ้นมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเกิดการเบรกดาวน์ขึ้นแล้วเป็นช่วงที่เรียกว่าการดิสชาร์จจะแบบประทังตัวเองได้ (self - sustaining discharge) ที่จุด E ถ้าเราให้กระแสให้เพิ่มขึ้นต่อไปเรื่อยๆ แรงดันที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรดดิสชาร์จจะลดลงจนเหลือต่ำที่สุด ที่จุด F เป็นช่วงที่ดิสชาร์จเริ่มเกิดการเรืองแสง (Subnormal glow) จนถึงจุด G การดิสชาร์จจะเรืองแสงเป็นพลาสมา (Normal glow) เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงดิสชาร์จเรืองแสงปกติ (normal glow discharge) หลังจากถึงช่วงที่แก๊สเกิดการดิสชาร์จเรืองแสงปกติแล้ว เมื่อเราทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นต่อไปอีก ช่วงจุด H – I การดิสชาร์จที่เกิดขึ้นจะเป็นการดิสชาร์จเรืองแสงไม่ปกติ (abnormal glow discharge) จะทำให้พลาสมามีอุณหภูมิสูงขึ้นจนนำไปสู่การเกิด อาร์คดิสชาร์จ

ช่วงที่ 3 อาร์คดิสชาร์จ (Arc - Discharge)

ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นไปอีก จนถึงจุด I ในที่สุดจะเกิดปรากฏการณ์ของดิสชาร์จที่ เรียกว่าอาร์คดิสชาร์จ ช่วงจุด J - K เกิดจากอิเล็กตรอนหลุดจากขั้วแคโทดด้วยความร้อนสูงและอิเล็กตรอนที่มีความร้อนสูงเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่นด้วยความเร็วและรุนแรง ทำให้การชนมีพลังงานสูงเกิดความร้อน จนมีแสงจ้าเกิดขึ้นจากลำอาร์ค (Arcing Discharge)

ที่มา : สำรวย สังข์สะอาด (2549)

2.4 การแบ่งประเภทของพลาสมาโดยใช้อุณหภูมิเป็นเกณฑ์

พลาสมา เราสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักๆ โดยใช้อุณหภูมิเป็นเกณฑ์ คือ พลาสมาอุณหภูมิสูง หรือที่เรียกว่า ฟิวส์ชันพลาสมา และพลาสมาอุณหภูมิต่ำ การแบ่งอุณหภูมิของพลาสมาโดยทั่วไปจะกำหนดตามความแตกต่างอุณหภูมิของอนุภาคต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e) อุณหภูมิของไอออน (T_i) โดยอุณหภูมิของอนุภาคเหล่านั้นจะส่งผลต่ออุณหภูมิของแก๊ส (T_g) และอุณหภูมิของพลาสมา (T_p) ด้วย โดยการแบ่งอุณหภูมิพลาสมาเป็นไปตามตารางที่ 2.1 โดยพลาสมาอุณหภูมิสูงทุกประเภทจะอยู่ในสภาพสมดุลความร้อน และพลาสมาอุณหภูมิต่ำจะอยู่ในสภาพกึ่งสมดุลความร้อน หรือ อยู่ในสภาพไม่สมดุลความร้อน

ที่มา : Lieberman, M.A., & Lichtenberg, A. J. (1994)

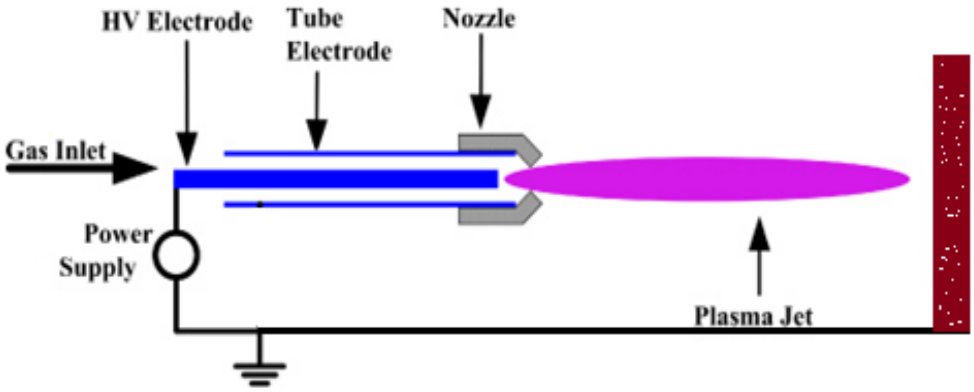
ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของลำพลาสมาตามอุณหภูมิของพลาสมา
ที่มา : Lieberman, M.A., & Lichtenberg, A. J. (1994)

พลาสมา	สภาพ	ตัวอย่างพลาสมา
พลาสมาอุณหภูมิสูง (สภาพสมดุลความร้อน)	$T_e \approx T_i \approx T_g, T_p = 10^6 - 10^8 K$ $n_e \geq 10^{20}\ m^{-3}$	เลเซอร์พลาสมา ฟิวส์ชันพลาสมา
	พลาสมาอุณหภูมิต่ำ	
พลาสมาร้อน (สภาพกึ่งสมดุลความร้อน)	$T_e \approx T_i \approx T_g \leq 2 \times 10^4 K$ $n_e \geq 10^{20}\ m^{-3}$	พลาสมาอาร์ค
พลาสมาเย็น (สภาพไม่สมดุลความร้อน)	$T_e \gg T_i \approx T_g = 300 - 10^3 K$ $n_e \approx 10^{10}\ m^{-3}$	ดิสชาร์จแบบปกติ โคโรนาดิสชาร์จ ลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ

ในโครงงานนี้ เราสนใจที่จะศึกษาพลาสมาอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากพลาสมาอุณหภูมิต่ำสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ทั้งในชีวิตประจำวันและในอุตสาหกรรม เช่น ด้านอุตสาหกรรมการเกษตร ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านชีวะการแพทย์ และด้านอื่นๆ โดยพลาสมาอุณหภูมิต่ำยังสามารถแบ่งออกได้อีกหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของเครื่องสร้างพลาสมา เช่น แบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ แบบไมโครไมโครฮอลโลว์แคโทด แบบพลาสมาเจ็ท ซึ่งในโครงงานนี้ เราจะมุ่งเน้นไปที่การสร้างพลาสมาเจ็ทอุณหภูมิต่ำ

2.5 ลำพลาสมา (Plasma Jet)

พลาสมาเจ็ท หรือ ลำของพลาสมา คือ พลาสมาที่ถูกฉีดออกจากหัวฉีด (Nozzle) ตามทิศทางของแรงดันแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ลำพลาสมาที่ได้จากระบบนี้ เกิดจากการกระตุ้นแก๊สด้วยไฟฟ้าแรงสูง พลาสมาถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดมีทิศทางตามทิศทางการไหลของแก๊สและความดันแก๊ส นอกจากนี้ทิศทางของลำพลาสมาจะถูกกำหนดด้วยขั้วอิเล็กโทรดที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยลำพลาสมาจะมีทิศทางพุ่งออกจากขั้วไฟฟ้าแรงสูงไปยังขั้วไฟฟ้าแรงดันต่ำ ความยาวของลำพลาสมาจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ความดันของแก๊ส ชนิดของแก๊ส ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเครื่องสร้างลำพลาสมา

ที่มา : Katsuhisa Kitano and Satoshi Hamaguchi. (2012)

รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของเครื่องสร้างลำพลาสมา ซึ่งเป็นการนำเอาหลักการการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงมาสร้างลำพลาสมา โดยโครงสร้างนี้ให้แก๊สไหลผ่านขั้วไฟฟ้าแรงดันสูง ซึ่งต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง ลำพลาสมาจะถูกปล่อยออกมาจากปลายของขั้วไฟฟ้าแรงดันสูงตามทิศทางการไหลของแก๊สออกจากหัวฉีดซึ่งเป็นขั้วแอโนดไปยังกราวด์ซึ่งเป็นขั้วแคโทด ลำพลาสมาเมื่อออกจากหัวฉีดแล้วจะทำหน้าที่เสมือนสายตัวนำระหว่างขั้วอิเล็กโทรด หมายถึงมีกระแสไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรดตาม ลำพลาสมาจะกลับเข้าสู่สถานะแก๊สอีก โดยอิเล็กตรอนจะพยายามที่จะดึงดูดเข้ากับไอออนบวก และกลับมารวมตัวกันเป็นอะตอมในสถานะแก๊สอีกครั้ง ซึ่งที่เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การกลับเข้าสู่สถานะเดิม (Recombination)

2.6 ประโยชน์ที่ได้จากลำพลาสมา

เนื่องจากลำพลาสมาเป็นพลาสมาที่มีลักษณะที่ถูกออกแบบมาเพื่อสามารถนำมาการประยุกต์ใช้งานได้ง่ายและหลายด้านไม่ว่าจะเป็นทางด้านอุตสาหกรรมโดยสามารถนำเอาลำพลาสมาไปตัดชิ้นส่วนให้ได้ตามแบบที่ต้องการ หรือทางด้านชีวภาพก็ยังสามารถนำมาประยุกต์ให้กับเซลล์ของสิ่งมีชีวิตได้ ทั้งนี้เพื่อทดแทนการใช้เคมีบำบัดแบบดั้งเดิมซึ่งการใช้เคมีบำบัดส่งผลให้มีผลกระทบต่อเซลล์สุขภาพดีอื่นๆข้างเคียงด้วย ทั้งนี้ในการใช้ลำพลาสมา เพื่อใช้ในงานแต่ละด้านจึงต้องคำนึงถึงคุณลักษณะของลำพลาสมาด้วย เนื่องจาก ชนิดของก๊าซ อัตราการไหลของแก๊ส กระแสที่ใช้ แรงดันไฟฟ้า และขนาดของหัวฉีด ล้วนแล้วแต่ มีผลทำให้คุณลักษณะของลำพลาสมาเปลี่ยนไปทั้งสิ้น อาทิเช่น ถ้าอัตราการไหลของก๊าซต่ำลำพลาสมาจะมีความร้อนที่สูง ซึ่งเหมือนสำหรับนำไปให้กับงานเชื่อมโลหะในอุสาหกรรม หรือในกรณีที่ พลาสมาเจ็ทที่ความดันบรรยากาศ

และมีอุณหภูมิต่ำมาก ก็สามารถนำไปใช้กับงานที่เกี่ยวข้อกับเซลล์ของสิ่งมีชีวิตได้ เป็นต้น ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาคุณสมบัติของลำพลาสมาเพื่อที่จะได้นำข้อมูลมาประยุกต์ใช้ได้อีกในการควบคุมหรือการนำลำพลาสมาเมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยโครงงานนี้จะมุ่งเน้นการสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ เพื่อศึกษาคุณลักษณะด้านต่างๆของลำพลาสมา เพื่อให้ได้ลำพลาสมาที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ให้ตรงกับคุณลักษณะของลำพลาสมาที่ได้ โดยจะได้ออกแบบเครื่องต้นแบบเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำและศึกษาคุณลักษณะของลำพลาสมาที่ได้จากเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ได้จากเครื่องต้นแบบนี้ และนำผลการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์ในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น การออกแบบเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำในรูปแบบอื่นๆ เพื่อให้ได้ลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำตามลักษณะการนำไปใช้งาน และการนำลำพลาสมาไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยจะอธิบายในบทต่อไป

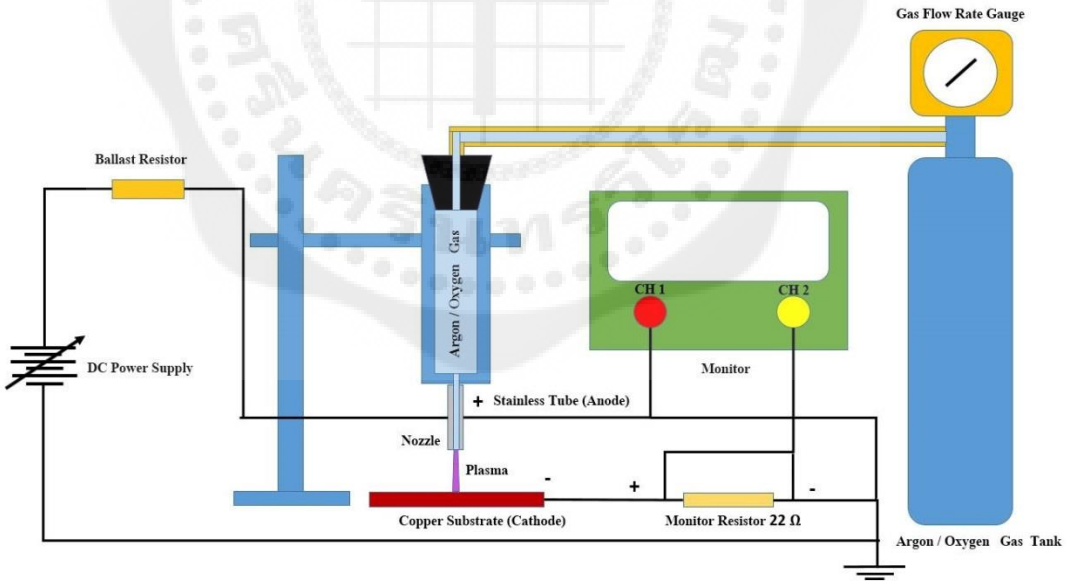
บทที่ 3

การออกแบบโครงสร้างและออกแบบการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึง แนวคิดการออกแบบโครงสร้างในส่วนต่างๆของเครื่องต้นแบบเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ อธิบายโครงสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ หลักการทำงาน การเลือกขนาดตัวต้านทาน การเลือกชนิดของแก๊ส รวมทั้งขั้นตอนการศึกษาทดลองและการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ออกแบบโครงสร้างเครื่องสร้างลำพลาสมา

โครงสร้างเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงนั้นประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญต่างๆและได้อธิบายการทำหน้าที่และหลักการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ เพื่อให้เข้าใจแต่ละอุปกรณ์ โดยแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

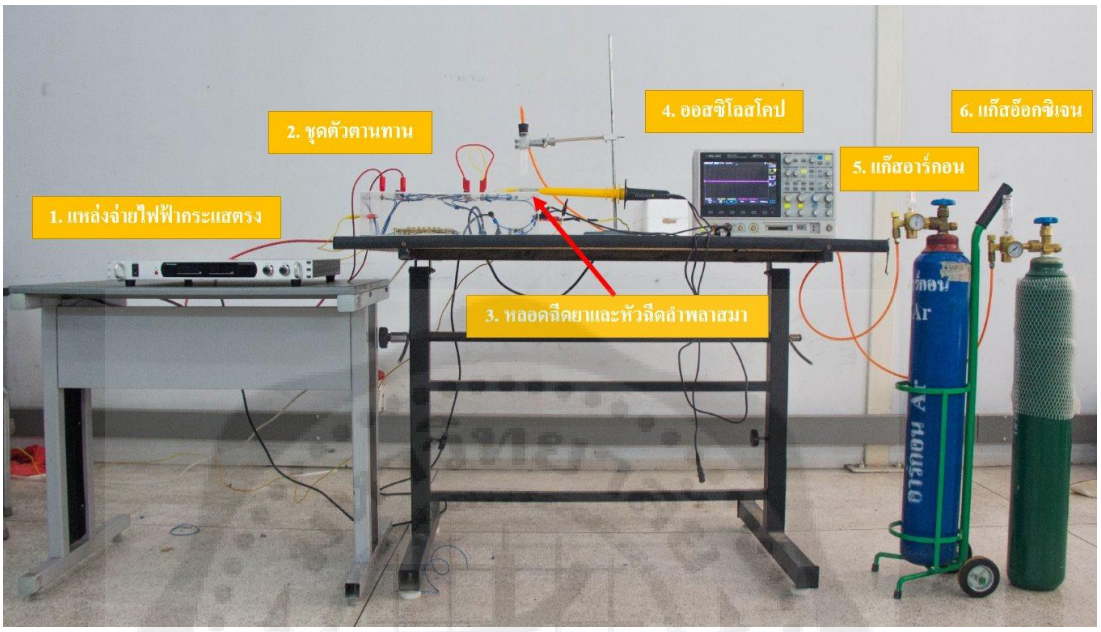


รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ออกแบบไว้

ตารางที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์และหน้าที่เครื่องต้นแบบเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง

อุปกรณ์	หน้าที่
แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)	เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับให้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าความต่างศักย์สูงกับแก๊สอาร์กอน เพื่อให้เกิดกระบวกการแตกตัวเป็นไอออนและอนุภาคอิสระที่มีประจุ ซึ่งหมายถึงแก๊สมีคุณสมบัติเป็นพลาสมา
ตัวต้านทาน (Resister)	เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจำกัดปริมาณกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จไม่ให้มีปริมาณมากเกินไป เพื่อไม่ต้องการให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการดิสชาร์จ
หัวเข็มฉีดยา	เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับขั้วแรงดันสูงของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยกำหนดเป็นขั้วแอโนด การดิสชาร์จของแก๊สขึ้นที่ตรงปลายของหัวเข็มฉีดยานอกจากนี้ยังใช้เป็นหัวฉีด (Nozzle)
มาตรวัดอัตราการไหลแก๊ส (Gas flow rate gauge)	เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับควบคุมปริมาณการไหลของแก๊สที่ออกจากถังแก๊ส
ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)	เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พิจารณาลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ได้แก่ ลักษณะของการแสดิสชาร์จและแรงดันดิสชาร์จ

การออกแบบโครงสร้างของเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ได้ออกแบบโครงสร้างไว้ แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ใช้สร้างลำพลาสมา

อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ประกอบโครงสร้างเครื่องสร้างลำพลาสมา

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)
2. ชุดตัวต้านทาน (Resister)
3. หัวเข็ม (Stainless Tube)
4. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)
5. แก๊สอาร์กอน (Argon Gas)
6. แก๊สออกซิเจน (Oxygen)

อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างเครื่องสร้างลำพลาสมา

โครงสร้างเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำนั้น ออกแบบให้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแหล่งที่ให้พลังงานกับโมเลกุลของแก๊ส โดยให้ขั้วที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงต่อกับตัวต้านทานที่เลือกใช้และต่อเข้าหัวเข็มฉีดยา ซึ่งให้เป็นขั้วแอโนด หัวเข็มฉีดยานี้ทำหน้าที่เป็นหัวฉีดลำพลาสมา และเป็นส่วนที่รับแก๊สจากถังแก๊สด้วย และให้ขั้วแคโทดเป็นส่วนที่ต่ออยู่กับกราวด์มีคุณสมบัติเป็นขั้วศักย์ไฟฟ้าต่ำ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วแอโนด แก๊สจะเกิดไอออไนเซชันเป็นลำพลาสมาตรงบริเวณหัวฉีด ที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด และต่อช่องวัดที่ 1 ของเครื่องออสซิลโลสโคป

ผ่านโพรบวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเข้ากับขั้วแอโนด และขาลบต่อเข้ากับขั้วกราวด์ เพื่อศึกษากราฟคุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้าของพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ได้ และต่อช่องวัดที่ 2 ของเครื่องออสซิลโลสโคป ผ่านโพรบวัดแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำเข้ากับขั้วแอโนด และขาลบต่อเข้ากับขั้วกราวด์ มีตัวต้านทานต่อระหว่างขั้วแคโทดกับกราวด์

3.2 หลักการทำงาน

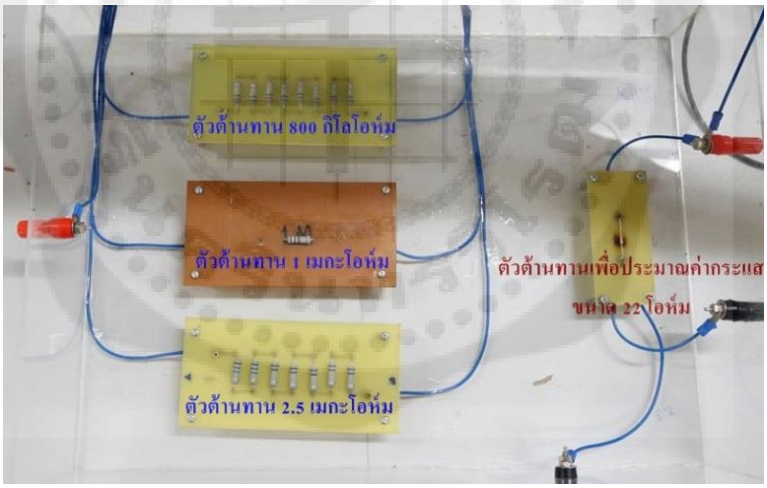
หลักการทำงานของเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศโดย ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ที่ได้ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.1 โดยการต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดพิกัดแรงดันสูงสุด 5 กิโลโวลต์ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองไม่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงไปกว่านี้ โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมต่ออยู่กับตัวต้านทานชนิดบัลลาสต์เพื่อทำหน้าที่จำกัดปริมาณกระแสที่ไม่ต้องการให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการดิสชาร์จแบบเรืองแสงปกติไปสู่ การดิสชาร์จแบบเรืองแสงไม่ปกติหรือถึงขั้นเกิดอาร์คดิสชาร์จขณะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ กับหัวเข็ม โดยปริมาณกระแสดิสชาร์จที่เหมาะสมควรจะมีค่าอยู่ระหว่าง ไมโครแอมแปร์ ถึง มิลลิแอมแปร์จะทำให้พลาสมาที่ได้มีอุณหภูมิต่ำเนื่องจากมีพลังงานที่ต่ำ และหลอดพลาสติกเชื่อมต่อกับท่อแก๊สที่รับ แก๊สจากถังแก๊ส โดยควบคุมอัตราการไหลของแก๊สด้วยมาตรวัดอัตราการไหลของแก๊ส โดยให้อัตราการไหลของแก๊สเหมาะสมกับอัตราการดิสชาร์จของแก๊สเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของการดิสชาร์จ การดิสชาร์จจะเกิดขึ้นที่ปลายเข็ม ซึ่งเป็นพื้นที่เปิดที่ความดันบรรยากาศที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เมื่อแก๊สเกิดการดิสชาร์จจนกระทั่งเกิดเป็นพลาสมา โดยพลาสมาที่ ปลายเข็มจะไหลตามทิศทางการไหลของแก๊ส ออกจากเข็มเป็นขั้วแอโนด ไปยังขั้วแคโทด พลาสมาที่ถูกฉีดออกจากปลายเข็มจะอยู่ในรูปของลำพลาสมา ซึ่งการรักษาสภาพของลำพลาสมานั้น เราจะต้องรักษาแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสม ถ้าระดับแรงดันไฟฟ้าไม่เหมาะสมอาจทำให้ลำพลาสมาที่ได้นั้นดับ หรือ เกิดการรวมตัวกลับสู่สถานะแก๊สได้ และให้อัตราการไหลของแก๊สก็เช่นกัน เพื่อให้อัตราการดิสชาร์จของแก๊สเกิดความสม่ำเสมอของการดิสชาร์จ จากนั้นจะได้ศึกษากราฟคุณลักษณะของลำพลาสมา โดยต่อเครื่องออสซิลโลสโคปช่องวัดที่ 1 เข้ากับขั้วแอโนด และกราวด์ เพื่อวัดค่าแรงดันดิสชาร์จช่องวัดที่ 2 ต่อคล่องตัวต้านทานอ้างอิง เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าคล่องตัวต้านทานอ้างอิงแล้วคำนวณ หาค่ากระแสดิสชาร์จ จากนั้นจะได้พิจารณาลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ได้แก่ ลักษณะของการแสดิสชาร์จ ($\boldsymbol{I_d}$) และแรงดันดิสชาร์จ ($\boldsymbol{V_d}$) ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (d) แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบ ($\boldsymbol{V_s}$) ขนาดของตัวต้านทาน (R) ชนิดของแก๊ส และอัตราการไหลของแก๊ส ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะถูกนำมาพิจารณาเพื่อใช้ในการควบคุมคุณสมบัติของลำพลาสมา

3.3 การเลือกขนาดของตัวต้านทาน

การเลือกใช้งานตัวต้านทานในการจำกัดขนาดของกระแสดิสชาร์จนั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ ข้อจำกัดของการใช้งานตัวต้านทานแต่ละชนิดในขณะที่มีกระแสไหลผ่าน เพื่อป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งพอที่จะสรุปได้ 4 อย่างคือ

1. ค่ากระแส I_R สูงสุดที่สามารถไหลผ่านได้โดยไม่ทำให้ตัวต้านทานเสียหาย
2. ขนาดความต้านทานที่สามารถลดทอนปริมาณกระแสให้มีความเหมาะสม
3. พิกัดกำลังสูงสุดของตัวต้านทาน
4. ข้อจำกัดการระบายความร้อนของตัวต้านทาน

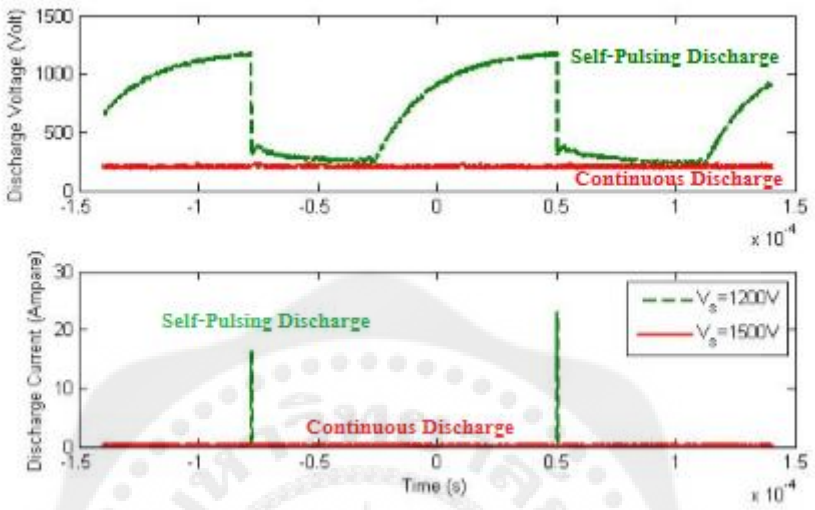
โดยตัวต้านทานที่เลือกใช้นั้นจะเป็นชนิดฟิล์มคาร์บอน ซึ่งมีคุณสมบัติทนความร้อนได้สูง และมีพิกัดกำลังสูงพอที่จะใช้ได้ โดยขนาดตัวต้านทานที่เลือกเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบปริมาณกระแสดิสชาร์จให้มีความเหมาะสมนั้นเลือกมาทั้งหมด 3 ขนาด ดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น คือ 800 กิโลโอห์ม 1 และ 2.5 เมกะโอห์ม ดังรูปที่ 3.3



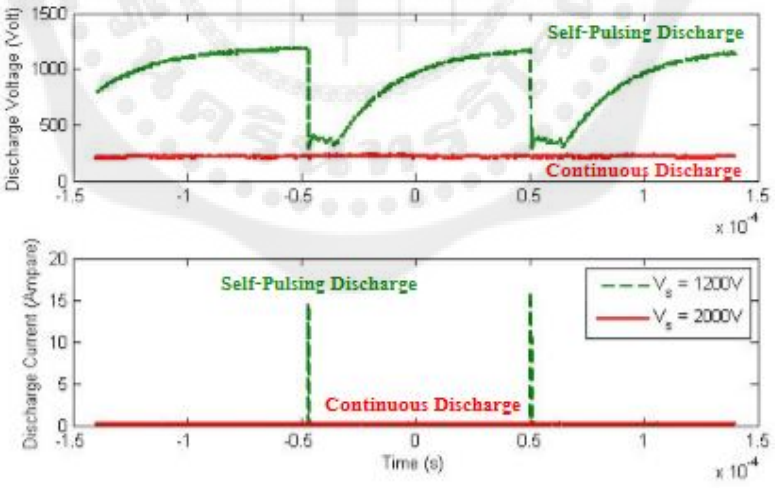
รูปที่ 3.3 ตัวต้านทานขนาด 800 กิโลโอห์ม 1 และ 2.5 เมกะโอห์ม

เมื่อนำตัวต้านทานทั้ง 3 ขนาด คือ 800 กิโลโอห์ม 1 และ 2.5 เมกะโอห์ม ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ ซึ่งจะออกในรูปแบบสัญญาณพัลส์ และเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดลำพลาสมารูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง โดยทดลองที่เงื่อนไขเดียวกัน คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดขนาด 1 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที โดยทำเลือกขนาดตัวต้านทานที่มีความเหมาะสมในการสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่มีคุณลักษณะ ตามต้องการทั้ง 2 รูปแบบ คือ รูปแบบสัญญาณพัลส์ (Self-Pulsing Discharge Mode)

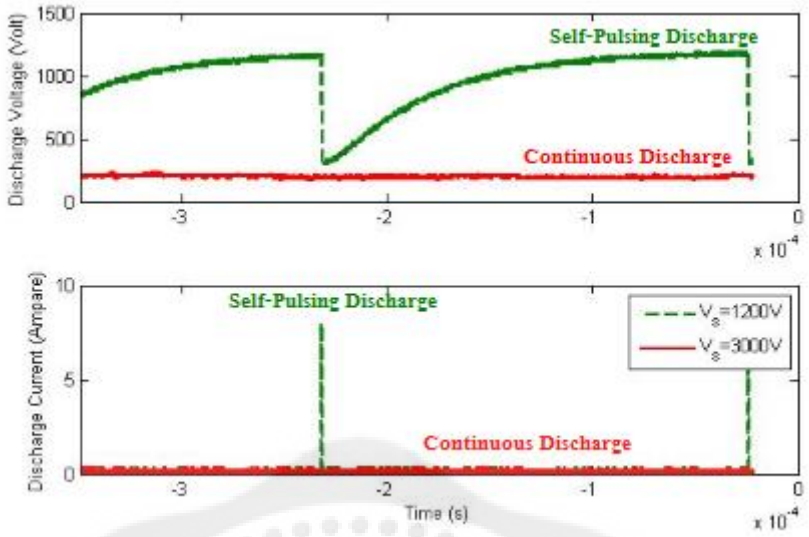
และ รูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง (Continuous Discharge Mode) เพื่อศึกษาลักษณะของการแสดิสชาร์จ (I_d) และ แรงดันดิสชาร์จ (V_d) โดยผลการทดลองจะแสดงไว้ ดังรูปที่ 3.4 - 3.6



รูปที่ 3.4 แรงดันและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในแรงดันรูปแบบสัญญาณพัลส์และรูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง ของตัวต้านทานขนาด 800 kΩ.



รูปที่ 3.5 แรงดันและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในแรงดันรูปแบบสัญญาณพัลส์และรูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง ของตัวต้านทานขนาด 1 MΩ.



รูปที่ 3.6 แรงดันและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในแรงดันรูปแบบสัญญาณพัลส์และรูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง ของตัวต้านทานขนาด 2.5 MΩ.

จากผลการทดลองจะเห็นว่า การเกิดลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์และรูปแบบสัญญาณต่อเนื่องนั้น ในลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ ขนาดของตัวต้านทานนั้นไม่ส่งผลต่อแรงดันแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ โดยค่าแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จนั้นจะมีค่าเท่ากันของตัวต้านทานทั้ง 3 ขนาด คือ 1200 โวลต์ แต่จะมีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ โดยค่ากระแสไฟฟ้าดิสชาร์จนั้นจะลดลงตามขนาดตัวต้านทานที่มากขึ้น และ ขนาดของตัวต้านทานนั้นมีผลต่อการสร้างลำพลาสมาในรูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากการทดลองค่าความต้านทานทั้ง 3 ขนาด ตัวต้านทานที่มีขนาดน้อยที่สุดคือ 800 กิโลโอห์ม จากกราฟผลการทดลอง จะเห็นว่าสามารถสร้างลำพลาสมาที่มีความต่อเนื่องได้ง่ายกว่า และแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่ต่ำกว่าค่าความต้านทาน 1 และ 2.5 เมกะโอห์ม แต่ด้วยปริมาณกระแสดิสชาร์จที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทาน 1 และ 2.5 เมกะโอห์ม จึงมีโอกาสที่ลำพลาสมาจะเป็นลำพลาสมาอุณหภูมิสูงมากกว่าที่จะเป็นเป็นลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ค่าความต้านทานมากที่สุดคือ 2.5 เมกะโอห์ม จากกราฟ ผลการทดลอง จะเห็นว่า การสร้างลำพลาสมาที่มีความต่อเนื่องจะค่อยข้างยากกว่าและแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่สูงกว่า ซึ่งอุปกรณ์การทดลองบ้างชนิดไม่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงมาก เมื่อเพิ่งระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดให้มากขึ้น เมื่อพิจารณาที่ค่าความต้านทานขนาด 1 เมกะโอห์ม จากกราฟผลการทดลองจะเห็นว่า การสร้างลำพลาสมาที่มีความต่อเนื่องนั้นใช้แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่ไม่สูงมาก ก็สามารถสร้างลำพลาสมาที่มีความต่อเนื่องได้แล้ว

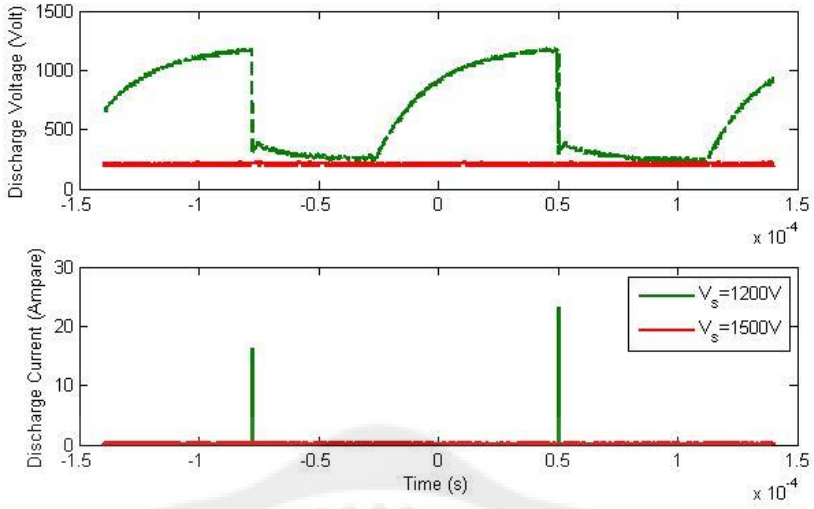
ดังนั้น ผู้ทำการทดลองจึงเลือกค่าความต้านทานขนาด 1 เมกะโอห์ม ที่มีความเหมาะสมเพื่อสร้างลำพลาสมา เพื่อพิจารณาลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ได้แก่ ลักษณะของการแสดิสชาร์จและแรงดันดิสชาร์จ ซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป

3.4 การเลือกชนิดแก๊ส

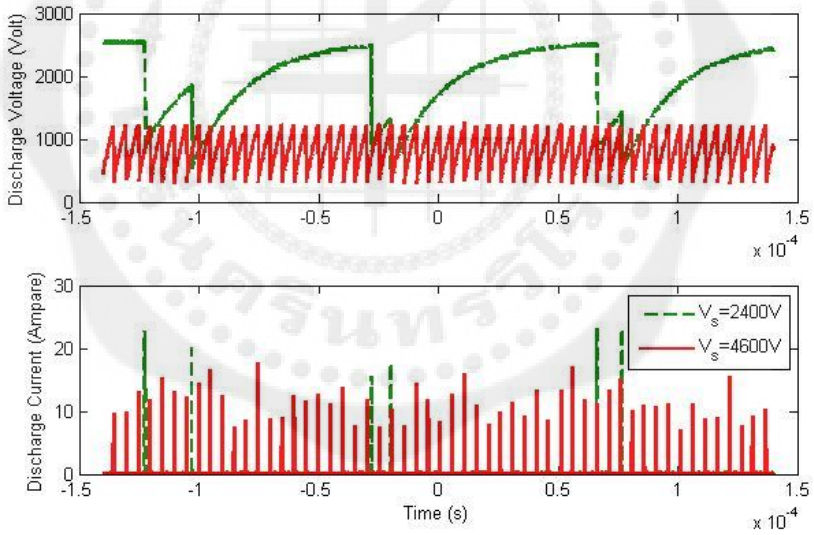
แก๊สถือว่าเป็นฉนวนไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีความสำคัญที่การใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูง โดยแก๊สแต่ล่ะชนิดมีค่าความเป็นฉนวนไม่เท่ากัน ซึ่งการทำให้แก๊สที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนเปลี่ยนคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้านั้น คือ ทำให้แก๊สเกิดกระบวนการไอออไนเซชัน ซึ่งแก๊สแต่ละชนิดต้องการพลังงานไอออไนเซชันที่ไม่เท่ากัน การเลือกชนิดแก๊สที่จะนำมาสร้างพลาสมานั้นถือว่ามีความสำคัญ ซึ่งจะทำให้ได้พลาสมาที่มีคุณสมบัติตามต้องการ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. แก๊สติดไฟได้ยากไม่ทำปฏิกิริยาขณะอุณหภูมิสูง
2. แก๊สที่ไม่เกิดผลเสียต่อสุขภาพและสภาพแวดล้อม
3. แก๊สที่มีพลังงานไอออไนเซชันที่ต่ำ จะทำให้เกิดเป็นพลาสมาได้ง่าย
4. มีคุณสมบัติไม่เป็นแก๊สไฟฟ้าลบ (Electronegative gas)
5. หาง่ายและมีราคาถูก

โดยชนิดแก๊สที่เลือกนำมาใช้ในการทดลองสร้างลำพลาสมา เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบนั้นได้เลือกแก๊ส 2 ชนิด คือ แก๊สอาร์กอน และแก๊สออกซิเจน โดยจะเลือกแก๊สที่มีความเหมาะสมเพื่อที่จะศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมาทั้ง 2 รูปแบบ คือ รูปแบบสัญญาณพัลส์ และรูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง โดยจะทำการทดลองเปรียบเทียบที่เงื่อนไขเดียวกัน คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดขนาด 1 มิลลิเมตร เนื่องจากใช้แรงดันไฟฟ้าไม่สูงมากที่ทำให้เกิดพลาสมา และอัตราการไหลของแก๊ส 1 ลิตรต่อนาที ซึ่งจะนำ ผลการทดลองมาเปรียบเทียบค่าแรงดันดิสชาร์จ และค่าแรงดันไฟฟ้ารูปแบบสัญญาณต่อเนื่องโดยจะแสดงผลการทดลองที่ได้จากแก๊สทั้ง 2 ชนิด แสดงไว้ดังรูปที่ 3.7 – 3.8



รูปที่ 3.7 แรงดันและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในแรงดันรูปแบบสัญญาณพัลส์และรูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง ของอาร์กอนพลาสมา



รูปที่ 3.8 แรงดันและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในแรงดันรูปแบบสัญญาณพัลส์และรูปแบบสัญญาณพัลส์ความถี่สูง ของออกซิเจนพลาสมา

จากกราฟผลการทดลองจะเห็นว่า แก๊สอาร์กอนนั้นเมื่อนำมาสร้างลำพลาสมา จะสามารถสร้างลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ และรูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง ได้ที่แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่ไม่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สออกซิเจน เนื่องจากออกซิเจนเป็นแก๊สไฟฟ้าลบจะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ยาก ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 ซึ่งแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้า

ของลำพลาสมาที่ได้จากแก๊สออกซิเจน จะเห็นว่ารูปแบบสัญญาณพัลส์นั้นไม่มีความสม่ำเสมอของรูปคลื่นสัญญาณพัลส์ ซึ่งหมายถึง เป็นลำพลาสมาที่ควบคุมได้ยาก ไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน และเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายถึง 4.6 กิโลโวลต์ ลำพลาสมาเกิดแบบสัญญาณพัลส์ความถี่สูง ถ้าต้องการได้พลาสมารูปแบบสัญญาณต่อเนื่องต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้สูงขึ้น ซึ่งอุปกรณ์ที่ให้ในการทดลองไม่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงเกิน 5 กิโลโวลต์ ทำให้ไม่สามารถศึกษาในรูปแบบสัญญาณต่อเนื่องที่ได้จากแก๊สออกซิเจนได้

ดังนั้นจึงเลือกใช้แก๊สอาร์กอน ในการนำมาสร้างพลาสมา เนื่องจากเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นพิษ ต้องการพลังงานไอออเซชันไม่สูงมาก ไม่มีคุณสมบัติไม่เป็นแก๊สไฟฟ้าลบ มีขายตามท้องตลาดและราคาถูก และที่สำคัญมีความเหมาะสมเพื่อที่จะศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมาทั้ง 2 รูปแบบ คือ รูปแบบสัญญาณพัลส์ และ รูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง

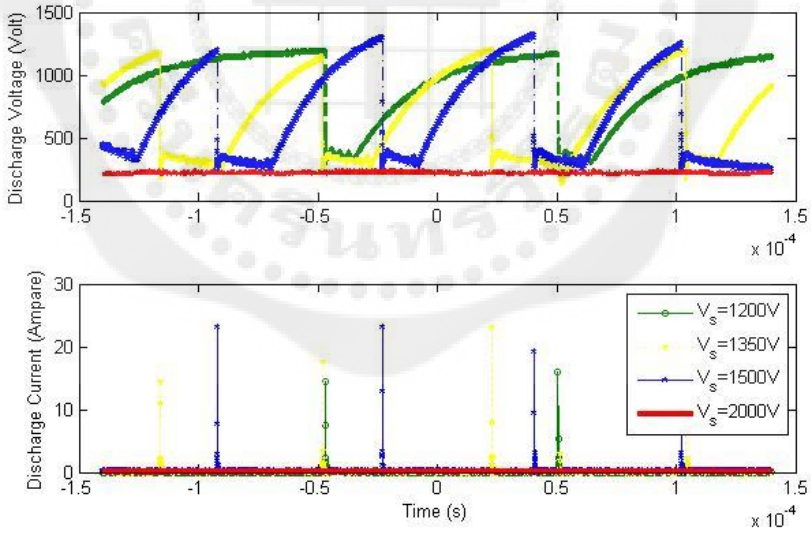
บทที่ 4

ผลการทดลองการสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองการสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง และพิจารณาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ ที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ในบทที่แล้ว ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

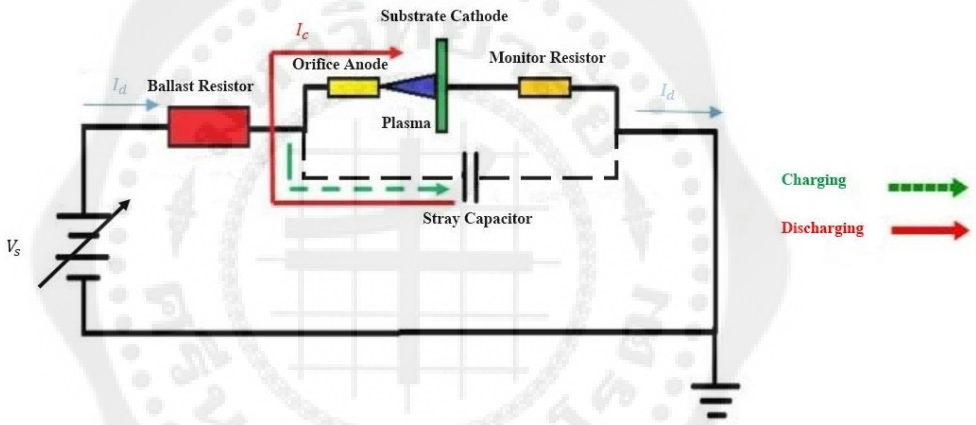
4.1 ผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์การเกิดลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ

ผลการทดลองที่ได้จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ ค่าความต้านทาน 1 เมกะโอห์ม ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 1,200 โวลต์ 1,350 โวลต์ 1,500 โวลต์ และ 2,000โวลต์ โดยมีผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมาในแรงดันรูปแบบสัญญาณพัลส์และรูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง ที่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.1 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ที่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะไม่เพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้สูงขึ้น เพราะ แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะแปลผันตรงกับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด แต่เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้สูงขึ้น จะเห็นว่าลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์จะมีความถี่เพิ่มขึ้นตามความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความถี่ของลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ จะเกิดจากความความเก็บประจุแฝง ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีความต่างศักย์ เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เวลาของการอัดประจุลดลง โดยค่าความเก็บประจุแฝงและเวลาของการอัดประจุนี้ จะอธิบายไว้ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงวงจรอนุกรมของตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 4.2 เป็นการอธิบายถึงการเกิดเก็บตัวประจุแฝงที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งตัวเก็บประจุแฝงนี้ จะทำหน้าที่สะสมประจุก่อนที่แก๊สอาร์กอนจะเกิดการเบรกดาวน์เป็นพลาสมา ซึ่งที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดนี้จะส่งผลต่อค่าเวลาและค่าความเก็บประจุแฝง ถ้าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าต่ำจะทำให้ค่าเวลาและค่าความเก็บประจุสูงขึ้นเพื่อให้เกิดการเบรกดาวน์ แต่ถ้าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าสูง ค่าความเก็บประจุลดลง ซึ่งส่งต่อความรูปของลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ ค่าความเก็บประจุของตัวเก็บประจุแฝงที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรด จะอธิบายตามสมการที่ (4.1)

สมการวงจรอนุกรมตัวต้านทานตัวเก็บประจุ

$$V_d = V_s + [V_b - V_s]e^{-t/\tau} \quad : \quad \tau = RC \quad . \tag{4.1}$$

เมื่อ V_d คือ แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์

V_s คือ แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

V_b คือ แรงดันไฟฟ้าฟื้นตัวสัญญาณพัลส์

R_B คือ ตัวต้านทานบัลลาสต์

C คือ ค่าความเก็บประจุ

t_1, t_2 คือ ค่าเวลาเริ่มต้นชาร์ตประจุและค่าเวลาสุดท้ายของการชาร์ตประจุ

ผลการคำนวณค่าความเก็บประจุที่ได้จากสมการที่ (4.1) และผลการทดลองสร้างลำพลาสมาเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายสรุปตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบผลการสร้างลำพลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายต่างกัน

	$Vs = 1200\,V$	$Vs = 1350\,V$	$Vs = 1500\,V$	$Vs = 2000\,V$
แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์	$1196\,V$	$1196\,V$	$1190\,V$	–
แรงดันไฟฟ้าฟื้นตัวสัญญาณพัลส์	$292\,V$	$256\,V$	$236\,V$	$216\,V$
กระแสไฟฟ้าเบรกดาวน์สัญญาณพัลส์	$14.55\,A$	$17.45\,A$	$23.09\,A$	$0.1818\,A$
ค่าความเก็บประจุแฝง	$23.6\ pF$	$24.38\ pF$	$25.8\ pF$	–
ค่าความถี่สัญญาณพัลส์	$10\,kH_z$	$14.08\,kH_z$	$15.7\ kH_z$	–

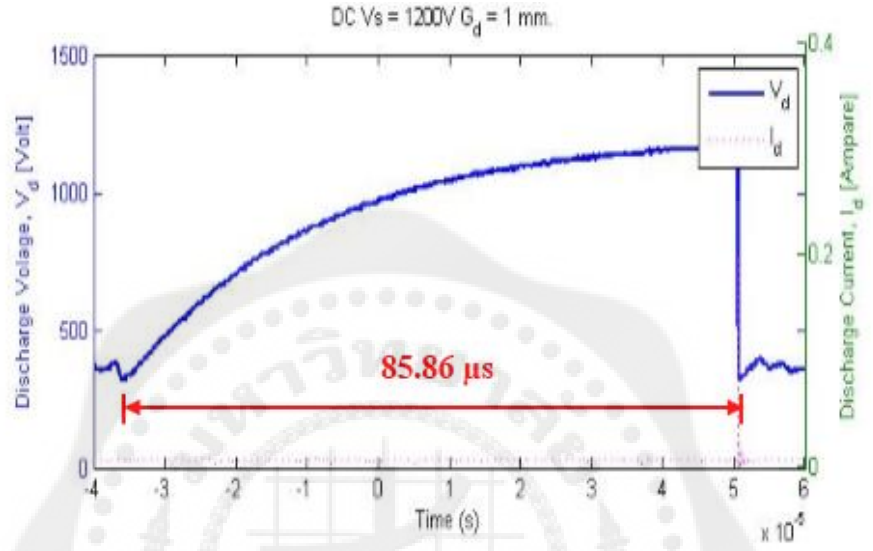
โดยเราจะใช้ผลทดลองที่เงื่อนไขนี้วิเคราะห์ค่าความถี่ของการเกิดรูปแบบสัญญาณพัลส์แบบประทังตัวเองของลำพลาสมา ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าจ่ายแหล่งจ่ายที่ต่างกัน เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายให้สูงขึ้น จะเห็นว่า ความถี่ของการเกิดรูปแบบสัญญาณพัลส์ยิ่งมีความถี่เพิ่มขึ้น นั้นหมายถึง ค่าเวลาของการเก็บประจุลดลง เกิดจากการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะทำให้พลังงานการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สอาร์กอนให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชันนั้นเพิ่มขึ้นด้วย อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่เร็วขึ้น การชนระหว่างอิเล็กตรอนอิสระกับโมเลกุลอื่นมีความรุนแรงมากขึ้น ใช้เวลาในการเกิดกระบวนการเพิ่มอิเล็กตรอนแบบทวีคูณสั้นลง ค่ากระแสดิสชาร์จเพิ่มขึ้นด้วย เป็นเหตุให้ทำให้เกิดการไอออไนเซชันง่ายขึ้น

4.2 ช่วงเวลาของการเก็บประจุและการเกิดกระแสดิสชาร์จ

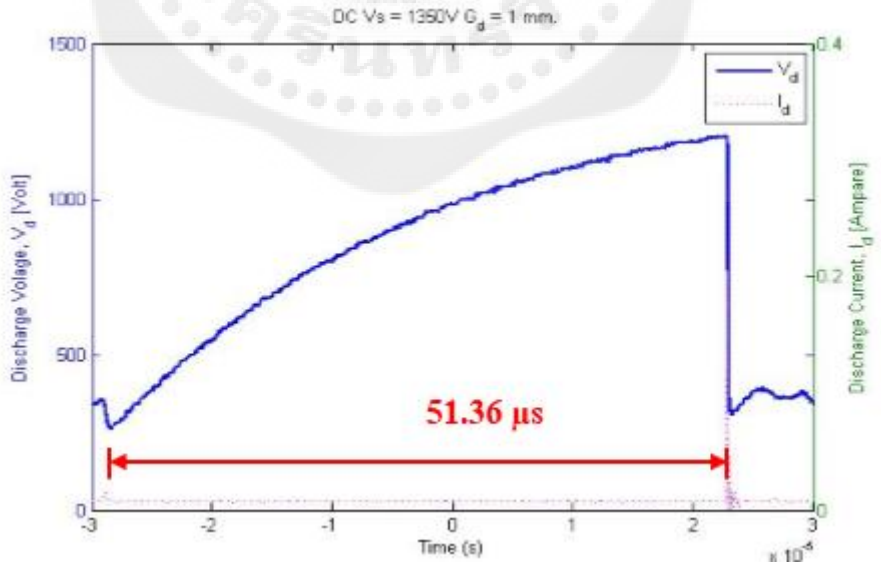
การเกิดลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์นั้น เกิดจากค่าความเก็บประจุแฝง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 จากการทดลองเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายให้สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่เพิ่มขึ้น ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 นั้นหมายถึง ช่วงเวลาของการสะสมประจุเพื่อทำให้แก๊สเกิดการดิสชาร์จจะใช้เวลาสั้นตามไปด้วย และช่วงเวลาการเกิดกระแสดิสชาร์จจะเกิดต่อจากช่วงเวลาที่เกิดการเบรกดาวน์ ซึ่งช่วงเวลา การเกิดกระแสดิสชาร์จจะเกิดในช่วงเวลาที่สั้นมาก โดยผลการทดลองที่แสดงช่วงเวลาของการเก็บประจุและช่วงเวลาการเกิดกระแสดิสชาร์จที่พารามิเตอร์ ระยะระหว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที แต่จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้สูงขึ้นเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง ช่วงเวลาของการเก็บประจุและช่วงเวลาการเกิดกระแสดิสชาร์จ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายต่างกัน

4.2.1 ช่วงเวลาของการเก็บประจุเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย

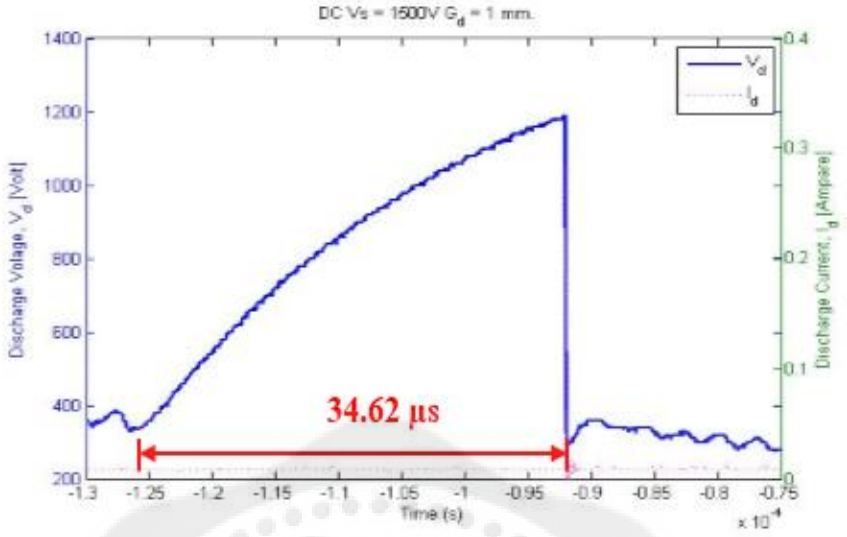
เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้สูงขึ้น เวลาของการเก็บประจุที่ทำให้เกิดลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์จะลดลง โดยผลการทดลองจะแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 – 4.5



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงช่วงเวลาของการเก็บประจุ ที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1200 โวลต์



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงช่วงเวลาของการเก็บประจุ ที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1350 โวลต์



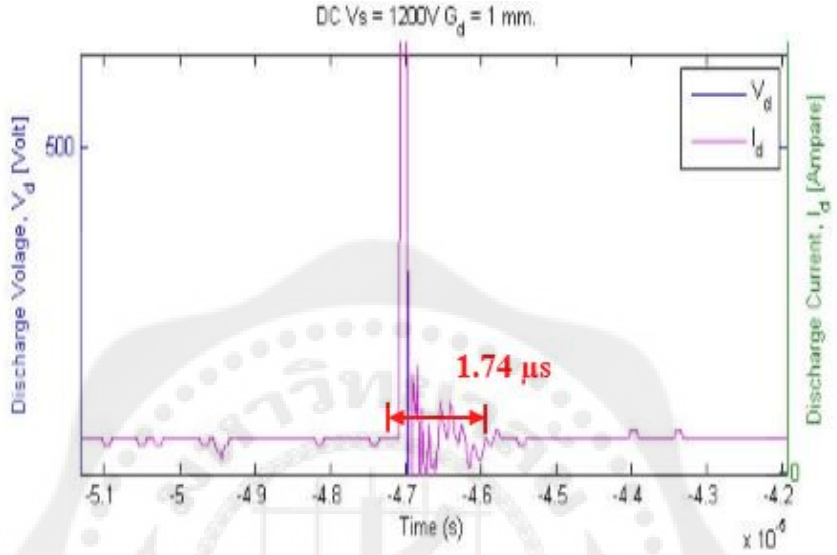
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงช่วงเวลาของการเก็บประจุ ที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1500 โวลต์

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบช่วงเวลาของการเก็บประจุที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายต่างกัน

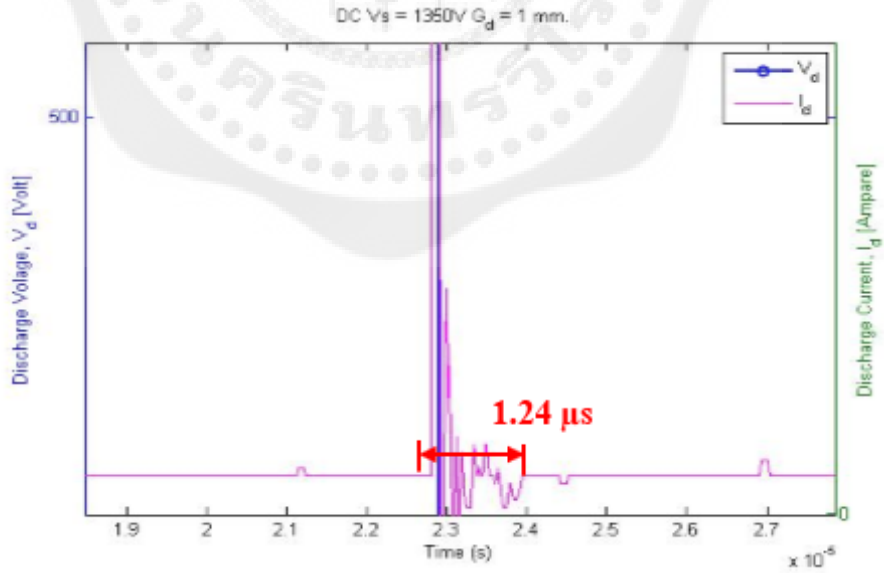
	$\boldsymbol{Vs = 1200\,V}$	$\boldsymbol{Vs = 1350\,V}$	$\boldsymbol{Vs = 1500\,V}$
ค่าเวลาของการเก็บประจุ	85.86 μs	51.36 μs	34.62 μs

4.2.2 ช่วงเวลาของกระแสดิสชาร์จเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย

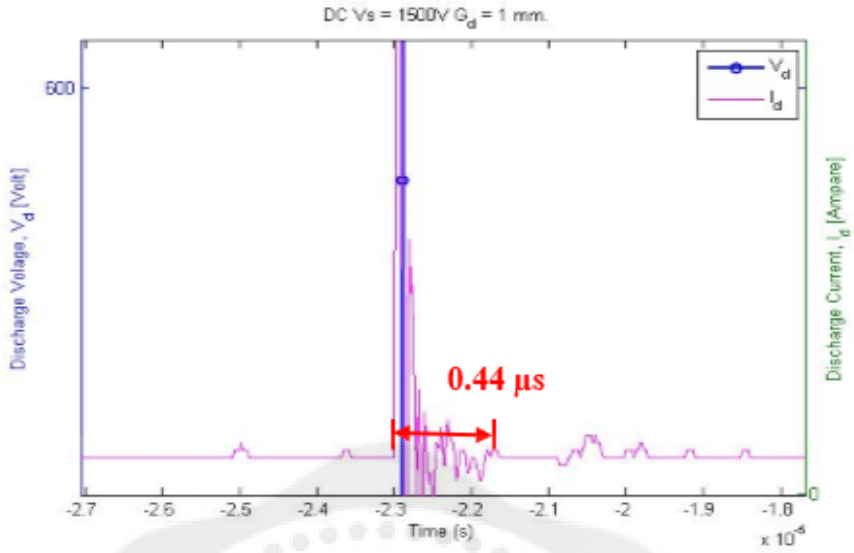
เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้สูงขึ้น เวลาของกระแสดิสชาร์จที่ทำให้เกิดลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์จะลดลง โดยผลการทดลองจะแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 – 4.8



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงช่างเวลาของการเกิดกระแสพัลส์ดิสชาร์จ ที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1200 โวลต์



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงช่างเวลาของการเกิดกระแสพัลส์ดิสชาร์จ ที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1350 โวลต์



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงช่างเวลาของการเกิดกระแสพัลส์ดิสชาร์จ ที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1500 โวลต์

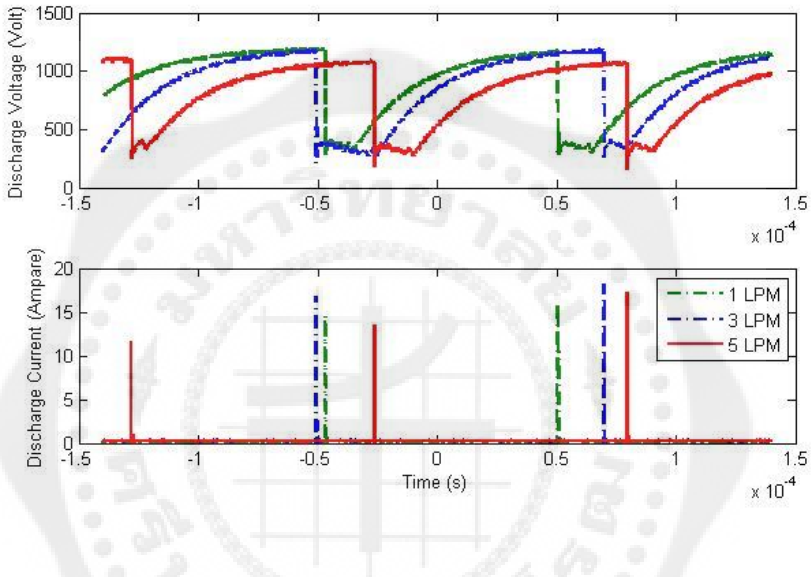
ตารางที่ 4.3 ตารางเปรียบเทียบช่วงเวลาของการเกิดกระแสดิสชาร์จที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายต่างกัน

	$Vs = 1200\,V$	$Vs = 1350\,V$	$Vs = 1500\,V$
ค่าเวลาของการเกิดกระแสพัลส์ดิสชาร์จ	1.74 μs	1.24 μs	0.44 μs
ขนาดของกระแสพัลส์ดิสชาร์จ	14.55 A	17.45 A	23.09 A

จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งแสดงเปรียบเทียบช่วงเวลาของการเก็บประจุที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายต่างกัน และ เปรียบเทียบช่างเวลาของการเกิดกระแสดิสชาร์จที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายต่างกัน จะเห็นเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้สูงขึ้น จะทำช่วงเวลาของการเกิดกระแสดิสชาร์จ จะสั้นลง และช่วงเวลาของการเก็บประจุในการทำให้เกิดการเบรกดาวน์ ก็ใช้เวลาสั้นลง ซึ่งส่งผลให้ความถี่ของลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่เพิ่มขึ้น

4.3 ผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์การเกิดลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่อัตราการไหลของแก๊สต่างกัน

ผลการทดลองที่ได้จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ ค่าความต้านทาน 1 เมกะโอห์ม ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร และเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที 3 ลิตรต่อนาที 5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 1200 โวลต์ โดยมีผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นผลการทดลองของแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ตามการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊ส



รูปที่ 4.9 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ที่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที 3 ลิตรต่อนาที 5 ลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบผลการสร้างลำพลาสมาที่ได้จากการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊ส

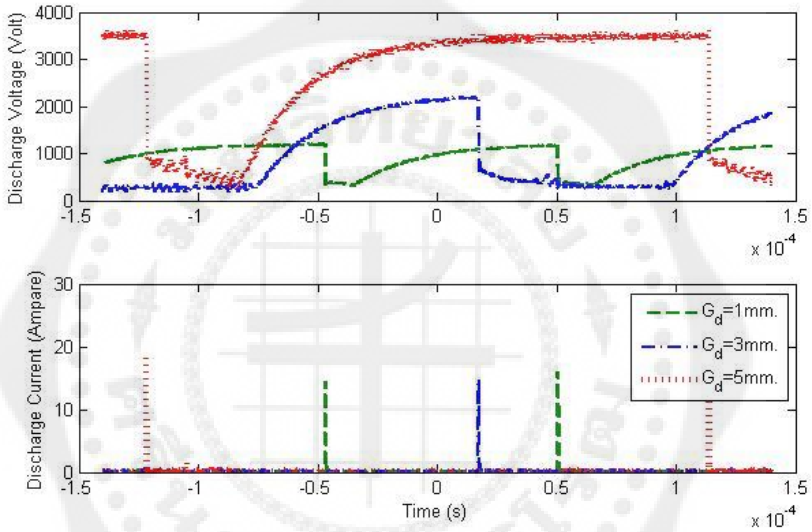
	$\boldsymbol{GFR = 1\ LPM.}$	$\boldsymbol{GFR = 3\ LPM.}$	$\boldsymbol{GFR = 5\ LPM.}$
แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์	$1196\ V$	$1176\ V$	$1076\ V$
แรงดันไฟฟ้าฟื้นตัวสัญญาณพัลส์	$292\ V$	$256\ V$	$236\ V$
กระแสไฟฟ้าเบรกดาวน์สัญญาณพัลส์	$14.55\ A$	$16.75\ A$	$17.27\ A$
ค่าความเก็บประจุแฝง	$0.236\ pF$	$0.175\ pF$	$0.245\ pF$
ค่าความถี่สัญญาณพัลส์	$10\ kH_z$	$8.358\ kH_z$	$9.442\ kH_z$

จากกราฟที่แสดงอัตราการไหลของแก๊ส 1 ลิตรต่อนาที 3 ลิตรต่อนาที 5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าลักษณะความโค้งของกราฟที่มีลักษณะลดลงในแนวระนาบของแกนนอน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สให้เพิ่มมากขึ้น เปรียบเสมือนว่า ความดันแก๊สเพิ่มขึ้น เป็นเพราะว่า อะตอม โมเลกุล หรืออนุภาคที่มีประจุที่ไหลออกมาจากตัวถังแก๊สนั้นมีปริมาณมากขึ้น เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย ทำให้อนุภาค ที่ถูกปล่อยออกมาเกิดการชนกัน สังเกตได้จากการเบรกดาวน์จะมีค่าลดลง ตามลำดับ เป็นไปตามกราฟของพาสเชนทางด้านซ้ายของ $V_{BR,min}$ ที่อธิบายไว้ว่า ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดคงที่ เมื่อเพิ่มความดันแก๊ส จะทำให้แก๊สเกิดการเบรกดาวน์ได้ง่ายขึ้น โดยที่อัตราการไหลของแก๊สที่ 5 ลิตรต่อนาที จะเบรกดาวน์ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด ที่มีปริมาณของอะตอม โมเลกุล และอนุภาคที่มีประจุ ทำให้อนุภาคต่างๆมีการชนกันและส่งผล ให้เกิดพลังงานมีสูง เพราะฉะนั้นพลังงานที่เกิดขึ้นรูปของลำพลาสมาจึงมีลักษณะเสถียรขึ้นตามลำดับของอัตราการไหลแก๊ส อัตราการไหลของแก๊สเป็นอีกส่วนสำคัญที่ทำให้พลาสมานำไปประยุคใช้กับการทำงานส่วนอื่นได้ เพียงแต่ต้องควบคุมการไหลในปริมาณที่แรงดันไฟฟ้าสามารถกระตุ้นในเกิดการชนกันของอนุภาคดังกล่าวได้อย่างสมบูรณ์จนนำไปสู่การประทังตัวได้เองของลำพลาสมา

4.4 ผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์การเกิดลำพลาสมาที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน

ผลการทดลองที่ได้จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ ค่าความต้านทาน 1 เมกะโอห์ม ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ และ อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นไปตามแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของแต่ละระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

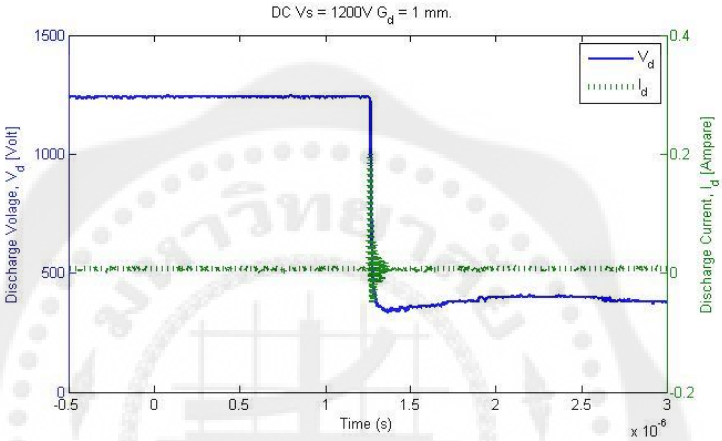
4.4.1 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน



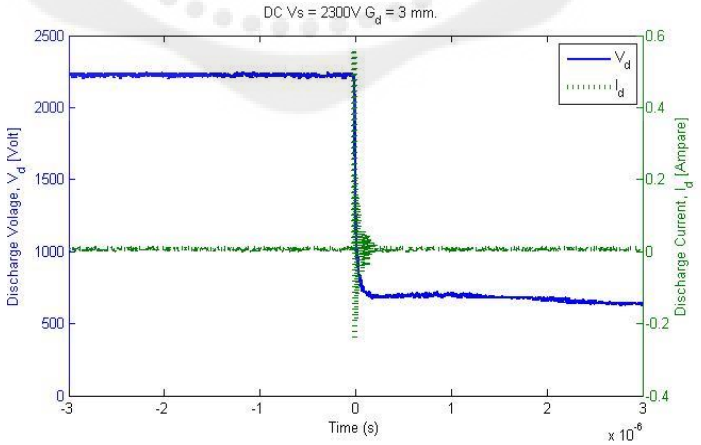
รูปที่ 4.10 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ที่แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของแต่ละระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร 5 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์นั้นจะเกิดขึ้นในรูปแบบสัญญาณพัลส์ ซึ่งจะแปรผันตรงกับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 1200 โวลต์ ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะอยู่ที่ 1176 โวลต์ และที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 มิลลิเมตร ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 2200 โวลต์ ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะอยู่ที่ 2156 โวลต์ และที่ระยะห่างระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 5 มิลลิเมตร ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 3600 โวลต์ ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะอยู่ที่ 3556 โวลต์ ตามลำดับ

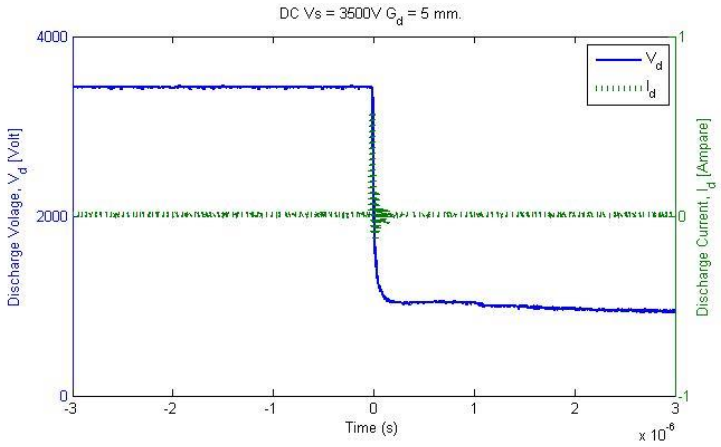
ลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์มีลักษณะพิเศษด้วยกัน 2 ประการ คือ พลาสมาที่สามารถคงสภาพพลาสมาไว้ได้ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าฟื้นตัวสัญญาณพัลส์ และพลาสมาที่เกิดจากการเบรกดาวน์ใหม่อีกครั้ง โดยจะศึกษาจากผลการทดลองโดยใช้ค่าพารามิเตอร์แบบเดียวกับรูปที่ 4.10 คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ และอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นไปตามแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของแต่ละระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.11 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์และแรงดันไฟฟ้าฟื้นตัวสัญญาณพัลส์



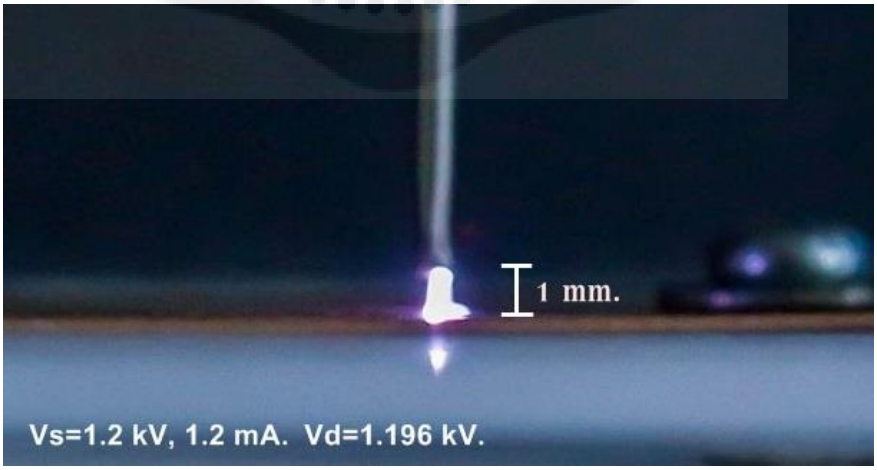
รูปที่ 4.12 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์และแรงดันไฟฟ้าฟื้นตัวสัญญาณพัลส์



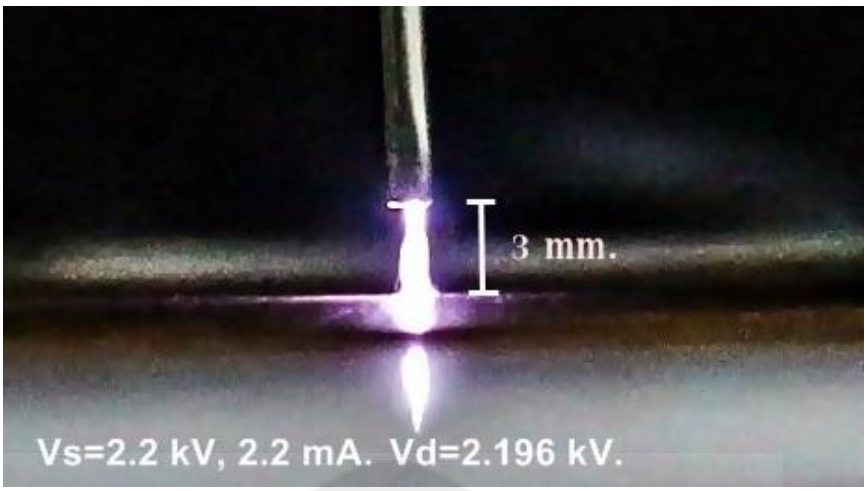
รูปที่ 4.13 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 5 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์และแรงดันไฟฟ้าฟื้นตัวสัญญาณพัลส์

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 – 4.13 จะเห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์และแรงดันไฟฟ้าฟื้นสัญญาณพัลส์ จะแปลผันตรงกับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดให้มีระยะเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์และแรงดันไฟฟ้าฟื้นสัญญาณพัลส์นั้นจะสูงขึ้นตาม

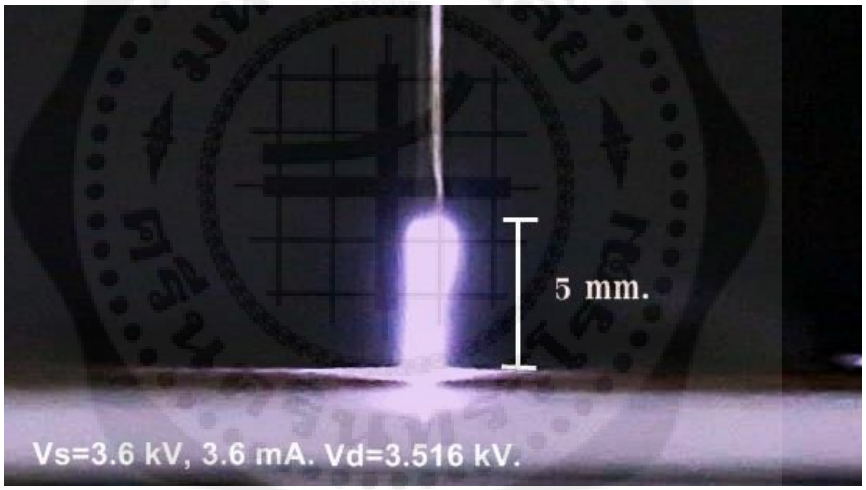
ลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการสร้างในแต่ละระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร 5 มิลลิเมตร แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 – 4.16



รูปที่ 4.14 ลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.15 ลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 มิลลิเมตร



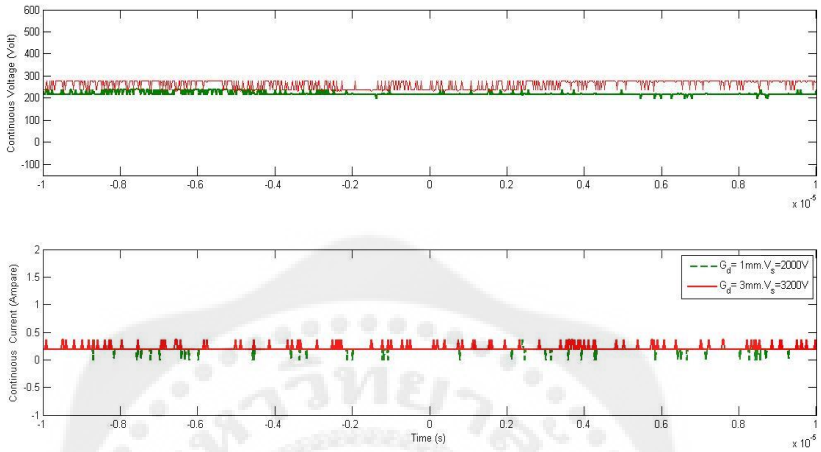
รูปที่ 4.16 ลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.5 ตารางเปรียบเทียบผลการสร้างลำพลาสมาที่ได้จากการเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

	$G_d = 1\ mm.$	$G_d = 3\ mm.$	$G_d = 5\ mm.$
แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์	1196 V	2196 V	3516 V
แรงดันไฟฟ้าฟื้นตัวสัญญาณพัลส์	292 V	232 V	236 V
กระแสไฟฟ้าเบรกดาวน์สัญญาณพัลส์	14.55 A	14.95 A	18.91 A
ค่าความเก็บประจุแฝง	0.236 pF	0.153 pF	5.34 pF
ค่าความถี่สัญญาณพัลส์	10 kH_z	5.72 kH_z	4.26 kH_z

จากผลการทดลอง จะเห็นว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์นั้น จะแปรผันตรงกับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ที่ระยะห่างระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะอยู่ที่ 1176 โวลต์ ระยะห่างระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 มิลลิเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะอยู่ที่ 2200 โวลต์ ระยะห่างระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 5 มิลลิเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะอยู่ที่ 3600 โวลต์ ตามลำดับ โดยเป็นไปตามกราฟของพาเชนทางด้านขวาของ $V_{BR,min}$ ที่อธิบายไว้ว่า ที่ความดันแก๊สคงที่ เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด จะทำให้แก๊สเกิดการเบรกดาวน์ได้ยากขึ้น เพราะโดยจุดที่มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกว้างกว่าจะมีระยะทางในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สที่ยาวกว่า และ มีความหนาแน่นของแก๊สที่น้อยมาก ซึ่งทำให้โอกาสที่อิเล็กตรอนจะชนกับอะตอมและโมเลกุลแก๊สอื่นๆมีน้อยมาก จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์มีค่าสูงกว่าที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแคบ

4.4.2 แรงดันไฟฟ้าสัญญาณต่อเนื่องของลำพลาสมาที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน



รูปที่ 4.17 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของลำพลาสมา ที่แรงดันไฟฟ้าต่อเนื่อง ของแต่ละระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสัญญาณต่อเนื่องและกระแสไฟฟ้าสัญญาณต่อเนื่อง

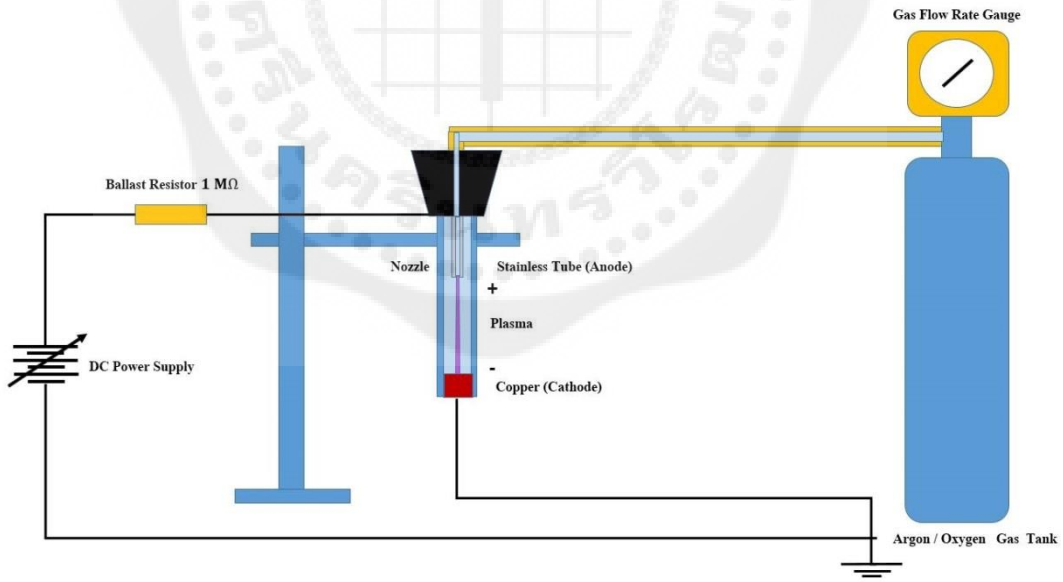
	$G_d = 1\ mm.$	$G_d = 3\ mm.$	$G_d = 5\ mm.$
แรงดันไฟฟ้าสัญญาณต่อเนื่อง	236 V	276 V	ยังไม่สามารถสร้างได้
กระแสไฟฟ้าสัญญาณต่อเนื่อง	0.3636 A	0.3636 A	ยังไม่สามารถสร้างได้

จากตารางที่ 4.6 ค่าแรงดันไฟฟ้ารูปแบบสัญญาณต่อเนื่องของลำพลาสมา ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น จะมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกว้างๆ ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นในการรักษาสภาพของลำพลาสมาที่ต่อเนื่อง โดยที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าสัญญาณต่อเนื่องจะอยู่ที่ 236 V และที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 3 มิลลิเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าสัญญาณต่อเนื่องจะอยู่ที่ 276 V แต่ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 5

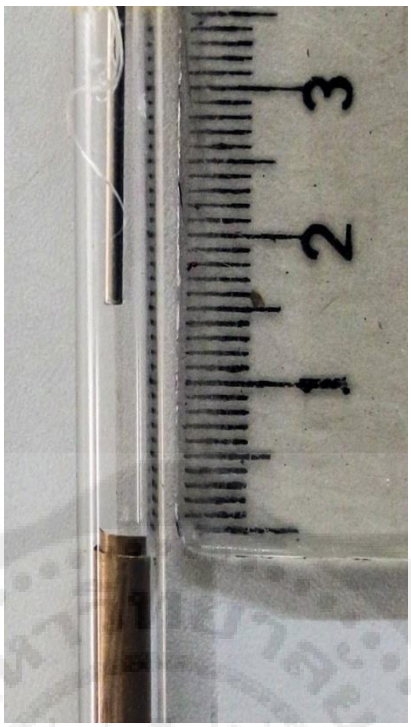
มิลลิเมตร ด้วยข้อจำกัดของโครงสร้างของเครื่องสร้างลำพลาสมาที่ได้ออกแบบไว้ ไม่สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงขนาดที่จะทำให้ลำพลาสมาที่เกิดที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 5 มิลลิเมตรเกิดในรูปแบบสัญญาณต่อเนื่องได้ และค่ากระแสไฟฟ้ารูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง จากตารางที่ 4.4 ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร จะมีค่าเท่ากัน เนื่องจาก ลำพลาสมาที่เกิดรูปแบบสัญญาณต่อเนื่องนั้น เปรียบเสมือนการลัดวงจรจึงทำให้กระแสทั้งวงจรไหลได้อย่างอิสระ และค่ากระแสนี้เป็นกระแสที่ไหลออกจากบัลลาสต์

4.5 การสร้างลำพลาสมาภายในหลอดแก้ว

ลำพลาสมาที่สร้างภายในหลอดแก้ว เพื่อเป็นการขจัดปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อการสร้างลำพลาสมาออกให้ได้มากที่สุด ไม่ว่าจะเป็นสภาพลมพัดผ่านลำพลาสมา การที่แก๊สเกิดการผสมกับอากาศ โดยได้ออกแบบให้หัวเข็มที่เป็นหัวฉีดลำพลาสมาและเป็นขั้วแอโนด อยู่ด้านบนภายในหลอดแก้ว และขั้วแคโทดที่เป็นแผ่นทองแดงม้วน จะอยู่ด้านล่างและอยู่ภายในหลอดแก้วเช่นกัน หัวเข็มและทองแดงว่างห่างกัน 1.5 เซนติเมตร โดยหลอดแก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และใช้ตัวต้านทานขนาด 1 เมกะโอห์ม แสดงไว้ดังรูปที่ 4.18

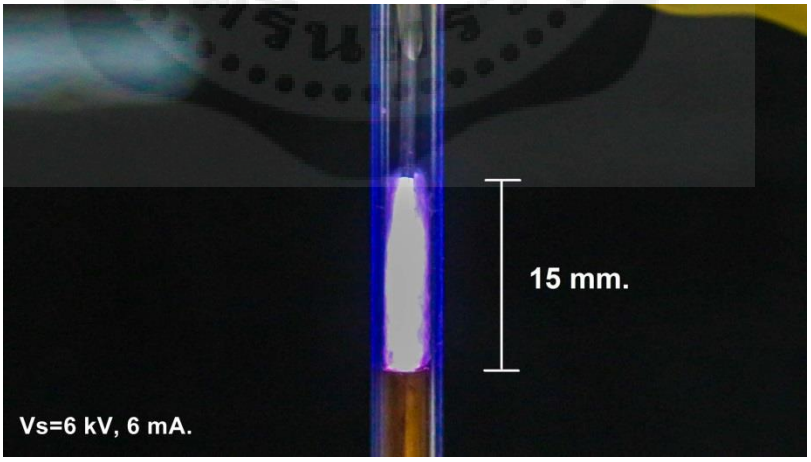


รูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำภายในหลอดแก้ว



รูปที่ 4.19 แสดงโครงสร้างภายในหลอดแก้ว

การสร้างลำพลาสมาภายในหลอดแก้ว เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากับขั้วแอโนด 6000 โวลต์ และให้อัตราการไหลของแก๊ส 5 LPM จะได้พลาสมาดังรูปที่ 4.19

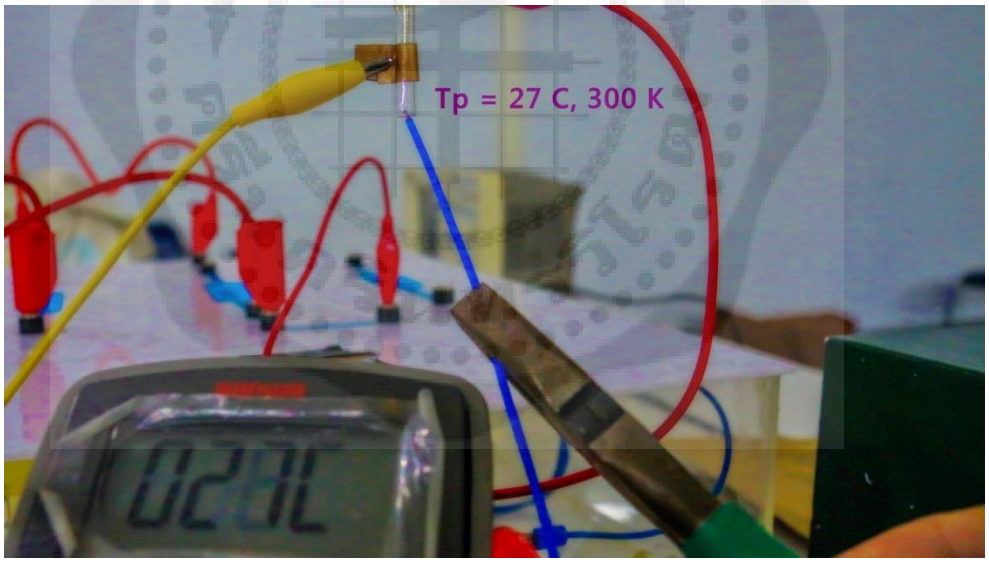


รูปที่ 4.20 ลำพลาสมาที่สร้างในหลอดแก้วหลอดแก้ว ยาว 1.5 เซนติเมตร

การสร้างลำพลาสมาในหลอดแก้วนี้ เป็นการใช้ความรู้และผลการศึกษาการสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความความดันบรรยากาศจากโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ก่อนหน้านี้มาประยุกต์ในการสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่โครงสร้างแบบอื่น เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน โดยสามารถเคลื่อนย้ายได้ อีกทั้งยังสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่มีความยาวเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการศึกษาการสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำนี้ ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้สร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำในโครงสร้างแบบอื่นๆได้อีกตามการออกแบบเพื่อนำไปใช้งานที่ต่างกัน

4.6 การวัดอุณหภูมิของลำพลาสมา

อุณหภูมิของลำพลาสมานั้น มีปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออุณหภูมิของลำพลาสมา คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย ถ้าต้องการสร้างลำพลาสมาที่มีอุณหภูมิต่ำ จำเป็นต้องให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายมีค่าเหมาะสม ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3 โดยอุณหภูมิที่วัดได้จากลำพลาสมาที่สร้างนั้น ที่สร้างจากโครงสร้างแบบฉนวนขั้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (Dielectric Barrier) แสดงไว้ในรูปที่ 4.21



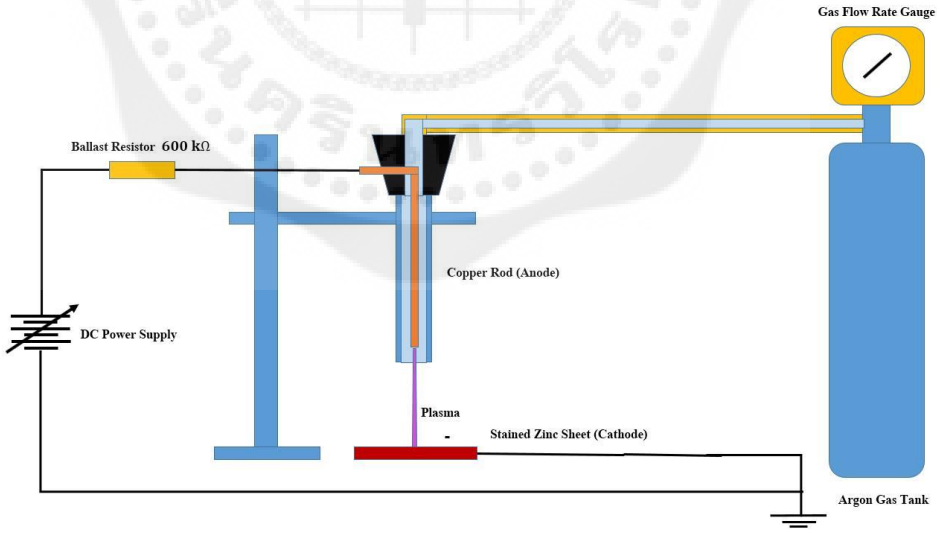
รูปที่ 4.21 การวัดอุณหภูมิของลำพลาสมาที่สร้างจากไฟฟ้ากระแสตรง

การวัดอุณหภูมิของลำพลาสมาที่สร้างจากไฟฟ้ากระแสตรง สามารถวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากลำพลาสมาได้ที่ 27 องศาเซลเซียส ที่แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 4000 โวลต์ โดยใช้ตัวต้านทานขนาด 1 เมกะโอห์ม กระแสไฟฟ้าที่ได้จะมีค่า 4 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งถึงอุณหภูมิที่วัดได้จัดอยู่ในเกณฑ์ปกติซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงของอุณหภูมิห้อง ทั้งนี้เนื่องเป็นผลจากว่าเป็นการสร้างพลาสมาใน

โหมดรูปแบบสัญญาณพัลส์ประกอบกับการที่แก๊สอาร์กอนที่ถูกพ่นออกจากปลายขั้วแอดโนด พร้อมกับลำพลาสมาตลอดเวลา จึงเป็นถือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยให้ระบบสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้นจึงทำให้ได้ลำพลาสมาที่เกิดขึ้นมีอุณหภูมิไม่สูงมาก หากต้องการทำให้ได้ลำพลาสมาที่มีอุณหภูมิสูงจะต้องให้เพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณกระแสที่ไหลในวงจรสูงด้วยเช่นกัน

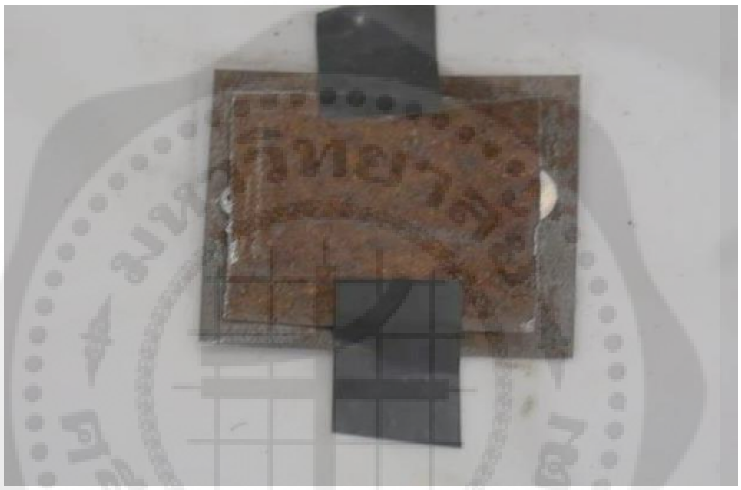
4.6 การประยุกต์เพื่อนำลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำไปใช้ให้เกิดประโยชน์

การนำผลการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สามารถใช้งานได้ที่ความดันบรรยากาศ โดยเป็นการออกแบบเครื่องสร้างลำพลาสมาให้เหมาะกับการใช้งาน ในโครงงานนี้จะเสนอตัวอย่างการสร้างและนำลำพลาสมาไปใช้งานในทางการสปัตเตอร์ริ่งผิวโลหะ (Sputtering) ซึ่งลำพลาสมาที่จะนำมาใช้ในการทำสกัดผิวโลหะนั้น ต้องเป็นลำพลาสมาที่มี พลังงานสูง คือ ปริมาณกระแสไหลในลำพลาสมาต้องสูงพอและมีความต่อเนื่อง จึงจะสามารถสการสปัตเตอร์ริ่งผิวโลหะออกได้ แต่ปริมาณกระแสจะต้องไม่สูงจนเกิดไปเพื่อที่ลำพลาสมาจะยังคงเป็นพลาสมาอุณหภูมิต่ำ การควบคุมปริมาณกระแสจะต้องใช้ค่าความต้านทานที่เหมาะสมดังที่กล่าวไว้ใน หัวข้อ 3.4 และการออกแบบโครงสร้างของเครื่องสร้างลำพลาสมาจะต้องเอื้อยต่อการทำไปใช้งานด้านการสปัตเตอร์ริ่งผิวโลหะ

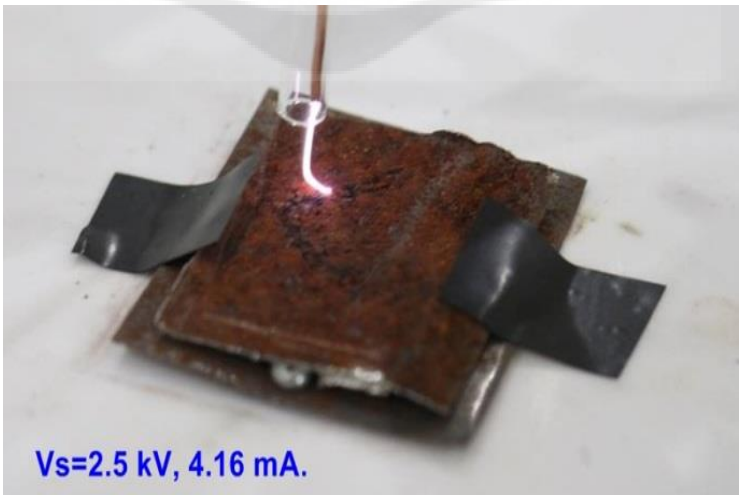


รูปที่ 4.22 โครงสร้างเครื่องสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำเพื่อใช้ในการสปัตเตอร์ริ่งผิวแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิม

ตัวอย่างการออกแบบโครงสร้างของเครื่องสร้างลำพลาสมานั้น จะให้แท่งทองแดงเป็นขั้วแอโนดอยู่ภายในหลอดแก้ว โดยที่แก๊สอาร์กอนจะไหลผ่านแท่งทองแดงและไหลภายในหลอดแก้วนั้น และให้ขั้วแคโทดเป็นแผ่นโลหะที่ต้องการจะการสปัตเตอร์ริ่งผิวผิดออก ในตัวอย่างนี้จะใช้แผ่นสังกะสีที่เกิดสนิม ดังรูปที่ 4.20 โดยมีจุประสงค์ที่ต้องการจะการสปัตเตอร์ริ่งผิวสังกะสีที่เกิดสนิมออกโดยตัวต้านทานที่เลือกนำว่าใช้ 600 กิโลโอห์ม อัตราการไหลของแก๊ส 1 ลิตรต่อนาที ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 15 มิลลิเมตร เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรด 2500 โวลต์ จะเกิดลำพลาสมาดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.23 แผ่นสังกะสีที่เกิดสนิมก่อนทำการการสปัตเตอร์ริ่งผิวด้วยลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 4.24 ลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำเพื่อการสปัตเตอร์ริ่งผิวแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิม

ผลการการสปัตเตอร์ริ่งผิวแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิมจะได้ผลดังรูปที่ 4.22

รูปที่ 4.25 ผลการการสปัตเตอร์ริ่งผิวแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิมออก

จากผลการทดลองการการสปัตเตอร์ริ่งผิวแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิมด้วยลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ จะเห็นว่า ผิวสังกะสีที่เกิดสนิมถูกการสปัตเตอร์ริ่งออกอย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่มีพลังงานสูง โดยไอออนบวกที่ได้จากกระบวนการไอออไนเซชัน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเข้าชนกับผิวของ แผ่นสังกะสีที่เกิดสนิมอย่างรุนแรง การชนของไอออนพลังงานสูงจากพลาสมาของแก๊สอาร์กอน ในช่วงดิสชาร์จแบบเรืองแสง บนผิวของแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิท จะเกิดการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างไอออนพลังงานสูงกับอะตอมของผิวหน้าที่สึกกร่อนจากการเกิดสนิม จนเกิดกระบวนการสปัตเตอร์ริงแล้วทำให้สนิมหลุดออกมา จะเห็นได้ว่าเป็นรอยเนื่องจากพลังงานของไอออนจากพลาสมาที่เข้าชนสนิมบนผิวหน้าของแผ่นสังกะสี ในกระบวนการสปัตเตอร์ริ่งมีค่าสูงมาก โดยที่พื้นผิวของแผ่นสังกะสีที่สึกกร่อนอยู่แล้วจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดได้ง่ายกว่าพื้นผิวที่สภาพดี อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิวแผ่นสังกะสีที่สึกกร่อนนี้ จะทำให้กระบวนการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นเร็ว เมื่ออิเล็กตรอนมากขึ้นการชนกันระหว่างอนุภาคก็จะมากขึ้นตาม ส่งผลให้ลำพลาสมาที่ได้มีพลังงานและอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งการหลุดของอิเล็กตรอนจากพื้นผิวของแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิมนี้ จะทำให้พื้นผิวของแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิมบางลงด้วย เมื่อยังคงตำแหน่งของลำพลาสมาไว้ที่จุดเดิม การหลุดของอิเล็กตรอนที่ผิวของแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิมจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเมื่ออิเล็กตรอนที่หลุดจากพื้นผิวที่สึกกร่อน หมดไป จะเหลือชั้นที่มีพื้นผิวที่มีการสึกกร่อนน้อยกว่า อิเล็กตรอนจะหลุดออกยากขึ้นลำพลาสมาจะมีพลังงานและอุณหภูมิลดลง เมื่อย้ายตำแหน่งของลำพลาสมาไปที่พื้นผิวที่มีการสึกกร่อนอื่นๆ กระบวนการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นอีกครั้ง

การหลุดของอิเล็กตรอนจากพื้นผิวของแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิมจะทำให้พื้นผิวของแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิมบางลง หรือที่เรียกว่า การสปัตเตอร์ริ่งผิวโลหะ(Sputtering) ดังรูปที่ 4.22 เป็นการใช้ลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำการสปัตเตอร์ริ่งผิวแผ่นสังกะสีที่เกิดสนิมเป็นรูปอักษร A อย่างเห็นได้ชัด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การเกิดพลาสมาสามารถแบ่งออกได้หลายรูปแบบ ทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้น มนุษย์ได้ทำการศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับพลาสมาเพื่อนำพลาสมา มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในหลายๆด้าน โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดพลาสมาได้แก่ ความดันบรรยากาศ ชนิดของแก๊ส ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการเกิดและการควบคุมพลาสมาในการนำมาใช้ประโยชน์ทั้งสิ้น

ในการศึกษาการสร้างลำพลาสมาโดยใช้โครงสร้างเครื่องสร้างลำพลาสมาที่ได้ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.1 จะทำการเลือกค่าตัวต้านทานที่ใช้ในการทดลองและศึกษา โดยกำหนดมา 3 ค่า นั่นคือ ตัวต้านทานขนาด 800 กิโลโอห์ม ตัวต้านทานขนาก 1 เมกกะโอห์ม และตัวต้านทานขนาด 2.5 เมกกะโอห์ม โดยทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลการสร้างลำพลาสมาที่ได้โดยใช้แก๊สอาร์กอน และกำหนดค่าพารามิเตอร์ ดังนี้ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร และอัตราการไหลของแก๊ส 1 ลิตรต่อนาที เมื่อทำการทดลองสร้างลำพลาสมา เพื่อศึกษาลำพลาสมาทั้ง 2 รูปแบบ คือ ลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่ประทังตัวเองได้ และลำพลาสมารูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง พบว่า ที่ค่าความต้านทานทั้ง 3 ขนาด จะเริ่มเกิดลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่ประทังตัวเองได้ที่แรงดันแหล่งจ่าย 1200 โวลต์เท่ากัน แต่ค่าตัวต้านทานขนาด 800 กิโลโอห์ม จะเกิดรูปแบบสัญญาณต่อเนื่องที่แหล่งจ่ายเพียง 1500 โวลต์ ซึ่งเป็นผลจากกระแสที่มากกว่ากรณีอื่น ที่ตัวต้านทานขนาด 2.5 เมกกะโอห์ม จะเกิดรูปแบบสัญญาณต่อเนื่องที่แหล่งจ่าย 3000 โวลต์ ซึ่งสูงมากอาจทำให้ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่สูงกว่านี้ลำพลาสมาจะไม่เกิดรูปแบบสัญญาณต่อเนื่องเนื่องจากกระแสน้อยเกินไปจึงไม่สามารถเลี้ยงลำพลาสมาให้เกิดสัญญาณต่อเนื่องได้ ที่ค่าต้านทานที่มีค่าเท่ากับ 1 เมกกะโอห์ม เริ่มเกิดลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่ประทังตัวเองได้ที่แรงดันแหล่งจ่าย 1200 โวลต์ เท่ากับตัวต้านทานขนาด 2 ขนาดที่กล่าวมา เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายเท่ากับ 2000โวลต์ ลำพลาสมาเกิดในรูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง ซึ่งให้แรงดันไฟฟ้าค่าไม่สูง จะทำให้สร้างลำพลาสมาเพื่อศึกษาทั้ง 2 รูปแบบตามจุดประสงค์ได้ ต่อมาได้ทำการเลือกแก๊สที่จะนำมาใช้ในการทดลองสร้างลำพลาสมา 2 ชนิด คือ แก๊สอาร์กอน และแก๊สออกซิเจน โดยการทดลองสร้างลำพลาสมา จะกำหนดพารามิเตอร์แบบเดียวกันทั้ง 2 ชนิดแก๊ส

คือ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร และอัตราการไหลของแก๊สเท่ากันที่ 1 ลิตรต่อนาที พบว่าเมื่อให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกระตุ้นแก๊ส แก๊สอาร์กอนจะเริ่มเกิดลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่ประทังตัวเองได้ที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1200 โวลต์ และเมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายเท่ากับ 1500 โวลต์ จะทำให้ลำพลาสมาเกิดในรูปแบบสัญญาณต่อเนื่อง เมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับแก๊สออกซิเจน ซึ่งจะเริ่มเกิดลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่ประทังตัวเองได้ที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายเท่ากับ 2400 โวลต์ และเมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายขึ้นเรื่อยๆ โอกาสที่ลำพลาสมาจะเกิดในรูปแบบสัญญาณต่อเนื่องจะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายในการกระตุ้นที่สูงมาก เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายถึง 4600 โวลต์ ลำพลาสมาก็ไม่สามารถเกิดในรูปแบบสัญญาณต่อเนื่องได้ โดยจะเกิดในรูปแบบสัญญาณพัลส์ความถี่สูงแทน ในการศึกษาลำพลาสมาจึงเลือกแก๊สอาร์กอนในการสร้างลำพลาสมา

เมื่อทำการทดลองสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ โดยได้จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ ค่าความต้านทาน 1 เมกะโอห์ม ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 1,200 โวลต์ 1,350 โวลต์ 1,500 โวลต์ และ 2,000โวลต์ แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะไม่เพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้สูงขึ้น เพราะ แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะแปลผันตรงกับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด แต่เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้สูงขึ้น จะเห็นว่า ลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์จะมีความถี่เพิ่มขึ้นตามความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความถี่ของลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ จะเกิดจากความความเก็บประจุแฝง เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เวลาของการอัดประจุลดลง และช่วงเวลาของการเก็บประจุและการเกิดกระแสดิสชาร์จเปรียบเทียบช่างเวลาของการเก็บประจุที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายต่างกัน และเปรียบเทียบช่างเวลาของการเกิดกระแสดิสชาร์จที่แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายต่างกัน จะเห็นเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้สูงขึ้น จะทำช่วงเวลาของการเกิดกระแสดิสชาร์จ จะสั้นลง และช่วงเวลาของการเก็บประจุในการทำให้เกิดการเบรกดาวน์ ก็ใช้เวลาสั้นลง ซึ่งส่งผลให้ความถี่ของลำพลาสมารูปแบบสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 1 ลิตรต่อนาที 3 ลิตรต่อนาที 5 ลิตรต่อนาที ที่ค่าความต้านทาน 1 เมกะโอห์ม ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สให้เพิ่มมากขึ้นเปรียบเสมือนว่า ความดันแก๊สเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะมีค่าลดลง เป็นไปตามกราฟของพาสเชนทางด้านซ้ายของ $V_{BR,min}$ ที่อธิบายไว้ว่า ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดคงที่ เมื่อเพิ่มความดันแก๊ส จะทำให้แก๊สเกิดการเบรกดาวน์ได้ง่ายขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร 5 มิลลิเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะเพิ่มขึ้น โดยเป็นไปตามกราฟของพาเชนทางด้านขวาของ$V_{BR,min}$ ที่อธิบายไว้ว่า

ที่ความดันแก๊สคงที่ เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด จะทำให้แก๊สเกิดการเบรกดาวน์ได้ยากขึ้น การใช้ความรู้และผลการศึกษาการสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความความดันบรรยากาศมาประยุกต์ในการสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่โครงสร้างแบบอื่น โดยเป็นการสร้างลำพลาสมาภายในหลอดแก้ว เพื่อเป็นการขจัดปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อการสร้าง โดยสามารถสร้างลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่มีความยาวเพิ่มขึ้น นำไปใช้งานง่ายขึ้น สุดท้ายคือนำผลการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานให้เกิดประโยชน์ ตัวอย่างการนำลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำไปใช้งานให้เกิดประโยชน์ โดยการนำมาไปใช้งานในการทำความสะอาดผิวโลหะที่เกิดสนิม โดยจะจะทำให้พื้นผิวโลหะที่เกิดสนิมบางลงด้วยจนเหลือเนื้อโลหะการสึกกร่อนน้อยกว่าได้

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. เนื่องจากเป็นการทดลองสร้างลำพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ ปัจจัยที่รบกวนระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระตุ้นแก๊สอาร์กอน คือ อากาศภายในห้องทดลอง อุณหภูมิห้อง เนื่องจากห้องทดลองมีเครื่องปรับอากาศที่เปิดอยู่เป็นประจำ เมื่อจะเริ่มทำการทดลองจึงต้องปิดเครื่องปรับอากาศและรอให้อุณหภูมิห้องปกติจึงสามารถเริ่มทำการทดลองได้

2. การวางแผนการใช้อุปกรณ์การทดลองรวมกับกลุ่มอื่นไม่เป็นไปตามแผนและข้อตกลงที่วางไว้

3. ความพร้อมของห้องทดลอง เนื่องจากมีพื้นที่ในการทำการทดลองน้อย และ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลองมีค่าสูง ส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนภายในห้อง

5.3 ข้อเสนอแนะ

1.ควรมีห้องสำหรับทำการทดลองที่มีความปลอดภัยในการในแรงดันไฟฟ้าสูง และพื้นที่เพียงพอสำหรับวางอุปกรณ์ต่างๆ

2.ควรศึกษาวิธีการใช้และข้อจำกัดของอุปกรณ์แต่ละชนิดอย่างละเอียด

เอกสารอ้างอิง

MATRA, Khanit. (2013). **Characteristics of micro plasma jet in SEM and its application**. Kochi, Japan

ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์. (2551) **ฟิสิกส์พลาสมาเบื้องต้น (Introduction to Plasma Physics).** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สเต็ปส์ ดีไซน์ แอนด์ พรินท์

http://www.sc.mahidol.ac.th/scpy/courses/scpy360_10/theory_Lab7_**GlowDischarge**_V1.pd

Vijay Nehra, Ashok Kumar and H K Dwivedi.(2006). **Atmospheric non-thermal plasma sources.** India

Becker, K. H.,Schoenbach, K. H., & Eden, J. G. (2006). **Microplasmas And Applications. Journal of Physics D: Applied Physics**, 39(3), R55-R70.

Yoshiki, H. (2006). **Generation of Air Microplasma Jet and Its Application To Local Etching Of Polyimide Films.Japanese Journal of Applied Physics**, 45 (No. 6B), 5618-5623.

Conrads, H., & Schmidt, M. (2000). **Plasma generation and plasma sources. Plasma Sources Science and Technology**, 9, 441.

http://nemoning.blogspot.com/2011/12/blog-post_15.html

สำรวย สังข์สะอาด. (2549) **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง** . พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Lieberman, M. A., & Lichtenberg, A. J. (1994). **Principles of plasma discharges and materials processing**. New York: Wiley. [1.4]

Wagenaars, E. (2006**). Plasma Breakdown of Low-Pressure Gas Discharges**. Ph.D. Technische Universiteit Eindhoven.

Bogaerts, A., Neyts, E., Gijbels, R., & der Mullen, J. v. (2002**). Gas Discharge Plasmas And Their Applications.Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, 57(4), 609-658.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Breakdown of gaseous insulation. (n.d.).Department of Electrical Engineering. Retrieved July 18, 2013, from www.elect.mrt.ac.lk/HV_Chap1.pdf

Christophorou, L. G. (1978). **High voltage research (breakdown strengths of gaseous and liquid insulators)**. Oak Ridge, Tenn.: Dept. of Energy, Oak Ridge National Laboratory.

Chapman, B. N. (1980). **Glow discharge processes: sputtering and plasma etching**. New York: Wiley.

ZOU, Q.(2008). **MICROPLASMA PRODUCTION USING FIELD EMISSION CATHODE.** Ph.D. Kochi University of Technology.

Paschen, F. (1889). Ueber Die Zum Funkenübergang In Luft, Wasserstoff Und Kohlensäure Bei Verschiedenen Drucken Erforderliche Potentialdifferenz. Annalen der Physik, 273(5), 69-96.

Sturges, D. J., & Oskam, H. J. (1964). **Studies Of The Properties Of The Hollow Cathode Glow Discharge In Helium And Neon**. Journal of Applied Physics, 35(10), 2887.

Iza, F., Kim, G. J., Lee, S. M., Lee, J. K., Walsh, J. L., Zhang, Y. T., et al. (2008**).Microplasmas: Sources, Particle Kinetics, And Biomedical Applications. Plasma Processes and Polymers**, 5(4), 322-344.

ประวัติย่อนิสิตผู้ทำโครงงาน

ชื่อ-สกุล นายจิรัฏฐ์ เกตุภู่

วัน เดือน ปีเกิด 29 กันยายน 2534

สถานที่เกิด ลำปาง

สถานที่อยู่ปัจจุบัน 761/150 ถ.ลำปาง-แจ้ห่ม ม.11 ต.ต้นธงชัย
อ.เมือง จ.ลำปาง 52000

โทรศัพท์ 095-4531964

E-mail mean.chanapol@gmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2546	ประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลลำปาง เขลางค์รัตน์อนุสรณ์
พ.ศ.2549	มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย ลำปาง
พ.ศ.2552	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ ไทย-เยอรมัน (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ) ศูนย์ลำปาง
พ.ศ.2557	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประวัติย่อนิสิตผู้ทำโครงงาน

ชื่อ-สกุล	นายวราวุธ ศรีบุรินทร์
วัน เดือน ปีเกิด	7 พฤศจิกายน 2535
สถานที่เกิด	เลย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	56/3 ม.3 ต.นาโป่ง อ.เมือง
	จ.เลย 42000
โทรศัพท์	094-5531107
E-mail	yackwarawut@gmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2547	ประถมศึกษา โรงเรียนเมืองเลย
พ.ศ.2550	มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเลยอนุกูลวิทยา
พ.ศ.2553	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเลยอนุกูลวิทยา
พ.ศ.2557	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประวัติย่อนิสิตผู้ทำโครงงาน

ชื่อ-สกุล	นายสรุต โรจนอุดมวุฒิกุล
วัน เดือน ปีเกิด	27 สิงหาคม 2535
สถานที่เกิด	นครสวรรค์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	55/14 ม.5 ต.บ้านกล้วย อ.เมือง
	จ.ลำปาง 52000
โทรศัพท์	083-0908731
E-mail	song_smart@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2547	ประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลชัยนาท
พ.ศ.2550	มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนชัยนาทพิทยาคม
พ.ศ.2553	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนชัยนาทพิทยาคม
พ.ศ.2557	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประวัติย่อนิสิตผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นายอมรพงศ์ อมฤก

วัน เดือน ปีเกิด 24 สิงหาคม 2535

สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร

สถานที่อยู่ปัจจุบัน 31/1 หมู่ 9 ต.ห้วยชัน อ.อินทร์บุรี
จ.สิงห์บุรี 16110

โทรศัพท์ 082-948-0842

E-mail kwukjajaja@hotmail.co.th

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2544	ประถมศึกษาตอนต้น โรงเรียนพระยามนธาตุราชศรีพิจิต
พ.ศ. 2547	ประถมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนตันติวัฒน์
พ.ศ. 2550	มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนชัยนาทพิทยาคม
พ.ศ. 2553	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนชัยนาทพิทยาคม
พ.ศ. 2557	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ