

การพัฒนาเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่ความดันบรรยากาศสำหรับการทำให้เลือดแข็งตัว



นางสาวณัฐนพิณช์ จรุงยศศักดิ์

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมชีวเวช (สหสาขาวิชา)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF AN ATMOSPHERIC PRESSURE COLD PLASMA JET FOR BLOOD  
COAGULATION

Miss Natnapin Jarunsak



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Biomedical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่ความดัน บรรยากาศสำหรับการทำให้เลือดแข็งตัว
โดย	นางสาวณัฐนพิณช์ จรุงศักดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมชีวเวช (สหสาขาวิชา)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์เดโช ทองอร่าม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. สุทธิลักษณ์ ปทุมราช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์เดโช ทองอร่าม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุทธิลักษณ์ ปทุมราช)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. กองพันธ์ อารีรักษ์)

ณัฐนพิชญ์ จรุงยศศักดิ์ : การพัฒนาเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ตที่ความดันบรรยากาศสำหรับการทำให้เลือดแข็งตัว (DEVELOPMENT OF AN ATMOSPHERIC PRESSURE COLD PLASMA JET FOR BLOOD COAGULATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.เดโช ทองอร่าม, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ศ. ดร. สุทธิลักษณ์ ปทุมราช, 127 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ตที่ความดันบรรยากาศสำหรับการทำให้เลือดแข็งตัวที่ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับแบบฟลายแบค (Fly back) ที่ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และพลาสมาโปรบด้วยวัสดุอุปกรณ์ที่หาได้ในประเทศ โดยออกแบบให้สามารถปรับตั้งค่าความถี่และดิวตี้ไซเคิลผ่านระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ที่ความถี่ 30 35 และ 40 kHz และเปอร์เซ็นต์ดิวตี้ไซเคิล 30 40 50 และ 70 % ตามลำดับ ส่วนการปรับตั้งค่าของไฟฟ้าแรงดันสูงเป็นการปรับด้วยมือได้ตั้งแต่ 0.1 ถึง 15 kV<sub>rms</sub>

จากผลการทดลองพบว่า แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพการทำงานเท่ากับ 74.28 % การศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อความยาวและอุณหภูมิของพลาสมาเจ็ต พบว่าค่าไฟฟ้าแรงดันสูง ความถี่ เปอร์เซนต์ดิวตี้ไซเคิล และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อความสม่ำเสมอของเปลวพลาสมา ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสมาด้วยเครื่อง Optical Emission Spectroscopy (OES) พบว่า มีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ความถี่ต่างๆและที่อัตราการไหลต่างๆที่มีค่าเท่ากับ 0.43 eV และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของพลาสมาอยู่ในช่วง  $5.46 \times 10^9 - 1.74 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  ซึ่งสามารถระบุได้ว่าพลาสมาแบบเจ็ตที่พัฒนาขึ้นเป็นพลาสมาเย็น จากผลทดสอบการแข็งตัวของเลือดด้วยเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ตที่พัฒนาขึ้น พบว่า ที่ระยะห่างระหว่างปลายโปรบกับกระจกสไลด์ 1 เซนติเมตร พลาสมาเย็นแบบเจ็ตที่พัฒนาขึ้นสามารถทำให้เลือดที่ผสมสารต้านการแข็งตัวของเลือด EDTA ปริมาณ 2.5  $\mu\text{L}$ . ให้แข็งตัวภายในเวลาประมาณ 20 วินาที ได้เร็วกว่าเลือดผสมสาร EDTA ที่ไม่ผ่านการฉายด้วยพลาสมาและเลือดผสมสาร EDTA ที่ผ่านการเป่าด้วยก๊าซอาร์กอนที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 5 L/min

สาขาวิชา วิศวกรรมชีวเวช (สหสาขาวิชา)

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5770165421 : MAJOR BIOMEDICAL ENGINEERING

KEYWORDS: COLD PLASMA, PLASMA JET, HIGH VOLTAGE AND HIGH FREQUENCY POWER SUPPLY , BLOOD COAGULATION BY COLD PLASMA

NATNAPIN JARUNSAK: DEVELOPMENT OF AN ATMOSPHERIC PRESSURE COLD PLASMA JET FOR BLOOD COAGULATION. ADVISOR: DECHO THONG-ARAM, Ph.D., CO-ADVISOR: PROF. SUTHILUK PATUMRAJ, Ph.D., 127 pp.

In this research was developed an atmospheric pressure cold plasma jet for blood coagulation which consists of two main parts. The first part is a high voltage and high frequency AC power supply in a fly-back configuration which could be controlled by microcontroller. The second part is a plasma probe which was made from locally available materials. It was designed to adjust the frequency and duty cycle by microcontroller at the frequency 30 35 and 40 kHz and the duty cycle 30 40 50 60 and 70 %, respectively. The high voltage could be manually adjusted from 0.1 to 15 kV<sub>rms</sub>.

The result showed that an efficiency of the developed high voltage high frequency AC Power Supply equaled 74.28%. From the study of the effects of parameters on the length and temperature of plasma jet, we found that high voltage, frequency, percentage of duty cycle and the flow rate of argon gas were important parameters that affected to the stability of plasma flame. The characteristic of the developed cold plasma jet by Optical Emission Spectroscopy (OES) showed that the electron temperature is about 0.43 eV. and the electron density of plasma is between  $5.46 \times 10^9 - 1.74 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ . at the various frequency and flow rate. It indicated that the developed plasma jet was a cold plasma. From the blood coagulation test showed that at the distance between plasma probe and the glass slice 1 cm., 2.5  $\mu\text{L}$ . plasma treatment blood with EDTA anticoagulant could be coagulated in 20 seconds which was faster than non-plasma treatment blood with EDTA and 5 L/min argon flow treatment blood with EDTA.

Field of Study: Biomedical Engineering

Academic Year: 2017

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของอาจารย์เตโช ทองอร่าม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำด้านการพัฒนาเครื่องพลาสมา ให้ความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และช่วยเหลืองานด้านการกลึงโพรบพลาสมาแก่ข้าพเจ้า

และ ศาสตราจารย์ สุทธิลักษณ์ ปทุมราช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำด้านการทดสอบการแข็งตัวของเลือด

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ มานะ ศรียุทธศักดิ์ ที่สนับสนุนเครื่องมือในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ก้องพัน อารีรักษ์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการภายนอกในการสอบโครงร่างและสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมให้ข้อเสนอแนะในงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ที่ให้คำแนะนำด้านพลาสมา และการวัดสเปกตรัมจากพลาสมา

ขอขอบคุณ ดร.กมลทิพย์ พลอยกระจ่าง ที่ให้คำแนะนำในการเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

ขอขอบคุณ นางสาวศุภกานดา สุขแพทย์ จากศูนย์เชี่ยวชาญหลอดเลือดจุลภาค ภาควิชาสรีระวิทยา คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือด้านการเก็บเลือดจากหนูทดลอง

ขอขอบคุณ Mr.Robert White และ Mr.Louis Héche ที่ช่วยตรวจทานภาษาอังกฤษในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บิดา มารดาและครอบครัว พร้อมทั้งเพื่อนิสิตปริญญาโทของภาควิชานิวเคลียร์ เพื่อนนิสิตปริญญาโทและรุ่นพี่ปริญญาเอก

หลักสูตรสหสาขาวิชา วิศวกรรมชีวเวช คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
สารบัญกราฟ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	17
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	17
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	18
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	18
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	18
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	18
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.1 คุณลักษณะของพลาสมา.....	22
2.2 พลาสมาทางเคมี.....	23
2.3 การแบ่งชนิดของพลาสมา.....	24
2.4 การเบรกดาวน์ของสถานะก๊าซ (Breakdown of gas).....	26
2.5 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการเบรกดาวน์ของสถานะก๊าซ.....	32
2.5.1 การแตกตัวเป็นไอออน (Ionization).....	32
2.5.1.1. การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชน (Collision ionization).....	32

2.5.1.2. การแตกตัวเป็นไอออนจากแสง (Photo ionization).....	33
2.5.1.3. การแตกตัวเป็นไอออนทุติยภูมิ (Secondary ionization).....	33
2.5.2. การเกาะกันของอิเล็กตรอน (Electron Attachment Process).....	33
2.5.3 การรวมตัวกัน (Recombination).....	34
2.6 สนามไฟฟ้า (Electrical field).....	34
2.7 วงจรขับหม้อแปลงความถี่สูง.....	36
2.7.1 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์.....	38
2.8 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง.....	39
2.9 พลาสมาแบบเจ็ตในความดันบรรยากาศ.....	40
2.10 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสมา.....	41
2.11 การใช้งานพลาสมาทางการแพทย์.....	43
2.12 กลไกการแข็งตัวของเลือด.....	45
2.13 การใช้พลาสมาเจ็ตในการทำให้เลือดแข็งตัว.....	45
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมา.....	52
3.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับ.....	53
3.1.1. หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง.....	54
3.1.2. วงจรขับหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์.....	55
3.1.3. การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปเหลี่ยม.....	61
3.1.4. การออกแบบวงจรแสดงผลและควบคุมสถานะการทำงาน.....	63
3.1.5. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ.....	65
3.2 โพรบสำหรับกำเนิดลำพลาสมา.....	66
3.3 ชุดควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ.....	68
บทที่ 4 วิธีการวิจัยและผลการวิจัย.....	69



4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับ.....	69
4.2 การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่ได้พัฒนาต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ด .....	71
4.2.1 ผลจากค่าไฟฟ้าแรงดันสูง.....	71
4.2.3 ผลของค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีตี้ไซเคิล .....	76
4.2.4 ผลของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน .....	79
4.3 การวัดสเปกตรัมของพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่พัฒนาขึ้น .....	82
4.3.1 การศึกษาความเข้มของสเปกตรัมของพลาสมาที่ระยะห่างระหว่างโพรบพลาสมาและหัววัดต่างกัน.....	82
4.3.2 การศึกษาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ความถี่ต่างๆ.....	84
4.3.3 การศึกษาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่างๆ .....	86
4.4 การทดสอบการแข็งตัวของเลือดด้วยเครื่องพลาสมาที่พัฒนาขึ้น .....	88
4.4.1 การทดสอบการแข็งตัวของเลือดที่ผสมสาร EDTA โดยไม่ผ่านการฉายด้วยพลาสมา.....	88
4.4.2 การทดสอบการแข็งตัวของเลือดที่ผสมสาร EDTA ที่ผ่านการฉายด้วยพลาสมา ...	89
4.4.2.1 ผลกระทบของระยะห่างของปลายโพรบและแผ่นกระจกสไลด์ .....	89
4.4.2.2 ผลกระทบระยะเวลาในการฉายด้วยพลาสมา .....	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	93
5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย.....	93
5.1.1 การทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับ .....	93
5.1.2 การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆของระบบที่ได้พัฒนาต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ด.....	93

5.1.3 การวิเคราะห์สเปกตรัมของพลาสมาเย็นแบบเจ็ด.....	94
5.1.4 การผลทดสอบการแข็งตัวของเลือดด้วยเครื่องพลาสมาที่พัฒนาขึ้น .....	94
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	94
รายการอ้างอิง .....	95
ภาคผนวก.....	99
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของ อิเล็กตรอน .....	100
ภาคผนวก ข. ส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง .....	104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	127



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2. 1	กระบวนการไอออนเซชันและพลังงานทั้งหมดของอะตอมอาร์กอนที่ใช้สำหรับทำให้เกิดกระบวนการไอออนเซชัน .....23
2. 2	เปรียบเทียบคุณสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นแบ่งตามอุณหภูมิ .....25
2. 3	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเพื่อทำให้เกิดประกายไฟ(sparking)ของก๊าซชนิดต่างๆ.....30
2. 4	ตารางเปรียบเทียบวงจรคอนเวอร์เตอร์มีการแยกกันทางวงจรไฟฟ้าระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตทั้ง 5 แบบ .....37
3. 1	การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พัฒนา.....57
3. 2	การตอบสนองค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พัฒนา 59
3. 3	การตอบสนองของค่าไฟฟ้าแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พัฒนา ...60
4. 1	ค่าไฟฟ้าแรงดันสูงเอาต์พุตของโหลดตัวต้านทานค่าต่างๆ ที่บรรจุอยู่ในฉนวนน้ำมัน.....70
4. 2	ค่าประสิทธิภาพและค่าไฟฟ้าแรงดันสูงเอาต์พุตของโหลดแต่ละชนิด .....71
4. 3	ผลกระทบจากไฟฟ้าแรงดันสูง .....72
4. 4	ผลกระทบของแต่ละความถี่ที่ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิล 60 % .....74
4. 5	ผลกระทบของแต่ละความถี่ที่ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิล 70 % .....74
4. 6	ผลกระทบของของค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ด.....77
4. 7	ผลกระทบของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ด.....80
4. 8	ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ความถี่ต่างๆ .....85
4. 9	ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ความถี่ต่างๆ.....85

4. 10 ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่างๆ .....87
4. 11 ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่างๆ .....87
4. 12 ลักษณะของเลือดที่ผสมสาร EDTA โดยไม่ผ่านการฉายด้วยพลาสมาที่ระยะเวลาต่างๆ ...88
4. 13 ผลกระทบของระยะห่างของปลายโพรบและแผ่นกระจกสไลด์เท่ากับ 0.5 1 และ 1.5 cm. ตามลำดับ ต่อการแข็งตัวของเลือดที่ผสมสาร EDTA ผ่านการฉายด้วยพลาสมาเย็นแบบเจ็ด และการเป่าด้วยก๊าซอาร์กอนที่มีอัตราการไหล 5 L/min ที่ระยะห่างของปลายโพรบและแผ่นกระจกสไลด์ 0.5 cm.....90
4. 14 การแข็งตัวของเลือดที่ผ่านการฉายด้วยพลาสมาที่ระยะเวลาต่างๆ .....92



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2. 1 การเปลี่ยนสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงาน .....	22
2. 2 กระบวนการเกิดพลาสมาจากสถานะก๊าซ .....	23
2. 3 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้เมื่อมีการเกิดการกระตุ้นของก๊าซอาร์กอนที่ทำให้เกิดอนุพันธ์ออกซิเจนที่ว่องไวและอนุพันธ์ไนโตรเจนที่ว่องไว.....	24
2. 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันในการเกิดพลาสมาที่ความดันต่างๆ	26
2. 5 ลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้นที่ความดันบรรยากาศ .....	26
2. 6 วงจรที่ใช้ในการทดลองของ Townsend .....	28
2. 7 กราฟการเบรกดาวน์ของก๊าซ.....	28
2. 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของการดิสชาร์จของก๊าซ .....	29
2. 9 (a.) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $pd$ และ $V_b$ ตามกฎของ Paschen (b.) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $pd$ และ $V_b$ ตามกฎของ Paschen ของก๊าซชนิดต่างๆ.....	30
2. 10 กลไกการเบรกดาวน์ของStremer.....	31
2. 11 วงจรที่ใช้อธิบายการเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชน .....	32
2. 12 (a.) อิเล็กโทรด 3 แบบ (b.) การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้ง 3 แบบที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่างๆ.....	35
2. 13 การจัดวงจรคอนเวอร์เตอร์มีการแยกกันทางวงจรไฟฟ้าระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต .....	37
2. 14 (a.) โครงสร้างวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (b.) การทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ .....	38
2. 15 โครงสร้างแบบต่างๆของพลาสมาแบบเจ็ตที่ความดันบรรยากาศ .....	41
2. 16 กราฟสเปกตรัมจากเครื่อง OES ของพลาสมาเจ็ตที่มีความยาวเปลวพลาสมาเท่ากับ 1 cm.....	43
2. 17 แหล่งกำเนิดพลาสมารูปแบบต่างๆ.....	44
2. 18 กระบวนการห้ามเลือด .....	45

2. 19 (a.) พลาสมาแบบ Floating-Electrode Dielectric Barrier Discharge ในอากาศ.....	46
2. 20 การแข็งตัวของเลือดเมื่อทดสอบด้วย เครื่อง FE-DBD เป็นเวลา 15 วินาที (a.) เลือดปกติ (b.) เลือดที่มีการเติมสารซีเตรทเพื่อดำเนินการแข็งตัวของเลือด .....	47
2. 21 การแข็งตัวของเลือดที่มีการเติมสารซีเตรทเพื่อดำเนินการแข็งตัวของเลือด เมื่อทดสอบด้วย เครื่อง FE-DBD เป็นเวลา 30 วินาที.....	47
2. 22 รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	49
2. 23 รูปจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเลือดที่ผ่านการรักษา ด้วยเครื่องพลาสมา รุ่น BPC-HP1 กับเครื่องพลาสมา รุ่น PN-110/120 TPG เปรียบเทียบ กับตัวควบคุมคอลลาเจน .....	50
2. 24 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของเลือดมนุษย์ที่ผสมสารยับยั้งการ แข็งตัวเมื่อมีการใช้ก๊าซ Ar, O <sub>2</sub> , He, N <sub>2</sub> , Air และ CO <sub>2</sub> ในการกำเนิดพลาสมา .....	50
2. 25 Histologyของเนื้อเยื่อแสดงตำแหน่งของ fibrinogen และเกล็ดเลือดที่ทำการห้ามเลือด ด้วยการจี้ด้วยไฟฟ้า เปรียบเทียบกับการใช้เครื่อง KINPen MED.....	51
3. 1 แผนผังโครงสร้างการของเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ทที่ออกแบบใช้งาน.....	52
3. 2 (a.) เครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ทที่พัฒนาขึ้น (b.) วงจรทั้งหมดของเครื่องพลาสมาเย็นแบบ เจ็ทที่พัฒนาขึ้น .....	53
3. 3 โครงสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับ.....	54
3. 4 (a.) หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงและ (b.) บอบบินที่พัฒนาขึ้น .....	55
3. 5 โครงสร้างของวงจรขับหม้อแปลงแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ .....	56
3. 6 การจัดอุปกรณ์เพื่อทดสอบการตอบสนองของความถี่ของหม้อแปลงที่พัฒนาขึ้น .....	57
3. 7 วงจรของไอซี 555 ที่สามารถปรับค่าความถี่และเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิลได้.....	61
3. 8 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปเหลี่ยมที่ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	63
3. 9 แผนผังการทำงาน (Flow chart) ของวงจรแสดงผลและควบคุมสถานะการทำงาน .....	64
3. 10 โครงสร้างวงจรแสดงผลและควบคุมสถานะการทำงาน.....	65
3. 11 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำชนิดปรับค่าได้ .....	66

3. 12 โครงสร้างของโพรบสำหรับกำเนิดลำพลาสมา .....67

3. 13 โครงสร้างชุดควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ .....68

3. 14 (a.) ข้อต่อก๊าซขาเข้าสำหรับต่อท่อลมจากถังก๊าซ (b.) ข้อต่อก๊าซขาออกสำหรับต่อท่อก๊าซ  
สำหรับเข้าโพรบกำเนิดพลาสมาเย็นแบบเจ็ด .....68



## สารบัญญกราฟ

กราฟที่	หน้า
3. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าแรงดันสูงและค่าความถี่.....	58
3. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าแรงดันสูงและค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิล.....	59
3. 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าแรงดันสูงและค่าไฟฟ้าแรงดันต่ำ ( $V_{DD}$ ).....	60
4. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าแรงดันสูงเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้านเอาต์พุต.....	70
4. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าแรงดันสูงและความยาวของเปลวพลาสมาจากปลายโพรบ.....	72
4. 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าแรงดันสูงและอุณหภูมิของเปลวพลาสมา.....	73
4. 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความยาวของเปลวพลาสมาจากปลายโพรบเมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิลเท่ากับ 60 %และ70 %.....	75
4. 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิลเท่ากับ 60 %และ70 %.....	75
4. 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวพลาสมาจากปลายโพรบและค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิล.....	78
4. 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเปลวพลาสมาและค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิล.....	78
4. 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวพลาสมาจากปลายโพรบและอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน.....	81
4. 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเปลวพลาสมาและอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน.....	81
4. 10 กราฟBlotzmann ของสเปกตรัมพลาสมาที่ความถี่ต่างๆ.....	84
4. 11 กราฟBlotzmann ของสเปกตรัมพลาสมาที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่างๆ.....	86



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

หลังจากที่ได้มีการค้นพบสถานะที่ 4 ของสสารที่เรียกว่า “พลาสมา” ขึ้น ทำให้ นักวิทยาศาสตร์พยายามนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้ในการ ปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวของวัสดุ การบำบัดน้ำเสีย การฆ่าเชื้อโรคและแบคทีเรีย เป็นต้น สำหรับ ในงานทางด้านทางการแพทย์และด้านทันตกรรมก็มีงานวิจัยที่นำพลาสมาไปประยุกต์ใช้ในการรักษา บาดแผลเรื้อรัง ฆ่าเซลล์มะเร็ง การฟอกสีฟัน การห้ามเลือดในการผ่าตัด กระตุ้นการเพิ่มจำนวน เซลล์ ฯลฯ ทั้งนี้เพราะพลาสมามีคุณลักษณะและคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างไปจากสสารสถานะ อื่น คือพลาสมาประกอบไปด้วย อนุภาคที่มีประจุบวก ประจุลบและอะตอมที่เป็นกลาง สามารถ ปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านยูวีได้ จากการศึกษากระบวนการห้ามเลือด (Hemostasis) พบว่าการแข็งตัวเป็นลิ่มเลือด (Blood coagulation) ก็เป็นอีกหนึ่งกลไกที่สำคัญในห้ามเลือด เพื่อป้องกันการสูญเสียเลือดเมื่อหลอดเลือดเกิดการฉีกขาด ซึ่งในการผ่าตัดทางการแพทย์แต่ละ ครั้งอาจจะใช้เวลานาน ทำให้ผู้ป่วยอาจเสียเลือดมากจนเป็นอันตรายต่อชีวิตได้ ในอดีตมีการห้าม เลือดโดยใช้สารเคมีที่มีฤทธิ์รุนแรงตลอดจนการใช้ความร้อนที่อาจส่งผลทำให้บาดแผลเกิด การติดเชื้อง่ายต่อมาที่มีการนำเครื่องผ่าตัดและจี้ด้วยไฟฟ้า มาใช้งานจนถึงปัจจุบัน เมื่อ เทคโนโลยีทางด้านพลาสมา มีความก้าวหน้ามากขึ้นก็ได้ถูกพัฒนามาใช้แทนเครื่องผ่าตัดและจี้ ด้วยไฟฟ้า [1] โดยเครื่องห้ามเลือดด้วยเทคนิคพลาสมา (Argon Plasma Coagulation; APC) ที่ พัฒนาขึ้นในระยะแรกอาศัยหลักการกำเนิดพลาสมาด้วยการให้พลังงานที่มากพอกับก๊าซอาร์กอน จนทำให้ก๊าซทั้งหมดเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) แต่เนื่องจากพลาสมาที่เกิดขึ้นนี้มี อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการไหม้ของแผลเซลล์เนื้อเยื่อบริเวณที่ทำการรักษาเสียหาย และทำ อันตรายต่อเซลล์รอบๆ บาดแผลได้ [2] จึงได้มีการพัฒนาพลาสมาเย็น (cold plasma) ขึ้นเพื่อ ลดปัญหาเรื่องความร้อนที่เกิดขึ้น

พลาสมาเย็นเกิดจากการให้พลังงานกระตุ้นสสารที่มีสถานะเป็นก๊าซภายใต้อุณหภูมิต่ำ และความดันบรรยากาศปกติทำให้ก๊าซแตกตัวเพียงบางส่วน การควบคุมการเกิดพลาสมาและ อุณหภูมิของพลาสมาสามารถทำได้โดยการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ความถี่และชนิดของก๊าซที่นำมาใช้งาน ได้แก่ ก๊าซอาร์กอน ก๊าซฮีเลียม ก๊าซไนโตรเจน และ อากาศ เป็นต้น จากงานวิจัยก่อนหน้ามีการศึกษาพบว่าพลาสมาเย็นช่วยเร่งกระบวนการฟื้นตัว ของบาดแผลในผู้ป่วยที่มีบาดแผลเรื้อรัง (chronic wound) และแผลเรื้อรังที่เกิดจากหลอดเลือด

ด้าลื้อม [2] ช่วร่งการแข่งตัวเป็นลุ่มเลือด [3] และนอกจากนี้ยังพบว่าการใช้พลาสมาเย็นรักษาปลอดภัยไม่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ (Mutagenicity) [4] แต่การนำเครื่องพลาสมาจากก๊าซอาร์กอนเย็นมาใช้ในประเทศไทยต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะพัฒนาเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่ความดันบรรยากาศจากก๊าซอาร์กอนขึ้นใช้สำหรับการห้ามเลือดทางการแพทย์ เพื่อช่วยลดต้นทุนและการนำเข้าอุปกรณ์ทางการแพทย์จากต่างประเทศ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่ความดันบรรยากาศสำหรับประยุกต์ใช้ในการห้ามเลือดทางการแพทย์

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่ความดันบรรยากาศ

1.3.2 ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความถี่ อัตราการไหลของก๊าซที่จะนำมาใช้งานและไฟฟ้าแรงดันสูง เป็นต้น ที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดเปลวพลาสมาที่มีความยาวเมื่อวัดจากปลายโพรบ 1 cm

1.3.3 ทดสอบการแข่งตัวของหยดเลือดด้วยเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่พัฒนาขึ้น

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ออกแบบและจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทำพลาสมาโพรบ

1.4.3 ออกแบบและสร้างเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่ความดันบรรยากาศ

1.4.4 ศึกษาผลที่ได้จากการทดลองพร้อมทั้งผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการแข่งตัวของเลือด

1.4.5 วิเคราะห์และประเมินผลการทดลอง

1.4.6 สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่ความดันบรรยากาศสำหรับประยุกต์ใช้ในการห้ามเลือดทางการแพทย์ที่มีราคาประหยัด

### 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 Gregory Fridman และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาการแข่งตัวของเลือดและการฆ่าเชื้อของเนื้อเยื่อในสิ่งมีชีวิตด้วย Floating - Electrode Dielectric Barrier Discharge (FE - DBD) ในอากาศ โดยอาศัยเนื้อเยื่อของสัตว์หรือร่างกายของมนุษย์ที่มีปริมาณน้ำอยู่มาก เป็นข้อ

อิเล็กโทรดหนึ่งขั้ว ซึ่งทำให้ได้ค่าของไดอิเล็กทริกสูงชันสามารถเกิดการสะสมของประจุได้ดีทำให้เกิด e-plasma ได้ดีที่ช่องว่างระหว่างเนื้อเยื่อและอิเล็กโทรดอีกขั้วหนึ่ง จากนั้นได้ทำการทดสอบการแข็งตัวของเลือดโดยการใช้เลือดจากคนสุภาพดีมาปริมาณ 500  $\mu\text{l}$  มาทำการทดสอบด้วยเครื่อง FE- DBD พบว่าเลือดที่ทำการทดสอบ เป็นเวลา 15 วินาทีที่มีการแข็งตัวเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบกับม้ามของมนุษย์ที่ถูกตัดพบว่า เมื่อมีการฉีกขาดของบาดแผลชั้นเลือดจะมีการซึมของเลือดบริเวณที่ถูกตัด แต่เมื่อทำการรักษาด้วยเครื่อง FE- DBD เป็นเวลา 30 วินาทีบริเวณบาดแผลไม่มีการซึมของเลือด แต่เนื้อเยื่อบริเวณโดยรอบเหมือนมีการไหม้เกิดขึ้นขณะที่อุณหภูมิบาดแผลยังเป็นอุณหภูมิประมาณอุณหภูมิห้องซึ่งคาดว่าอาจเกิดจากกลไกการแข็งตัวของเลือดด้วยพลาสมาอาจจะไปทำให้ค่า pH หรือความเข้มข้นของ  $\text{Ca}^{2+}$  เกิดการเปลี่ยนแปลง

1.6.2 Sameer U. Kalghatgi และคณะ [5] ได้ศึกษาการกลไกการแข็งตัวของเลือดด้วย Non - thermal Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge Plasma โดยในงานวิจัยนี้ใช้เลือดที่มีการผสมของสารซีเตรทเพื่อต้านการแข็งตัวของเลือดเป็นโมเดลแทนโรครีโมฟิเลียเทียบกับเลือดปกติ พบว่า หลังจากทดสอบด้วย FE - DBD เป็นเวลา 15 วินาที มีการเกิดเกล็ดเลือดขึ้นปานกลาง นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบโดยการใช้ aluminum foil มาปิดเพื่อศึกษาว่าลิ่มเลือดที่เกิดขึ้นเกิดจากความร้อนหรือไม่ หลังการทดสอบการแข็งตัวของเลือดที่มีการเติมสารซีเตรทเพื่อต้านการแข็งตัวของเลือดด้วยเครื่อง FE- DBD เป็นเวลา 30 วินาที ไม่มีการเกิดขึ้นของลิ่มเลือดเกิดขึ้น ต่อมาได้ทำการทดสอบว่าการเกิดขึ้นของลิ่มเลือดที่เกิดขึ้นเกิดจากรังสี UV หรือสนามไฟฟ้าหรือไม่ โดยการนำกระจกแก้วที่มีความหนา 0.25 mm มาปิด พบว่าหลังจากทดสอบด้วยเครื่อง FE- DBD เป็นเวลา 30 วินาที ไม่มีการเกิดขึ้นของลิ่มเลือดเกิดขึ้น เขาจึงสรุปว่าการเกิดขึ้นของลิ่มเลือดที่เกิดขึ้นเกิดจาก e-plasma ไม่ได้เกิดจากรังสี UV หรือสนามไฟฟ้า นอกจากนี้ยังพบว่า e-plasma ไม่ได้ไปเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{Ca}^{2+}$  หรือเปลี่ยนแปลงค่าของ pH เลย นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบโปรตีนในเลือดมนุษย์โดยใช้ albumin และ fibrinogen มาทดสอบด้วยเครื่อง FE-DBD เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำมาวัดการกระจายตัวของโปรตีนด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS) พบว่าการกระจายตัวของขนาดโปรตีน albumin ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่การกระจายตัวของขนาดโปรตีน fibrinogen มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะ สรุปว่า e-plasma จากเครื่อง FE-DBD สามารถไปเร่งการเปลี่ยนแปลงจาก fibrinogen ไปเป็น fibrin และส่งผลโดยตรงต่อการห้ามเลือด

1.6.3 Kenji Miyamoto และคณะ [6] ทำการศึกษาการแข็งตัวเป็นลิ่มเลือดของเซลล์เม็ดเลือดแดงด้วยพลาสมาอุณหภูมิต่ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องพลาสมาอุณหภูมิต่ำแบบ Dielectric barrier discharge รุ่น BPC-HP1 ของบริษัท Nikon กับเครื่อง

พลาสมาอุณหภูมิต่ำแบบ micro hollow discharge รุ่น PN-110/120 TPG ของ NU Global งานวิจัยนี้ใช้ก๊าซฮีเลียมบริสุทธิ์ที่มีอัตราการไหล 2 slm. เพื่อกระตุ้นให้เกิดสถานะพลาสมา และได้ทำการวัดอุณหภูมิของพลาสมาที่เกิดขึ้นพบว่า พลาสมาของเครื่อง BPC-HP1 มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ส่วนพลาสมาของเครื่อง PN-110/120 TPG มีอุณหภูมิประมาณ 50°C หลังจากนั้นได้ทำการศึกษาการแข็งตัวของลิ้มเลือดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเปรียบเทียบกับตัวควบคุมคือการใช้วัสดุคอลลาลาเจนเป็นตัวห้ามเลือด พบว่าผลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของการรักษาด้วยเครื่อง BPC-HP1 มีการเกิดโครงสร้างคล้ายเยื่อหุ้มแต่ไม่พบโครงสร้างดังกล่าวในการรักษาด้วยเครื่อง PN-110/120 TPG ส่วนผลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่า การรักษาด้วยเครื่อง BPC-HP1 มีการเกาะกลุ่มกันของเซลล์เม็ดเลือดแดงขณะที่การรักษาด้วยเครื่อง PN-110/120 TPG มีการเกาะกลุ่มกันแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ส่วนในตัวควบคุมคอลลาลาเจนพบว่ามีทั้งการเกาะกลุ่มกันของเซลล์เม็ดเลือดแดงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์เม็ดเลือดแดง จากนั้นได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกับความเข้มข้นของฮีโมโกลบินในสารละลาย PBS พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อให้เกิดความแม่นยำต่อความแข็งตัวของลิ้มเลือด

1.6.4 Gui-Min Xu และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาเรื่อง DBD Plasma Jet in Atmospheric Pressure Argon เป็นการกระตุ้นสถานะพลาสมาโดยใช้แหล่งกำเนิดแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ โดยใช้ความถี่ 34 kHz รูปคลื่นไซน์ ที่มีกำลังไฟฟ้าหลายสิบบวัตต์ จากก๊าซอาร์กอน โดยในงานนี้มีการวัดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (anemometer) และวัดอุณหภูมิของเปลวพลาสมาที่เกิดขึ้นด้วย thermocouple พบว่า เมื่ออัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนมีค่ามาก อุณหภูมิที่ได้จะใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง และลักษณะการ discharge ที่เกิดขึ้นเป็นแบบ glow discharge ซึ่งพลาสมาอุณหภูมิต่ำนี้ เหมาะสำหรับการฆ่าเชื้อทางการแพทย์และการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านพื้นผิวของวัสดุ

1.6.5 L.Xu และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Experimental study and sterilizing application of atmospheric pressure plasmas โดยงานวิจัยนี้เป็นการสร้างพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ที่ความดันบรรยากาศเพื่อนำไปฆ่าเชื้อ Escherichia coli. ซึ่งงานวิจัยนี้มีออกแบบโปรบแตกต่างกัน 2 แบบคือ PJ-1 และ PJ-2 ใช้ความถี่เสียง ช่วง 5 – 20 kHz และมีอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 200 L/hr. ในการทำให้เกิดเปลวพลาสมาที่มีความยาว 1.5 cm. เมื่อวัดจากปลายโปรบ และอุณหภูมิของพลาสมาที่เกิดของโปรบ PJ-1 และ PJ-2 คือ 47 °C และ 38 °C ตามลำดับ จากการทดสอบการนำไปฆ่าเชื้อ Escherichia coli. พบว่า PJ-2 สามารถฆ่าเชื้อชนิดนี้ได้ดีกว่า PJ-1

1.6.6 ลีดา มิตรายนและคณะ [9] ได้ทำการพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาความหนาแน่นสูงที่ความดันบรรยากาศแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิวาร์จ โดยในงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาที่มีค่าไฟฟ้าแรงดันสูง 30 kVpp มีช่วงความถี่ตอบสนองอยู่ระหว่าง 67.8 – 74k Hz และที่ 20 kVpp มีช่วงระหว่าง 56.28 – 76.65 kHz และได้ทำการวิเคราะห์หาอุณหภูมิและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากสเปกตรัมที่วัดด้วยเครื่อง Optical Emission spectroscopy (OES) พบว่า สเปกตรัมของก๊าซอาร์กอนที่ได้จากความถี่ต่างๆมีลักษณะคล้ายคลึงกันและได้อุณหภูมิของอิเล็กตรอนอยู่ระหว่าง 1.67 eV ถึง 1.78 eV. ส่วนความหนาแน่นอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง  $0.14 \times 10^{24}$  ถึง  $3.87 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$

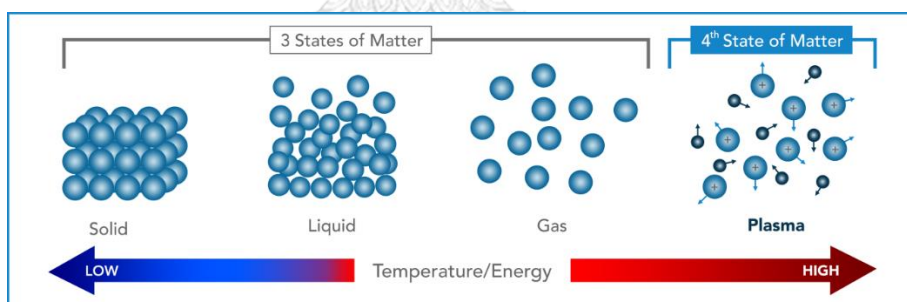
1.6.7 Benabbas และคณะ [10] ได้ศึกษาผลกระทบตัวแปรทางไฟฟ้าต่อลักษณะของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ตที่ความดันบรรยากาศโดยใช้ก๊าซอาร์กอน ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการใช้แหล่งจ่ายไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์สี่ห่อ Redline รุ่น G2000 ที่สามารถจ่ายค่าแรงดันสูงได้ 20 kVpp และปรับค่าความถี่ได้ในช่วง 4 ถึง 500 kHz และมีการสร้างโพรบแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิวาร์จที่มีโคตรสร้างเป็นทรงกระบอก ซึ่งสามารถกระตุ้นด้วยการเกิดเปลวพลาสมาได้ 6 cm. ที่ 10 kVpp และความถี่ 50kHz. พบว่า ความยาวของเปลวพลาสมาขึ้นอยู่กับการจัดวางอิเล็กโทรด ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และค่าความถี่ของสัญญาณ โดยความของเปลวพลาสมาจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และค่าความถี่เพิ่มขึ้นแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเปลวพลาสมาจะลดลงเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และค่าความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเปลวพลาสมาอาจเป็นสิ่งสำคัญต่องานทางด้านการแพทย์

1.6.8 Lotfy และคณะ [11] ได้ศึกษาการสร้างระบบพลาสมาเย็นแบบเจ็ตเพื่อนำไปใช้งานด้านการแพทย์ ทางชีวภาพและทางด้านพอลิเมอร์ โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการนำแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับหลอดนีออนมาประยุกต์ใช้เพื่อลดต้นทุนของแหล่งกำเนิดความถี่คลื่นวิทยุ ซึ่งแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับหลอดนีออนสามารถให้แรงดันสูง 10 kv. 30 A. และความถี่ 20 kHz. ซึ่งเป็นความถี่ต่ำในช่วงวิทยุ ซึ่งข้อดีของพลาสมาเย็นแบบเจ็ตที่ออกแบบไม่ต้องใช้ระบบหล่อเย็น และระบบสุญญากาศ และใช้ก๊าซไนโตรเจนในการกระตุ้นให้เกิดพลาสมา ซึ่งสามารถเกิดเปลวพลาสมาที่มีความยาว 7 mm. ที่ค่าไฟฟ้าแรงดันสูงขาเข้าเท่ากับ 3 kV และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 14 L/min จากการศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของพลาสมาและอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนระหว่าง 2 ถึง 14 L/min พบว่า อุณหภูมิของพลาสมาลดลงเมื่อมีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้น

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คุณสมบัติของพลาสมา

สสารโดยทั่วไปมีการเปลี่ยนสถานะเมื่อได้รับพลังงานที่เหมาะสมซึ่งลักษณะและคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 2.1 สำหรับสถานะของพลาสมาในทางฟิสิกส์ถูกพิจารณาให้เป็นสถานะที่ 4 ของสสาร มีการค้นพบครั้งแรก โดยเซอร์ วิลเลียม ครูกส์ (Sir William Crookes) เมื่อ ค.ศ. 1879 ต่อมาในปี ค.ศ. 1928 นักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบลชื่อ เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) กำหนดคำว่าพลาสมา (plasma) ขึ้นมาแทนสถานะของสสารนี้ เนื่องจากได้นึกถึงพลาสมาของเลือด[12] การที่พลาสมาถูกจัดว่าเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจากมีคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะที่แตกต่างไปจากสถานะอื่นของสสารอย่างชัดเจน กล่าวคือพลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุทั้งประจุบวกและลบทำให้สามารถปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ยักรวมถึงอะตอมหรือโมเลกุลที่ยังไม่ถูกกระตุ้นในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ หรือที่เรียกว่า “quasi neutral” ซึ่งทั้งหมดนี้มีการแสดงพฤติกรรมร่วมกันเรียกว่า “collective behavior” [13]

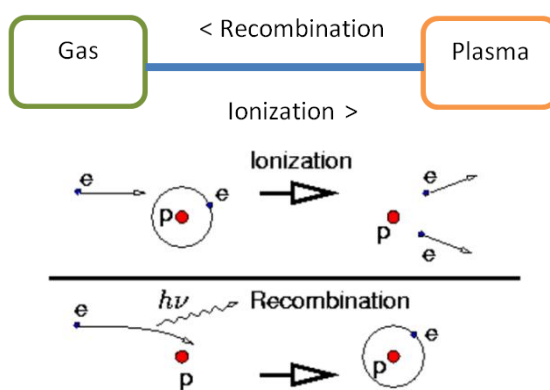


รูปที่ 2. 1 การเปลี่ยนสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงาน

ที่มารูป : ( <http://tetronics.com/assets/plasma-diagram.png> )

กระบวนการเกิดพลาสมาจากสถานะก๊าซ โดยทั่วไปทำได้ด้วยการให้พลังงานปริมาณมากแก่ก๊าซที่เป็นกลาง ซึ่งพลังงานภายนอกที่ใช้ในการกระตุ้นอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ ไฟฟ้ากระแสตรง ไฟฟ้ากระแสสลับ คลื่นความถี่วิทยุ และคลื่นความถี่ไมโครเวฟ เป็นต้น เมื่อก๊าซได้รับพลังงานที่มีค่ามากพอจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่า “กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization)” ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเหลือจากการชนและไอออนบางส่วนที่สามารถกลับมารวมตัวกลับมาเป็นอะตอมเดิม

และคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือรังสียูวี กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า “กระบวนการรวมตัว (Recombination)” ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2. 2กระบวนการเกิดพลาสมาจากสถานะก๊าซ

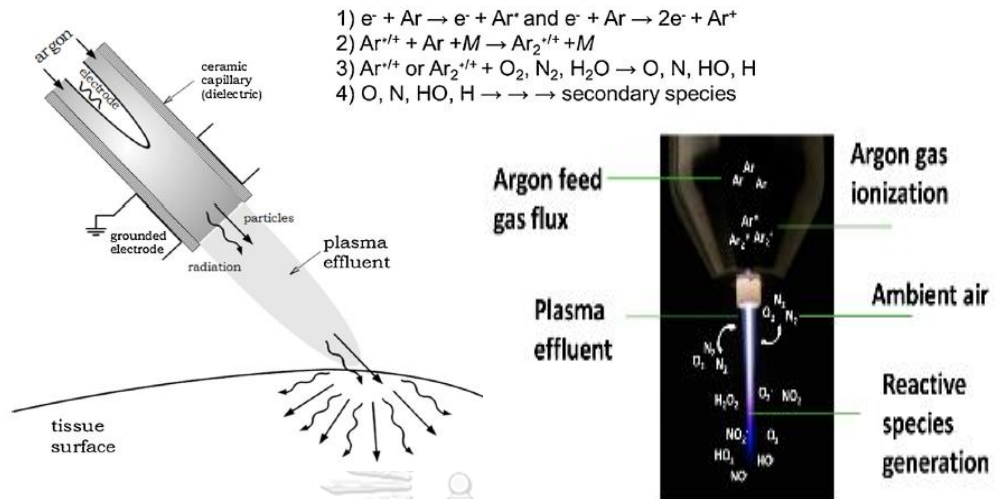
ที่มารูป : (<http://silas.psf.mit.edu/introplasma/figures/chap1/ionrecomb1.png>)

## 2.2 พลาสมาทางเคมี

ในทางเคมีพลาสมาประกอบด้วย อนุพันธ์ออกซิเจนและไนโตรเจนที่ว่องไว (Reactive Oxygen and Nitrogen species; RONS) ซึ่งแบ่งเป็น 3 ชนิดได้แก่ อนุภาคที่มีช่วงชีวิตสั้นได้แก่  $N_2^*$ ,  $O_2^*$ ,  $\bullet OH$ , และ  $N_2^+$  หลังจากมีการเกิดเปลวพลาสมาเกิดขึ้นจะมีการเกิดของอนุพันธ์ที่มีช่วงชีวิตยาว  $H_2O_2$ ,  $O$ ,  $O_3$ ,  $NO$  และโมเลกุลหรืออะตอมพวกรวม Metastable  $O_2(A)$ ,  $N_2(A)$ ,  $Ar(A)$  [4, 14] กระบวนการไอออไนเซชันของก๊าซอาร์กอนที่ทำให้เกิดอนุพันธ์ออกซิเจนที่ว่องไว และอนุพันธ์ไนโตรเจนที่ว่องไวตามตารางที่ 2.1 และ รูปที่ 2.3 โดยส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้พลาสมาจะเกี่ยวข้องกับการทำปฏิกิริยาของ อนุพันธ์ออกซิเจนที่ว่องไว และอนุพันธ์ไนโตรเจนที่ว่องไว กับสารตั้งต้น

ตารางที่ 2. 1 กระบวนการไอออไนเซชันและพลังงานทั้งหมดของอะตอมอาร์กอนที่ใช้สำหรับทำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชัน [15]

Reaction	Formula	Type	$\Delta\epsilon(eV)$
1	$e + Ar \rightarrow e + Ar$	Elastic	0
2	$e + Ar \rightarrow e + Ar^s$	Excitation	11.5
3	$e + Ar^* \rightarrow e + Ar$	Superelastic	-11.5
4	$e + Ar \rightarrow 2e + Ar^+$	Ionization	15.8
5	$e + Ar^* \rightarrow 2e + Ar^+$	Ionization	4.427
6	$Ar^* + Ar^* \rightarrow e + Ar + Ar^+$	Penning ionization	---
7	$Ar^* + Ar \rightarrow Ar + Ar$	Metastable quenching	---



รูปที่ 2. 3 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้เมื่อมีการเกิดการกระตุ้นของก๊าซอาร์กอนที่ทำให้เกิดอนุพันธ์ออกซิเจนที่ว่องไวและอนุพันธ์ไนโตรเจนที่ว่องไว [4, 16]

### 2.3 การแบ่งชนิดของพลาสมา

พลาสมาสามารถแบ่งออกตามอุณหภูมิออกเป็น 2 แบบ คือ พลาสมาร้อน (hot plasma หรือ Thermal Plasma) และพลาสมาเย็น (cold plasma) พลาสมาร้อนเกิดจากการให้พลังงานที่มากพอกับก๊าซภายใต้ความดันสุญญากาศ ทำให้ก๊าซเกือบทั้งหมดเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) อุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเท่ากับอุณหภูมิของไอออนและอนุภาคที่เป็นกลางอุณหภูมิรวมของพลาสมาที่เกิดทั้งหมดจะสูงขึ้นตามค่าของพลังงาน แต่เนื่องจากพลาสมาชนิดนี้ทำภายใต้ความดันสุญญากาศทำให้มีราคาแพง ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาพลาสมาเย็นขึ้น พลาสมาแบบเย็นเกิดจากการให้พลังงานกระตุ้นสถานะก๊าซภายใต้ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้องทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเพียงบางส่วน ซึ่งทำให้อุณหภูมิของไอออนที่แตกตัวออกมาสามารถเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิห้อง [17, 18] เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของพลาสมาที่แบ่งตามอุณหภูมิเป็นไปตามตารางที่ 2.2

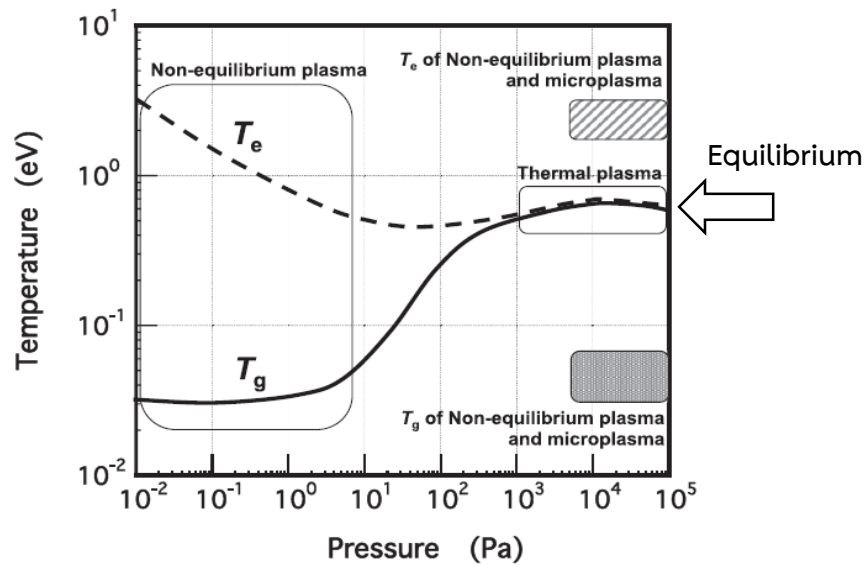


ตารางที่ 2. 2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นแบ่งตามอุณหภูมิ [19]

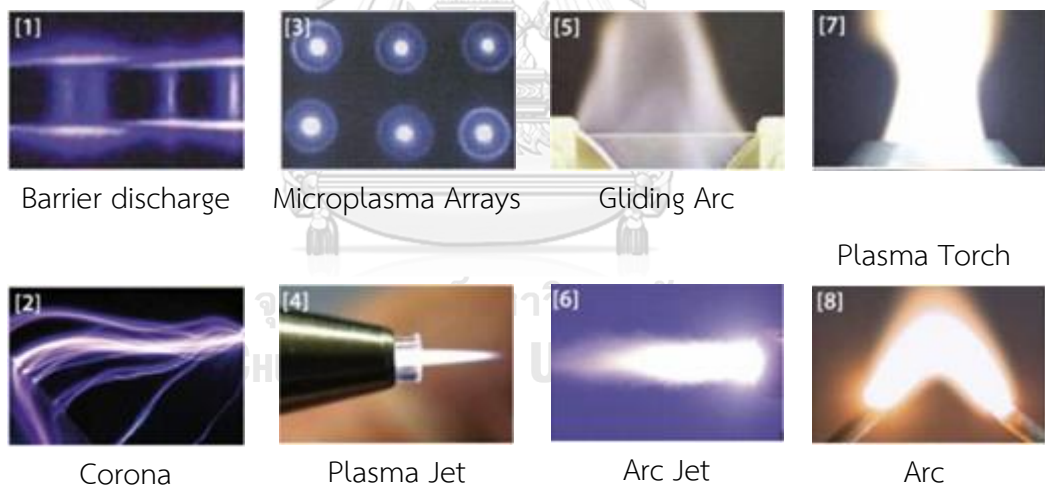
Non-Thermal (NT) Plasmas		Thermal Plasmas
“Cold” Non-Thermal Plasmas	Translational (“Hot NT”) Plasmas	
$T_i \approx T_g \approx 300 \dots 400\text{K}$ $T_i \ll T_e < 10^5 \text{ K (10 eV)}$	$T_i \approx T_g \leq 10^4 \dots 10^5 \text{ K}$ $T_i \approx T_g \leq 4 \times 10^3 \text{ K}$	$T_i \approx T_g \approx T_e$ $T_x < 5 \times 10^3 \dots 10^4\text{K}$

พลาสมาแบ่งตามเงื่อนไขความดันก๊าซ ตามรูปที่ 2.4 โดยทั่วไปอิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าไอออนประมาณ  $10^3 - 10^4$  เท่า ทำให้อิเล็กตรอนต้องใช้พลังงานสูงในการเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า หรือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความดันสูง ความถี่ในการชนกันของอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซมีมาก ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซจนเข้าสู่ภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอน ( $T_e$ ) เท่ากับอุณหภูมิของก๊าซ ( $T_g$ ) ความหนาแน่นของพลาสมา (คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอน)อยู่ในช่วง  $10^{16} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  เรียกพลาสมาที่เกิดขึ้นว่า พลาสมาที่ภาวะสมดุล(Equilibrium Plasma)

ที่ความดันต่ำ ความถี่ในการชนกันของอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซมีน้อย ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซน้อย อุณหภูมิของอิเล็กตรอน ( $T_e$ ) มากกว่าอุณหภูมิของก๊าซ ( $T_g$ ) ความหนาแน่นของพลาสมาอยู่ในช่วง  $10^8 - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  เรียกพลาสมาที่เกิดขึ้นว่า พลาสมาที่ภาวะไม่สมดุล (Non - Equilibrium Plasma) ซึ่งพลาสมาชนิดนี้ต้องใช้ระบบสุญญากาศ จึงเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง และขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดของระบบสุญญากาศ ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาพลาสมาที่ความดันบรรยากาศขึ้น แต่ก็มีปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมเกิดดิสชาร์จที่เป็นไปอย่างต่อเนื่อง และมีการเกิดประกายไฟ (arcing) ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการออกแบบให้ขั้วอิเล็กโทรดให้มีลักษณะปลายแหลมในการดิสชาร์จแบบโคโรนา การใช้ฉนวนแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ และการทำแหล่งกำเนิดให้มีการไหลของก๊าซผ่านขั้วอิเล็กโทรดในพลาสมาแบบเจ็ต เป็นต้น ลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้นที่ความดันบรรยากาศเป็นไปตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2. 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันในการเกิดพลาสมาที่ความดันต่างๆ [20]



รูปที่ 2. 5 ลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้นที่ความดันบรรยากาศ [19]

## 2.4 การเบรกดาว์นของสถานะก๊าซ (Breakdown of gas) [21, 22]

โดยทั่วไปก๊าซมีคุณสมบัติเป็นฉนวนแต่เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งเข้าไประหว่างขั้วอิเล็กโทรดในตัวกลางที่มีสถานะเป็นก๊าซ จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจำนวนมากเกินค่าที่ฉนวนจะทนต่อสนามไฟฟ้าได้จึงเปลี่ยนสภาพจากฉนวนไปเป็นสภาพนำไฟฟ้า ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการเบรกดาว์น (Breakdown) โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฉนวนจนทำให้ฉนวนเกิดการเบรกดาว์นเรียกว่า แรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์น (Breakdown Voltage) ซึ่งกลไกการเบรกดาว์นใน

สถานะก๊าซสามารถอธิบายได้จากมี 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีของ Townsend และ ทฤษฎีของ Streammer

ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และความดันต่ำ สามารถอธิบายกลไกการเกิดการเบรกดาวนในสถานะก๊าซได้โดยกฎของ Townsend โดย Townsend ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระหว่างอิเล็กโทรดแบบระนาบที่วางขนานกัน ตามรูปที่ 2.6 เมื่อมีการส่องของแสง UV ทำให้เกิด  $e^-$  กลุ่มแรกที่หลุดออกจากขั้วแคโทด (ขั้วลบ) และกลุ่มอิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด (ขั้วบวก) พร้อมทั้งมีการชนเข้ากับอะตอมของก๊าซที่เป็นกลางและเกิดเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนกลุ่มใหม่เกิดขึ้น ซึ่งทุกๆ ระยะห่างจากแคโทดเท่ากับ  $x$  ซึ่งกราฟแสดงการเบรกดาวนของก๊าซเป็นไปตามรูปที่ 2.7 Townsend ได้อธิบายว่าเมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนจนถึง  $V_3$  จะมีการเกิดจากการไอออไนเซชันจากการชนกันของ electron ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของจำนวนอิเล็กตรอนจึงเป็นเหตุให้กระแสเพิ่มขึ้น เป็นแบบ Exponential ซึ่งช่วงนี้จะอยู่ในขบวนการของ alpha (Process) สามารถคำนวณกระแสเฉลี่ยในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดได้จากสมการที่ 2.1

$$I = I_0 e^{\alpha x} \quad \dots\dots\dots 2.1$$

แต่หลังจากที่ทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้ามากกว่า  $V_3$  กระแสจะเพิ่มขึ้นมากกว่าแบบ alpha (Process) การเพิ่มขึ้นของกระแสในช่วงนี้เกิดจากขบวนการ gamma ( $\gamma$  Process) กระแสไฟฟ้าที่สภาวะคงที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

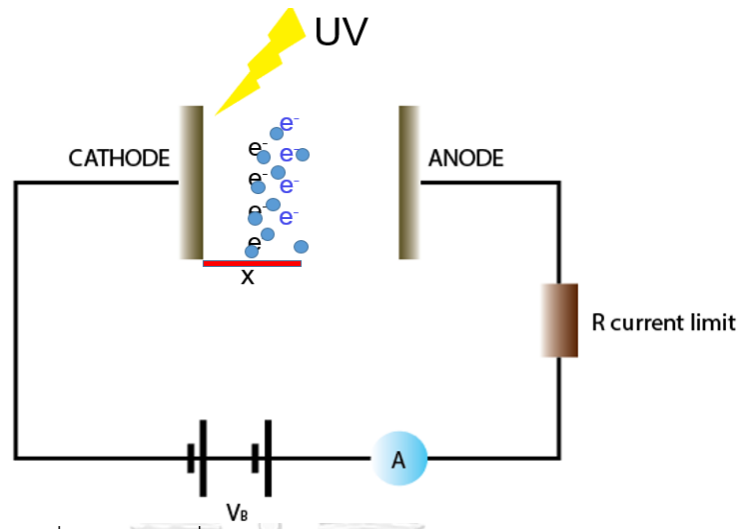
$$I = \frac{I_0 e^{\alpha x}}{1 - \gamma(e^{\alpha x} - 1)} \quad \dots\dots\dots 2.2$$

โดย  $I_0$  กระแสเริ่มต้นที่ขั้วแคโทด  $\alpha$  เป็นสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันตัวแรกของ Townsend ซึ่งหมายถึงจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหนึ่งตัวเคลื่อนที่ในทิศทางของสนามไฟฟ้าเป็นระยะทาง 1cm. ขึ้นอยู่กับความดันก๊าซ (p) ที่สัมพันธ์กับความถี่ในการชน และ  $E/p$  และแปรผกผันกับระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) ของอิเล็กตรอน  $\gamma$  เป็นสัมประสิทธิ์ของการไอออไนเซชันตัวที่สองของ Townsend ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทด, อุณหภูมิแคโทด และชนิดของก๊าซเป็นต้น โดยถ้าเทอม  $\gamma(e^{\alpha x} - 1) = 1$  กระแสจะมีค่าเป็นอินฟินิตี้ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณีคือ

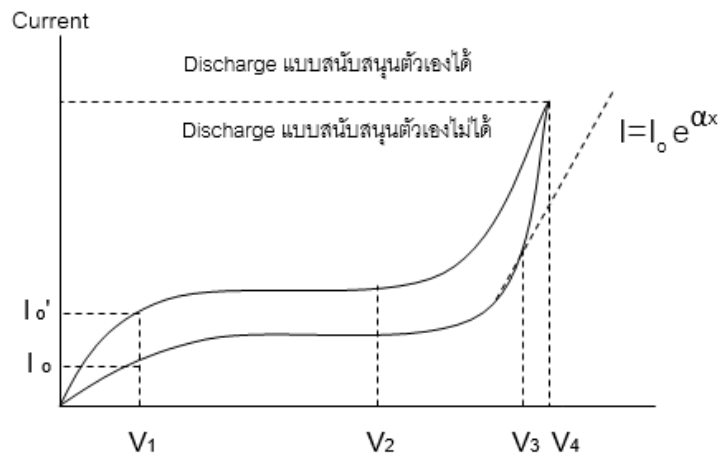
$\gamma e^{\alpha x} < 1$  จะเกิดการดิสชาร์จแบบสนับสนุนตัวเองไม่ได้

$\gamma e^{\alpha x} = 1$  จะเกิดการดิสชาร์จแบบสนับสนุนตัวเองได้

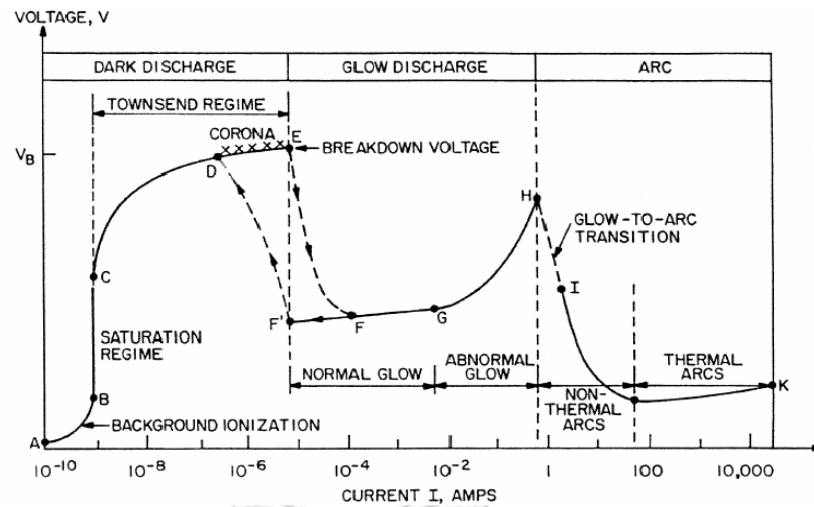
$\gamma e^{\alpha x} > 1$  จะเกิดavalancheมาก ทำให้เกิดกระแสไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2. 6 วงจรที่ใช้ในการทดลองของ Townsend [23]



รูปที่ 2. 7 กราฟการเบรกดาวน์ของก๊าซ [21]



รูปที่ 2. 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของการดีสชาร์จของก๊าซ  
ที่มีรูป :

([https://www.researchgate.net/profile/EB\\_Sozer/publication/253328797/figure/fig4/AS:298042923208720@1448070378761/DC-Gas-Discharge-V-I-characteristics-10.png](https://www.researchgate.net/profile/EB_Sozer/publication/253328797/figure/fig4/AS:298042923208720@1448070378761/DC-Gas-Discharge-V-I-characteristics-10.png))

- การดีสชาร์จของก๊าซด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วงตามรูปที่ 2.8 คือ 1.) Dark discharge หรือ Townsend discharge คือช่วงเริ่มต้นมีการเกิดของประกายไฟ  
2.) Normal glow discharge ช่วงที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ หรือมีการลดลงของกระแสไฟฟ้า  
3.) Abnormal glow discharge ช่วงที่แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า  
4) “arc discharge” ช่วงที่พลาสมามีการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

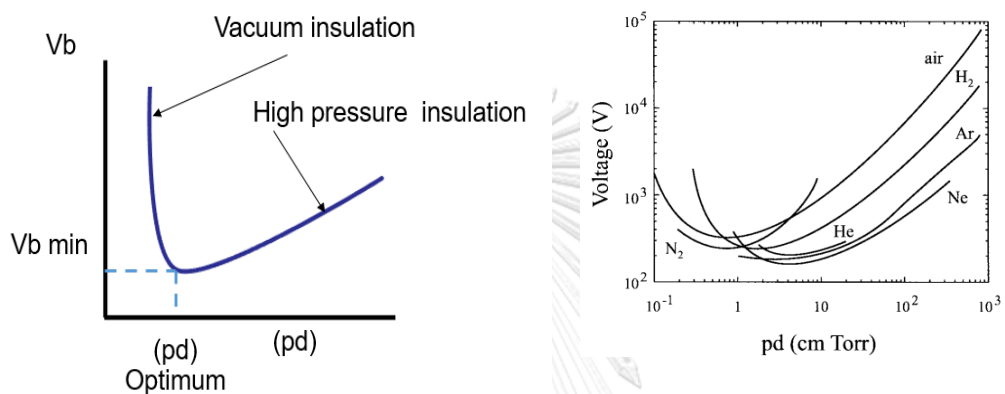
ต่อมา Paschen ได้ทำการศึกษาการเบรกดาวน์ของก๊าซภายใต้ความดันของก๊าซต่างๆ พบว่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ ( $V_b$ ) เป็นฟังก์ชันของความดันก๊าซ ( $p$ ) และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ( $d$ ) ตามสมการที่ 2.3 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังกราฟตามรูปที่ 2.9 (a.)

$$V_b = f(p, d) \tag{2.3}$$

Paschen พบว่าก๊าซทุกชนิดจะมีค่า  $p \cdot d$  ที่เหมาะสมที่สุดซึ่งเป็นค่าที่แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์มีค่าต่ำสุดตามรูปที่ 2.9 (b.) เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าเท่ากันจะเห็นได้ว่าทั้งสองข้างของจุดต่ำสุดของกราฟแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ความดันต่ำ ความหนาแน่นของก๊าซต่ำ ทำให้การเกิดไอออนไนเซชันต่ำ ที่ความดันสูงความถี่ของการชนมีสูง ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับการเบรกดาวน์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$V_b = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln(A \cdot p \cdot d) - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right]} \tag{2.4}$$

ค่า A และ B ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ โดยก๊าซแต่ละชนิดมีค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับการเบรกดาวนไม่เท่ากันดังกราฟที่ 2.9 (b.) และตารางที่ 2.3 สำหรับก๊าซอาร์กอน มีค่าคงที่ A และ B ของเท่ากับ  $13.6 \frac{1}{\text{torr.cm}}$  และ  $235 \frac{V}{\text{torr.cm}}$  ตามลำดับ [15] ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการเบรกดาวนประมาณ 2500 V ที่ความดัน 760 torr ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 5 mm ดังนั้นที่ความดันบรรยากาศ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่แคบเป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดการเบรกดาวน [24]



(a.) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $pd$  และ  $V_b$  ตามกฎของ Paschen [25] (b.) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $pd$  และ  $V_b$  ตามกฎของ Paschen ของก๊าซชนิดต่างๆ [24]

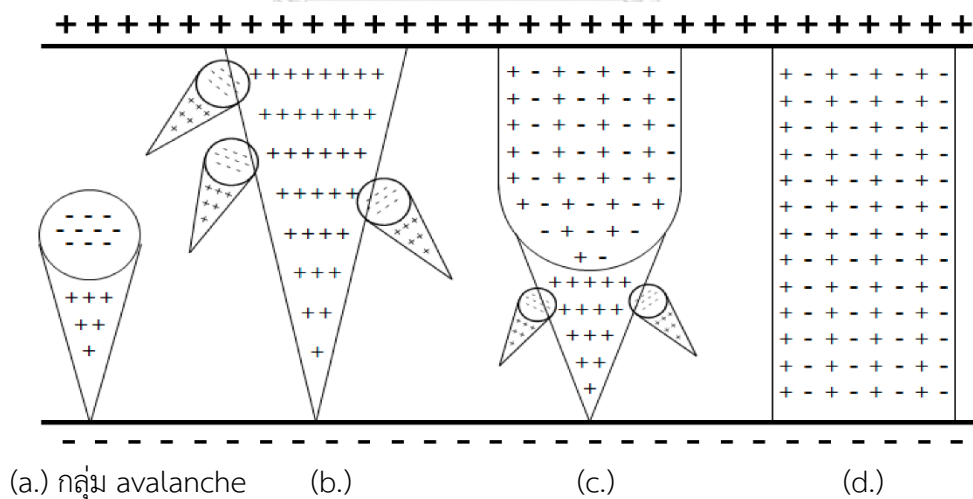
รูปที่ 2. 9 (a.) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $pd$  และ  $V_b$  ตามกฎของ Paschen (b.) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $pd$  และ  $V_b$  ตามกฎของ Paschen ของก๊าซชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2. 3 แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเพื่อทำให้เกิดประกายไฟ (sparking) ของก๊าซชนิดต่างๆ [22]

ก๊าซชนิดต่างๆ	$V_b$ น้อยที่สุด (V.)	$pd$ ที่ $V_b$ น้อยที่สุด (torr-cm)
Air	327	0.567
Argon	137	0.9
$H_2$	273	1.15
Helium	156	4.0
$CO_2$	420	0.51
$N_2$	251	0.67
$N_2O$	418	0.5

ก๊าซชนิดต่างๆ	Vb น้อยที่สุด ( V.)	pd ที่ Vb น้อยที่สุด (torr-cm)
O <sub>2</sub>	450	0.7
SO <sub>2</sub>	457	0.33
H <sub>2</sub> S	414	0.6

กลไกการเบรกดาวนของStremer [23] ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีค่ามากไม่สามารถอธิบายการเกิดเบรกดาวนได้ด้วยทฤษฎีของ Townsend ต่อมา Meek และ Loeb ได้คิดทฤษฎีการเบรกดาวนแบบ Stremer ขึ้น เมื่อกลุ่ม avalanche ตามรูปที่ 2.10 (a.) ได้วิ่งข้าม gap electron วิ่งไปยัง Anode แล้วเหลือไอออนบวกอยู่ใน gap จึงทำให้รูปร่างเป็นแบบกรวยตามรูปที่ 2.10 (b.) จึงไม่ทำให้เกิดการเบรกดาวนได้เพราะว่าสนามไฟฟ้า เนื่องจาก Space charge มีค่าสูงเฉพาะบริเวณที่ใกล้ Anode ส่วนสนามบริเวณอื่นจะมีความหนาแน่นต่ำ แต่ Photon ที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีความหนาแน่นของไอออนสูงพอที่จะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันเป็น avalanche เวลาต่อมา avalanche นี้จะเกิด Ionization มากขึ้น และไอออนบวกจะเรียงกันเป็นลำดับดังรูปที่ 2.10 (c.) แล้วก็จะเกิดการฟอร์มตัวเป็นลำของ Streamer ดังรูปที่ 2.10 (d.) ทำให้เกิดการเบรกดาวนในช่องว่างระหว่าง Anode และ Cathode ในที่สุด



รูปที่ 2. 10 กลไกการเบรกดาวนของStremer

ที่มารูป : ([http://www.mdpi.com/energies/energies-10-01584/article\\_deploy/html/images/energies-10-01584-g001.png](http://www.mdpi.com/energies/energies-10-01584/article_deploy/html/images/energies-10-01584-g001.png))

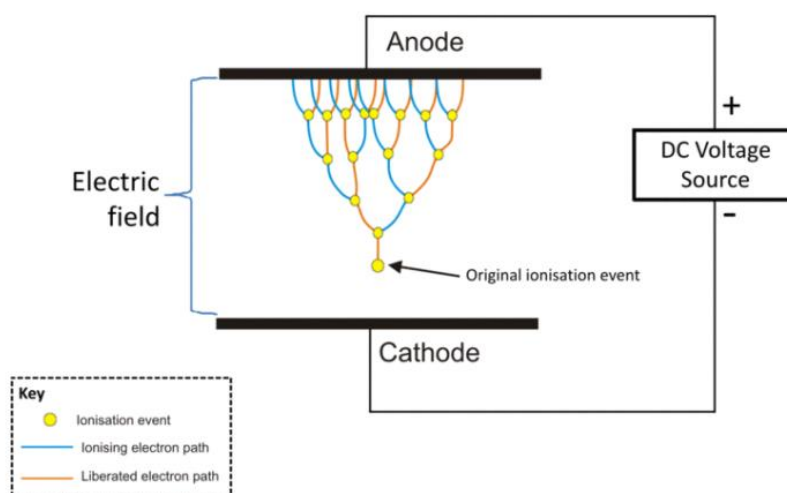
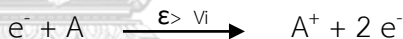
## 2.5 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการเบรกดาวนซ์ของสถานะก๊าซ [22, 23]

### 2.5.1 การแตกตัวเป็นไอออน (Ionization)

เกิดขึ้นเมื่อก๊าซได้รับพลังงานที่มีค่ามากพอจะทำให้อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานวงนอกสุดหลุดออกจากอะตอม วิธีการทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้แก่ การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชน (Collision ionization) การแตกตัวเป็นไอออนจากแสง (Photo ionization) การแตกตัวเป็นไอออนทุติยภูมิ (Secondary ionization)

#### 2.5.1.1. การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชน (Collision ionization)

เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระชนกับโมเลกุลของก๊าซทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนตัวใหม่และไอออนบวก ตามรูปที่ 2.11 ที่ความดันก๊าซต่ำ เมื่อมีการเพิ่มของสนามไฟฟ้าเข้าไประหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 2 แผ่นที่วางขนานกัน จะมีการเกิดอิเล็กตรอนหลุดออกจากขั้วแคโทดและเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด โดยอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีการชนกันกับโมเลกุลของก๊าซที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทำให้อิเล็กตรอนมีความเร่งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงขั้วแอโนด ถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน ( $\mathcal{E}$ ) ที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดมีค่ามากกว่าพลังงานในการไอออไนเซชัน ( $V_i$ ) ของก๊าซ จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชน ซึ่งสามารถเขียนได้เป็นสมการ



รูปที่ 2. 11 วงจรที่ใช้อธิบายการเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชน

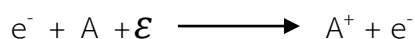
ที่มารูป: ([https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ac/Electron\\_avalanche.gif/800px-](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ac/Electron_avalanche.gif/800px-Electron_avalanche.gif)

[Electron\\_avalanche.gif](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ac/Electron_avalanche.gif/800px-Electron_avalanche.gif))



### 2.5.1.2. การแตกตัวเป็นไอออนจากแสง (Photo ionization)

เมื่อมีการแผ่รังสีหรือมีแสงเข้ามาตกกระทบที่ผิวของอิเล็กโทรด พลังงานแสงที่ถูกดูดซับด้วยอะตอมหรือโมเลกุล ( $h\nu$ ) ถ้ามีมากเกินไปกว่าค่าพลังงานไอออไนเซชันจะทำให้เกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้เกิด 2 ปรากฏการณ์คือ การกระตุ้นให้อะตอมมีระดับพลังงานที่สูงขึ้นตามสมการ



### 2.5.1.3. การแตกตัวเป็นไอออนทุติยภูมิ (Secondary ionization)

เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ซึ่งส่งผลให้เกิดการติสซาร์จแบบสนับสนุนตัวเองได้ (Sustaining discharge) ได้แก่

การหลุดออกของอิเล็กตรอนเนื่องจากการชนของไอออนบวก (Electron Emission due to Positive Ion Impact) เมื่อไอออนบวกเกิดขึ้นจากการไอออไนเซชันแบบการชนหรือ การไอออไนเซชันด้วยแสง ไอออนบวกจะเคลื่อนที่มาที่ขั้วแคโทด ซึ่งถ้าพลังงานรวมของไอออนบวกมีค่ามากกว่าสองเท่าของค่า work function ( $\phi$ ) ของโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโทรดจะเกิดการหลุดของอิเล็กตรอนเกิดขึ้น

การหลุดออกของอิเล็กตรอนเนื่องจากแสง (Electron Emission due to Photons) เมื่อมีแสงส่องมาที่พื้นผิวของโลหะและพลังงานแสงที่โลหะดูดซับไว้มีค่ามากกว่าค่า work function ของโลหะ ( $h\nu \geq \phi$ ) จะทำให้เกิดการหลุดออกของอิเล็กตรอนจากพื้นผิวโลหะ

การหลุดออกของอิเล็กตรอนเนื่องจากการชนกันกับ Metastable กับอะตอม (Electron Emission due to Metastable and Neutral Atoms) ในการกระตุ้นอะตอมของสารบางอย่างอาจใช้เวลาอันเนื่องมาจากมีเวลาชีวิตที่นาน ( $10^{-3}$  วินาที) เช่น ก๊าซเฉื่อย ซึ่งเรียกสภาวะนี้ว่า Metastable อะตอม เขียนแทนด้วย ( $A^m$ ) ซึ่งอนุภาคปกติใช้เวลาในการกระตุ้น  $10^{-8}$  วินาที

### 2.5.2. การเกาะกันของอิเล็กตรอน (Electron Attachment Process)

เป็นกระบวนการชนแบบหนึ่งที่เกิดจากอิเล็กตรอนชนกับอะตอมที่เป็นกลางแล้วกลายเป็นไอออนลบ ซึ่งก๊าซที่แสดงคุณสมบัติเช่นนี้ได้แก่  $O_2, CO_2, Cl_2, F_2, C_2F_6, C_3F_8, C_4F_{10}, CCl_2, F_2$

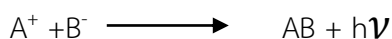
$$\text{Atom} + e^- + k \longrightarrow \text{negative atomic ion} + (E_a + K)$$

$E_a$  คือค่าสมรรถภาพอิเล็กตรอน (Electron affinity)

$K$  คือค่าพลังงานจลน์ (Kinetic energy)

### 2.5.3 การรวมตัวกัน (Recombination)

เป็นกระบวนการไอออนบวกและไอออนลบเกิดการรวมตัวกันแล้วมีการคายพลังงานออกมาในรูปของการแผ่รังสี ( $h\nu$ ) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



## 2.6 สนามไฟฟ้า (Electrical field) [26]

สนามไฟฟ้าคือ บริเวณไฟฟ้าที่เมื่อนำประจุไฟฟ้าเข้าไปวางแล้วเกิดแรงกระทำที่ประจุไฟฟ้าที่นำมาทดสอบ ซึ่งทิศทางของสนามไฟฟ้าสามารถเขียนแทนได้โดยใช้เส้นแรงไฟฟ้า เมื่ออิเล็กโทรดที่มีรูปร่างต่างกันและจัดให้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ  $d$  mm. แล้วป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรดเท่ากันตามรูปที่ 2.12 (a.) จะได้สนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันตามกราฟรูปที่ 2.12 (b.) โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดกับอิเล็กโทรดที่มีรูปร่างแบบ I. ค่าสนามไฟฟ้าทุกๆจุดในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าเท่ากัน ทำให้เรียกการเกิดสนามไฟฟ้าที่เกิดกับอิเล็กโทรดแบบนี้ว่า สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอถึงค่าค่าหนึ่งจะเกิดการเบรกดาวนทันที โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโทรด ( $E_{av}$ ) และ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$E_{max} = E_{av} = V/d \quad \dots\dots\dots 2.5$$

โดย  $V$  คือแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดหน่วย โวลต์ หรือ กิโลโวลต์

$d$  คือช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด มีหน่วยเป็น เซนติเมตร

และสามารถคำนวณความเครียดที่ทำให้เกิดเบรกดาวน ( $E_b$ ) ได้จากสมการที่ 2.6 ซึ่ง  $V_b$  คือแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

$$E_b = V_b/d \quad \dots\dots\dots 2.6$$

ส่วนการเกิดสนามไฟฟ้ากับอิเล็กโทรดที่มีรูปร่างแบบ II และ III สนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันจึงเรียก สนามไฟฟ้าแบบนี้ว่า สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ แบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอและ สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง ในกรณีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอจะมีรูปร่างของอิเล็กโทรดเป็นแบบทรงกลม ซึ่งความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณพื้นผิวของทรงกลม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$E_{max} = V/d\eta^* \quad \dots\dots\dots 2.7$$

โดย  $\eta^*$  คือเฟกเตอร์ของสนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor) ที่ใช้บ่งบอกว่าสนามไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดนั้นมีความสม่ำเสมอมากหรือน้อย  $\eta^* = E_{av} / E_{max} \leq 1$  และสามารถหาความเครียดเบรกดาวน์ได้จากสมการที่ 2.8

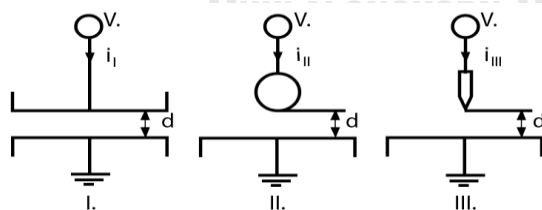
$$E_b = V_b / d \eta^* \quad \dots\dots\dots 2.8$$

ซึ่งสมการนี้ใช้ได้เฉพาะกับกรณีที่มีอิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือ ไม่มีโคโรนา (Corona) หรือพรีดีสชาร์จ (Pre-discharge) เกิดก่อนเบรกดาวน์ เท่านั้นเพราะก่อนเกิดการเบรกดาวน์จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโทรดเลยจนกระทั่งเมื่อค่าความเครียดของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดถึงค่าวิกฤตจึงเกิดการเบรกดาวน์ทันที

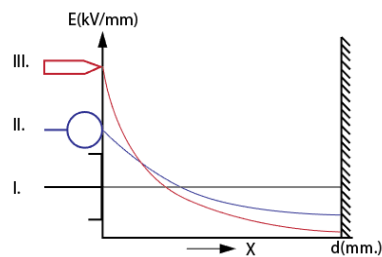
ส่วนในกรณีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่บริเวณที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดของอิเล็กโทรดคือที่ปลายแหลม เนื่องจากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่ปลายแหลมจะมีค่าถึงค่าความเครียดวิกฤตทำให้มีการเกิดโคโรนาพรีดีสชาร์จ (Corona Pre-discharge) ขึ้นที่บริเวณนี้แต่ไม่เกิดบริเวณอื่นเนื่องจากมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ สามารถเรียกการเกิดดีสชาร์จแบบนี้ว่า การเกิด ดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ก่อนการเบรกดาวน์อาจถูกเรียกว่า กระแสโคโรนา (corona circuit) และสามารถคำนวณความเครียดของสนามไฟฟ้าที่แรงดันเริ่มเกิด ( $E_i$ ) ได้จากสมการที่ 2.9

$$E_i = V_i / d \eta^* \quad \dots\dots\dots 2.9$$

ซึ่ง  $V_i$  คือแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเมื่อจนโคโรนาเริ่มเกิด ซึ่งกรณีอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และ อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย  $V_i = V_b$  และ  $E_i = E_b$  แต่ในอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง  $V_b > V_i$  และ  $E_b > E_i$



- I. สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ
  - II. สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
  - III. สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง
- (a.) อิเล็กโทรด 3 แบบ



(b.) การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้ง 3 แบบ ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่างๆ

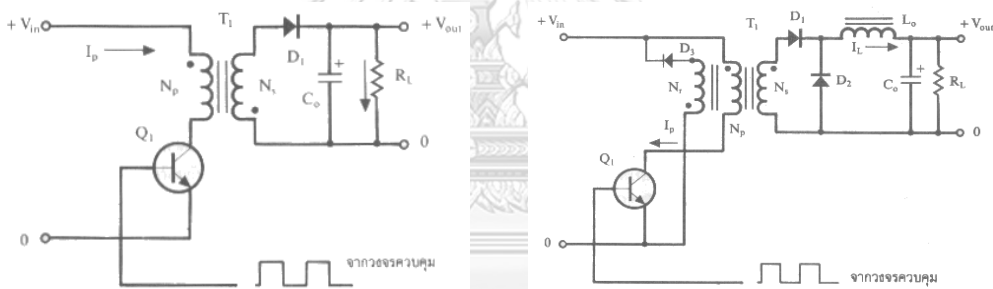
รูปที่ 2. 12 (a.) อิเล็กโทรด 3 แบบ (b.) การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้ง 3 แบบ ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่างๆ

## 2.7 วงจรขับหม้อแปลงความถี่สูง [27]

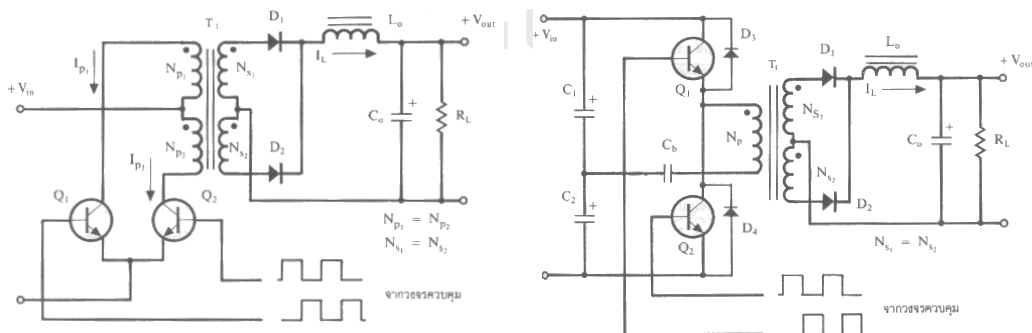
วงจรขับหม้อแปลงหรือที่นิยมเรียกว่า “คอนเวอร์เตอร์” โดยทำการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต (input) ให้ได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (output) ตามความต้องการ วงจรคอนเวอร์เตอร์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวงจรและแต่ละแบบจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ข้อควรพิจารณาในการเลือกใช้รูปแบบการจัดวงจรคอนเวอร์เตอร์มีดังนี้คือ

- การแยกกันทางวงจรไฟฟ้าระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต
- ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางอินพุตที่ส่งผ่านไปยังขดลวดปฐมภูมิ
- ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ขณะทำงาน
- ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ตกคร่อมอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ขณะทำงาน

การจัดรูปแบบคอนเวอร์เตอร์ที่มีการแยกกันทางวงจรไฟฟ้าระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตจะใช้หม้อแปลงแทนขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมี 5 รูปแบบตามรูปที่ 2.13

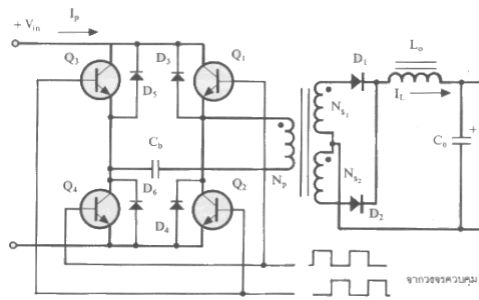


(a.) ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (b.) ฟอเวิร์ดคอนเวอร์เตอร์



(c.) พูช-พูลคอนเวอร์เตอร์

(d.) ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์



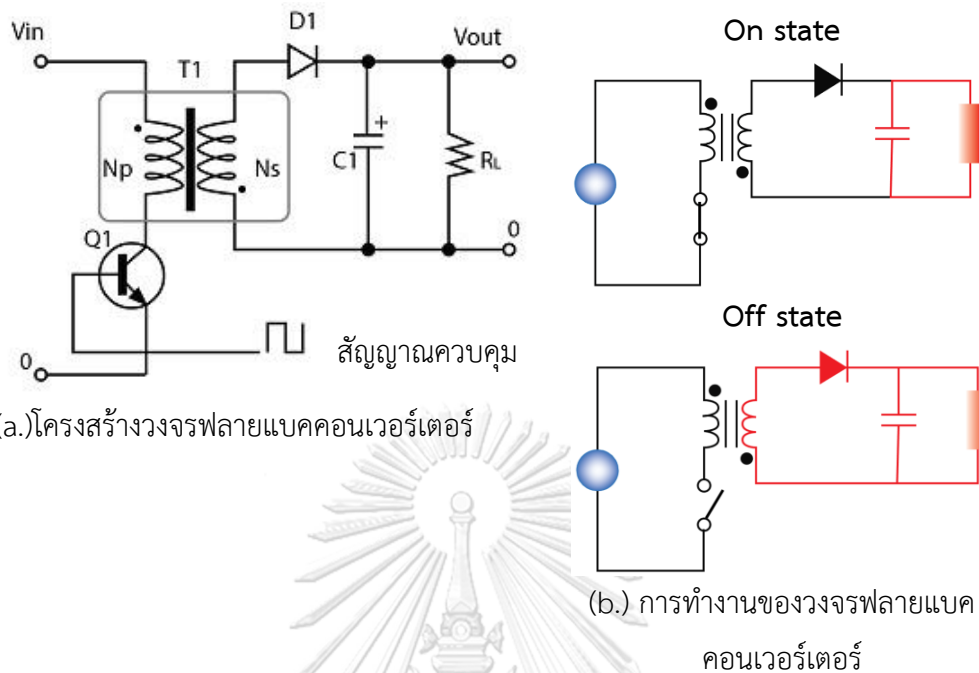
## (e.) ฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 2. 13 การจัดวงจรคอนเวอร์เตอร์มีการแยกกันทางวงจรไฟฟ้าระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต ทั้ง 5 แบบ ที่มารูป : (สุวัฒน์ แซ่ตัน, 2558, 7)

ตารางที่ 2. 4 ตารางเปรียบเทียบวงจรคอนเวอร์เตอร์มีการแยกกันทางวงจรไฟฟ้าระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตทั้ง 5 แบบ

โครงสร้าง	ช่วงกำลังไฟฟ้าที่ จ่ายได้ (W)	$V_{in}$ (dc)	Typical efficiency (%)	Relative parts Cost
ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	0-150	5-500	80	1.2
ฟอเวิร์ตคอนเวอร์เตอร์	0-150	5-500	78	1.4
พูช-พูลคอนเวอร์เตอร์	100-1000	50-1000	75	2.0
ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์	100-500	50-1000	75	2.2
ฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์	400-2000+	50-1000	73	2.5

### 2.7.1 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2. 14 (a.) โครงสร้างวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (b.) การทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

การจัดวงจรแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ให้กำลังงานได้ไม่เกิน 150 วัตต์ มีประสิทธิภาพการทำงาน (typical efficiency) สูงที่สุดเท่ากับ 80 % ใช้อุปกรณ์น้อยและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรขั้วหม้อแปลงรูปแบบอื่นตามตารางที่ 2.4 ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วงจรขั้วหม้อแปลงเป็นแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย Q1 คือ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์หรือ MOSFET ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ภายในวงจร ส่วนหม้อแปลง T1 ซึ่งถูกกำหนดขดปฐมภูมิ (Primary) และขดทุติยภูมิ (Secondary) ให้มีลักษณะกลับเฟสกันอยู่ และได้โอดต่อกันลักษณะตามรูปที่ 2.14 (a.) การทำงานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ตามรูปที่ 2.14 (b.) เริ่มจาก เมื่อ Q1 นำกระแสสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมในช่วง  $T_{on}$  เปรียบเสมือนการปิดสวิตช์ ทำให้ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง T1 ต่อเข้าโดยตรงกับ  $+V_{in}$  กระแสไฟฟ้าจึงสามารถไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิเกิดเป็นสนามแม่เหล็กขึ้นไปเหนี่ยวนำขดลวดทุติยภูมิ แต่แรงดันที่เกิดขึ้นต่อกับไดโอดในลักษณะไบแอสกลับกระแสไฟฟ้าจึงไม่ไหลผ่านโหลด ทำให้พลังงานทั้งหมดกลับไปสะสมภายในหม้อแปลง T1 ต่อมาเมื่อ Q1 นำกระแสสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมในช่วง  $T_{off}$  เปรียบเสมือนการเปิดสวิตช์ ทำให้สนามแม่เหล็กเกิดการยุบตัวลง และเกิดการกลับเฟสตามกฎของเลนซ์ เกิดการไบแอสตรงที่ไดโอด D1 พลังงานทั้งหมดที่ถูกสะสม

ในหม้อแปลงจะถูกถ่ายเทไปให้ขดลวดทุติยภูมิและเกิดการไหลของกระแสไปยังโหลด และวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ตามสมการที่ 2.10 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความถี่การทำงานของ Q1 ช่วงเวลานำกระแสของ Q1 อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง และค่าของแรงดันที่อินพุต

$$V_{out} = \frac{t_{ON} \times (N_s/N_p)(V_{in} - V_{CE(sat)})}{(T - t_{ON})} - V_D \quad \dots\dots\dots 2.10$$

T	คือ คาบเวลาการทำงานของ Q1	หน่วยเป็นวินาทีต่อรอบ
t <sub>ON</sub>	คือ ช่วงเวลาการทำงานของ Q1	หน่วยเป็นวินาที
N <sub>p</sub>	คือ จำนวนรอบของขดไพรมารี	หน่วยเป็นรอบ
N <sub>s</sub>	คือ จำนวนรอบของขดเซคันดารี	หน่วยเป็นรอบ
V <sub>out</sub>	คือ แรงดันที่เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์	หน่วยเป็นโวลต์
V <sub>in</sub>	คือ แรงดันที่อินพุตของคอนเวอร์เตอร์	หน่วยเป็นโวลต์
V <sub>CE(sat)</sub>	คือ แรงดันตกคร่อม Q1 ขณะนำกระแสที่จุดอิ่มตัว	หน่วยเป็นโวลต์
V <sub>D</sub>	คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด D1 ขณะนำกระแส	หน่วยเป็นโวลต์

หมายเหตุ โดยทั่วไปนิยมกำหนดให้ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิล (duty cycle) ของสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมมีค่าประมาณ 50%

## 2.8 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง [27]

สิ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือกออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงมีดังนี้

- ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเป็นแกนหม้อแปลง ควรเลือกให้เหมาะกับลักษณะการใช้งาน เช่น แกนเฟอร์ไรต์จะใช้ในงานที่มีความถี่สูง เป็นต้น
- รูปแบบของแกนและขนาดของแกนหม้อแปลง การเลือกใช้รูปแบบแกนและขนาดของหม้อแปลงที่เหมาะสมจะส่งผลถึงขนาดของเครื่อง, ราคา และน้ำหนักของเครื่องที่สร้างขึ้น และส่งผลถึงความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Flux density; B) สูงสุดที่เกิดขึ้นภายในแกนหม้อแปลงเมื่อมีกระแสไหลผ่าน

- การกำหนดระยะช่องว่างอากาศ (air gap) เพื่อป้องกันการอิมิตัวของแกนเฟอร์ไรต์และช่วยให้การสะสมพลังงานของขดลวดมีค่าเพิ่มขึ้นและค่านี้สามารถยังสามารถใช้ในการคำนวณหาจำนวนขดลวดปฐมภูมิในการพันหม้อแปลง
- การเลือกขนาดของขดลวดและแบบการพันขดลวด เมื่อขดลวดมีการเรียงซ้อนกันและมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะทำให้เกิดความร้อนที่ขดลวดอาจทำให้ขดลวดขาดและเกิดการสูญเสียพลังงานขึ้น

## 2.9 พลาสมาแบบเจ็ตในความดันบรรยากาศ [28]

พลาสมาแบบเจ็ตที่ความดันบรรยากาศ คือ ระบบที่เปลวพลาสมาปล่อยออกไปรอบในพื้นผิวเปิด ซึ่งมีความยาวของเปลวพลาสมาในหน่วย เซนติเมตร โดยส่วนใหญ่นิยมประยุกต์ใช้งานทางด้านชีวการแพทย์ โครงสร้างที่นิยมใช้ในการออกแบบแหล่งกำเนิดพลาสมาเจ็ตมี 3 แบบ ได้แก่ โครงสร้างแบบวงแหวน, โครงสร้างแบบอิเล็กโทรดหุ้มด้วยหลอดไดอิเล็กตริก และโครงสร้างแบบอิเล็กโทรดทำจากโลหะเปลือยตามรูปที่ 2.15

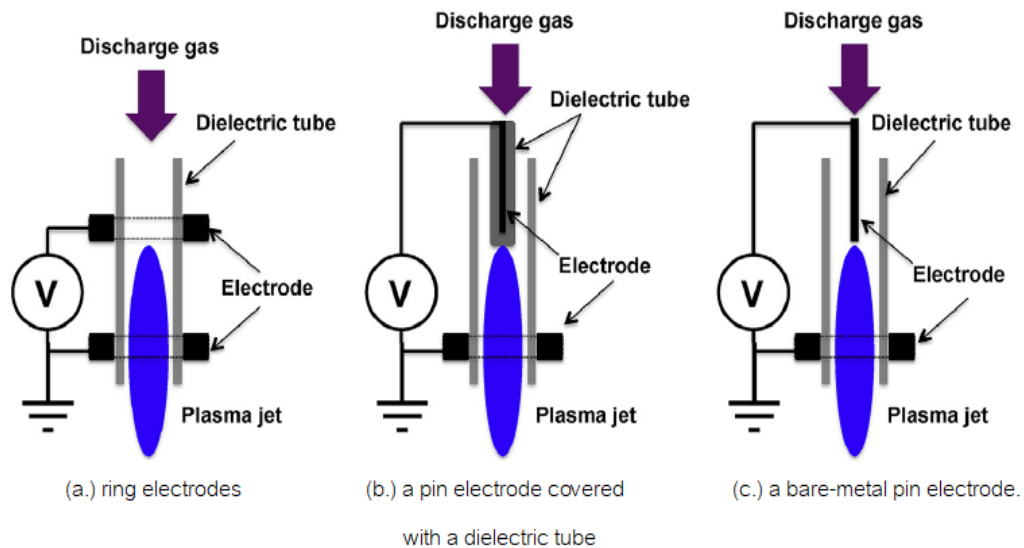
โครงสร้างแบบวงแหวนตามรูปที่ 2.15 (a) จะประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดที่ทำมาจากโลหะวงแหวน จำนวน 2 วงอยู่ด้านนอกของโพรบ เมื่อมีการปล่อยให้ก๊าซเฉื่อยเช่น ก๊าซฮีเลียม และก๊าซอาร์กอนไหลผ่านหลอดไดอิเล็กตริกและมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าในหน่วยกิโลโวลต์ จะมีการเกิดเปลวของพลาสมาเย็นออกมาที่อากาศรอบนอก ซึ่งมีการใช้กับการรักษาโรคมะเร็ง, gene transfection เป็นต้น

โครงสร้างแบบอิเล็กโทรดหุ้มด้วยหลอดไดอิเล็กตริกตามรูปที่ 2.15 (b.) เป็นการแทนที่ของอิเล็กโทรดแบบวงแหวนขั้วหนึ่งด้วยขั้วอิเล็กโทรดแบบแท่งหุ้มด้วยหลอดไดอิเล็กตริก และจัดให้อยู่ตรงกลางวงแหวน ซึ่งแรงดันที่ป้อนให้กับแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดนี้ต้องใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มีความถี่ในหน่วยกิโลเฮิร์ต หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ และสามารถทำให้เกิดเปลวพลาสมาที่มีความยาวประมาณ 10 mm แต่แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบนี้มีข้อเสียคืออาจมีการเกิดอาร์ค (Arcing) เนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริกที่หุ้มทั้งหมดของอิเล็กโทรด ซึ่งแหล่งกำเนิดพลาสมาเย็นแบบเจ็ตโครงสร้างแบบนี้นำมาใช้ในการทำให้เลือดแข็งตัว (Blood coagulation) ระหว่างการผ่าตัด

โครงสร้างแบบอิเล็กโทรดทำจากโลหะเปลือยตามรูปที่ 2.15 (c.) หรือที่เรียกอีกอย่างว่า DBD-like Jet ซึ่งโครงสร้างแบบนี้ใช้ในเครื่อง kINPenMED (INP Greifswald/neoplas GmbH, Greifswald, Germany) ประกอบด้วยอิเล็กโทรดแบบแท่งเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm อยู่ตรงกลางหลอดแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 mm มีการป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบความถี่สูง 1.1



เมกกะเฮิร์ต (MHz) 2.6 กิโลโวลต์ ซึ่งเครื่อง kINPenMED ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายทางด้าน การแพทย์ และการทดสอบทางด้านชีวภาพ เป็นต้น



รูปที่ 2. 15 โครงสร้างแบบต่างๆของพลาสมาแบบเจ็ตที่ความดันบรรยากาศ  
 (a.) โครงสร้างแบบวงแหวน (b.) โครงสร้างแบบอิเล็กโทรดหุ้มด้วยหลอดไดอิเล็กตริก  
 (c.) โครงสร้างแบบอิเล็กโทรดทำจากโลหะเปลือย

## 2.10 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสมา [29, 30]

ในการใช้นำพลาสมาไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจวิเคราะห์อุณหภูมิของอิเล็กตรอน ( $T_e$ ) และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ( $n_e$ ) ซึ่งวิธีที่ได้รับคามนิยมมี 2 วิธี คือวิธีที่ใช้ Langmuir probe และ วิธี Optical Emission spectroscopy (OES) วิธี Langmuir probe เป็นวิธีที่ง่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสมาซึ่งเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V) แล้วนำมาคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอน ( $T_e$ ) จากสมการที่ 2.11 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ( $n_e$ ) คำนวณจากกระแสอิ่มตัวของอิเล็กตรอน ( $I_{s,e}$ ) ได้จากสมการที่ 2.12 แต่ที่ความดันบรรยากาศพลาสมาที่เกิดขึ้นมีการความถี่การชนกันของอิเล็กตรอนที่สูง จึงไม่นิยมใช้วิธีนี้เนื่องจากมีการเกิดความร้อนสูง ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนสูง

$$\frac{KT_e}{e} = \left[ \frac{\Delta(\ln(I_e))}{\Delta V} \right]^{-1} \quad \dots\dots\dots 2.11$$

$$n_e = \frac{I_{se}}{A_p e} \left( \frac{2m\pi}{KT_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots 2.12$$

ต่อมามีการพัฒนาการวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสมาด้วยเครื่อง Optical Emission spectroscopy ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก อุณหภูมิของอิเล็กตรอน ( $T_e$ ) และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ( $n_e$ ) สามารถพิจารณาจากสเปกตรัมความเข้มของการปล่อยพลังงานของอะตอม ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอิเล็กตรอน ( $T_e$ ) และจำนวนของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น อุณหภูมิของอิเล็กตรอน ( $T_e$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ Boltzmann สมการที่ 2.13

$$KT_e = \frac{E_2 - E_1}{\log\left(\frac{I_1 \lambda_1 g_2 A_2}{I_2 \lambda_2 g_1 A_1}\right)} \quad \dots\dots\dots 2.13$$

โดย  $I$  คือ ความเข้มเส้นสเปกตรัม

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

$g$  คือ ตัวถ่วงน้ำหนักทางสถิติ

$A$  คือ ความน่าจะเป็นในการเกิดการเปลี่ยนสถานะ

$E$  คือ พลังงานที่ทำให้ในการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ

$K$  คือ ค่าคงที่ Boltzmann

หมายเหตุ 1 และ 2 หมายถึงเส้นสเปกตรัมเส้นที่ 1 และ เส้นสเปกตรัมเส้นที่ 2

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ( $n_e$ ) สามารถคำนวณได้จากการใช้อัตราส่วนความเข้มของเส้นสเปกตรัมของอะตอมและของไอออนตามสมการ Boltzmann-Saha โดยการแทนค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน ( $T_e$ ) ในหน่วย eV ที่ได้จากสมการที่ 2.13 ลงในสมการที่ 2.14

$$n_e = 2 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \left( \frac{A_2}{A_1} \right) \left( \frac{g_2}{g_1} \right) \left[ \frac{2\pi m_e K T_e}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \exp \left[ -\frac{E_1 - E_2 + E_i}{K T_e} \right] \quad \text{หน่วย cm}^{-3} \quad \dots\dots\dots 2.14$$

โดย  $E$  คือ พลังงานที่ถูกปล่อยจากชั้นระดับพลังงาน หน่วย eV.

$E_i$  คือ พลังงานไอออไนเซชันของอะตอมอาร์กอน ที่เป็นกลาง มีค่าเท่ากับ 15.759610 eV.

$I_1$  คือ ความเข้มของเส้นสเปกตรัม Ar-I

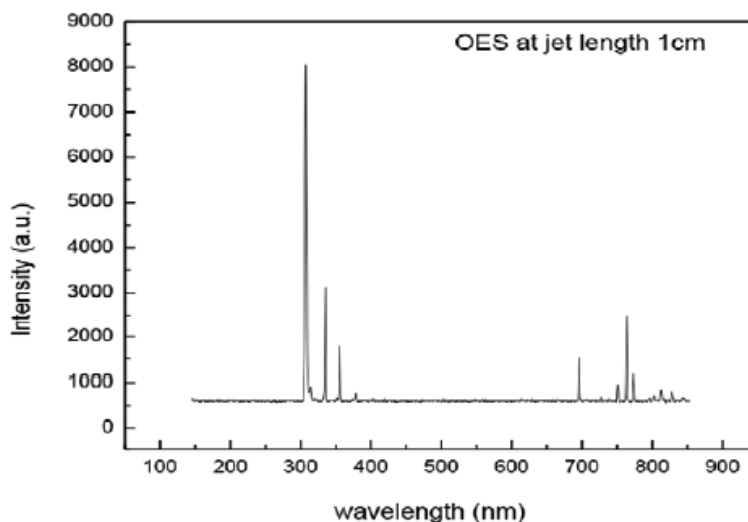
$I_2$  คือ ความเข้มของเส้นสเปกตรัม Ar-II

$m_e$  คือ มวลของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $9.1 \times 10^{-31}$  kg.

$K$  คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K

$h$  คือ ค่าคงที่ของ Planck มีค่าเท่ากับ  $6.626 \times 10^{-34}$  J\*s

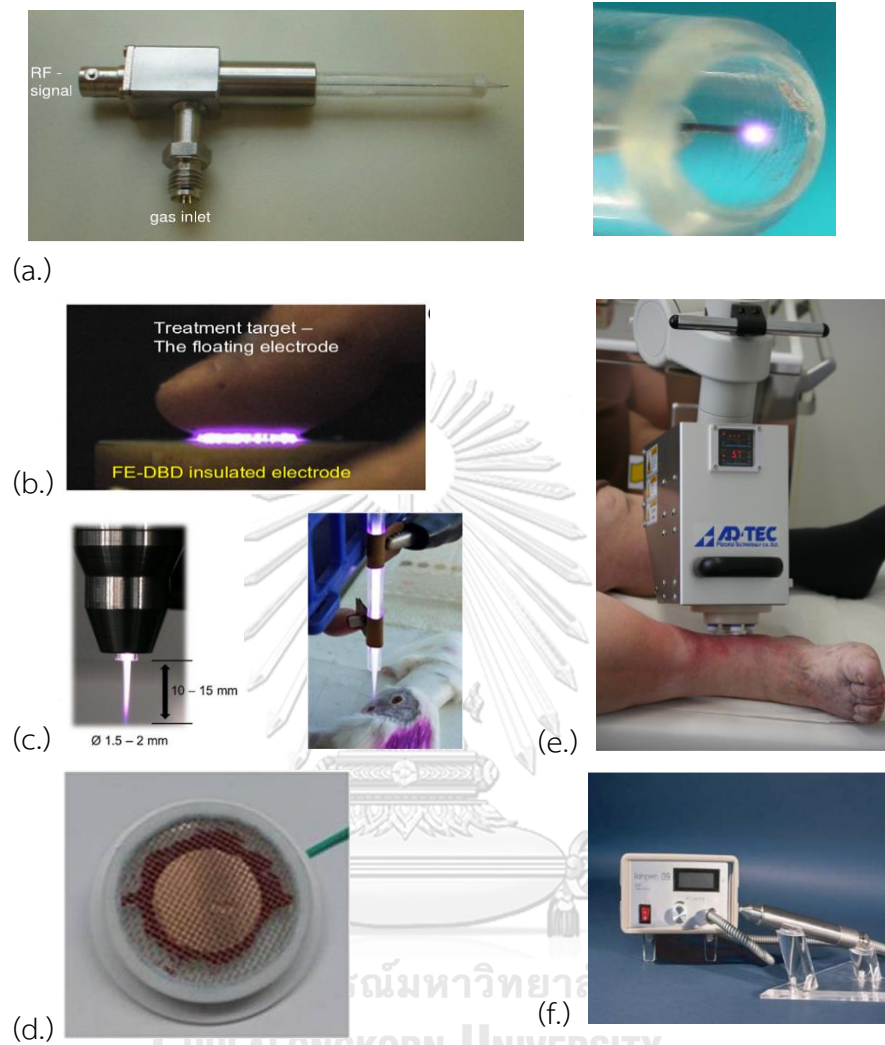
เส้นสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง OES จะถูกวัดในช่วงความยาวคลื่น 300 – 850 nm. ตัวอย่างสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง OESเป็นไปตามรูปที่ 2.16



รูปที่ 2. 16 กราฟสเปกตรัมจากเครื่อง OES ของพลาสมาเจ็ตที่มีความยาวเปลวพลาสมาเท่ากับ 1 cm. [29]

## 2.11 การใช้งานพลาสมาทางการแพทย์ [31]

การรักษาโดยใช้พลาสมาทางการแพทย์แบ่งเป็น 3 แบบคือ แบบโดยตรง (direct plasma) แบบโดยอ้อม (indirect plasma) และแบบผสม (hybrid plasma) การรักษาด้วยพลาสมาแบบโดยตรง (direct plasma) เป็นการใช้ผิวหนังหรือเนื้อเยื่อเป็นขั้วอิเล็กโทรดอีกขั้วหนึ่ง ทำให้มีการไหลของกระแสผ่านร่างกาย แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดนี้ คือ แบบ dielectric barrier discharge (DBD) การรักษาด้วยพลาสมาแบบโดยอ้อม (Indirect plasma) เป็นการอาศัยอัตราการไหลของก๊าซ ทำให้พลาสมาไปสัมผัสกับส่วนที่ต้องการรักษา แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดนี้ได้แก่ plasma jet, plasma needle และ plasma pen การรักษาด้วยพลาสมาแบบผสม (hybrid plasma) เป็นการนำการรักษาทั้งสองแบบมาผสมกันโดยมีการออกแบบหัวโพรบที่ใช้ให้มีลักษณะเป็นตะแกรง ทำให้สามารถมีเปลวของพลาสมาออกมาได้ ซึ่งแสดงตามรูปที่ 2.17

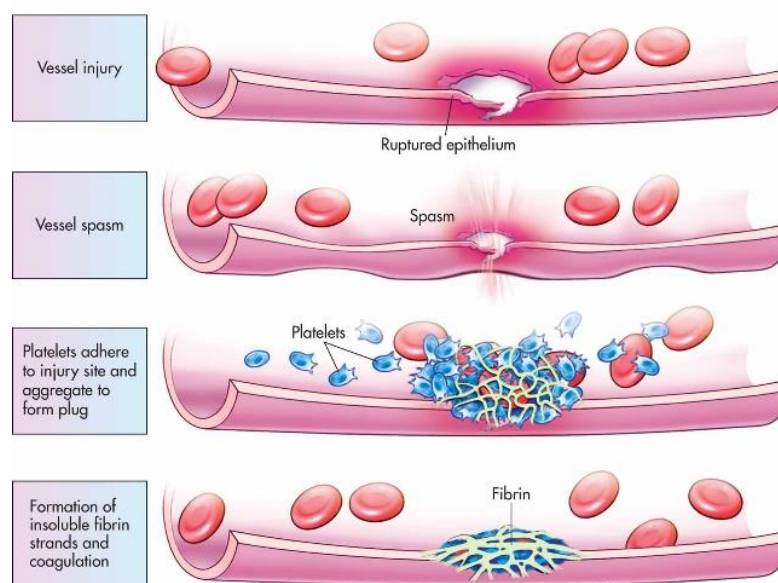


รูปที่ 2. 17 แหล่งกำเนิดพลาสมารูปแบบต่างๆ

(a.) plasma needle (b.) Dielectric barrier discharge (DBD) (c.) plasma jet (d.) DBD system based ที่มีการออกแบบให้เป็นตะแกรงแบบระบบ hybrid และเครื่องพลาสมาทางการค้าในต่างประเทศ (e.) MicroPlaster alpha (f.) Atmospheric pressure plasma jet (APPJ; INP Greifswald, Germany)

## 2.12 กลไกการแข็งตัวของเลือด [32]

โดยทั่วไปเมื่อหลอดเลือดเกิดการฉีกขาดจะมีการห้ามเลือดในระยะแรก (primary hemostasis) ที่เกิดจากการหดตัวของหลอดเลือดโดยอัตโนมัติจากการทำงานของกล้ามเนื้อเรียบ ทำให้เลือดมาเลี้ยงบริเวณนั้นน้อยลงและมีเกล็ดเลือด (platelet) เข้ามายึดเกาะบริเวณที่ฉีกขาดกลายเป็น platelet plug ซึ่งการเกิด platelet plug แข็งแรงพอที่จะลดการสูญเสียเลือดที่หลอดเลือดขนาดเล็ก แต่ในหลอดเลือดขนาดใหญ่จะมีกระบวนการสร้างลิ่มเลือดซึ่งเกิดจากการเปลี่ยน fibrinogen ให้กลายเป็น fibrin ทำให้เกิดลิ่มเลือดที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงและสามารถห้ามเลือดได้ดีกว่า platelet plug เรียกกระบวนการนี้ว่า การห้ามเลือดระยะที่สอง (secondary hemostasis) ซึ่งกระบวนการเป็นไปตามรูปที่ 2.18 การสร้างลิ่มเลือดนั้นต้องอาศัยปัจจัยการแข็งตัวของเลือดหรือ coagulation factor มาช่วยทำให้ fibrin ที่ได้ตกตะกอนร่วมกับเม็ดเลือดแดงกลายเป็นลิ่มเลือด (blood clot)



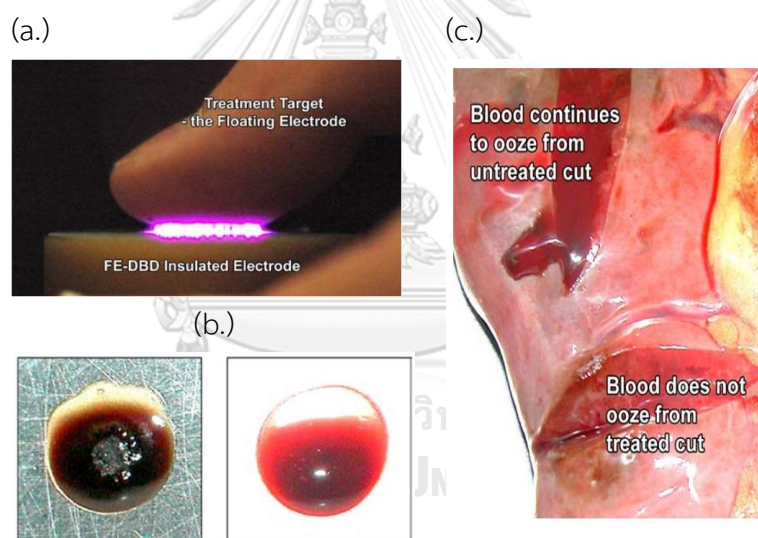
รูปที่ 2. 18 กระบวนการห้ามเลือด

ที่มารูป : ([http://biology-forums.com/gallery/14755\\_01\\_10\\_12\\_7\\_58\\_58\\_92212495.jpeg](http://biology-forums.com/gallery/14755_01_10_12_7_58_58_92212495.jpeg))

## 2.13 การใช้พลาสมาเจ็ตในการทำให้เลือดแข็งตัว

Gregory Fridman และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาการแข็งตัวของเลือดและการฆ่าเชื้อของเนื้อเยื่อในสิ่งมีชีวิตด้วย Floating-Electrode Dielectric Barrier Discharge ในอากาศ ในการศึกษาทำให้เกิด e-plasma นั้นต้องใช้ขั้วอิเล็กโทรดสองขั้ว แต่ในงานวิจัยของเขาแทนที่ขั้วอิเล็กโทรดด้วยเนื้อเยื่อของสัตว์หรือร่างกายของมนุษย์ซึ่งมีปริมาณน้ำอยู่เยอะซึ่งทำให้ค่าคงที่

ไดอิเล็กทริกที่สูง และสามารถเกิดการสะสมของประจุได้ พลาสมาที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นที่ช่องว่างระหว่างเนื้อเยื่อและอิเล็กโทรดอีกขั้วหนึ่ง ลักษณะการเกิดพลาสมาเป็นไปตามรูปที่ 2.19 (a.) หลังจากนั้นเขาได้ทำการทดสอบการแข็งตัวของเลือดโดยใช้เลือดจากคนสุภาพดีมาปริมาณ 500  $\mu\text{l}$  มาทำการทดสอบด้วยเครื่อง FE- DBD ตามรูปที่ 2.19 (b.) พบว่าเลือดที่ทำการทดสอบด้วยเครื่อง FE- DBD เป็นเวลา 15 วินาทีที่มีการแข็งตัวเกิดขึ้น นอกจากนี้รูปที่ 2.19 (c.) เขาได้ใช้เครื่อง FE- DBD ทำการทดสอบกับม้ามของมนุษย์ที่ถูกตัดพบว่า เมื่อมีการฉีกขาดของบาดแผลขึ้นเลือดจะมีการซึมของเลือดบริเวณที่ถูกตัด แต่เมื่อทำการรักษาด้วยเครื่อง FE- DBD เป็นเวลา 30 วินาทีบริเวณบาดแผลไม่มีการซึมของเลือด แต่เนื้อเยื่อบริเวณโดยรอบเหมือนมีการไหม้เกิดขึ้นแต่อุณหภูมิที่บาดแผลยังเป็นอุณหภูมิประมาณอุณหภูมิห้อง เขาจึงคิดว่าการกลไกการแข็งตัวของเลือดโดยใช้พลาสมาอาจจะไปกระตุ้นค่า pH หรือ  $\text{Ca}^{2+}$  เนื่องจากหมู่ไอออนต่างๆที่เกิดขึ้น

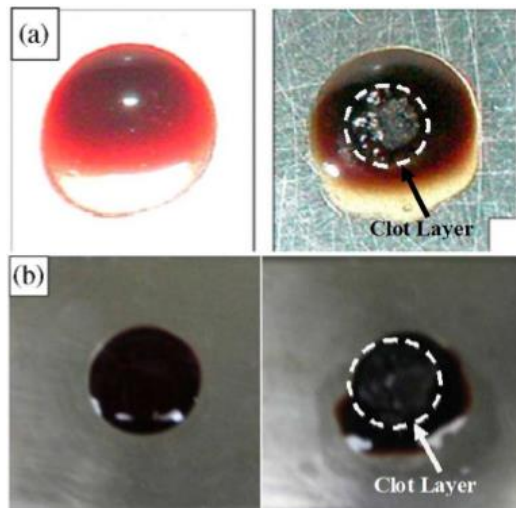


รูปที่ 2. 19 (a.) พลาสมาแบบ Floating-Electrode Dielectric Barrier Discharge ในอากาศ (b.) การทดสอบการแข็งตัวของเลือดด้วยเครื่อง FE-DBD ทางซ้ายมือและการแข็งตัวของเลือดตามปกติทางด้านขวามือ (c.) การทดสอบการทำมเลือดด้วยเครื่อง FE-DBD ในม้ามของมนุษย์ ด้านบนเป็นลักษณะบาดแผลที่ถูกตัด โดยไม่มีการรักษาด้วยเครื่อง FE- DBD ด้านล่างเป็นลักษณะแผลที่ถูกตัดและรักษาด้วยเครื่อง FE- DBD

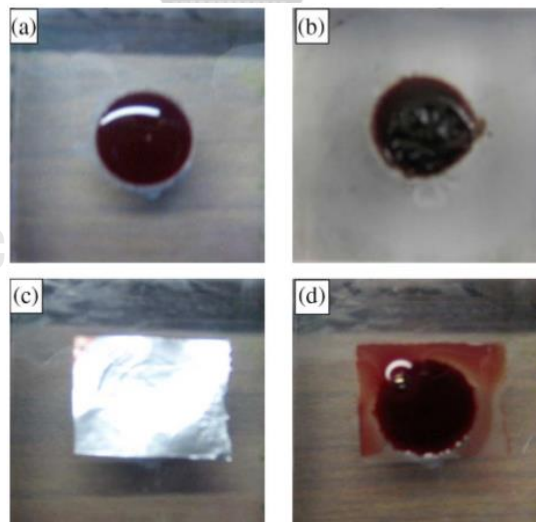
ต่อมา Sameer U. Kalghatgi และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาการกลไกการแข็งตัวของเลือดด้วย Nonthermal Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge Plasma โดยในงานวิจัยนี้ใช้เลือดที่มีการผสมของสารซีเตรทเพื่อต้านการแข็งตัวของเลือดเป็นโมเดลแทนโรคฮีโมฟีเลีย



เทียบกับเลือดปกติ พบว่า หลังจากทดสอบด้วย FE- DBD เป็นเวลา 15 วินาทีที่มีการเกิดเกล็ดเลือดขึ้นปานกลางตามรูปที่ 2.20 (b.) เมื่อเปรียบเทียบกับเกิดการเกิดเกล็ดเลือดในเลือดปกติ หลังจากทดสอบด้วย FE- DBD ตามรูปที่ 2.20 (a.)



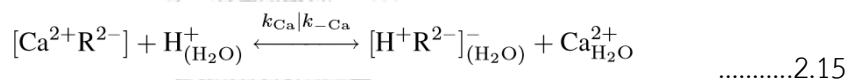
รูปที่ 2. 20 การแข็งตัวของเลือดเมื่อทดสอบด้วย เครื่อง FE-DBD เป็นเวลา 15 วินาที  
(a.) เลือดปกติ (b.) เลือดที่มีการเติมสารซีเตรทเพื่อต้านการแข็งตัวของเลือด



รูปที่ 2. 21 การแข็งตัวของเลือดที่มีการเติมสารซีเตรทเพื่อต้านการแข็งตัวของเลือด  
เมื่อทดสอบด้วยเครื่อง FE-DBD เป็นเวลา 30 วินาที

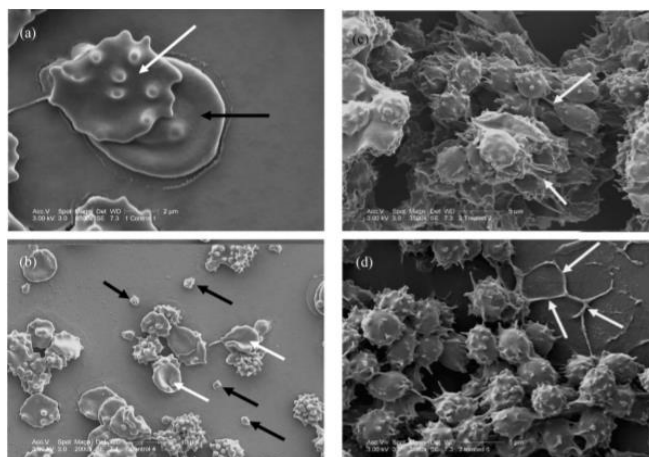
(a.) ก่อนทดสอบ (b.) หลังทดสอบ (c.) ปิดด้วย aluminum foil (d.) หลังทดสอบด้วยเครื่อง  
FE-DBD และปิด aluminum foil

นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบโดยการใช้ aluminum foil มาปิดเพื่อศึกษาว่าลิ้มเลือดที่เกิดขึ้นเกิดจากความร้อนหรือไม่ จากรูปที่ 2.21 (d.) พบว่าหลังการทดสอบการแข็งตัวของเลือดที่มีการเติมสารซีเตรทเพื่อต้านการแข็งตัวของเลือด ด้วยเครื่อง FE- DBD เป็นเวลา 30 วินาที ไม่มีการเกิดขึ้นของลิ้มเลือดเกิดขึ้น ต่อมาได้ทำการทดสอบว่าการเกิดขึ้นของลิ้มเลือดที่เกิดขึ้นเกิดจากรังสี UV หรือสนามไฟฟ้า หรือไม่ โดยการนำกระจกแก้วที่มีความหนา 0.25 mm มาปิดพบว่าหลังจากทดสอบด้วยเครื่อง FE- DBD เป็นเวลา 30 วินาที ไม่มีการเกิดขึ้นของลิ้มเลือดเกิดขึ้น เขาจึงสรุปว่าการเกิดขึ้นของลิ้มเลือดที่เกิดขึ้นเกิดจาก e-plasma ไม่ได้เกิดจากรังสี UV หรือสนามไฟฟ้า ในงานวิจัยก่อนหน้าของ Gregory Fridman และคณะ ได้ตั้งสมมติฐานว่า e-plasma อาจจะไปเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{Ca}^{2+}$  ตามสมการที่ 2.15 และอาจมีการเปลี่ยนแปลงค่า pH เกิดขึ้นเนื่องจาก  $\text{H}^+$  มีการจับกับ R ซึ่ง R ในสมการนี้หมายถึงโปรตีนที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนบางตัว เช่น albumin ที่จับกับ  $\text{Ca}^{2+}$  Sameer U. Kalghatgi และคณะจึงได้ทำการวัดความเข้มข้นของ  $\text{Ca}^{2+}$  ด้วย calcium-selective microelectrode และวัดค่า pH ด้วย pH meter พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของ  $\text{Ca}^{2+}$  และ pH ทำให้เขาสรุปได้ว่า e-plasma ไม่ได้ช่วยในการแข็งตัวของเลือดผ่านกลไก ตามสมการที่ 2.15



เมื่อนำชั้นของลิ้มเลือดที่มีการเติมสารซีเตรทเพื่อต้านการแข็งตัวของเลือดมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า เกล็ดเลือดที่เลือดที่มีการเติมสารซีเตรทเพื่อต้านการแข็งตัวของเลือดที่ไม่ผ่านการทดสอบด้วย FE-DBD มีเกล็ดเลือดบางส่วนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามลูกศรสีดำในรูปที่ 2.22 (a.) และ 2.22 (b.) และบางส่วนมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกล็ดเลือดขึ้น เรียกว่า pseudopodia formation ตามลูกศรสีขาวในรูปที่ 2.22 (a.) และ 2.22 (b.) แต่ไม่มีการรวมตัวของเกล็ดเลือดและไม่มีการเกิดเส้นใย fibrin แต่ในทางกลับกันหลังจากทดสอบด้วยเครื่อง FE-DBD เป็นเวลา 30 วินาทีมีการเกิดเส้นใย fibrin ตามลูกศรสีขาวในรูปที่ 2.22 (c.) และ 2.22 (d.)





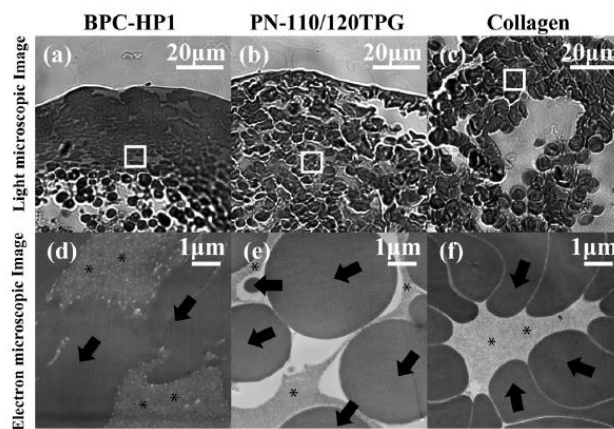
รูปที่ 2. 22 รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM)

(a.) และ (b.) ลิ่มเลือดไม่ผ่านการทดสอบด้วย FE-DBD (ตัวควบคุม) (c.) และ (d.) ลิ่มเลือดที่ผ่านการทดสอบด้วย FE-DBD เป็นเวลา 30 วินาที

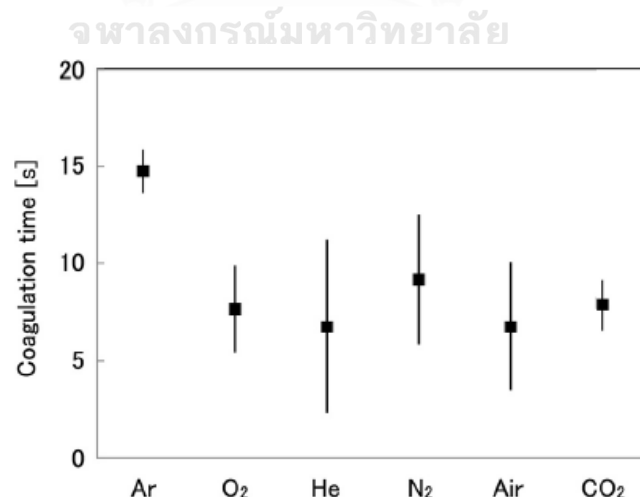
นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบโปรตีนในเลือดมนุษย์ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ albumin และ fibrinogen มาทดสอบด้วยเครื่อง FE-DBD เป็นเวลา 30 วินาที และหลังจากนั้นนำมาวัดการเกาะกลุ่มกันของโปรตีนด้วยเครื่อง Dynamic light scattering (DLS) พบว่า กราฟการกระจายตัวของขนาดโปรตีน Albumin ไม่มีการเปลี่ยนเมื่อทดสอบด้วยเครื่อง FE-DBD แต่การกระจายตัวของขนาดโปรตีน fibrinogen หลังทดสอบด้วยเครื่อง FE-DBD เป็นเวลา 30 วินาที แสดงให้เห็นว่า e-plasma จากเครื่อง FE-DBD สามารถไปเร่งการเปลี่ยนแปลงจาก fibrinogen ไปเป็น fibrin ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการห้ามเลือด

Kenji Miyamoto และคณะ [6] ทำการศึกษาการแข็งตัวของลิ่มเลือดของเซลล์เม็ดเลือดแดงด้วยพลาสมาอุณหภูมิต่ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้เขาได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องพลาสมาอุณหภูมิต่ำแบบ Dielectric barrier discharge รุ่น BPC-HP1 ของบริษัท Nikon กับเครื่องพลาสมาอุณหภูมิต่ำแบบ micro hollow discharge รุ่น PN-110/120 TPG ของ NU Global งานวิจัยนี้ใช้ก๊าซฮีเลียมบริสุทธิ์ที่มีอัตราการไหล 2 slm. เพื่อกระตุ้นให้เกิดสถานะพลาสมา และได้ทำการวัดอุณหภูมิของพลาสมาที่เกิดขึ้นพบว่า พลาสมาของเครื่อง BPC-HP1 มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ส่วนพลาสมาของเครื่อง PN-110/120 TPG มีอุณหภูมิประมาณ 50°C หลังจากนั้นได้ทำการศึกษาการแข็งตัวของลิ่มเลือดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเปรียบเทียบกับตัวควบคุมคือการใช้วัสดุคอลลาเจนเป็นตัวห้ามเลือดตามรูปที่ 2.23 พบว่าผลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของการรักษาด้วยเครื่อง BPC-HP1 มีการเกิดโครงสร้างคล้ายเยื่อหุ้มแต่ไม่พบโครงสร้างดังกล่าวในการรักษาด้วยเครื่อง PN-110/120 TPG

ส่วนผลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่า การรักษาด้วยเครื่อง BPC-HP1 มีการเกาะกลุ่มกันของเซลล์เม็ดเลือดแดงขณะที่การรักษาด้วยเครื่อง PN-110/120 TPG มีการเกาะกลุ่มกันแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ส่วนในตัวควบคุมคอลลาเจนพบว่ามีทั้งการเกาะกลุ่มกันของเซลล์เม็ดเลือดแดงและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์เม็ดเลือดแดง จากนั้นได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกับความเข้มข้นของฮีโมโกลบินในสารละลาย PBS พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อให้เกิดความแม่นยำต่อความแข็งตัวเป็นลิ่มเลือด

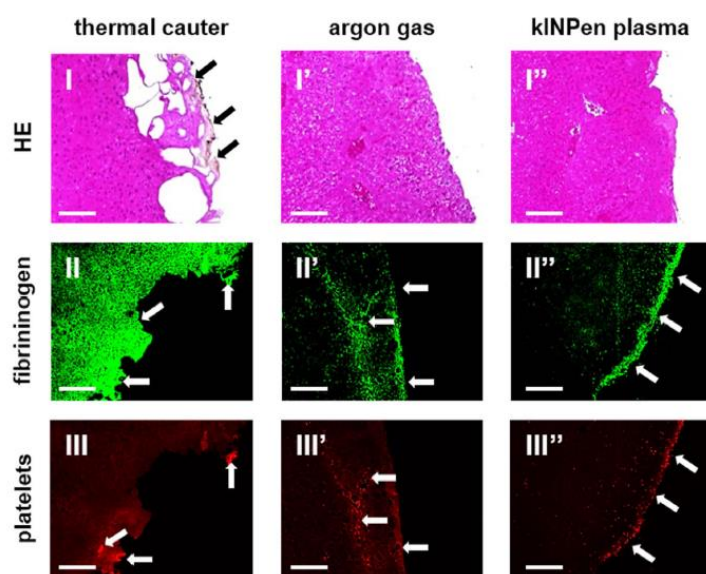


รูปที่ 2. 23 รูปจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเลือดที่ผ่านการรักษาด้วยเครื่องพลาสมา รุ่น BPC-HP1 กับเครื่องพลาสมา รุ่น PN-110/120 TPG เปรียบเทียบกับตัวควบคุมคอลลาเจน



รูปที่ 2. 24 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของเลือดมนุษย์ที่ผสมสารยับยั้งการแข็งตัวเมื่อมีการใช้ก๊าซ Ar, O<sub>2</sub>, He, N<sub>2</sub>, Air และ CO<sub>2</sub> ในการกำเนิดพลาสมา

Yudai Nomura และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของชนิดของก๊าซในพลาสมาแบบเจ็ตต่อเวลาในการทำให้เลือดแข็งตัวของเลือด (Coagulation time) ของมนุษย์ที่ผสมสารยับยั้งการแข็งตัวได้กราฟตามรูปที่ 24 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลาสมาที่เกิดจากก๊าซอาร์กอนใช้เวลานานที่สุด เท่ากับ 14.7 วินาทีในการทำให้เลือดแข็งตัว ก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใช้เวลาในการทำให้เลือดแข็งตัวเร็วที่สุดเท่ากับ 6.8 วินาที



รูปที่ 2. 25 Histology ของเนื้อเยื่อแสดงตำแหน่งของ fibrinogen และเกล็ดเลือดที่ทำการห้ามเลือดด้วยการจี้ด้วยไฟฟ้า เปรียบเทียบกับการใช้เครื่อง kinPen MED โดยใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นโมเดลแทนการทำให้เลือดแข็งตัวตามธรรมชาติ

Sander Bekeschus และคณะ [34] ได้ทำการศึกษากลไกการห้ามเลือดโดยใช้เครื่อง argon plasma jet (kinPen MED) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับห้ามเลือดโดยใช้การจี้ด้วยไฟฟ้า และเขาใช้ก๊าซอาร์กอนแทนโมเดลในการแข็งตัวของเลือดตามธรรมชาติ จากรูปที่ 2.25 Histology ของเนื้อเยื่อ แสดงให้เห็นว่ามีการเสียหายของเนื้อเยื่อที่ผ่านการจี้ด้วยไฟฟ้า ส่วนเนื้อเยื่อที่ห้ามเลือดโดยใช้เครื่อง kinPen ยังคงสภาพดี รูปแสดงตำแหน่งของ fibrinogen และเกล็ดเลือด ในการจี้ด้วยไฟฟ้ามีการกระจายตัวของ fibrinogen และเกล็ดเลือด แต่ในที่ที่ใช้เครื่อง kinPen fibrinogen จะรวมตัวกันตรงบริเวณที่ถูกห้ามเลือดด้วย plasma jet ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับกลุ่มควบคุม (ใช้ก๊าซอาร์กอน) เนื่องจากพลาสมาประกอบด้วยอนุพันธ์ออกซิเจนที่ว่องไว (ROS) และอนุพันธ์ไนโตรเจนที่ว่องไว (RNS) จำนวนมาก อนุพันธ์เหล่านี้ อาจจะเป็นส่วนที่ช่วยเร่งให้เกิดเลือดเกิดการเกาะกลุ่มกันและสามารถห้ามเลือดได้ จึงได้คาดการณ์ว่าเกล็ดเลือดเป็นตัวการสำคัญในการทำให้เลือดแข็งตัวโดยใช้พลาสมาเย็น

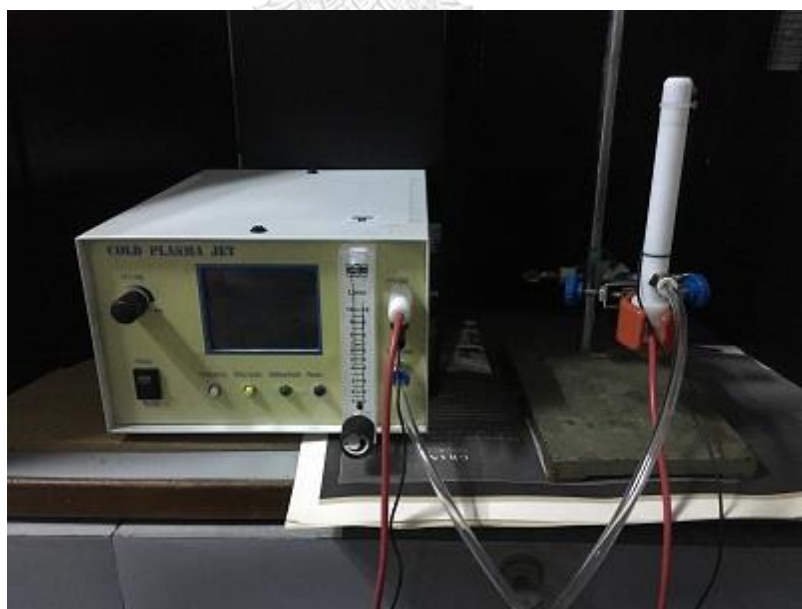
### บทที่ 3

#### การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมา

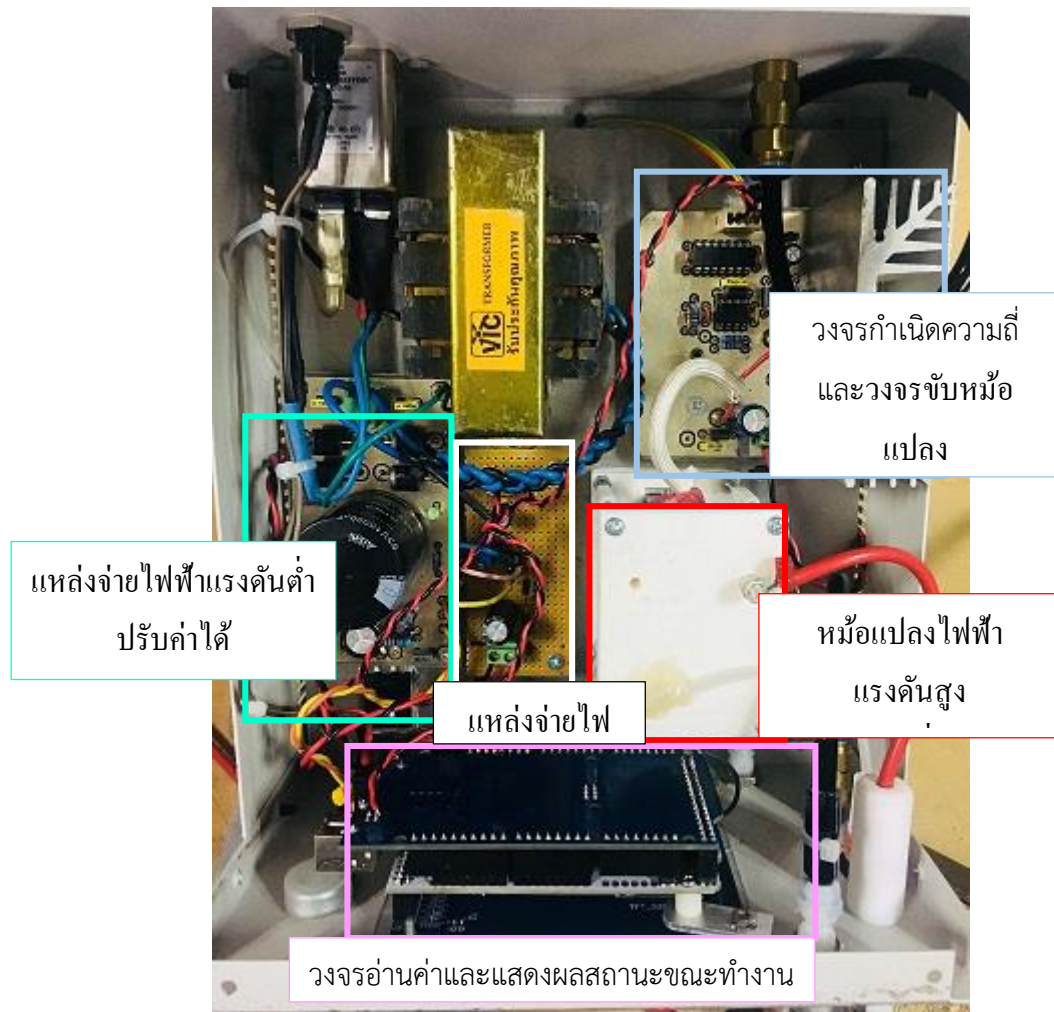
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ตที่ความดันบรรยากาศสำหรับใช้ในการห้ามเลือดทางการแพทย์ โดยแนวทางการออกแบบเบื้องต้นมีลักษณะโครงสร้างการทำงานของเครื่องประกอบด้วยส่วนสำคัญหลัก 3 ส่วนคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับ ชุดควบคุมอัตราการไหลก๊าซ และโพรบกำเนิดลำพลาสมา ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ตที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3. 1 แผนผังโครงสร้างการของเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ตที่ออกแบบใช้งาน



(a.) เครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ตที่พัฒนาขึ้น



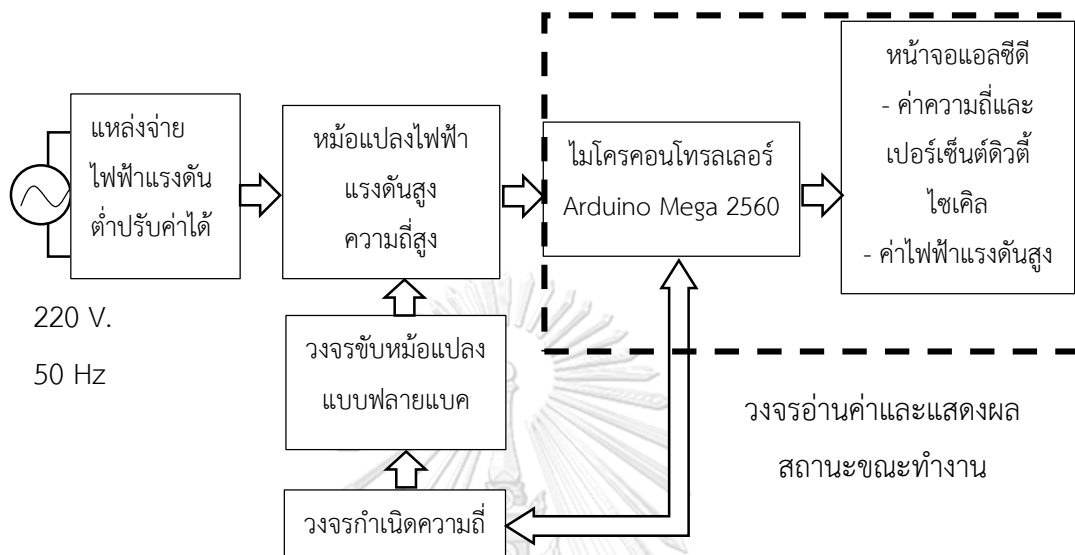
(b.) วงจรทั้งหมดของเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ตที่พัฒนาขึ้น

รูปที่ 3. 2 (a.) เครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ตที่พัฒนาขึ้น (b.) วงจรทั้งหมดของเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ตที่พัฒนาขึ้น

### 3.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับ

ในการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับสำหรับใช้งานกับระบบพลาสมาเย็นแบบเจ็ต ผู้วิจัยได้พยายามออกแบบวงจรที่ไม่ซับซ้อนเพื่อง่ายต่อการซ่อมบำรุงด้วยวัสดุ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถหาได้ในประเทศและราคาถูก โดยโครงสร้างและหลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับประกอบด้วยส่วนสำคัญต่างๆ ดังนี้

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำชนิดปรับค่าได้ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง วงจรขับ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Fly-back converter) วงจรกำเนิดความถี่ และไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมการทำงานและการแสดงผล ดังแสดงในรูปที่ 3.3

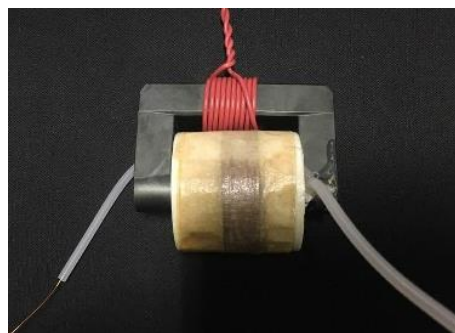


รูปที่ 3. 3 โครงสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับ

### 3.1.1. หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แกนหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟอร์ไรต์รูปทรงตัวยู (U-Shape) เนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับงานที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าและความถี่สูง ส่วนบอบบิน (Bobbin) ทำจากพลาสติก เอบีเอส (ABS) ปรี้นต์ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยออกแบบและพันขดลวดให้มีอัตราส่วนจำนวนรอบ (Turn ratio) ของขดลวดด้านปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิเท่ากับ 1 ต่อ 70 ซึ่งอัตราส่วนจำนวนรอบ 1 ต่อ 70 ได้มาจากการทดลองก่อนหน้า เนื่องจากไม่มีข้อมูลของแกนหม้อแปลงที่นำมาใช้ออกแบบ จึงต้องทำการทดลองด้วยการพันหม้อแปลงแล้วหาอัตราส่วนขดลวดปฐมภูมิต่อขดลวดทุติยภูมิที่เหมาะสม การพันหม้อแปลงใช้สายไฟชนิด VSF ซึ่งเป็นสายอ่อนทองแดงฝอยเบอร์ 26 และลวดทองแดงอาบน้ำยาเบอร์ 38 สำหรับขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิตามลำดับ ซึ่งการใช้สายไฟชนิด VSF ของขดลวดด้านปฐมภูมิจะช่วยลดผลกระทบที่ผิว (Skin effect) ที่ความถี่สูงขณะทำงาน หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พันขดลวดและประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วแสดงดังรูปที่ 3.4





(a.) หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

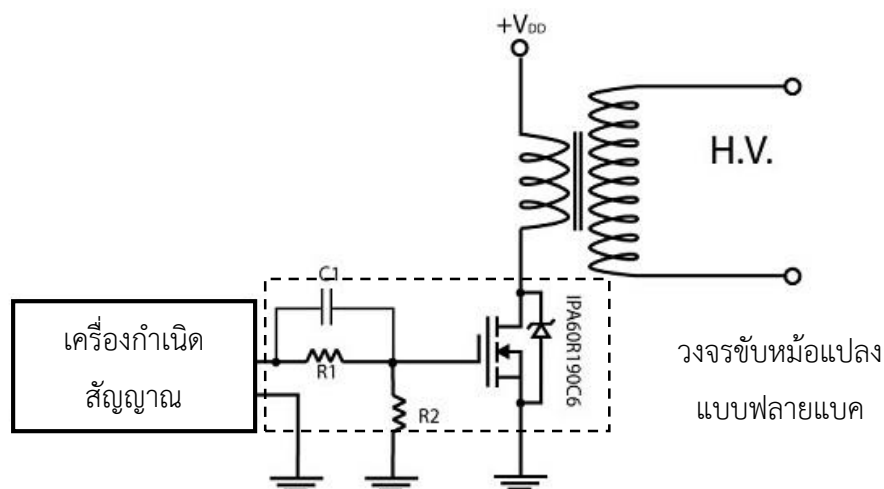


(b.) บอบบิน

รูปที่ 3. 4 (a.) หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงและ (b.) บอบบินที่พัฒนาขึ้น

### 3.1.2. วงจรขับหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบวงจรขับหม้อแปลงเป็นแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ เพื่อประหยัดชิ้นส่วนอุปกรณ์ทำให้สามารถลดขนาดและราคาของเครื่องมือที่ทำการพัฒนาลงได้ นอกจากนี้ยังเป็นวงจรที่มีประสิทธิภาพในการทำงาน (Typical efficiency) ที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรขับหม้อแปลงรูปแบบอื่น ซึ่งวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ได้ใช้ เพาเวอร์มอสเฟต (MOSFET) เบอร์ IPA60R190C6 ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ขับ (Drive) หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พัฒนาขึ้นเพราะมีค่าอัตราทนแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการใช้งาน อีกทั้งยังมีสวิตชิ่งไดโอดความเร็วสูงต่ออยู่ที่ขาเดรน (Drain) และ ขาซอส (Source) เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์เมื่อเกิดกระแสไหลย้อนกลับจากหม้อแปลง การทำงานของวงจรเริ่มจากการป้อนสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปเหลี่ยมขนาดความสูง 5 โวลต์ทางขาเกต (Gate) ของมอสเฟส ผ่านทางวงจรอาร์ซี (RC circuit) ที่ทำหน้าที่แบ่งแรงดันและเพิ่มความเร็ว (Speed-up) ในการทำงานให้กับวงจร จึงทำให้มอสเฟตที่ทำหน้าที่ขับหม้อแปลงสามารถทำงานที่ความถี่ที่สูงขึ้นและลดการผิตเพี้ยนของสัญญาณด้านทางออกของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง โครงสร้างของวงจรขับหม้อแปลงแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3. 5 โครงสร้างของวงจรขับหม้อแปลงแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

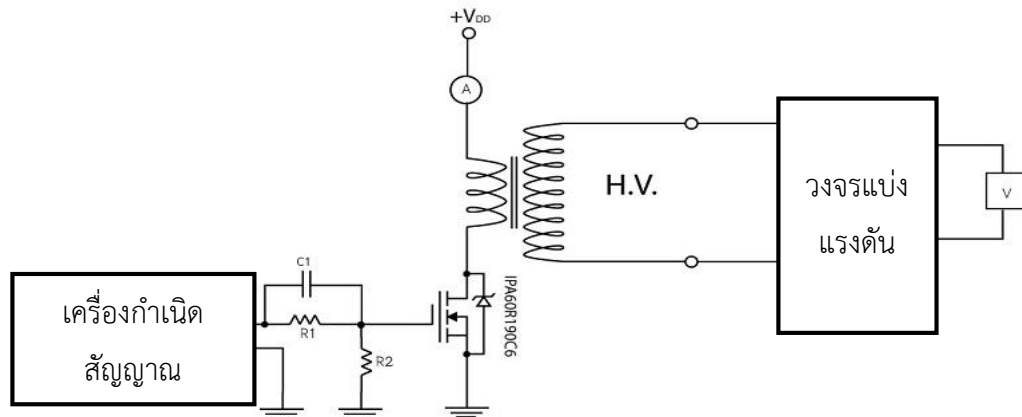
หลังจากได้หม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันสูงพร้อมวงจรขับแล้วได้นำมาทำการทดสอบหาค่าความถี่ และค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิลที่ตอบสนองหม้อแปลงความถี่สูงแรงดันสูง โดยการใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator) รุ่น GFG-3015 เพื่อนำค่าความถี่และเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิลที่ดีที่สุดไปใช้ในการออกแบบวงจรกำเนิดความถี่และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากเครื่อง DC POWER SUPPLY รุ่น HY3005 เพื่อหาค่าไฟฟ้าแรงดันต่ำเพื่อนำมาออกแบบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำปรับค่าได้ โดยแบ่งการทดลองเบื้องต้นออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนที่ 1 การทดสอบการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พัฒนา

เพื่อหาค่าความถี่และประสิทธิภาพการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน มีการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.6 โดยการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำกระแสตรง ( $V_{DD}$ ) เป็น 20 V. และปรับความถี่ตั้งแต่ 15 ถึง 50 kHz ครึ่งละ 5 kHz โดยคงค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิลไว้ที่ 50 % ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.1 และกราฟที่ 3.1

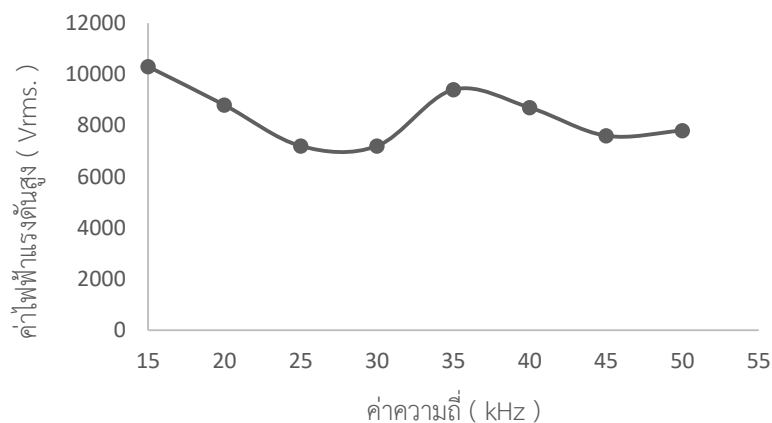




รูปที่ 3. 6 การจัดอุปกรณ์เพื่อทดสอบการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 3. 1 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พัฒนา

ความถี่ (kHz)	ค่าไฟฟ้าแรงดันสูง		กระแสไฟฟ้าอินพุต (A)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W.)
	$kV_{rms}$	$kV_{pp}$		
15	10.30	29.13	0.71	14.2
20	8.80	24.89	0.40	8.0
25	7.20	20.36	0.24	4.8
30	7.20	20.36	0.22	4.4
35	9.40	26.59	0.56	11.2
40	8.70	24.61	0.66	13.2
45	7.60	21.49	0.56	11.2
50	7.80	22.06	0.50	10.0



กราฟที่ 3. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าแรงดันสูงและค่าความถี่

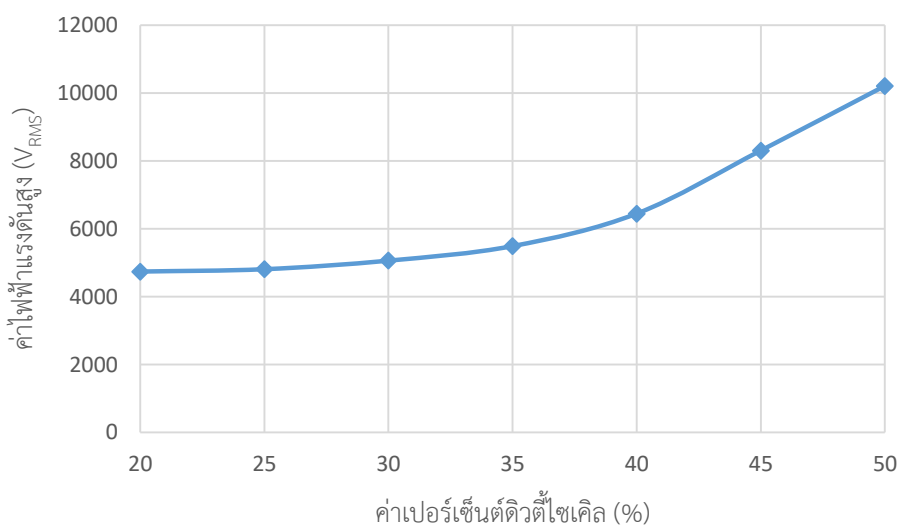
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ต่อไฟฟ้าแรงดันสูงแสดงดังกราฟที่ 3.1 พบว่าที่ความถี่ 35 kHz ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดแต่ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยที่สุด และที่สำคัญคือไม่เกิดเสียงรบกวนจากตัวหม้อแปลงขณะเครื่องทำงาน จึงเลือกค่านี้เพื่อนำมาออกแบบวงจรกำเนิดความถี่

ส่วนที่ 2 การทดสอบการตอบสนองของค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิลของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พัฒนา

เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิลและประสิทธิภาพการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน โดยการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำกระแสตรง ( $V_{DD}$ ) เป็น 20 V. และปรับเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิลตั้งแต่ 20 ถึง 50 % ครึ่งละ 5 % โดยคงค่าความถี่ไว้ที่ 35 kHz ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.2 และกราฟที่ 3.2

ตารางที่ 3. 2 การตอบสนองค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีทีไอเคิลของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พัฒนา

ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีทีไอเคิล (%)	ค่าไฟฟ้าแรงดันสูง		กระแสไฟฟ้าอินพุต (A)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W.)
	kV <sub>rms</sub>	kV <sub>pp</sub>		
20	4740	13408.76	0.06	1.2
25	4809	13603.96	0.06	1.2
30	5062	14319.66	0.08	1.6
35	5490	15530.41	0.12	2.4
40	6447	18237.62	0.21	4.2
45	8305	23493.63	0.37	7.4
50	10210	28882.60	0.55	11



กราฟที่ 3. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าแรงดันสูงและค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีทีไอเคิล

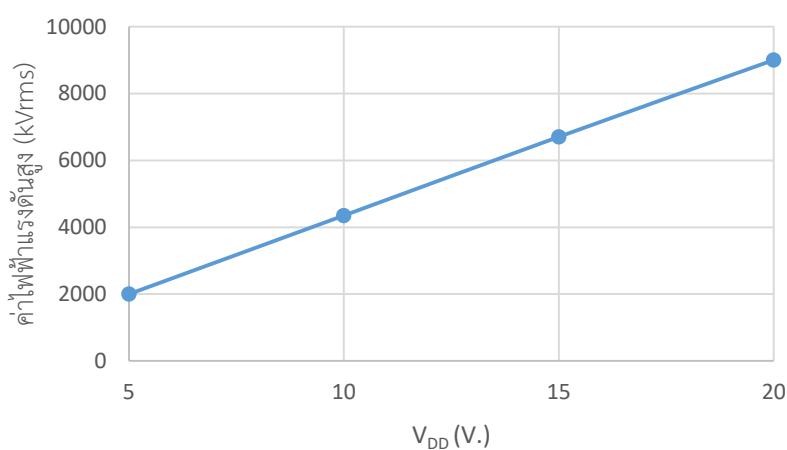
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีทีไอเคิลต่อค่าไฟฟ้าแรงดันสูงเป็นไปตามกราฟที่ 3.2 เห็นได้ว่าเมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีทีไอเคิลมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าไฟฟ้าแรงดันสูงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ส่วนที่ 3 การทดสอบการตอบสนองของค่าไฟฟ้าแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พัฒนา

เพื่อหาค่าไฟฟ้าแรงดันต่ำและประสิทธิภาพการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน โดยตั้งค่าความถี่ไว้ที่ 35 kHz และค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีทีไซเคิลเท่ากับ 50 % ให้คงที่แล้วปรับค่าไฟฟ้าแรงดันต่ำ ( $V_{DD}$ ) ตั้งแต่ 5 ถึง 20 V. โดยปรับค่าทีละ 5 V. ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.3 และกราฟที่ 3.3

ตารางที่ 3. 3 การตอบสนองของค่าไฟฟ้าแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พัฒนา

ค่าไฟฟ้าแรงดันต่ำ (V.)	ค่าไฟฟ้าแรงดันสูง		กระแสไฟฟ้า อินพุต (A)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W.)
	$kV_{rms}$	$kV_{pp}$		
5	2000	5657.70	0.12	0.6
10	4350	12305.51	0.27	2.7
15	6702	18958.98	0.43	6.45
20	9000	25459.68	0.59	11.8

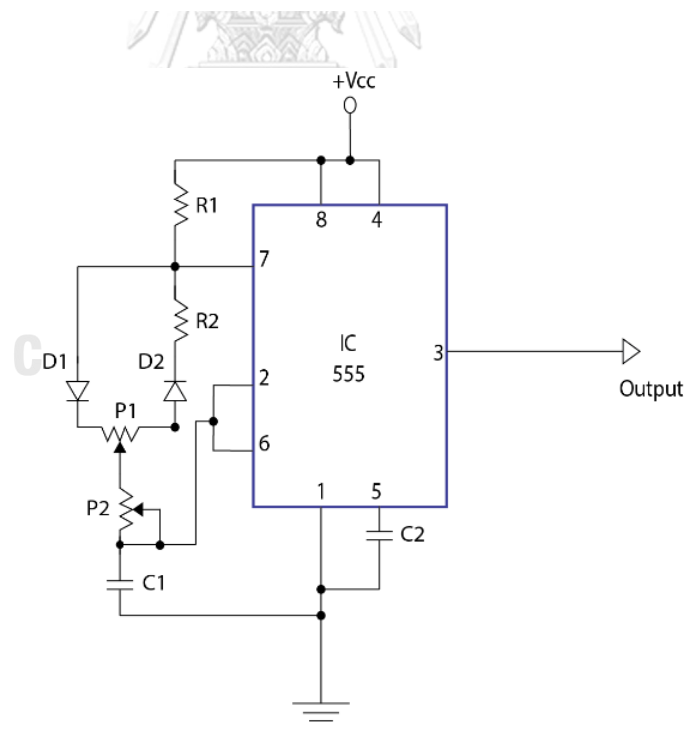


กราฟที่ 3. 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าแรงดันสูงและค่าไฟฟ้าแรงดันต่ำ ( $V_{DD}$ )

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ต่อแรงดันสูงเป็นไปตามกราฟที่ 3.2 เห็นได้ว่าเมื่อค่าไฟฟ้าแรงดันต่ำกระแสตรงมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าไฟฟ้าแรงดันสูงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อคำนวณกลับมาหาค่าอัตราส่วนระหว่างขดลวดทุติยภูมิและขดลวดปฐมภูมิไม่เท่ากับ 1 : 70 อาจเนื่องมาจากผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (back EMF) การเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของแกนหม้อแปลงที่นำมาใช้

### 3.1.3. การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปเหลี่ยม

วงจรกิจกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าแบบคลื่นรูปสี่เหลี่ยมใช้สำหรับควบคุมการทำงานของมอสเฟต (MOSFET) ในส่วนของวงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันและความถี่สูงแบบฟลายแบค โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ ไอซีเบอร์ 555 เนื่องจากเป็นไอซีที่ได้รับความนิยมและสามารถปรับค่าความถี่ได้ในช่วงกว้างและเปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิลได้ตามที่ต้องการ โดยมีการต่อวงจรให้สามารถปรับค่าความถี่และเปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิลได้ตามโครงสร้างวงจรรูปที่ 3.7 และได้มีการคำนวณค่า C timing ตามสมการที่ 3.1 โดยใช้ค่าความถี่เท่ากับ 35 kHz ในการคำนวณ



รูปที่ 3. 7 วงจรของไอซี 555 ที่สามารถปรับค่าความถี่และเปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิลได้

การคำนวณค่า C timing (C1) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.1

$$f = \frac{0.69}{(2P1+P2+R1)C1} \quad \text{โดย } R1 = R2 \quad \dots\dots\dots 3.1$$

เมื่อ f = ค่าความถี่ที่ใช้ หน่วยเป็น เฮิรต (Hz)

P1 = ค่าตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ตัวที่ 1 ใช้ปรับความถี่มี หน่วยเป็น โอห์ม ( $\Omega$ )

P2 = ค่าตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ตัวที่ 2 ใช้ปรับค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิล หน่วยเป็น โอห์ม ( $\Omega$ )

C1 = ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้หน่วงเวลา หรือที่เรียกว่า C timing หน่วยเป็น ฟารัด (F)

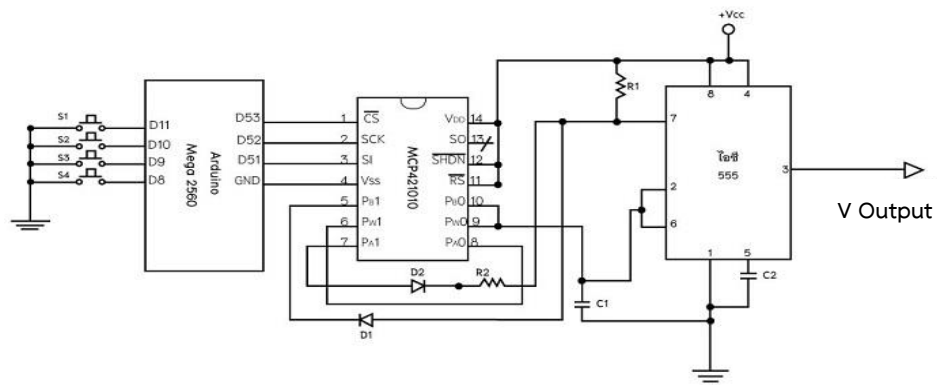
กำหนดให้ P1 = P2 = 10k $\Omega$  และ R1 = 1k $\Omega$  ที่ความถี่ 35 kHz.

จะได้ว่า

$$C1 = \frac{0.69}{(2(10k\Omega) + (10k\Omega) + 1k\Omega) * 35 \text{ kHz}}$$

$$C1 = 6.35 * 10^{-10} \text{ F หรือ } 0.6 \text{ nF}$$

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่า C1 = 1.5 nF เพื่อให้สามารถปรับค่าในช่วงความถี่ต่ำได้กว้างขึ้นและเพื่อให้การควบคุมค่าความถี่และเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิลได้เที่ยงตรงยิ่งขึ้น จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนวงจรไอซีโทมเมอร์เบอร์ 555 ทำงานร่วมไอซีที่ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้แบบดิจิทัล (Digital potentiometer) ขนาด 8 บิต เบอร์ MCP421010 ที่สามารถควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์จากบอร์ด Arduino Mega 2560 ผ่านการสื่อสารด้วยระบบบัสอนุกรมแบบ SPI เพื่อให้ง่ายต่อการปรับค่าความถี่และเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิลให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งในการออกแบบวงจรใช้งานสามารถทำงานปรับค่าความถี่ได้ 3 ระดับ 30 35 และ 40 kHz และค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิลได้ 5 ระดับคือ 30 40 50 60 และ 70 % นอกจากนี้เพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งานจึงได้ออกแบบวิธีการปรับค่าความถี่และเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิลด้วยสวิตช์แบบปุ่มกดที่ติดตั้งอยู่ที่หน้าปัดเครื่องซึ่งวงจรทั้งหมดมีโครงสร้างตามรูปที่ 3.8



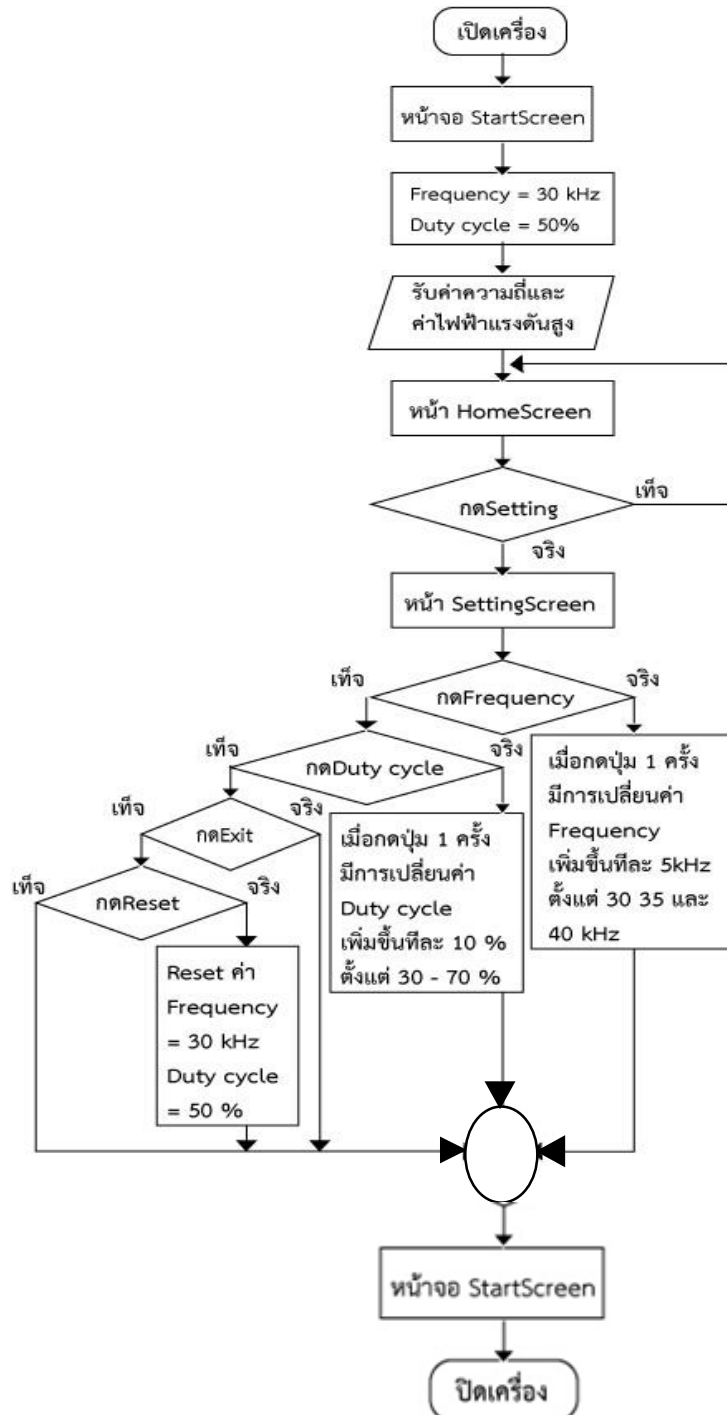
รูปที่ 3. 8 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปเหลี่ยมที่ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

#### 3.1.4. การออกแบบวงจรแสดงผลและควบคุมสถานะการทำงาน

เพื่อให้ผู้ศึกษาและวิจัยด้านพลาสมาสามารถใช้ประโยชน์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ความถี่สูงชนิดกระแสสลับได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบวงจรอ่านค่าและแสดงผลความถี่ เพอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิล และไฟฟ้าแรงดันสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้งานได้เห็นค่าต่างๆ เหล่านี้ได้ขณะทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์และนำไปใช้เป็นข้อมูลในการทำวิจัยได้ ในการอ่านและแสดงผลค่าความถี่และเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิล ไมโครคอนโทรลเลอร์จะอ่านค่าของคาบสัญญาณ ON (Htime) และ OFF (Ltime) ที่ได้มาจากเอาต์พุตของไอซี 555 ผ่านโปรแกรมฟังก์ชัน `pulseIn()` แล้วนำมาคำนวณหาช่วงเวลา 1 ไซเคิล (Ttime) เพื่อให้ได้ค่าความถี่ และนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิลจากสมการที่ 3.2

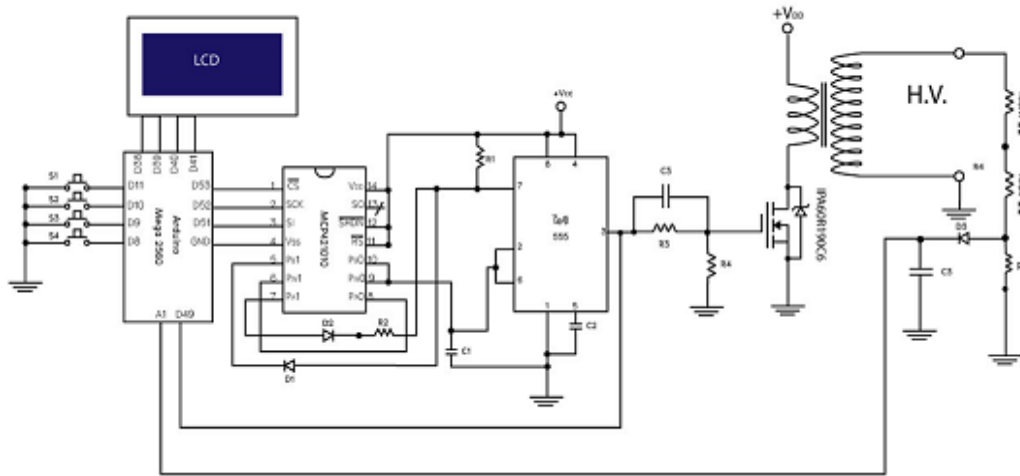
$$\% \text{ Duty cycle} = ( \text{Htime} / \text{Ttime} ) \times 100\% \quad \dots\dots\dots 3.2$$

โดยค่าความถี่และค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิลที่ได้จะถูกแสดงผลผ่านหน้าจอแอลซีดีสี (Color LCD) ส่วนการอ่านค่าไฟฟ้าแรงดันสูงอาศัยการทำงานของวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) เพื่อลดค่าไฟฟ้าแรงดันสูงจากเอาต์พุตของหม้อแปลงจาก 0 ถึง 15 kVrms. ให้เป็น 0 ถึง 5 V. และมีวงจรกรองสัญญาณผ่านไดโอดและคาปาซิเตอร์เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่เรียบขึ้นสำหรับป้อนให้กับขานาลอกอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 เพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าผ่านโปรแกรมฟังก์ชัน `analogRead()` และเขียนโปรแกรมแสดงผลค่าไฟฟ้าแรงดันสูงผ่านหน้าจอ ซึ่งวงจรแสดงผลสถานะการทำงานมีแผนผังการทำงาน (Flow chart) ตามรูปที่ 3.9 และ โครงสร้างวงจรแสดงผลค่าความถี่ ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิล และค่าไฟฟ้าแรงดันสูง แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3. 9 แผนผังการทำงาน (Flow chart) ของวงจรแสดงผลและควบคุมสถานะการทำงาน





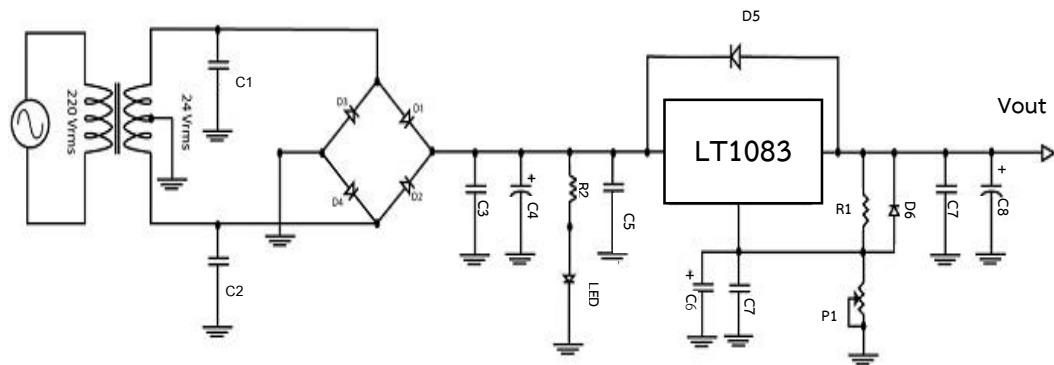
รูปที่ 3. 10 โครงสร้างวงจรแสดงผลและควบคุมสถานะการทำงาน

### 3.1.5. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำที่ออกแบบใช้งานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงชนิดปรับค่าได้ตั้งแต่ 1.25 ถึง 30 V. ที่ประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V. 50 Hz ให้เป็น 24 โวลต์ 2 A. วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Bridge rectifier) คาปาซิเตอร์กรองสัญญาณ และไอซีเรกูเลเตอร์ (Regulator) เบอร์ LT1083 ที่สามารถให้กระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 7.5 A. ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำนี้จะใช้สำหรับควบคุมการปรับตั้งค่าไฟฟ้าแรงดันสูงขณะใช้งาน ซึ่งค่าแรงดันเอาต์พุตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$V_{out} = 1.25 (1 + R1/P1)$$

..... 3.3



รูปที่ 3.11 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำชนิดปรับค่าได้

### 3.2 โปรมสำหรับกำเนิดลำพลาสมา

ในงานวิจัยนี้มีการออกแบบให้เป็นทรงกระบอกมีขนาดเท่าปากกาเขียนกระดานเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถจับได้ถนัดมือ โดยโปรมสำหรับกำเนิดลำพลาสมาทำมาจากเทฟลอนเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ภายในทำจากหลอดแก้วโบโรซิลิเกต มีขั้วไฟฟ้าแรงดันสูงทำจากแท่งทังสเตนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm. และมีขั้วกราวด์ทำจากทองเหลืองกลึงติดไว้ที่ปลายของหลอดทดลอง ซึ่งโครงสร้างของโปรมกำเนิดลำพลาสมาเป็นไปตามรูปที่ 3.12



รูปที่ 3. 12 โครงสร้างของโพรบสำหรับกำเนิดลำพลาสมา

### 3.3 ชุดควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ

ใช้เพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนในการกระตุ้นให้เกิดสถานะพลาสมาในโพรบ ประกอบด้วย ข้อต่อก๊าซขาเข้าและข้อต่อก๊าซขาออก ทำจากสแตนเลส เครื่องโรตาริเมตรที่มีสเกลตั้งแต่ 0 - 10 L/min และท่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm. โดยเริ่มต้นมีการต่อท่อลมจากถังก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ข้อต่อก๊าซขาเข้าด้านหลังของเครื่อง จากนั้นก๊าซจะไหลผ่านเครื่องโรตาริเมตรเพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซขณะใช้งานก่อนเข้าสู่โพรบกำเนิดพลาสมาผ่านข้อต่อก๊าซขาออก โครงสร้างชุดควบคุมอัตราการไหลของก๊าซเป็นไปตามรูปที่ 3.13 ข้อต่อก๊าซขาเข้าและข้อต่อก๊าซขาออกที่หน้าปัดเครื่องพลาสมาเป็นไปตามรูปที่ 3.14



รูปที่ 3. 13 โครงสร้างชุดควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ



(a.) ข้อต่อก๊าซขาเข้าสำหรับต่อท่อลมจากถังก๊าซอาร์กอน

(b.) ข้อต่อก๊าซขาออกสำหรับต่อท่อลมสำหรับเข้าโพรบกำเนิดพลาสมาเย็นแบบเจ็ด

รูปที่ 3. 14 (a.) ข้อต่อก๊าซขาเข้าสำหรับต่อท่อลมจากถังก๊าซ (b.) ข้อต่อก๊าซขาออกสำหรับต่อท่อลมสำหรับเข้าโพรบกำเนิดพลาสมาเย็นแบบเจ็ด

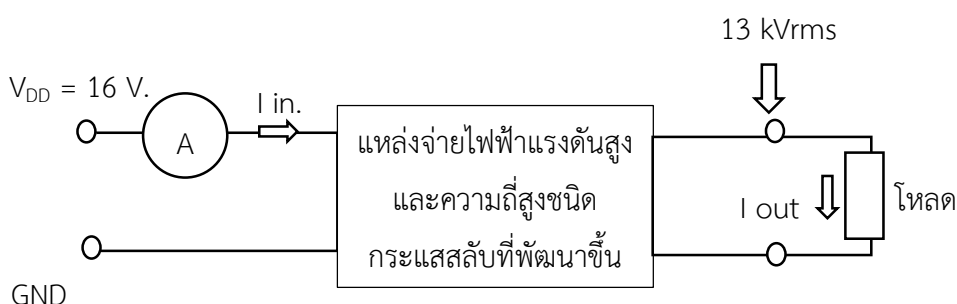
## บทที่ 4

### วิธีการวิจัยและผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งวิธีการทดสอบระบบการทำงานของเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบเจ็ทที่ความดันบรรยากาศที่พัฒนาขึ้นออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงและความถี่สูงชนิดกระแสสลับ ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อความยาวของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ท ส่วนที่ 3 เป็นการวัดสเปกตรัมของพลาสมาที่ได้จากแหล่งกำเนิดเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและทำการวิเคราะห์หาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และส่วนที่ 4 เป็นการทดสอบการแข็งตัวของเลือด

#### 4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับ

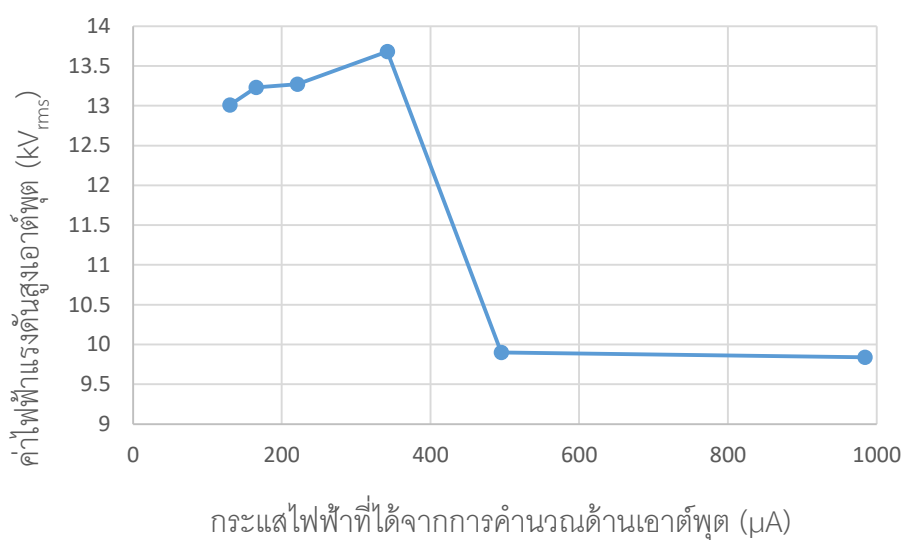
การทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงกระแสสลับมีการจัดระบบการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากนั้นปรับค่าของไฟฟ้าแรงดันสูงของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับที่พัฒนาเป็นค่าสูงสุดที่ 13 kVrms แล้วต่อโหลดที่มีค่าความต้านทานค่าต่างๆวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทได้ผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 4.1 และได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าแรงดันสูงขาออกและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณตามกราฟที่ 4.1 หลังจากนั้นคำนวณกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตต์และเอาท์พุทจากค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อต่อด้วยตัวต้านทาน 40 M $\Omega$  ที่บรรจุอยู่ในฉนวนน้ำมัน ซึ่งค่าความต้านทาน 40 M $\Omega$  นี้เป็นค่าต่ำสุดที่ไม่ทำให้ค่าไฟฟ้าแรงดันสูงลดลง ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.2 จากการทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับที่พัฒนาขึ้น พบว่ามีประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับเท่ากับ 74.28 % และสามารถรักษาค่าไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายออกไปสู่โหลดได้โดยไม่มีการลดลง



รูปที่ 4.1 การจัดระบบการทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงกระแสสลับ

ตารางที่ 4. 1 ค่าไฟฟ้าแรงดันสูงเอาต์พุตของโหลดตัวต้านทานค่าต่างๆ ที่บรรจุอยู่ในฉนวนน้ำมัน

ตัวต้านทานโหลด	ค่าไฟฟ้าแรงดันสูงเอาต์พุต ( $kV_{rms}$ )	กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการ คำนวณด้านเอาต์พุต ( $\mu A$ )
ไม่มีโหลด	13.24	-
100 M $\Omega$	13.01	130.1
80 M $\Omega$	13.23	165.38
60 M $\Omega$	13.27	221.16
40 M $\Omega$	13.68	342
20 M $\Omega$	9.9	495
10 M $\Omega$	9.84	984



กราฟที่ 4. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าแรงดันสูงเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้านเอาต์พุต

ตารางที่ 4. 2 ค่าประสิทธิภาพและค่าไฟฟ้าแรงดันสูงเอาต์พุตของโพลิตแต่ละชนิด

ชนิดของโพลิต	อินพุต			เอาต์พุต			ประสิทธิภาพการทำงาน (%)
	I (mA.)	V (V.)	P (W.)	I ( $\mu$ A.)	V (kVrms.)	P (W.)	
ตัวต้านทาน 40 M $\Omega$ ที่บรรจุอยู่ในฉนวนน้ำมัน	394	16	6.30	342	13.68	4.68	74.28

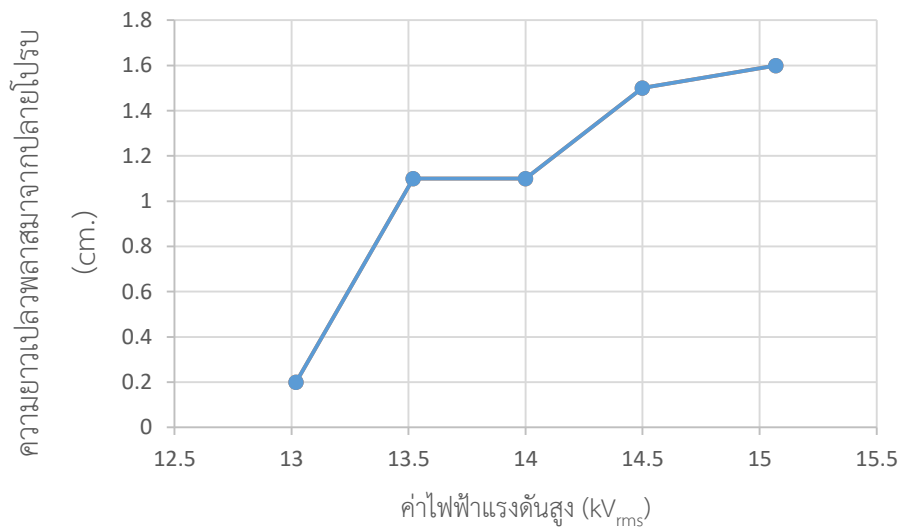
#### 4.2 การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่ได้พัฒนาต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ต

##### 4.2.1 ผลจากค่าไฟฟ้าแรงดันสูง

การทดลองนี้เพื่อศึกษาค่าไฟฟ้าแรงดันสูงมีผลกระทบต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ตด้วยการตั้งค่าความถี่ใช้งานที่ 30 kHz ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิลเท่ากับ 60 % และ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 5 L/min ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่สามารถทำให้เกิดเปลวพลาสมาออกมาจากโพรบได้ จากนั้นปรับค่าไฟฟ้าแรงดันสูงตั้งแต่ 13.00 kVrms ถึง 15.00 kVrms โดยเพิ่มค่าทีละ 0.5 kVrms แล้วอ่านค่าไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่มีการต่อตัวต้านทานแบ่งแรงดัน 1:100 แล้วทำการวัดความยาวของเปลวพลาสมาที่ออกมาจากปลายโพรบ และวัดอุณหภูมิของเปลวพลาสมาด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะที่บริเวณปลายเปลวของพลาสมา ได้ผลการทดลองแสดงดังในตารางที่ 4.3 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าแรงดันสูงและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาแสดงดังกราฟที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

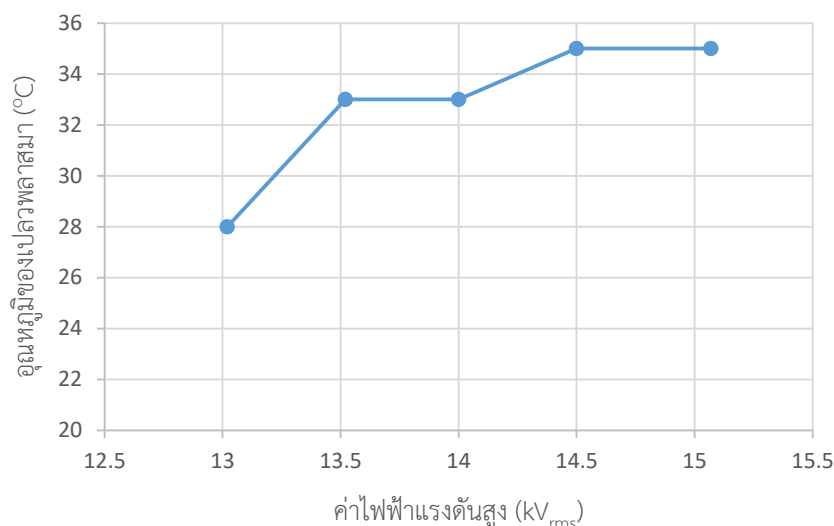
ตารางที่ 4. 3 ผลกระทบจากไฟฟ้าแรงดันสูง

ค่าไฟฟ้าแรงดันสูง (kVrms.)	ความยาวของเปลวพลาสมาจากปลายโพรบ	อุณหภูมิของเปลวพลาสมา (°C)
13.02	0.2 cm.	28
13.52	1.1 cm.	33
14.05	1.1 cm.	33
14.50	1.5 cm.	35
15.07	1.6 cm.	35



กราฟที่ 4. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าแรงดันสูงและความยาวของเปลวพลาสมาจากปลายโพรบ





กราฟที่ 4. 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าแรงดันสูงและอุณหภูมิของเปลวพลาสมา

จากการศึกษาผลกระทบของค่าไฟฟ้าแรงดันสูงต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเป็นแบบเจ็ตพบว่า เมื่อมีการเพิ่มค่าไฟฟ้าแรงดันสูงจะทำให้ความยาวของเปลวพลาสมาเพิ่มสูงขึ้นตามและเมื่อมีการเกิดเปลวพลาสมาออกจากปลายโพรบที่มีความยาวเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของเปลวพลาสมาเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องมาจากค่าไฟฟ้าแรงดันสูงคือพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดพลาสมา เมื่อพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นพลาสมาเพิ่มขึ้นทำให้มีการเกิดกระบวนการไอออนไนเซชันเพิ่มขึ้นและมีการคายพลังงานออกมาในรูปของความร้อน ทำให้อุณหภูมิของเปลวพลาสมามีค่าสูงขึ้น

#### 4.2.2 ผลจากความถี่

การทดลองนี้เพื่อศึกษาค่าความถี่มีผลกระทบต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเป็นแบบเจ็ต โดยการปรับอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนไว้ที่ 5 L/min แล้วตั้งค่าความถี่ใช้งานที่ 30 35 และ 40 kHz ตามลำดับ จากนั้นปรับค่าไฟฟ้าแรงดันสูงจนเกิดเปลวพลาสมาออกจากปลายโพรบแล้ววัดค่าแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงผ่านดิจิจิตอลมิเตอร์ที่มีการต่อตัวต้านทานแบ่งแรงดัน 1:100 เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของความถี่ต่อค่าไฟฟ้าแรงดันสูงขณะทำการทดลอง แล้วทำการวัดความยาวของเปลวพลาสมาที่ออกมาจากปลายโพรบและวัดอุณหภูมิของเปลวพลาสมาด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะที่บริเวณปลายเปลวของพลาสมา

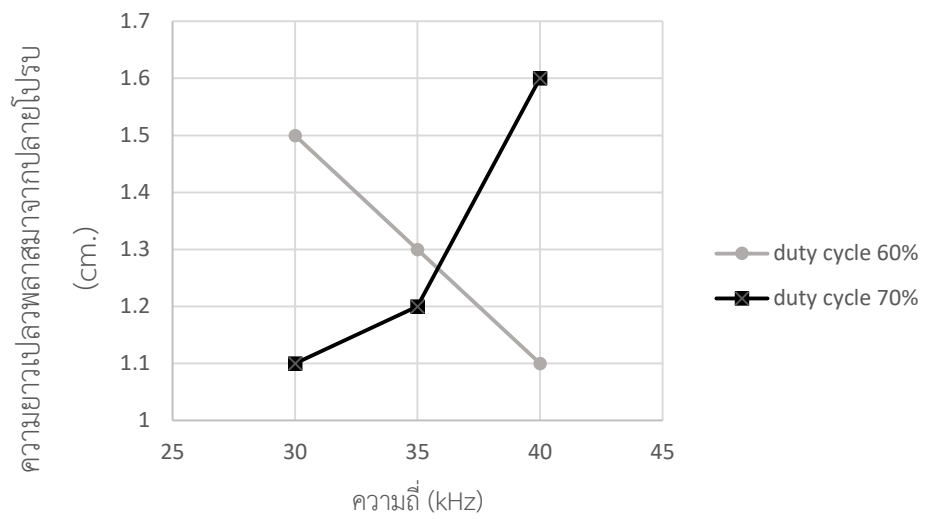
เมื่อกำหนดให้ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลเท่ากับ 60 % ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.4 และค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลเท่ากับ 70 % ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความยาวของเปลวพลาสมาจากปลายโพรบและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอุณหภูมิของเปลวพลาสมาได้กราฟที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4. 4 ผลกระทบของแต่ละความถี่ที่ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิล 60 %

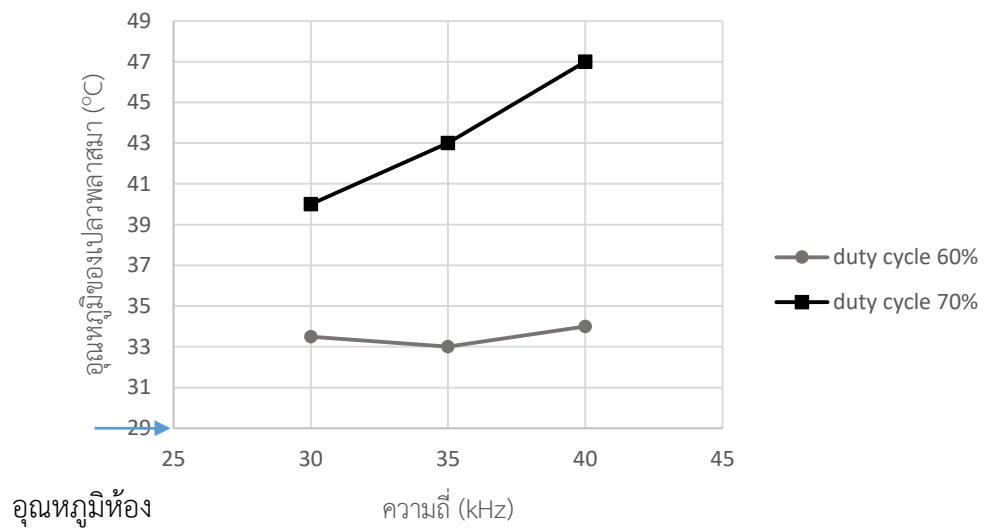
ค่าความถี่ (kHz.)	ค่าไฟฟ้าแรงดันสูง (kVrms.)	ความยาวของเปลวพลาสมาจากปลายโพรบ	อุณหภูมิของเปลวพลาสมา (°C)
30	15.03	 1.5 cm.	33.5
35	13.74	 1.3 cm.	33
40	12.68	 1.1 cm.	34

ตารางที่ 4. 5 ผลกระทบของแต่ละความถี่ที่ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิล 70 %

ค่าความถี่ (kHz.)	ค่าไฟฟ้าแรงดันสูง (kVrms.)	ความยาวของเปลวพลาสมาจากปลายโพรบ	อุณหภูมิของเปลวพลาสมา (°C)
30	15.30	 1.1 cm.	40
35	15.74	 1.2 cm.	43
40	15.76	 1.6 cm.	47



กราฟที่ 4. 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความยาวของเปลวพลาสมาจากปลายโพรบ  
เมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิลเท่ากับ 60 % และ 70 %



กราฟที่ 4. 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอุณหภูมิของเปลวพลาสมา  
เมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิลเท่ากับ 60 % และ 70 %

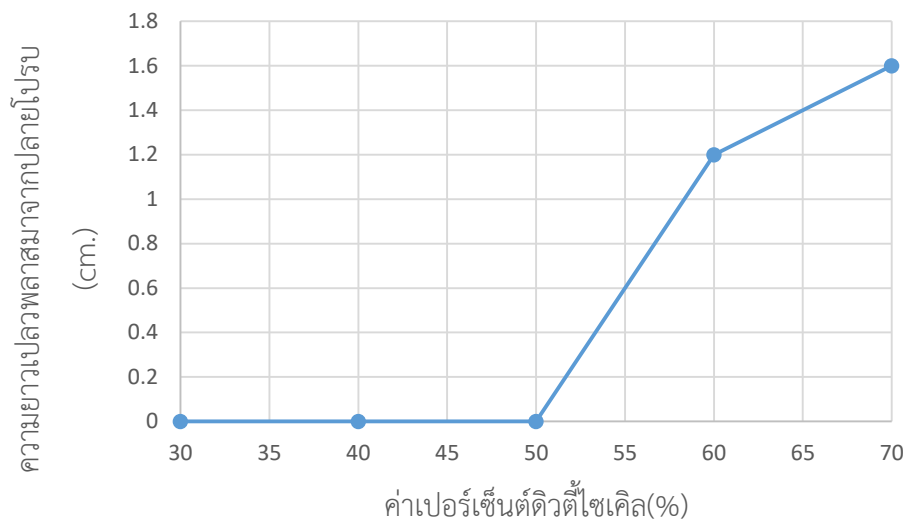
จากการศึกษาผลกระทบของค่าความถี่ต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ดพบว่าที่ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลเท่ากับ 60 % เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าความถี่จะทำให้ความยาวของเปลวพลาสมาลดลง ที่ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลเท่ากับ 70 เมื่อมีการเพิ่มค่าความถี่จะทำให้ความยาวของเปลวพลาสมาเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากการตอบสนองต่อความถี่และค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลของหม้อแปลงความถี่สูงแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ทำให้เกิดไฟฟ้าแรงดันสูงชั่วขณะ (Transient) ซึ่งส่งผลต่อรูปแบบของสัญญาณทางไฟฟ้า ทำให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ใช้กระตุ้นให้เกิดพลาสมาที่ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลเท่ากับ 60 % ลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าความถี่ ส่งผลให้ความยาวของเปลวพลาสมาลดลง และเปลวพลาสมาที่เกิดขึ้นไม่มีความสม่ำเสมอ (ติดๆดับๆ) ทำให้อุณหภูมิลดลงและเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ที่ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลเท่ากับ 70 % เมื่อมีเพิ่มขึ้นของค่าความถี่ ทำให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ใช้กระตุ้นให้เกิดพลาสมาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความยาวของเปลวพลาสมาเพิ่มขึ้นและมีความสม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชันเพิ่มขึ้นและมีการคายพลังงานออกมาในรูปของความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิของเปลวพลาสมาจะเพิ่มขึ้น

#### 4.2.3 ผลของค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิล

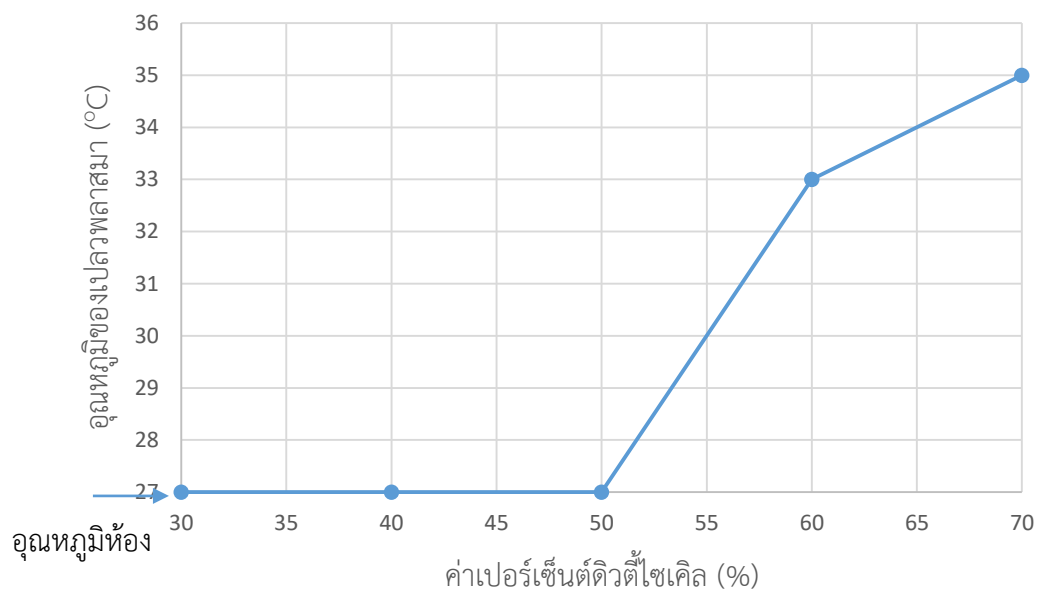
การทดลองนี้เพื่อศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลมีผลกระทบต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ด โดยตั้งค่าความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ 30 kHz อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 5 L/min แล้วปรับค่าแรงดันสูงให้คงที่ แล้วทำการปรับเปลี่ยนค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิล 30 40 50 60 และ 70 %ตามลำดับ แล้ววัดค่าไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่มีการต่อตัวต้านทานแบ่งแรงดัน 1:100 จากนั้นทำการวัดความยาวของเปลวพลาสมาที่ออกมาจากปลายโพรบและวัดอุณหภูมิของเปลวพลาสมาด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะที่บริเวณปลายเปลวของพลาสมา ผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 4.6 ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาของแต่ละค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลแสดงดังกราฟที่ 4.6 และกราฟที่ 4.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4. 6 ผลกระทบของของค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสติกเย็นแบบเจ็ด

ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิล (%)	ค่าไฟฟ้าแรงดันสูง (kVrms.)	ความยาวของเปลวพลาสติกจากปลายโพรบ	อุณหภูมิของเปลวพลาสติก (°C)
30	7.82	 ไม่มีเปลวพลาสติกออกมาจากโพรบ	27
40	8.03	 ไม่มีเปลวพลาสติกออกมาจากโพรบ	27
50	11.69	 ไม่มีเปลวพลาสติกออกมาจากโพรบ	27
60	14.54	 1.2 cm.	33
70	17.17	 1.6 cm.	35



กราฟที่ 4. 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวพลาสมาจากปลายโพรบและค่าเปอร์เซ็นต์ตัวดีไซเคิล



กราฟที่ 4. 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเปลวพลาสมาและค่าเปอร์เซ็นต์ตัวดีไซเคิล







จากการศึกษาผลกระทบของค่าเปอร์เซ็นต์ตัวดีไซเคิลต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเป็นแบบเจ็ต พบว่า เมื่อมีการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ตัวดีไซเคิลจะทำให้ค่าไฟฟ้าแรงดันสูงเพิ่มขึ้นจนมีค่าประมาณ 14.54 Vrms ทำให้สามารถเกิดเปลวพลาสมาออกมาจากปลายโพรบได้และความยาวของเปลวพลาสมาเพิ่มขึ้นตามค่าเปอร์เซ็นต์ตัวดีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อ

ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลเพิ่มขึ้นจะทำให้พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดพลาสมาเพิ่มขึ้น มีการเกิดกระบวนการไอออไนเซชันมากขึ้น แล้วมีการคายพลังงานออกมาในรูปของความร้อน ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

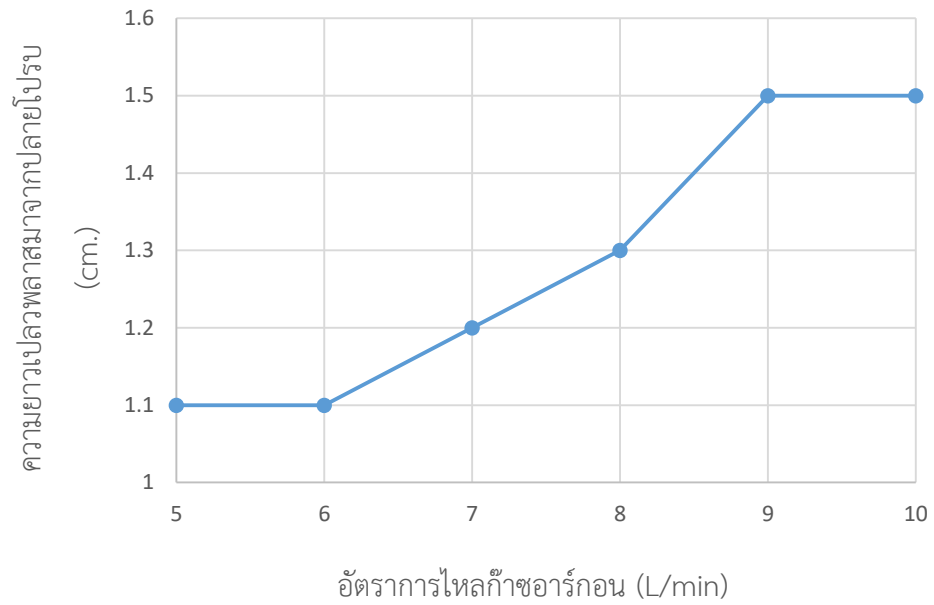
#### 4.2.4 ผลของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน

การทดลองนี้เพื่อศึกษาอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนมีผลกระทบต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเป็นแบบเจ็ตอย่างไร โดยทำการตั้งค่าไฟฟ้าแรงดันสูงมีค่าประมาณ 14.5 kVrms. ค่าความถี่เท่ากับ 30 kHz และค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลเท่ากับ 60 % เป็นค่าคงที่ แล้วทำการปรับค่าอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 5 6 7 8 9 และ 10 L/Min แล้วทำการวัดค่าไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่มีการต่อตัวต้านทานแบ่งแรงดัน 1:100 วัดความยาวของเปลวพลาสมาที่ออกมาจากปลายโพรบวัดและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบกระดาษที่บริเวณปลายเปลวของพลาสมา ได้ผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวพลาสมาจากปลายโพรบและอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเปลวพลาสมาและอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนกราฟที่ 4.8 และกราฟที่ 4.9

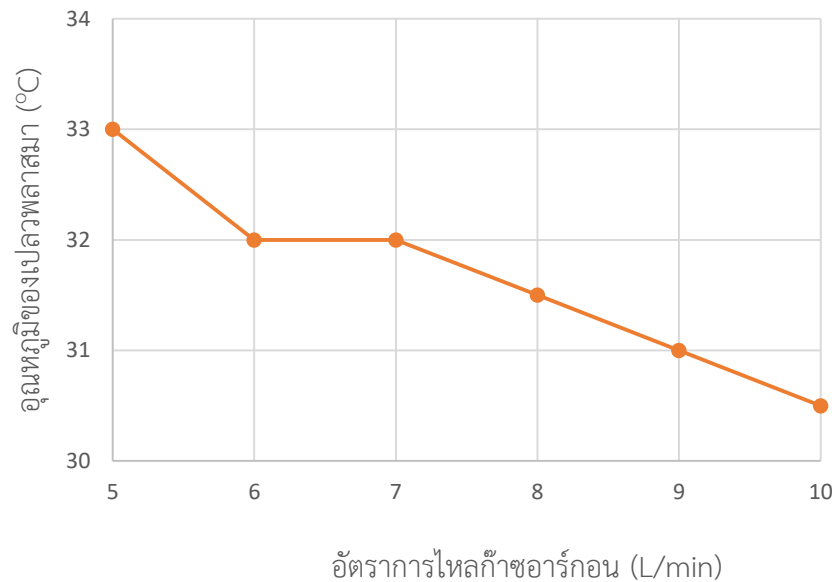
ตารางที่ 4. 7 ผลกระทบของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสติกแบบแข็ง

อัตราการไหล ก๊าซอาร์กอน (L/min)	ค่าไฟฟ้า แรงดันสูง (kVrms.)	ความยาวของเปลวพลาสติกจากปลาย โพรบ	อุณหภูมิของเปลว พลาสติก (°C)
5	14.58	 1.1 cm.	33
6	14.27	 1.1 cm.	32
7	14.19	 1.2 cm.	32
8	14.12	 1.3 cm.	31.5
9	14.20	 1.5 cm.	31
10	14.16	 1.5 cm.	30.5





กราฟที่ 4. 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวพลาสมาจากปลายโพรบและอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน



กราฟที่ 4. 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเปลวพลาสมาและอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน

จากการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ด พบว่า เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน ที่ค่าไฟฟ้าแรงดันสูงคงที่ค่าประมาณ 14.5 Vrms ทำให้ความยาวของเปลวพลาสมาเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของเปลวพลาสมามีค่าลดลงเนื่องมาจากเมื่อมีอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิแวดล้อมลดลง ทำให้อุณหภูมิของเปลวพลาสมามีค่าลดลง

### 4.3 การวัดสเปกตรัมของพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่พัฒนาขึ้น

หลังจากทำการทดลองได้ค่าไฟฟ้าแรงดันสูง ค่าความถี่ ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไฮเคิลและค่าอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ทำให้เปลวพลาสมาออกมาจากโพรบ 1 เซนติเมตรแล้วมีการทดสอบการวัดสเปกตรัมของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่พัฒนาขึ้น ด้วยเครื่อง Optical emission spectroscopy (OES) รุ่น USB4000-VIS-NIR และหัววัดแสงทำจากไฟเบอร์ออปติก มีลักษณะตามรูปที่ 4.2 เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้น โดยการวัดสเปกตรัมของพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่พัฒนาขึ้นแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้

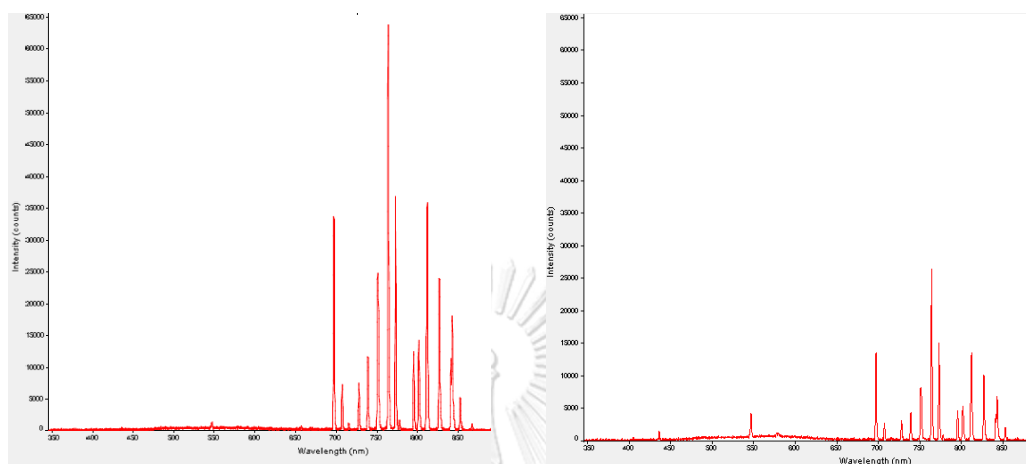


รูปที่ 4. 2 เครื่อง Optical emission spectroscopy (OES) รุ่น USB4000-VIS-NIR และหัววัดแสงทำจากไฟเบอร์ออปติก

#### 4.3.1 การศึกษาความเข้มของสเปกตรัมของพลาสมาที่ระยะห่างระหว่างโพรบพลาสมาและหัววัดต่างกัน

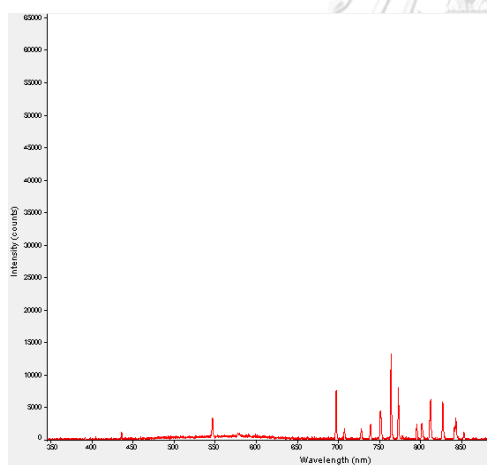
การทดลองนี้เพื่อหาระยะห่างระหว่างโพรบพลาสมาและหัววัดมีผลต่อความเข้มของสเปกตรัมของพลาสมาเจ็ด ทำโดยตั้งค่าค่าไฟฟ้าแรงดันสูงเท่ากับ 15.0 kVrms ค่าความถี่ 30 kHz ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไฮเคิลเท่ากับ 60 % และค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 5 L/min วางหัววัดของเครื่อง OES ให้ห่างจากโพรบพลาสมาเป็นระยะ 5 10 และ 15 cm. สังเกตและบันทึก

ผลกราฟสเปกตรัมผ่านโปรแกรม OceanView 1.6.7 ได้กราฟของสเปกตรัมของพลาสมาที่ระยะต่างๆตามรูปที่ 4.3



ก. ระยะห่างระหว่างหัววัดและโพรบ  
พลาสมา 5 cm.

ข. ระยะห่างระหว่างหัววัดและโพรบ  
พลาสมา 10 cm.



ค. ระยะห่างระหว่างหัววัดและโพรบ  
พลาสมา 15 cm.

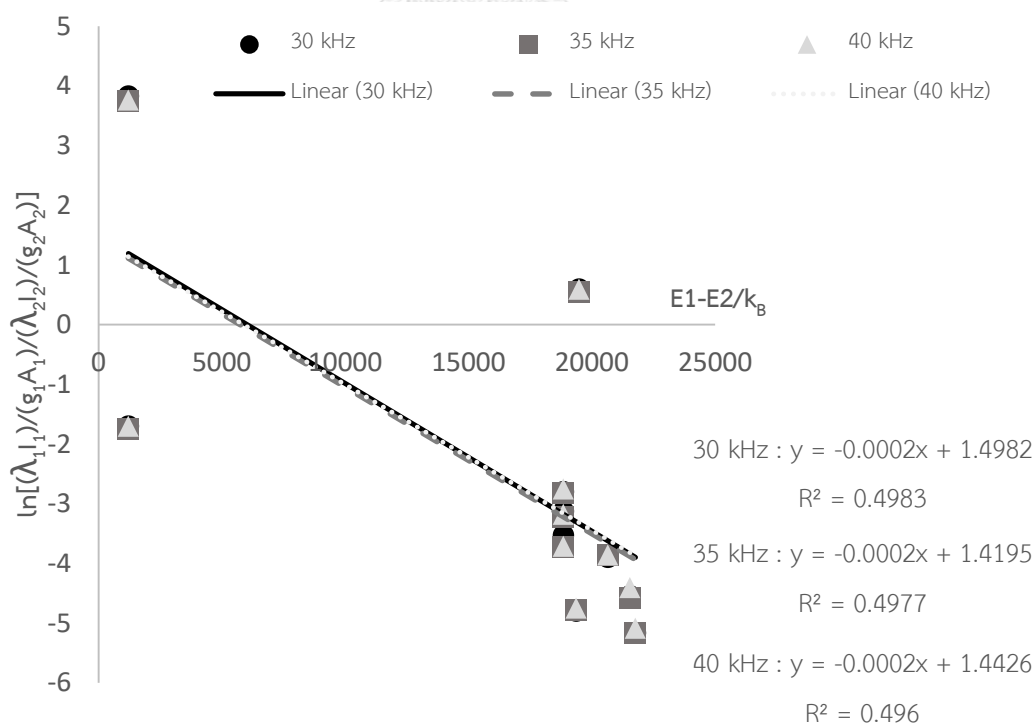
รูปที่ 4. 3 สเปกตรัมของพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่ระยะห่างระหว่างหัววัดและโพรบพลาสมา  
ก. 5 cm. ข. 10 cm. และ ค. 15 cm.

จากผลการทดลองเพื่อศึกษา ระยะห่างระหว่างโพรบพลาสมาและหัววัดมีผลต่อความเข้มของสเปกตรัมของพลาสมาเจ็ด พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างโพรบพลาสมาและหัววัดมีค่าเท่ากับ 5 cm. จะให้ความเข้มของเส้นสเปกตรัมมีค่าสูง แต่โปรแกรมที่ใช้ในการวัดสเปกตรัมไม่อยู่ในสถานะอิ่มตัว ระยะห่างระหว่างโพรบพลาสมาและหัววัดมีค่าเท่ากับ 15 cm. จะให้ความ

เข้มของเส้นสเปกตรัมมีค่าต่ำโปรแกรมที่ใช้ในการวัดสเปกตรัมอยู่ในสถานะอิ่มตัวแต่ความเข้มของบางพีคที่วัดได้มีค่าน้อยมาก ดังนั้นระยะห่างระหว่างโพรบพลาสมาและหัววัดมีค่าเท่ากับ 10 cm. เป็นค่าที่เหมาะสมในการวัดสเปกตรัมของพลาสมาเย็นแบบเจ็ด

#### 4.3.2 การศึกษาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ความถี่ต่างๆ

การทดลองนี้เพื่อศึกษาความถี่ที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดพลาสมามีผลต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอย่างไร ทำโดยตั้งค่าค่าไฟฟ้าแรงดันสูงเท่ากับ 15.0 kVrms ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิลเท่ากับ 60 % และค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 5 L/min วางหัววัดของเครื่อง OES ให้ห่างจากโพรบพลาสมาเป็นระยะ 10 cm. แล้วทำการปรับตั้งค่าความถี่ที่ 30 35 และ 40 kHz สังเกตและบันทึกผลกราฟสเปกตรัมผ่านโปรแกรม OceanView แล้วนำข้อมูลสเปกตรัมที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของ NIST เพื่อนำไปคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนด้วยวิธีพล็อตกราฟ Boltzmann โดย ได้กราฟที่ 4.10 ซึ่งอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ความถี่ต่างๆมีค่าตามตารางที่ 4.8 และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ความยาวคลื่นต่างๆ มีค่าตามตารางที่ 4.9



กราฟที่ 4. 10 กราฟ Boltzmann ของสเปกตรัมพลาสมาที่ความถี่ต่างๆ

ตารางที่ 4. 8 ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่ (kHz)	อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (Te)	
	เคลวิน (K)	eV
30	5000	0.4310345
35	5000	0.4310345
40	5000	0.4310345

ตารางที่ 4. 9 ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ความถี่ต่างๆ

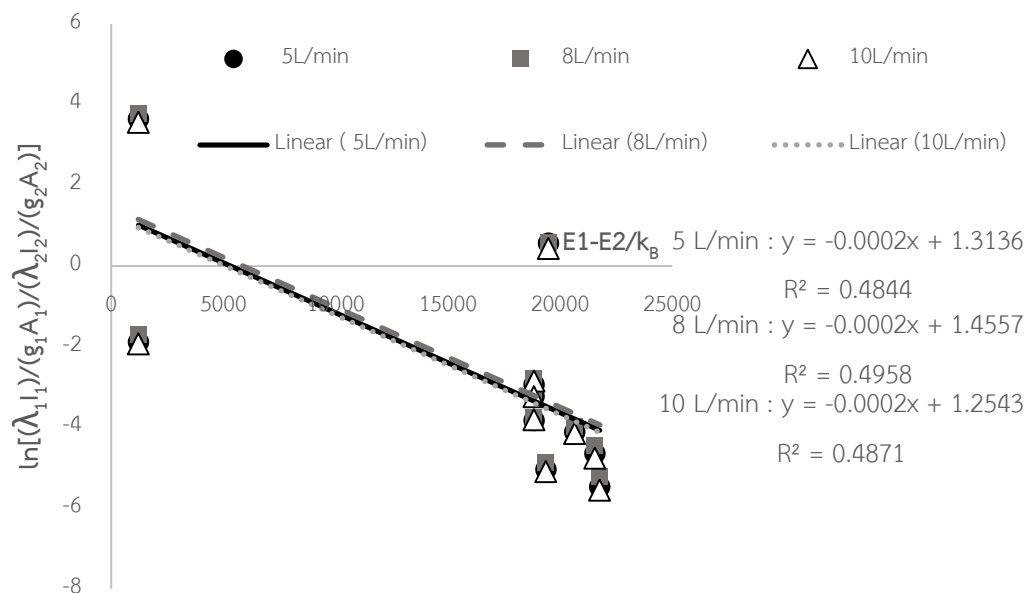
Ion	$\lambda$ (nm.)	$n_e$ (cm <sup>-3</sup> )		
		30 kHz	35 kHz	40 kHz
ArI	696.025	2.63E+10	2.59E+10	2.35E+10
ArI	739.298	6.97E+10	6.69E+10	6.51E+10
ArI	727.2936	6.14E+09	5.73E+09	5.46E+09
ArI	751.15	2.36E+12	2.2E+12	2.09E+12
ArI	763.5106	3.34E+10	3.41E+10	3.09E+10
ArI	772.4207	5.01E+10	4.45E+10	4.25E+10
ArI	794.8176	1.05E+10	1.05E+10	9.83E+09
ArI	801.6738	1.55E+12	1.39E+12	1.29E+12
ArI	811.5311	1.17E+10	1.15E+10	1.13E+10
ArI	826.4522	3.36E+10	2.68E+10	2.49E+10
ArI	842.4648	2.1E+10	1.97E+10	2.14E+10

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อตั้งค่าค่าไฟฟ้าแรงดันสูงเท่ากับ 15.0 kVrms ค่าเปอร์เซ็นต์ดิวิตซ์ไคเคลเท่ากับ 60 % และค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 5 L/min เป็นค่าคงที่และปรับค่าความถี่เท่ากับ 30 35 และ 40 kHz มีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนเท่ากันคือ 0.43 eV. และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าอยู่ระหว่าง  $6.14 \times 10^9 - 1.55 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  ที่ความถี่ 30 kHz  $5.73 \times 10^9 - 1.39 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  ที่ความถี่ 35 kHz และ  $5.46 \times 10^9 - 1.29 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  ที่ความถี่ 40 kHz เนื่องมาจากที่ค่าเปอร์เซ็นต์ดิวิตซ์ไคเคลเท่ากับ 60 % ค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ใช้กระตุ้นให้เกิดพลาสมาลดลง ทำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชันลดลง จึงส่งผลให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนลดลง และจากคุณสมบัติของพลาสมาทำให้สามารถ

ระบุได้ว่า พลาสมาที่เกิดขึ้นเป็นพลาสมาเย็นเนื่องจากมีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนน้อยกว่า 10 eV.

#### 4.3.3 การศึกษาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่างๆ

การทดลองนี้เพื่อศึกษาอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนมีผลต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอย่างไร ทำโดยตั้งค่าค่าไฟฟ้าแรงดันสูงเท่ากับ 15.0 kVrms ค่าความถี่ 30 kHz ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิลเท่ากับ 60 % วางหัววัดของเครื่อง OES ให้ห่างจากโพรบพลาสมาเป็นระยะ 10 cm. แล้วปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 5 8 และ 10 L/min สังเกตและบันทึกผลกราฟสเปกตรัมผ่านโปรแกรม OceanView แล้วนำข้อมูลสเปกตรัมที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของ NIST เพื่อนำไปคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนด้วยวิธีวาดกราฟ Boltzmann โดย ได้กราฟที่ 4.11 ซึ่งอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนมีค่าตามตารางที่ 4.10 และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่างๆ มีค่าตามตารางที่ 4.11



กราฟที่ 4. 11 กราฟ Boltzmann ของสเปกตรัมพลาสมาที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่างๆ

ตารางที่ 4. 10 ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่างๆ

อัตราการไหล (L/min)	อุณหภูมิของอิเล็กตรอน Te	
	เคลวิน (K)	eV
5	5000	0.4310345
8	5000	0.4310345
10	5000	0.4310345

ตารางที่ 4. 11 ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่างๆ

Ion	(nm.)	$n_e$ (cm <sup>-3</sup> )		
		5 L/min	8 L/min	10 L/min
ArI	696.025	2.871E+10	3.103E+10	3.102E+10
ArI	739.298	6.592E+10	8.367E+10	7.809E+10
ArI	727.2936	5.585E+09	7.168E+09	5.734E+09
ArI	751.15	2.498E+12	2.748E+12	2.356E+12
ArI	763.5106	2.933E+10	3.616E+10	3.041E+10
ArI	772.4207	4.972E+10	5.697E+10	5.287E+10
ArI	794.8176	8.935E+09	1.147E+10	9.174E+09
ArI	801.6738	1.407E+12	1.741E+12	1.393E+12
ArI	811.5311	9.47E+09	1.302E+10	9.375E+09
ArI	826.4522	2.712E+10	3.17E+10	2.983E+10
ArI	842.4648	2.062E+10	2.712E+10	1.973E+10

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อตั้งค่าค่าไฟฟ้าแรงดันสูงเท่ากับ 15.0 kVrms ค่าความถี่ 30 kHz ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีตีไซเคิลเท่ากับ 60 % แล้วปรับอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 5 8 และ 10 L/min มีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนเท่ากันคือเท่ากับ 0.43 eV. โดยที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 5 L/min ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง  $5.59 \times 10^9 - 1.41 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 8 L/min ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง  $7.17 \times 10^9 - 1.74 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 10 L/min ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง  $5.73 \times 10^9 - 1.39 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  จะเห็นได้ว่า ความหนาแน่นของ

อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ 5 และ 8 L/min แต่ลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 10 L/min อาจเนื่องมาจากปริมาณของก๊าซอาร์กอนที่ใส่เข้าไปเยอะ แต่พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชันมีน้อย




#### 4.4 การทดสอบการแข็งตัวของเลือดด้วยเครื่องพลาสติกที่พัฒนาขึ้น

เพื่อทดสอบว่าเครื่องพลาสติกแบบเจ็ดที่พัฒนาขึ้นสามารถทำให้เลือดแข็งตัวได้หรือไม่ โดยในการทดลองนี้มีการเก็บเลือดจากหนูทดลองพันธุ์ Sprague Dawley rat ปริมาณ 500  $\mu\text{L}$ . แล้วเก็บในหลอดเก็บเลือดที่ผสมสาร Ethylenediaminetetra- acetic acid (EDTA) ซึ่งเป็นสารต้านการแข็งตัวของเลือด (anti-coagulant) โดย สาร EDTA เปน chelating effect ของ calcium ในเลือด โดยจับกับ calcium ทำให้เลือดไม่สามารถแข็งตัวได้ [35] หลังจากนั้นรักษาอุณหภูมิหลอดเก็บเลือดไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 0 °C แล้วทำการทดลองให้เสร็จภายใน 24 ชม. ในงานวิจัยนี้มีการแบ่งการทดสอบการแข็งตัวของเลือดออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

##### 4.4.1 การทดสอบการแข็งตัวของเลือดที่ผสมสาร EDTA โดยไม่ผ่านการฉายด้วยพลาสติก

เพื่อศึกษาว่าเลือดที่ผสมสารต้านการแข็งตัวของเลือดโดยปกติใช้เวลานานเท่าไรในการทำให้เลือดแข็งตัว โดยการหยุดเลือดที่เก็บจากหนูทดลองปริมาณ 2.5  $\mu\text{L}$  จับเวลา 5 15 และ 20 นาที สังเกตและบันทึกผล ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 4.12 พบว่าเลือดเลือดที่ผสมสาร EDTA ที่ไม่ผ่านการฉายด้วยพลาสติกใช้เวลาในการทำให้เลือดแข็งตัวประมาณ 20 นาที

ตารางที่ 4. 12 ลักษณะของเลือดที่ผสมสาร EDTA โดยไม่ผ่านการฉายด้วยพลาสติกที่ระยะเวลาต่างๆ

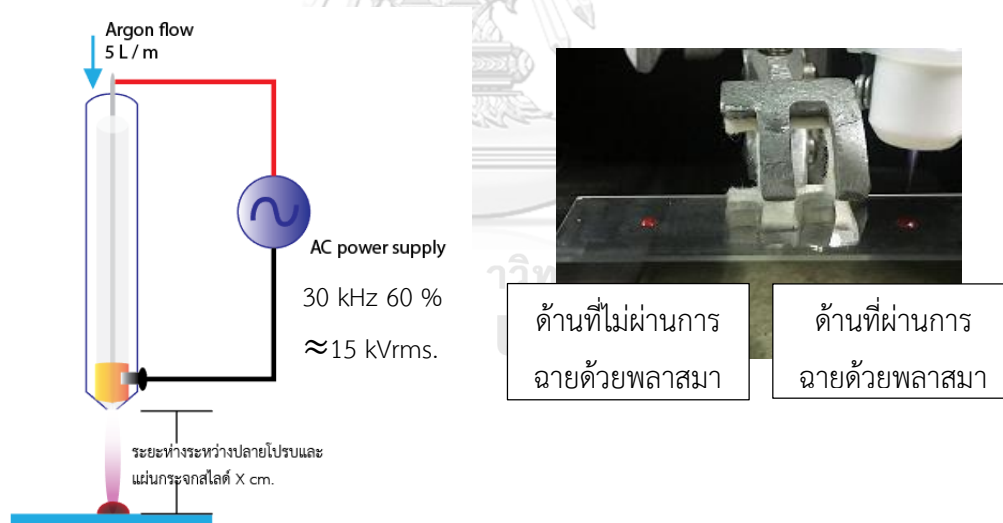
เลือดที่ผสมสาร EDTA ที่ไม่ผ่านการฉายด้วยพลาสติก	ระยะเวลา		
	5 นาที	15 นาที	20 นาที
			
	ไม่มีการแข็งตัวของเลือด	ไม่มีการแข็งตัวของเลือด	มีการแข็งตัวของเลือด



#### 4.4.2 การทดสอบการแข็งตัวของเลือดที่ผสมสาร EDTA ที่ผ่านการฉายด้วยพลาสมา

##### 4.4.2.1 ผลกระทบของระยะห่างของปลายโพรบและแผ่นกระจกสไลด์

เพื่อศึกษาว่าระยะห่างระหว่างปลายโพรบและบริเวณที่ทำการฉายด้วยพลาสมามีผลต่อระยะเวลาในการแข็งตัวของเลือดหรือไม่ โดยในการทดลองนี้มีการจัดอุปกรณ์ตามรูปที่ 4.4ก. หยดเลือดบนแผ่นกระจกสไลด์ปริมาณ 2.5  $\mu\text{L}$  (ซึ่งหยดเลือดปริมาณนี้สามารถครอบคลุมเส้นผ่านศูนย์กลางของเปลวพลาสมาทั้งหมดได้) จำนวน 2 หยด โดยหยดแรกไม่ผ่านการฉายด้วยพลาสมาเพื่อใช้เป็นตัวแปรควบคุม ส่วนหยดที่สองมีการฉายด้วยพลาสมาเย็นแบบเจ็ตที่มีการตั้งค่าไฟฟ้าแรงดันสูงประมาณ 15 kVrms ที่ความถี่ 30 kHz 60 % และกำหนดให้ระยะห่างระหว่างเปลวพลาสมาและแผ่นกระจกสไลด์เท่ากับ 0.5 1 และ 1.5 cm. ตามลำดับ จากนั้นจับเวลาจนกระทั่งหยดเลือดเกิดการแข็งตัวแล้วบันทึกผลการทดลอง นอกจากนี้มีการเปรียบเทียบกับกรเป่าด้วยก๊าซอาร์กอนที่มีอัตราการไหลของก๊าซ 5 L/min ที่ระยะห่างระหว่างเปลวพลาสมาและแผ่นกระจกสไลด์เท่ากับ 0.5 cm. จนกระทั่งหยดเลือดเกิดการแข็งตัว ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดเป็นไปตามตารางที่ 4.13











(a.) การจัดอุปกรณ์สำหรับทดสอบ

(b.) ภาพการทดลองจริง

การแข็งตัวของเลือดด้วยพลาสมาเจ็ตที่  
พัฒนาขึ้น

รูปที่ 4. 4 (a.) การจัดอุปกรณ์สำหรับทดสอบการแข็งตัวของเลือดด้วยพลาสมาเย็นแบบเจ็ต  
ที่พัฒนาขึ้นและ (b.) ภาพการทดลองจริง

ตารางที่ 4. 13 ผลกระทบของระยะห่างของปลายโพรบและแผ่นกระจกสไลด์เท่ากับ 0.5 1 และ 1.5 cm. ตามลำดับ ต่อการแข็งตัวของเลือดที่ผสมสาร EDTA ผ่านการฉายด้วยพลาสมา เย็นแบบเจ็ต และการเป่าด้วยก๊าซอาร์กอนที่มีอัตราการไหล 5 L/min ที่ระยะห่างของปลายโพรบและแผ่นกระจกสไลด์ 0.5 cm.







ระยะห่างของปลายโพรบและแผ่นกระจกสไลด์		ระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของเลือด (วินาที)
1.5 cm.		
		18
ไม่ผ่านพลาสมา	ผ่านพลาสมา	
1.0 cm.		
		13
ไม่ผ่านพลาสมา	ผ่านพลาสมา	
0.5 cm.		
		9
ไม่ผ่านพลาสมา	ผ่านพลาสมา	
0.5 cm. เป่าด้วยก๊าซอาร์กอนที่อัตราการไหล 5 L/min แต่ไม่มีการเกิดพลาสมา		
		33
หยุดเลือดควบคุม	หยุดเลือดที่ผ่านการเป่าด้วยก๊าซอาร์กอน	

จากผลการทดลองระยะห่างของปลายโพรบและแผ่นกระจกสไลด์มีผลต่อการแข็งตัวของเลือดที่ผสมสาร EDTA ผ่านการฉายด้วยพลาสมา พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างปลายโพรบและแผ่นกระจกสไลด์มีค่าน้อยจะทำให้ระยะเวลาในการแข็งตัวของเลือดมีค่าน้อย แต่ทำให้หยุดเลือดกระจายออกเนื่องจากแรงลมที่เกิดจากการไหลของก๊าซอาร์กอน ที่ระยะห่างระหว่างปลายโพรบและแผ่นกระจกสไลด์เพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาในการแข็งตัวของเลือดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ยังใช้เวลาน้อยกว่าการเป่าก๊าซอาร์กอนที่ไม่มีการเกิดพลาสมาเกิดขึ้น เนื่องจากพลาสมาประกอบไปด้วยอนุมูลอิสระ (Reactive Species) ซึ่งระยะห่างของปลายโพรบและแผ่นกระจกสไลด์ที่ลดลง บริเวณนั้นมีปริมาณของอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นและสามารถไปเร่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ fibrinogen ไปเป็น fibrin ทำให้เกิดการแข็งตัวของเลือดเร็วขึ้น

#### 4.4.2.2 ผลกระทบระยะเวลาในการฉายด้วยพลาสมา

เพื่อศึกษาว่าระยะเวลาในการฉายด้วยพลาสมาการแข็งตัวของเลือดที่ผสมสาร EDTA มีลักษณะอย่างไร โดยในการทดลองนี้มีการจัดอุปกรณ์ตามการทดลองที่ 4.4.1 แต่กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเปลวพลาสมาและแผ่นกระจกสไลด์เท่ากับ 1 cm. จากนั้นจับเวลาที่ระยะเวลาเท่ากับ 10 20 และ 30 วินาที แล้วบันทึกผลการทดลอง ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดเป็นไปตามตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4. 14 การแข็งตัวของเลือดที่ผ่านการฉายด้วยพลาสมาที่ระยะเวลาต่างๆ

ระยะเวลาในการฉายด้วยพลาสมา (วินาที)	ผลการทดลอง	
10	 ไม่ผ่านพลาสมา	 ผ่านพลาสมา
20	 ไม่ผ่านพลาสมา	 ผ่านพลาสมา
30	 ไม่ผ่านพลาสมา	 ผ่านพลาสมา

จากผลการทดลอง พบว่า เลือดที่ผ่านการฉายด้วยพลาสมาเป็นเวลา 10 วินาที เลือดบริเวณใกล้ๆกับเปลวพลาสมาจะมีการแข็งอย่างรวดเร็ว เลือดที่ผ่านการฉายด้วยพลาสมาเป็นเวลา 20 วินาที เลือดบริเวณใกล้ๆกับเปลวพลาสมาจะมีการแข็งตัวเป็นลิ่มเลือดเกิดขึ้น เลือดที่ผ่านการฉายด้วยพลาสมาเป็นเวลา 30 วินาทีเลือดส่วนใหญ่มีการแข็งตัวเป็นลิ่มเลือด เนื่องมาจากพลาสมาประกอบไปด้วยหมู่ว่องไว (Reactive Species) ซึ่งระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ทำให้เวลาที่หมู่ว่องไวที่เกิดจากพลาสมาไปเร่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ fibrinogen ไปเป็น fibrin เพิ่มมากขึ้น ทำให้เลือดเกิดการแข็งตัวเป็นส่วนใหญ่

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

##### 5.1.1 การทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดกระแสสลับ

ผลการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและความถี่สูงที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพการทำงานเต็มกำลังของเครื่องมีค่าเท่ากับ 74.28 % และสามารถรักษาการจ่ายแรงดันขาออกได้สม่ำเสมอเมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของโหลด

##### 5.1.2 การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆของระบบที่ได้พัฒนาต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ด

ผลกระทบของค่าไฟฟ้าแรงดันสูงต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ดพบว่า เมื่อมีการเพิ่มค่าไฟฟ้าแรงดันสูงจะทำให้ความยาวของเปลวพลาสมาเพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากการเพิ่มค่าไฟฟ้าแรงดันสูงทำให้พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดพลาสมาเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชันเพิ่มขึ้นและมีการคายพลังงานออกมาในรูปของความร้อน ทำให้อุณหภูมิของเปลวพลาสมาเพิ่มสูงขึ้น

ผลกระทบของค่าความถี่และค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิล พบว่า ค่าความถี่และค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลที่เปลี่ยนไปส่งผลกระทบต่อการตอบสนองต่อความถี่และเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไอเคิลของหม้อแปลงความถี่สูงแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ทำให้เกิดไฟฟ้าแรงดันสูงชั่วขณะ (Transient) ซึ่งทำให้รูปแบบของสัญญาณทางไฟฟ้าเปลี่ยนไป ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดพลาสมา ทำให้ความยาวของเปลวพลาสมาและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเปลี่ยนไป

ผลกระทบของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต่อความยาวและอุณหภูมิของเปลวพลาสมาเย็นแบบเจ็ด พบว่า เมื่ออัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความยาวของเปลวพลาสมาเพิ่มขึ้น แต่ถ้าอัตราการไหลของก๊าซเร็วเกินไปแต่เส้นผ่านศูนย์กลางของโบริบพลาสมาแคบอาจทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ส่งผลให้ความยาวของเปลวพลาสมาลดลงได้ และเมื่อมีอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิแวดล้อมลดลง ทำให้อุณหภูมิของเปลวพลาสมามีค่าลดลงตาม

### 5.1.3 การวิเคราะห์สเปกตรัมของพลาสมาเย็นแบบเจ็ด

พบว่า อุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ความถี่ต่างๆและที่อัตราการไหลต่างๆที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.43 eV ซึ่งสามารถระบุได้ว่าพลาสมาที่เกิดขึ้นเป็นพลาสมาแบบเย็น และ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ความถี่ต่างๆมีค่าลดลง เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชันลดลง และเมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนลดลง เนื่องมาจากปริมาณก๊าซอาร์กอนมีมากแต่พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดพลาสมา น้อย ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนลดลง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงความถี่และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนอยู่ในช่วง  $5.46 \times 10^9 - 1.74 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

### 5.1.4 การผลทดสอบการแข็งตัวของเลือดด้วยเครื่องพลาสมาที่พัฒนาขึ้น

จากผลการทดลองพบว่าพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่พัฒนาขึ้นสามารถทำให้เลือดที่ผสมสารด้านการแข็งตัวของเลือด EDTA ให้แข็งตัวภายในเวลาประมาณ 20 วินาที ซึ่งเร็วกว่าเลือดที่ผสมสารด้านการแข็งตัวของEDTA และเลือดที่ผ่านการเป่าด้วยก๊าซอาร์กอนที่อัตราการไหล 5 L/min นอกจากนี้พบว่าระยะห่างระหว่างปลายโพรบกับบริเวณที่ทำการฉายด้วยพลาสมาเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการแข็งตัวของเลือด และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการฉายด้วยพลาสมาจะทำให้เลือดส่วนใหญ่เกิดการแข็งตัว

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรออกแบบโพรบกำเนิดพลาสมาให้มีความปลอดภัยเพิ่มขึ้น

5.2.2 ในการทดสอบด้วยสเปกตรัมด้วยเครื่อง OES ควรเลือกรุ่นที่สามารถวัดในช่วง UV ได้ด้วย เนื่องจากสเปกตรัมของพลาสมาประกอบด้วยย่านรังสี UV และ IR

5.2.3 ก๊าซที่ใช้ควรมีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากอาจมีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าแรงดันสูง และขั้วกราวด์

5.2.4 เนื่องจากในการทดลองนี้มีการใช้หลอดทดลองทำจากแก้วโบโรซิลิเกตที่มีความบาง เมื่อเกิดการอาร์คทำให้แก้วมีรอยร้าวได้ง่าย จึงควรใช้หลอดแก้วที่มีความหนาเพิ่มขึ้น

5.2.5 การใช้งานเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ดที่พัฒนาขึ้นควรปรับตั้งค่าความถี่และค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิล และค่าไฟฟ้าแรงดันสูงทุกครั้งเวลาเปิดเครื่องใหม่เพื่อให้ได้ค่าไฟฟ้าแรงดันสูงประมาณ 15 kVrms เพื่อใช้ในการกระตุ้นให้เกิดเปลวพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอ

### รายการอ้างอิง

1. นายปราโมช ดอกไม้, การหาแบบจำลองและออกแบบการควบคุมวงจรรินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์สำหรับเครื่องตัดจีไฟฟ้าเพื่อการผ่าตัด, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2549.ศ.พ., จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. Isbary, G., et al., Cold atmospheric argon plasma treatment may accelerate wound healing in chronic wounds: Results of an open retrospective randomized controlled study in vivo. *Clinical Plasma Medicine*, (2)1 .2013p. 30-25
3. Fridman, G., et al., Blood Coagulation and Living Tissue Sterilization by Floating-Electrode Dielectric Barrier Discharge in Air. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, (4)26 .2006p. 442-425
4. Wende, K., et al., Risk assessment of a cold argon plasma jet in respect to its mutagenicity. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen*, :799-798 .2016p. 54- 48
5. Kalghatgi, S., et al. Mechanism of Blood Coagulation by Non-Thermal Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge. in *Plasma Science*, .2007 ICOPS .2007IEEE 34th International Conference on. .2007
6. Miyamoto, K., et al., Red blood cell coagulation induced by low-temperature plasma treatment. *Arch Biochem Biophys*, .2016
7. Gui-Min, X., M. Yue, and Z. Guan-Jun, DBD Plasma Jet in Atmospheric Pressure Argon. *IEEE Transactions on Plasma Science*, (4)36 .2008p. 1353-1352
8. Xu, L., et al., Experimental study and sterilizing application of atmospheric pressure plasmas. *Thin Solid Films*, :507-506 .2006p. 403-400
9. นางสาวลีดา มิตรายน, การพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาความหนาแน่นสูงที่ความดันบรรยากาศแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท .2555p. 146
10. Benabbas, M.T., et al., Effects of the electrical excitation signal parameters on the geometry of an argon-based non-thermal atmospheric pressure plasma jet. *Nanoscale Research Letters*, :9 .2014p. 697

11. Lotfy, K., Cold Plasma Jet Construction to Use in Medical, Biology and Polymer Applications. Vol. .1910-1901 .2017 .08
12. Google.Plasma. Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma\\_\(physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_(physics)).
13. Google, Definition of the Plasma State. Available from: [https://www.springer.com/cda/content/document/cda\\_downloaddocument/9783642104909-c1.pdf?SGWID=0-0-45-963408-p173949627](https://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9783642104909-c1.pdf?SGWID=0-0-45-963408-p173949627)
14. Nasruddin, et al., Evaluation the effectiveness of combinative treatment of cold plasma jet, Indonesian honey, and micro-well dressing to accelerate wound healing. *Clinical Plasma Medicine*, :6-5 .2017p. .25-14
15. Ghassemi, M., et al. Dielectric Barrier Discharge (DBD) dynamic modeling for high voltage insulation. in 2011 Electrical Insulation Conference (EIC). .2011
16. Gumbel, D.A.-O., et al., Cold Atmospheric Plasma in the Treatment of Osteosarcoma. LID - E] 2004pii] LID - /10.3390ijms] 18092004doi]. (-1422 ) 0067Electronic))
17. Ermolaeva, S.A., et al., - 10.18Cold Plasma Therapy A - 2Brahme, Anders, in *Comprehensive Biomedical Physics*. 2014, Elsevier: Oxford. p. .367-343
18. Guerrero-Preston, R., et al., Cold atmospheric plasma treatment selectively targets head and neck squamous cell carcinoma cells. *Int J Mol Med*, .2014 : (4)34p. .6-941
19. von Woedtke, T., et al., Plasmas for medicine. *Physics Reports*, : (4)530 .2013 p. .320-291
20. Setsuhara, Y., Low-temperature atmospheric-pressure plasma sources for plasma medicine. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, :605 .2016p. -3 .10
21. Google, บทที่ 5 กระบวนการเบรกดาวน์ 2560.; Available from: <http://eestaff.kku.ac.th/~amnart/HVLectureNote/HV-5.doc>
22. M S Naidu, V.K., HIGH VOLTAGE ENGINEERING Second Edition. :1995McGraw-Hill.
23. Google, บทที่ 4 กระบวนการไอออไนเซชัน 2560.; Available from: <http://eestaff.kku.ac.th/~amnart/HVLectureNote/HV-4.doc>



24. Schutze, A., et al., The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources. *IEEE Transactions on Plasma Science*, : (6)26 .1998p. .1694-1685
25. Ashok, K., H. K Dwivedi, and N. Vijay, Atmospheric Non-Thermal Plasma Sources. Vol. .2008 .2
26. google, ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าและมลภาวะอากาศ.2560 . ; Available from:  
[http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/1/191743dc066e58f321627311b4480e7fd0341?Resolve\\_DOI=/10.14457KMITL.the.2006.334](http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/1/191743dc066e58f321627311b4480e7fd0341?Resolve_DOI=/10.14457KMITL.the.2006.334)
27. Brown, M., Power Supply Cookbook. .2001
28. Lu, X., M. Laroussi, and V. Puech, On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets. *Plasma Sources Science and Technology*, : (3)21 .2012p. .034005
29. Shrestha, R., et al., Generation, characterization and application of atmospheric pressure plasma jet. Vol. .1696-1689 .2016 .45
30. Safi, M.I., Characterization of Argon Plasma by Use of Optical Emission Spectroscopy and Langmuir Probe Measurements. Available from:  
<https://wwwamdis.iaea.org/ICTP/2009ParticipantPresentations/Safi.pdf>
31. Heinlin, J., et al., Plasma medicine: possible applications in dermatology. *J Dtsch Dermatol Ges*, : (12)8 .2010p. .76-968
32. ผศ. ดร. นพ. ชัชวาลย์ ศรีสวัสดิ์, การห้ามเลือด(HEMOSTASIS). 2555; Available from:  
[http://www.si.mahidol.ac.th/department/biochemistry/home/md/lecture/Hemostasis\\_lecture\\_note.pdf](http://www.si.mahidol.ac.th/department/biochemistry/home/md/lecture/Hemostasis_lecture_note.pdf).
33. Nomura, Y., et al., Investigation of blood coagulation effect of nonthermal multigas plasma jet in vitro and in vivo. *Journal of Surgical Research*, .2017 :219p. .309-302
34. Bekeschus, S., et al., Platelets are key in cold physical plasma-facilitated blood coagulation in mice. *Clinical Plasma Medicine*, :8-7 .2017p. .65-58
35. ผศ.บุญศรี มหาภิตติคุณ, การเจาะเก็บเลือดและการใช้สารกันเลือดแข็ง .Available from:  
<http://www.microscopy.ahs.chula.ac.th/newmicros/lecture/bloodcollecting.pdf>.

36. Google, NIST Atomic Spectra Database Lines Form. Available from:  
[http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



ภาคผนวก ก.

ตัวอย่างการคำนวณอนุมัติของอิเล็กทรอนิกส์และความหนาแน่นของอิเล็กทรอนิกส์

วิธีการคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของอิเล็กตรอน [9]

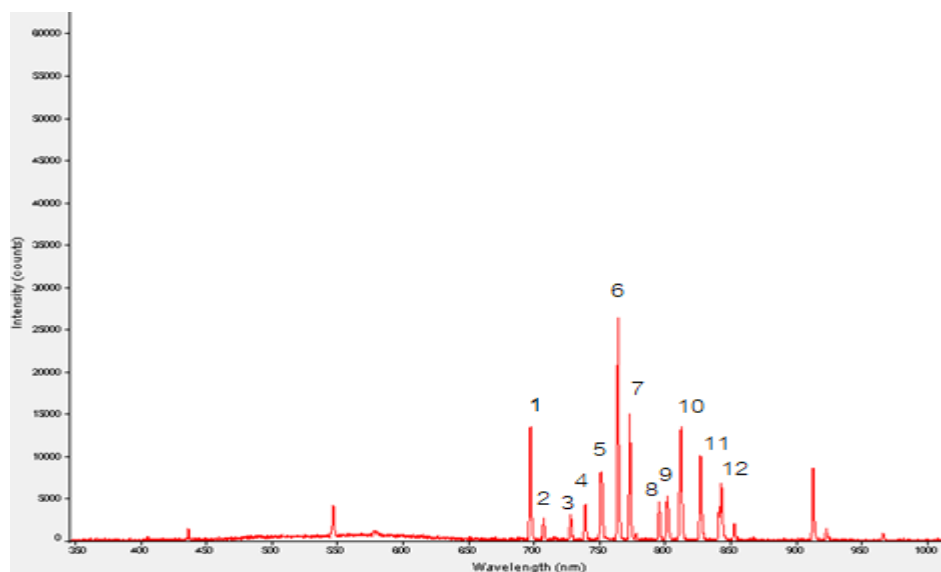
1. เลือกสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง OES โดยตัดเส้นสเปกตรัมที่เป็นของออกซิเจนและไนโตรเจนออก
2. นำค่าความยาวคลื่นของสเปกตรัมที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าสเปกตรัมของก๊าซอาร์กอนจากฐานข้อมูลของ NIST [36] เพื่อหาค่าตัวแปร  $E_k$  คำนวณค่า  $g_k$
3. คำนวณหาค่า  $\ln[(\lambda_{1I_1})/(g_1A_1)/(\lambda_{2I_2})/(g_2A_2)]$  และ  $E_1-E_2/k_B$

ซึ่ง 1 และ 2 หมายถึง เส้นสเปกตรัมของอะตอมที่ถูกไอออไนซ์ ArI เส้นที่ 1 และเส้นที่ 2

และ  $k_B$  คือค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ  $8.62 \times 10^{-5}$  eV/K

4. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln[(\lambda_{1I_1})/(g_1A_1)/(\lambda_{2I_2})/(g_2A_2)]$  และ  $E_1-E_2/k_B$
5. หาความชันของกราฟ Boltzmann ที่ได้
6. นำค่าความชันมาคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอน  
Slope =  $-1/T_e$  หน่วย เคลวิน (K)
7. แปลงหน่วยค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ได้แปลงหน่วยเป็น eV โดย  $1 \text{ eV} = 11600 \text{ K}$  แล้วนำค่าที่ได้ไปแทนที่ สมการที่ 2.14 ซึ่งความหนาแน่นของอิเล็กตรอน 1 และ 2 จะเป็นค่าที่เปรียบเทียบระหว่าง ArI กับ ArII

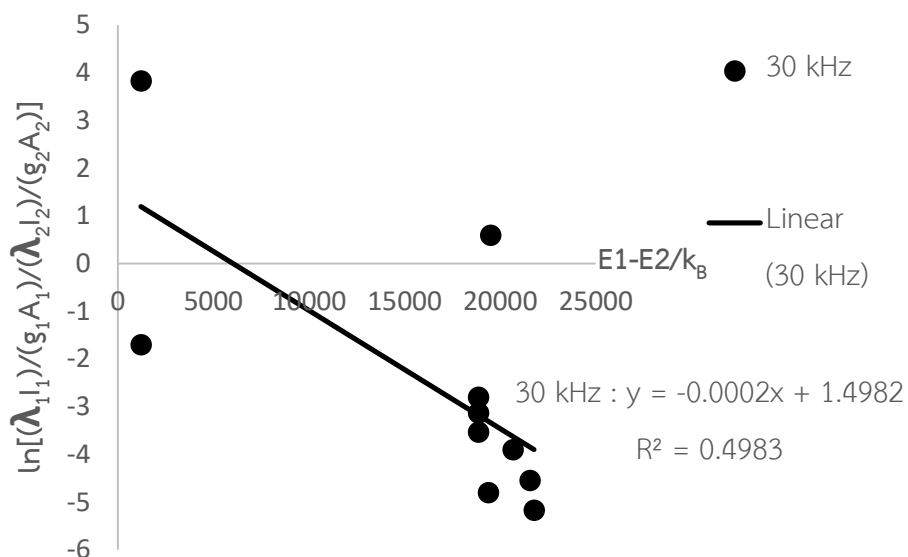
$$n_e = 2 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \left( \frac{A_2}{A_1} \right) \left( \frac{g_2}{g_1} \right) \left[ \frac{2\pi m_e K T_e}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \exp \left[ -\frac{E_1 - E_2 + E_1}{K T_e} \right] \text{ หน่วย } \text{cm}^{-3}$$



รูปที่ ก-1 กราฟเส้นสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง Optical Emission Spectroscopy (OES) ที่ความถี่ 30 kHz ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิล 60% อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 5 L/min และระยะห่างระหว่างหัววัดแสงกับปลายโพรบพลาสมาเท่ากับ 10 cm.

ตารางที่ ก-1 ตารางข้อมูลตัวแปรที่ความยาวคลื่นต่างๆที่ได้จากฐานข้อมูล NIST [36]

No.	Ion	$\lambda$ (nm.)	$E_k$ (cm <sup>-1</sup> )	$A_{jk}$ (s <sup>-1</sup> )	$j_k$	$g_k$
1	Arl	696.025	120600.89	2.40E+05	2	5
2	ArlI	707.7024	157234.02	1.00E+05	3.5	8
3	Arl	739.298	107496.42	1.83E+06	1	3
4	Arl	727.2936	119760.17	7.20E+05	1	3
5	Arl	751.15	107054.27	4.50E+05	0	1
6	Arl	763.5106	106237.55	2.45E+07	2	5
7	Arl	772.4207	107496.42	1.17E+07	1	3
8	Arl	794.8176	107131.71	1.86E+07	1	3
9	Arl	801.6738	119760.17	4.20E+03	1	3
10	Arl	811.5311	105462.76	3.31E+07	3	7
11	Arl	826.4522	107496.42	1.53E+07	1	3
12	Arl	842.4648	105617.27	1.22E+07	2	5



กราฟที่ ก-1 กราฟBlotzmann ของสเปกตรัมพลาสมาที่ความถี่ 30 kHz ค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีไซเคิล  
 60% อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 5 L/min

$$\text{ความชันของกราฟ} = -0.0002 = -\frac{1}{Te}$$

$$Te = \frac{1}{0.0002} = 5000 \text{ K}$$

จาก  $1 \text{ eV} = 11600 \text{ K}$  ดังนั้น  $Te = 0.43 \text{ eV}$ .

ภาคผนวก ข.  
ส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY





## 600V CoolMOS™ C6 Power Transistor

IPA60R190C6, IPB60R190C6  
 IPI60R190C6, IPP60R190C6  
 IPW60R190C6

### 1 Description

CoolMOS™ is a revolutionary technology for high voltage power MOSFETs, designed according to the superjunction (SJ) principle and pioneered by Infineon Technologies. CoolMOS™ C6 series combines the experience of the leading SJ MOSFET supplier with high class innovation. The offered devices provide all benefits of a fast switching SJ MOSFET while not sacrificing ease of use. Extremely low switching and conduction losses make switching applications even more efficient, more compact, lighter, and cooler.

#### Features

- Extremely low losses due to very low FOM  $R_{DS(on)} \cdot Q_g$  and  $E_{sw}$
- Very high commutation ruggedness
- Easy to use/drive
- JEDEC<sup>1)</sup> qualified, Pb-free plating, Halogen free

#### Applications

PFC stages, hard switching PWM stages and resonant switching PWM stages for e.g. PC Silverbox, Adapter, LCD & PDP TV, Lighting, Server, Telecom and UPS.

*Please note: For MOSFET paralleling the use of ferrite beads on the gate or separate totem poles is generally recommended.*

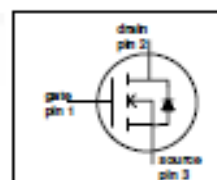
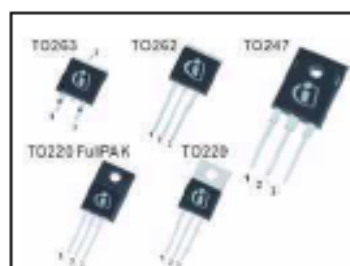


Table 1 Key Performance Parameters

Parameter	Value	Unit
$V_{DS} @ I_{DM}$	650	V
$R_{DS(on),max}$	0.19	$\Omega$
$Q_{g,typ}$	63	nC
$I_{Q,pulse}$	59	A
$E_{sw} @ 400V$	5.2	$\mu J$
Body diode $dI/dt$	500	A/ $\mu s$

Type / Ordering Code	Package	Marking	Related Links
IPW60R190C6	PG-TO247	6R190C6	<a href="#">JEX C6 Product Brief</a> <a href="#">JEX C6 Portfolio</a> <a href="#">JEX CoolMOS Webpage</a> <a href="#">JEX Design tools</a>
IPB60R190C6	PG-TO263		
IPI60R190C6	PG-TO262		
IPP60R190C6	PG-TO220		
IPA60R190C6	PG-TO220 FullPAK		

1) J-STD020 and JEDEC22



## Maximum ratings

## 2 Maximum ratings

 at  $T_J = 25\text{ °C}$ , unless otherwise specified.

Table 2 Maximum ratings

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note / Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Continuous drain current <sup>1)</sup>	$I_D$	-	-	20.2	A	$T_C = 25\text{ °C}$
				12.8		$T_C = 100\text{ °C}$
Pulsed drain current <sup>2)</sup>	$I_{D,pulse}$	-	-	59	A	$T_C = 25\text{ °C}$
Avalanche energy, single pulse	$E_{AS}$	-	-	418	mJ	$I_D = 3.4\text{ A}$ , $V_{DS} = 50\text{ V}$ (see table 21)
Avalanche energy, repetitive	$E_{AR}$	-	-	0.63		$I_D = 3.4\text{ A}$ , $V_{DS} = 50\text{ V}$
Avalanche current, repetitive	$I_{AR}$	-	-	3.4	A	
MOSFET $dv/dt$ ruggedness	$dv/dt$	-	-	50	V/ns	$V_{GS} = 0\text{...}480\text{ V}$
Gate source voltage	$V_{GS}$	-20	-	20	V	static
		-30	-	30		AC ( $f < 1\text{ Hz}$ )
Power dissipation for TO-220, TO-247, TO-262, TO-263	$P_{tot}$	-	-	151	W	$T_C = 25\text{ °C}$
Power dissipation for TO-220 FullPAK	$P_{tot}$	-	-	34		
Operating and storage temperature	$T_J, T_{stg}$	-55	-	150	°C	
Mounting torque TO-220, TO-247		-	-	60	Ncm	M3 and M3.5 screws
				50		M2.5 screws
Mounting torque TO-220 FullPAK				50		
Continuous diode forward current	$I_S$	-	-	17.5	A	$T_C = 25\text{ °C}$
Diode pulse current <sup>2)</sup>	$I_{S,pulse}$	-	-	59	A	$T_C = 25\text{ °C}$
Reverse diode $dv/dt$ <sup>3)</sup>	$dv/dt$	-	-	15	V/ns	$V_{GS} = 0\text{...}400\text{ V}$ , $I_{SD} = I_S$
Maximum diode commutation speed <sup>3)</sup>	$di/dt$	-	-	500	A/ $\mu$ s	$T_J = 25\text{ °C}$ (see table 22)
Insulation withstand voltage TO-220 FullPAK	$V_{iso}$	-	-	2500	V	$V_{RMS}$ , $T_C = 25\text{ °C}$ , $t = 1\text{ min}$

 1) Limited by  $T_{Jmax}$ . Maximum duty cycle  $D < 0.75$ 

 2) Pulse width, limited by  $T_{Jmax}$ 

 3) Identical low side and high side switch with identical  $R_{th}$



### 3 Thermal characteristics

**Table 3 Thermal characteristics TO-220 (IP60R190C6), TO-247 (IPW60R190C6), TO-262 (IPi60R190C6)**

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note / Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Thermal resistance, junction - case	$R_{\theta JC}$	-	-	0.83	°C/W	
Thermal resistance, junction - ambient	$R_{\theta JA}$	-	-	62		loaded
Soldering temperature, wave-soldering only allowed at leads	$T_{solt}$	-	-	260	°C	1.6 mm (0.063 in.) from case for 10 s

**Table 4 Thermal characteristics TO-220 FullPAK (IPA60R190C6)**

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note / Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Thermal resistance, junction - case	$R_{\theta JC}$	-	-	3.7	°C/W	
Thermal resistance, junction - ambient	$R_{\theta JA}$	-	-	80		loaded
Soldering temperature, wave-soldering only allowed at leads	$T_{solt}$	-	-	260	°C	1.6 mm (0.063 in.) from case for 10 s

**Table 5 Thermal characteristics TO-263 (IPB60R190C6)**

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note / Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Thermal resistance, junction - case	$R_{\theta JC}$	-	-	0.83	°C/W	
Thermal resistance, junction - ambient	$R_{\theta JA}$	-	-	62		SMD version, device on PCB, minimal footprint
			35		SMD version, device on PCB, 6cm <sup>2</sup> cooling area <sup>1)</sup>	
Soldering temperature, wave- & reflow soldering allowed	$T_{solt}$	-	-	260	°C	reflow MSL1

1) Device on 40mm<sup>2</sup> 40mm\*1.5mm one layer epoxy PCB FR4 with 6cm<sup>2</sup> copper area (thickness 70µm) for drain connection. PCB is vertical without air stream cooling.



#### 4 Electrical characteristics

Electrical characteristics, at  $T_J=25\text{ }^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified.

Table 6 Static characteristics

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note / Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Drain-source breakdown voltage	$V_{(DSS)}$	600	-	-	V	$V_{GS}=0\text{ V}$ , $I_D=0.25\text{ mA}$
Gate threshold voltage	$V_{(GSth)}$	2.5	3	3.5		$V_{DS}=V_{GS}$ , $I_D=0.63\text{ mA}$
Zero gate voltage drain current	$I_{DSS}$	-	-	1	$\mu\text{A}$	$V_{DS}=600\text{ V}$ , $V_{GS}=0\text{ V}$ , $T_J=25\text{ }^\circ\text{C}$
		-	10	-		$V_{DS}=600\text{ V}$ , $V_{GS}=0\text{ V}$ , $T_J=150\text{ }^\circ\text{C}$
Gate-source leakage current	$I_{GSS}$	-	-	100	nA	$V_{DS}=20\text{ V}$ , $V_{GS}=0\text{ V}$
Drain-source on-state resistance	$R_{DS(on)}$	-	0.17	0.19	$\Omega$	$V_{GS}=10\text{ V}$ , $I_D=9.5\text{ A}$ , $T_J=25\text{ }^\circ\text{C}$
		-	0.44	-		$V_{GS}=10\text{ V}$ , $I_D=9.5\text{ A}$ , $T_J=150\text{ }^\circ\text{C}$
Gate resistance	$R_G$	-	8.5	-	$\Omega$	$f=1\text{ MHz}$ , open drain

Table 7 Dynamic characteristics

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note / Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Input capacitance	$C_{iss}$	-	1400	-	pF	$V_{DS}=0\text{ V}$ , $V_{GS}=100\text{ V}$ , $f=1\text{ MHz}$
Output capacitance	$C_{oss}$	-	85	-		
Effective output capacitance, energy related <sup>1)</sup>	$C_{ob(1)}$	-	56	-		
Effective output capacitance, time related <sup>2)</sup>	$C_{ob(2)}$	-	266	-		
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	-	15	-	ns	$V_{DS}=400\text{ V}$ , $V_{GS}=13\text{ V}$ , $I_D=9.5\text{ A}$ , $R_G=3.4\Omega$ (see table 20)
Rise time	$t_r$	-	11	-		
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$	-	110	-		
Fall time	$t_f$	-	9	-		

1)  $C_{ob(1)}$  is a fixed capacitance that gives the same stored energy as  $C_{oss}$  while  $V_{DS}$  is rising from 0 to 80%  $V_{DS(100)}$

2)  $C_{ob(2)}$  is a fixed capacitance that gives the same charging time as  $C_{oss}$  while  $V_{DS}$  is rising from 0 to 80%  $V_{DS(100)}$


**600V CoolMOS™ C6 Power Transistor  
IPx60R190C6**
**Electrical characteristics**
**Table 8 Gate charge characteristics**

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note / Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Gate to source charge	$Q_{gs}$	-	7.6	-	nC	$V_{DS}=480\text{ V}$ , $I_C=9.5\text{ A}$ , $V_{GS}=0$ to 10 V
Gate to drain charge	$Q_{gd}$	-	32	-		
Gate charge total	$Q_g$	-	63	-		
Gate plateau voltage	$V_{plateau}$	-	5.4	-	V	

**Table 9 Reverse diode characteristics**

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note / Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Diode forward voltage	$V_{SD}$	-	0.9	-	V	$V_{GS}=0\text{ V}$ , $I_C=9.5\text{ A}$ , $T_F=25\text{ °C}$
Reverse recovery time	$t_{rr}$	-	430	-	ns	$V_{GS}=400\text{ V}$ , $I_C=9.5\text{ A}$ , $di/dt=100\text{ A}/\mu\text{s}$ (see table 22)
Reverse recovery charge	$Q_{rr}$	-	6.9	-	$\mu\text{C}$	
Peak reverse recovery current	$I_{rrm}$	-	30	-	A	



## 5 Electrical characteristics diagrams

Table 10

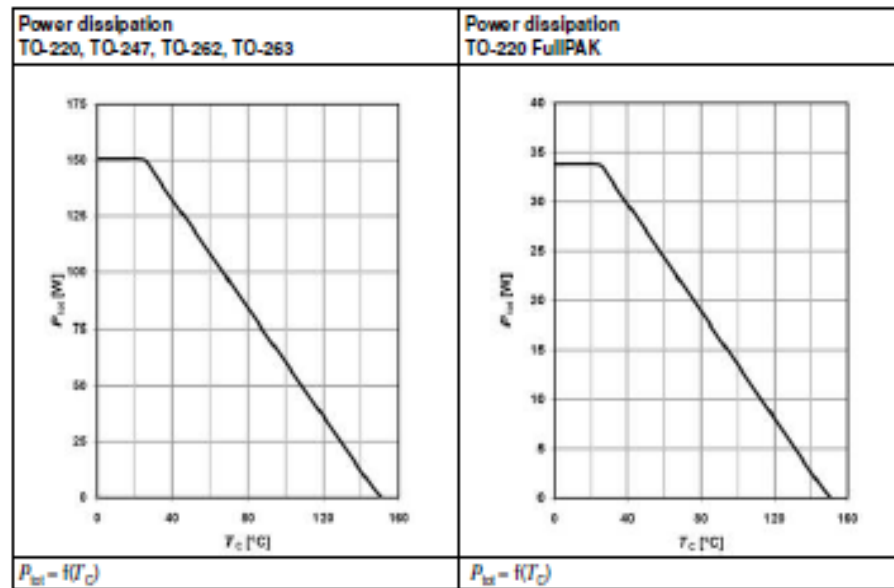


Table 11

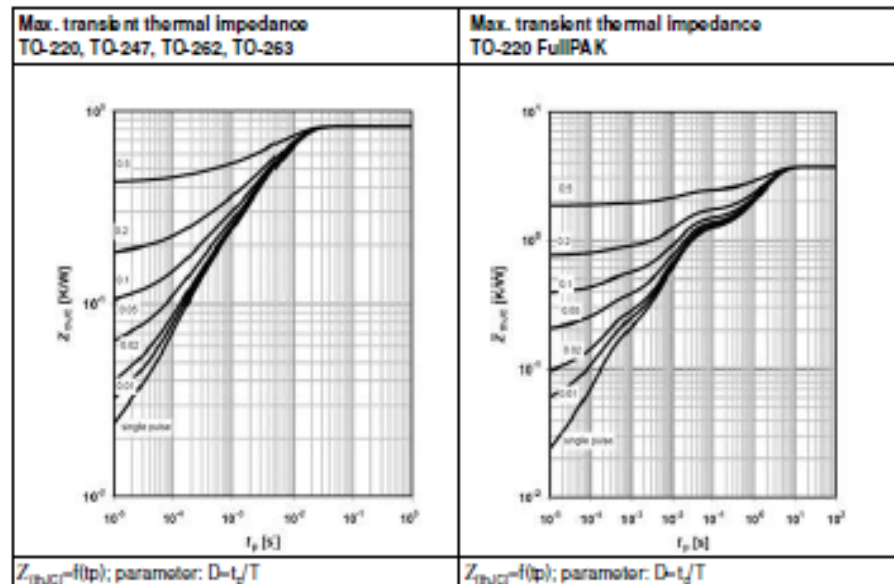




Table 12

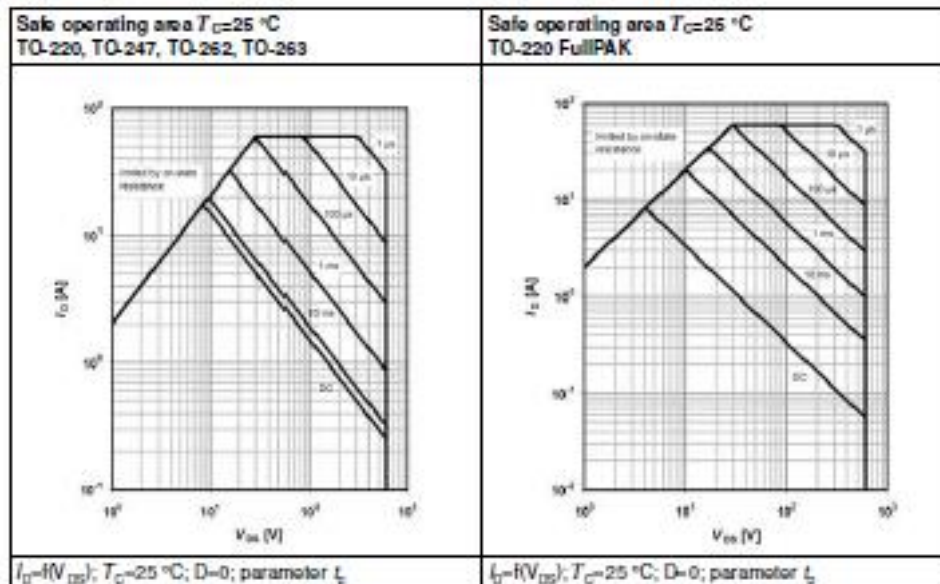
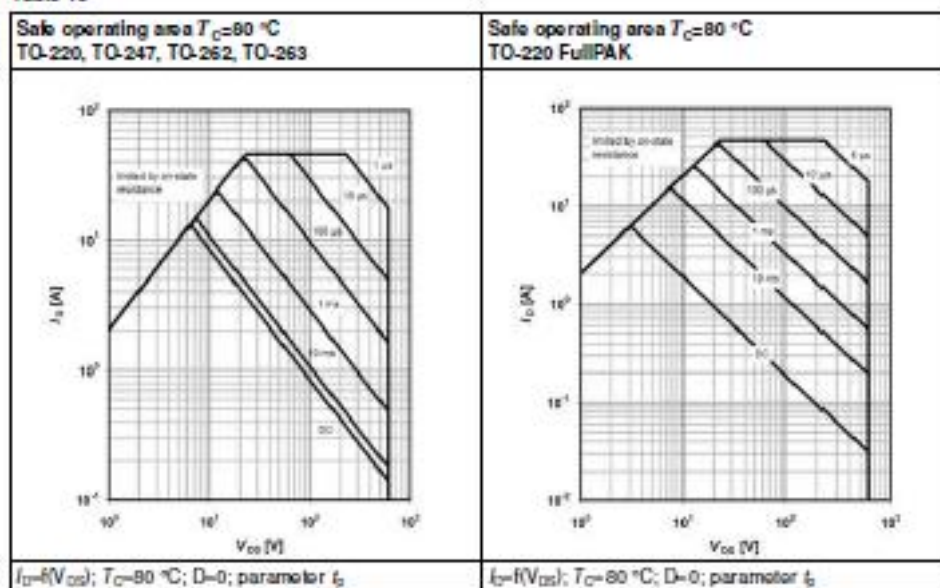


Table 13





600V CoolMOS™ C6 Power Transistor  
IPx60R190C6

Electrical characteristics diagrams

Table 14

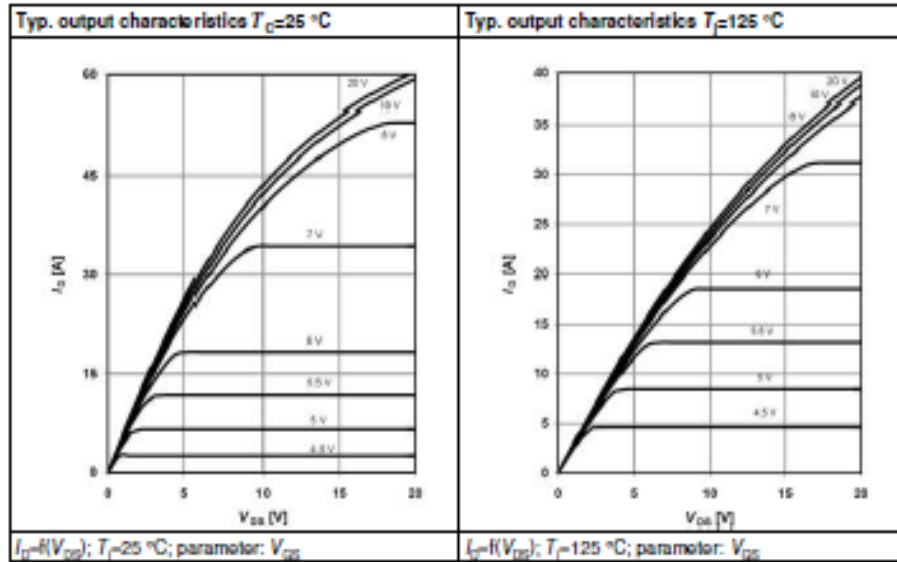


Table 15

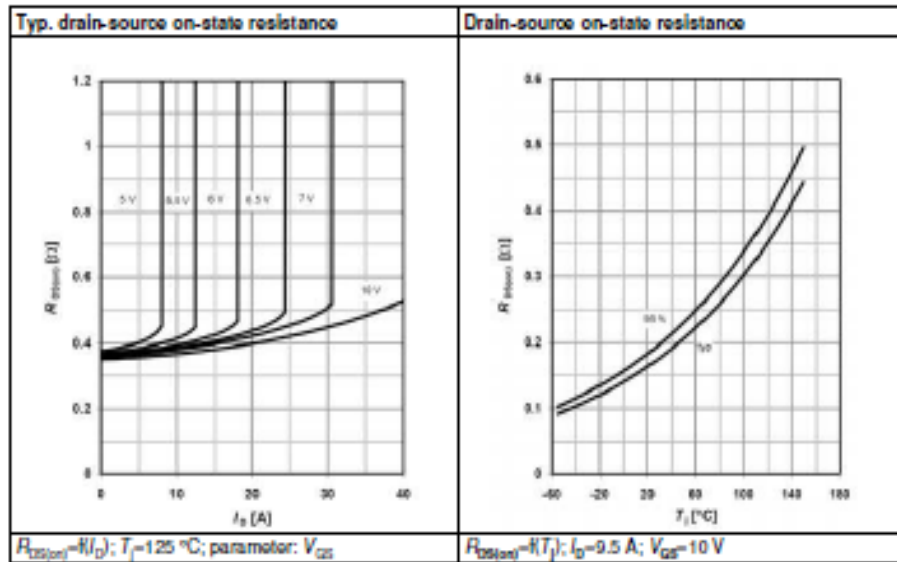






Table 16

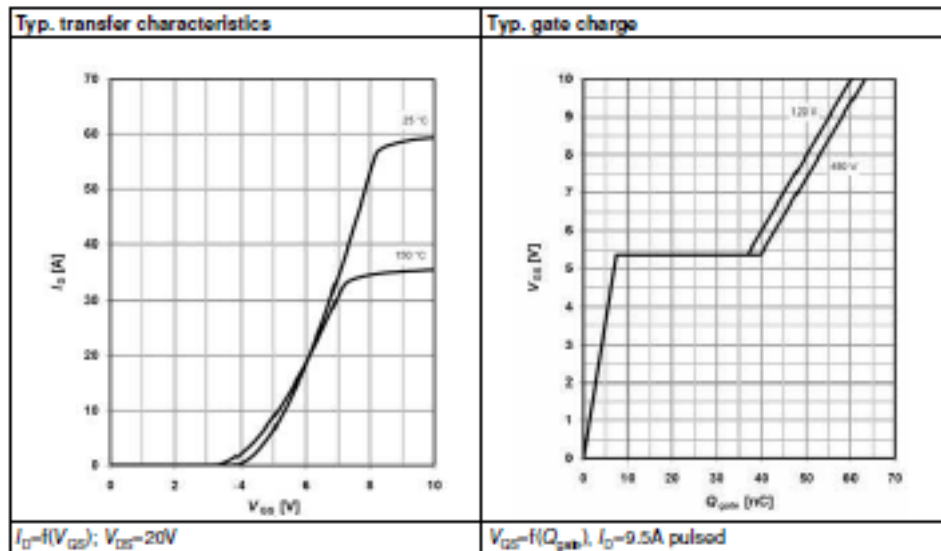
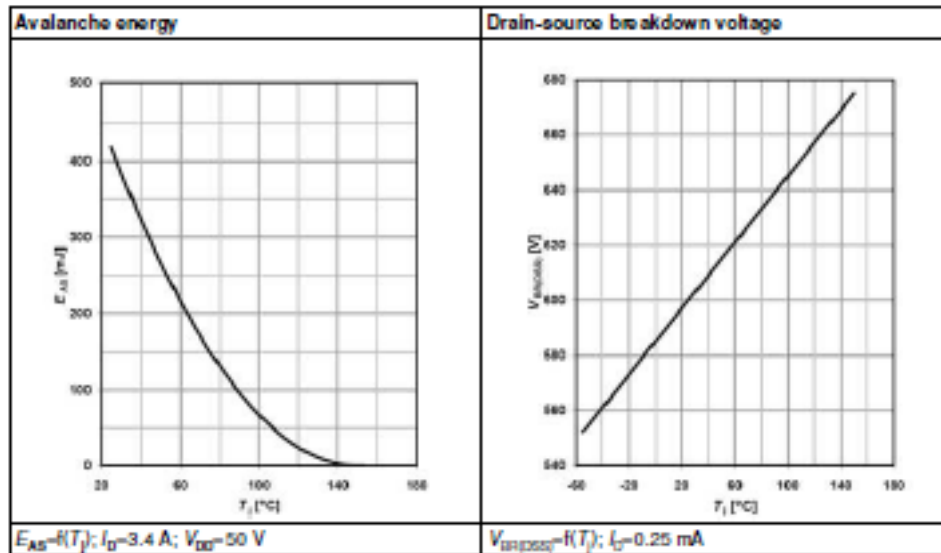


Table 17





600V CoolMOS™ C6 Power Transistor  
IPx60R190C6

Electrical characteristics diagrams

Table 18

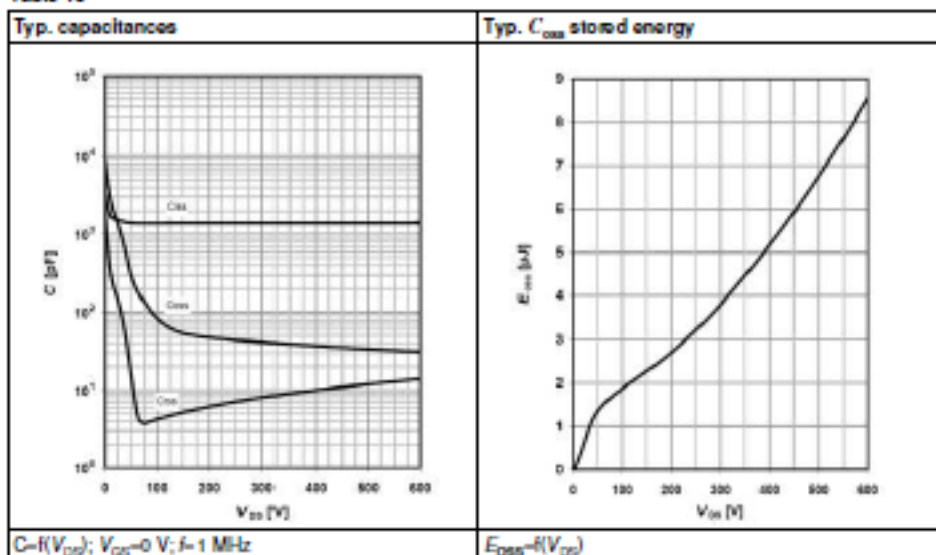
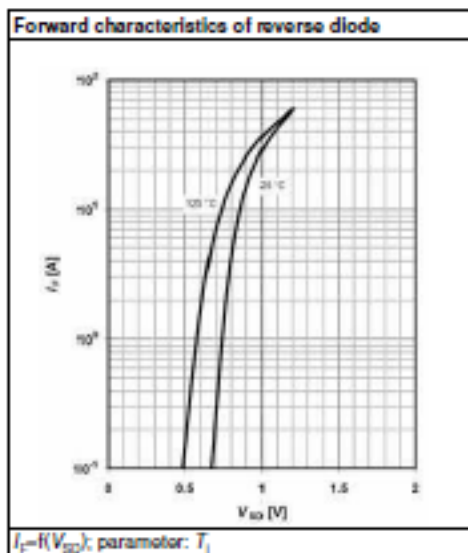


Table 19





## 7 Package outlines

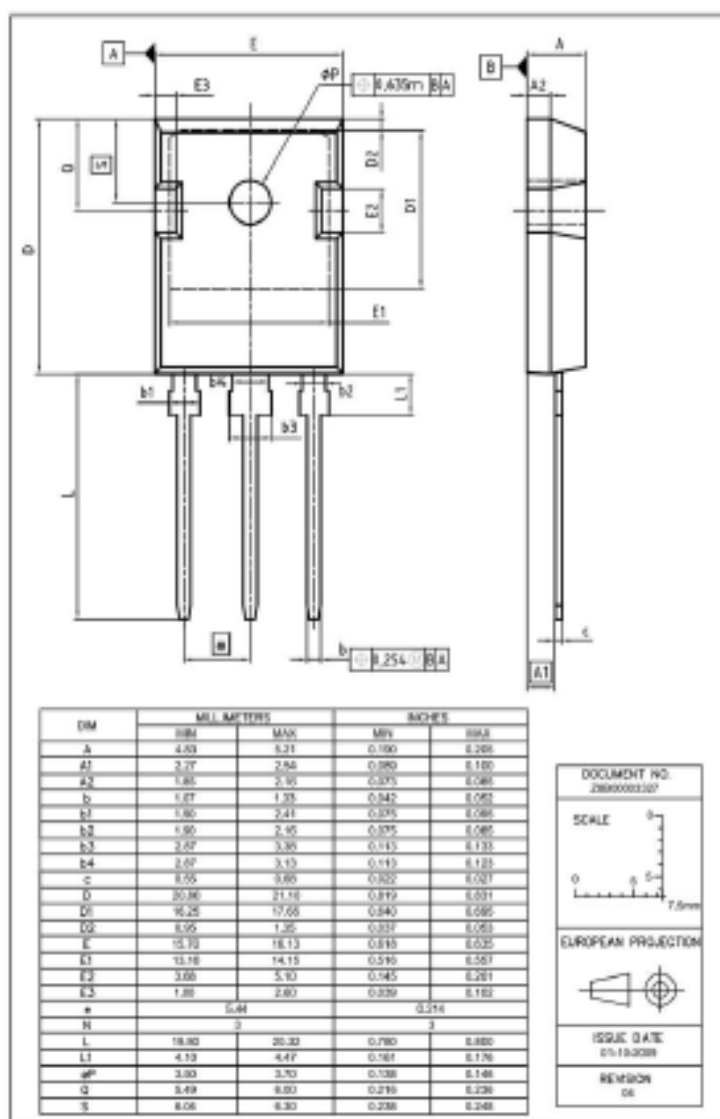


Figure 1 Outlines TO-247, dimensions in mm/inches



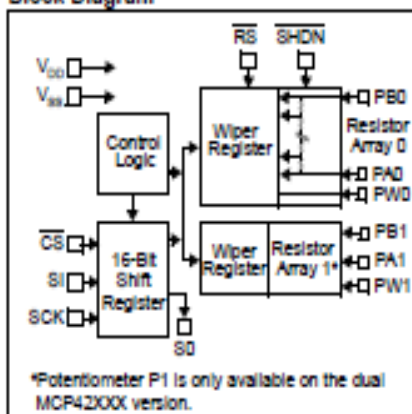
# MCP41XXX/42XXX

## Single/Dual Digital Potentiometer with SPI™ Interface

### Features

- 256 taps for each potentiometer
- Potentiometer values for 10 kΩ, 50 kΩ and 100 kΩ
- Single and dual versions
- SPI™ serial interface (mode 0,0 and 1,1)
- $\pm 1$  LSB max INL & DNL
- Low power CMOS technology
- 1  $\mu$ A maximum supply current in static operation
- Multiple devices can be daisy-chained together (MCP42XXX only)
- Shutdown feature open circuits of all resistors for maximum power savings
- Hardware shutdown pin available on MCP42XXX only
- Single supply operation (2.7V - 5.5V)
- Industrial temperature range: -40°C to +85°C
- Extended temperature range: -40°C to +125°C

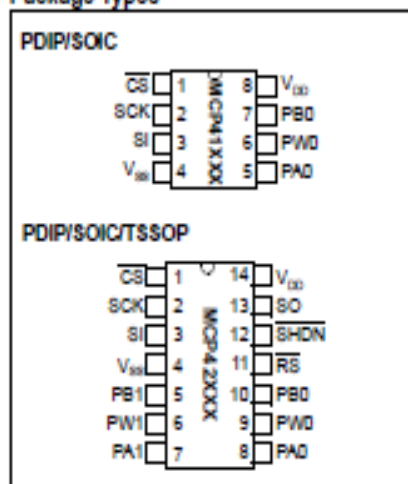
### Block Diagram



### Description

The MCP41XXX and MCP42XXX devices are 256-position, digital potentiometers available in 10 kΩ, 50 kΩ and 100 kΩ resistance versions. The MCP41XXX is a single-channel device and is offered in an 8-pin PDIP or SOIC package. The MCP42XXX contains two independent channels in a 14-pin PDIP, SOIC or TSSOP package. The wiper position of the MCP41XXX/42XXX varies linearly and is controlled via an industry-standard SPI interface. The devices consume <math><1 \mu\text{A}</math> during static operation. A software shutdown feature is provided that disconnects the "A" terminal from the resistor stack and simultaneously connects the wiper to the "B" terminal. In addition, the dual MCP42XXX has a SHDN pin that performs the same function in hardware. During shutdown mode, the contents of the wiper register can be changed and the potentiometer returns from shutdown to the new value. The wiper is reset to the mid-scale position (80h) upon power-up. The RS (reset) pin implements a hardware reset and also returns the wiper to mid-scale. The MCP42XXX SPI interface includes both the SI and SO pins, allowing daisy-chaining of multiple devices. Channel-to-channel resistance matching on the MCP42XXX varies by less than 1%. These devices operate from a single 2.7 - 5.5V supply and are specified over the extended and industrial temperature ranges.

### Package Types



# MCP41XXX/42XXX

## 1.0 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

### DC CHARACTERISTICS: 10 kΩ VERSION

Electrical Characteristics: Unless otherwise indicated, $V_{DD} = +2.7V$ to $5.5V$ , $T_A = -40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$ (TSSOP devices are only specified at $+25^{\circ}C$ and $+85^{\circ}C$ ). Typical specifications represent values for $V_{DD} = 5V$ , $V_{SS} = 0V$ , $V_A = 0V$ , $T_A = +25^{\circ}C$ .						
Parameters	Sym	Min	Typ	Max	Units	Conditions
<b>Rheostat Mode</b>						
Nominal Resistance	R	8	10	12	kΩ	$T_A = +25^{\circ}C$ (Note 1)
Rheostat Differential Non-Linearity	R-DNL	-1	±1/4	+1	LSD	Note 2
Rheostat Integral Non-Linearity	R-INL	-1	±1/4	+1	LSD	Note 2
Rheostat Tempo	$\Delta R_{tap}/\Delta T$	—	800	—	ppm/°C	
Wiper Resistance	$R_{W1}$	—	52	100	Ω	$V_{DD} = 5.5V$ , $I_W = 1$ mA, code 00h
	$R_{W2}$	—	73	125	Ω	$V_{DD} = 2.7V$ , $I_W = 1$ mA, code 00h
Wiper Current	$I_W$	-1	—	+1	mA	
Nominal Resistance Match	$\Delta R/R$	—	0.2	1	%	MCP42010 only, P0 to P1; $T_A = +25^{\circ}C$
<b>Potentiometer Divider</b>						
Resolution	N	8	—	—	Bits	
Monotonicity	N	8	—	—	Bits	
Differential Non-Linearity	DNL	-1	±1/4	+1	LSD	Note 3
Integral Non-Linearity	INL	-1	±1/4	+1	LSD	Note 3
Voltage Divider Tempo	$\Delta V_{out}/\Delta T$	—	1	—	ppm/°C	Code 80h
Full Scale Error	$V_{FSERR}$	-2	-0.7	0	LSD	Code FFh, $V_{DD} = 5V$ , see Figure 2-25
	$V_{FSERR}$	-2	-0.7	0	LSD	Code FFh, $V_{DD} = 3V$ , see Figure 2-25
Zero Scale Error	$V_{ZERR}$	0	+0.7	+2	LSD	Code 00h, $V_{DD} = 5V$ , see Figure 2-25
	$V_{ZERR}$	0	+0.7	+2	LSD	Code 00h, $V_{DD} = 3V$ , see Figure 2-25
<b>Resistor Terminals</b>						
Voltage Range	$V_{A,W}$	0	—	$V_{DD}$		Note 4
Capacitance ( $C_A$ or $C_W$ )		—	15	—	pF	$f = 1$ MHz, Code = 80h, see Figure 2-30
Capacitance	$C_W$	—	5.6	—	pF	$f = 1$ MHz, Code = 80h, see Figure 2-30
<b>Dynamic Characteristics (All dynamic characteristics use <math>V_{DD} = 5V</math>)</b>						
Bandwidth -3dB	BW	—	1	—	MHz	$V_A = 0V$ , Measured at Code 80h, Output Load = 30 pF
Settling Time	$t_S$	—	2	—	μs	$V_A = V_{DD}$ , $V_W = 0V$ , ±1% Error Band, Transition from Code 80h to Code 80h, Output Load = 30 pF
Resistor Noise Voltage	$R_{noise}$	—	9	—	nV/√Hz	$V_A =$ Open, Code 80h, $f = 1$ kHz
Crestfactor	$C_F$	—	-95	—	dB	$V_A = V_{DD}$ , $V_W = 0V$ (Note 5)
<b>Digital Inputs/Outputs (CS, SCK, SI, SO) See Figure 2-12 for RS and SHDN pin operation</b>						
Schmitt Trigger High-Level Input Voltage	$V_{IH}$	$0.7V_{DD}$	—	—	V	
Schmitt Trigger Low-Level Input Voltage	$V_{IL}$	—	—	$0.3V_{DD}$	V	
Hysteresis of Schmitt Trigger Inputs	$V_{HYS}$	—	$0.05V_{DD}$	—		
Low-Level Output Voltage	$V_{OL}$	—	—	0.40	V	$I_{OL} = 2.1$ mA, $V_{DD} = 5V$
High-Level Output Voltage	$V_{OH}$	$V_{DD} - 0.5$	—	—	V	$I_{OH} = 400$ μA, $V_{DD} = 5V$
Input Leakage Current	$I_{IL}$	-1	—	+1	μA	$CS = V_{DD}$ , $V_{SI} = V_{SCK} = V_{SO} = V_{DD}$ , Includes $V_A$ , SHDN=0
Pin Capacitance (All inputs/outputs)	$C_{IN}$ , $C_{OUT}$	—	10	—	pF	$V_{DD} = 5.0V$ , $T_A = +25^{\circ}C$ , $f_s = 1$ MHz
<b>Power Requirements</b>						
Operating Voltage Range	$V_{DD}$	2.7	—	5.5	V	
Supply Current, Active	$I_{DDA}$	—	340	500	μA	$V_{DD} = 5.5V$ , $CS = V_{DD}$ , $f_{SCK} = 10$ MHz, $SI =$ Open, Code FFh (Note 6)
Supply Current, Static	$I_{DDI}$	—	0.01	1	μA	$CS$ , $SHDN$ , $RS = V_{DD} = 5.5V$ , $SI =$ Open (Note 6)
Power Supply Sensitivity	PSD	—	0.0015	0.0035	%/%	$V_{DD} = 4.5V - 5.5V$ , $V_A = 4.5V$ , Code 80h
	PSD	—	0.0015	0.0035	%/%	$V_{DD} = 2.7V - 3.3V$ , $V_A = 2.7V$ , Code 80h

- Note**
- $V_{A,W} = V_{DD}$ , no connection on wiper.
  - Rheostat position non-linearity R-INL is the deviation from an ideal value measured between the maximum resistance and the minimum resistance wiper positions. R-DNL measures the relative step change from the ideal between successive tap positions.  $I_W = 50$  μA for  $V_{DD} = 3V$  and  $I_W = 400$  μA for  $V_{DD} = 5V$  for 10 kΩ version. See Figure 2-26 for test circuit.
  - INL and DNL are measured at  $V_{DD}$  with the device configured in the voltage divider or potentiometer mode.  $V_A = V_{DD}$  and  $V_W = 0V$ . DNL specification limits of ±1 LSD max are specified monotonic operating conditions. See Figure 2-25 for test circuit.
  - Resistor terminals A, B and W have no restrictions on polarity with respect to each other. Full-scale and zero-scale error were measured using Figure 2-25.
  - Measured at  $V_{W1}$  pin where the voltage on the adjacent  $V_{W2}$  pin is swinging full-scale.
  - Supply current is independent of current through the potentiometers.

## MCP41XXX/42XXX

### Absolute Maximum Ratings †

V <sub>DD</sub> .....	7.0V
All inputs and outputs w.r.t. V <sub>SS</sub> .....	-0.6V to V <sub>DD</sub> +1.0V
Storage temperature.....	-60°C to +150°C
Ambient temp. with power applied.....	-60°C to +125°C
ESD protection on all pins.....	> 2 kV

† Notice: Stresses above those listed under "maximum ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at those or any other conditions above those indicated in the operational listings of this specification is not implied. Exposure to maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

### AC TIMING CHARACTERISTICS

Electrical Characteristics: Unless otherwise indicated, V <sub>DD</sub> = +2.7V to 5.5V, T <sub>A</sub> = -60°C to +85°C.						
Parameter	Sym	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Clock Frequency	F <sub>CLK</sub>	—	—	10	MHz	V <sub>DD</sub> = 5V (Note 1)
Clock High Time	t <sub>CH</sub>	40	—	—	ns	
Clock Low Time	t <sub>CL</sub>	40	—	—	ns	
CS Fall to First Rising CLK Edge	t <sub>CSF</sub>	40	—	—	ns	
Data Input Setup Time	t <sub>SI</sub>	40	—	—	ns	
Data Input Hold Time	t <sub>SH</sub>	10	—	—	ns	
SCK Fall to SO Valid Propagation Delay	t <sub>SO</sub>	—	—	80	ns	C <sub>L</sub> = 30 pF (Note 2)
SCK Rise to CS Rise Hold Time	t <sub>CSH</sub>	30	—	—	ns	
SCK Rise to CS Fall Delay	t <sub>CSF</sub>	10	—	—	ns	
CS Rise to CLK Rise Hold	t <sub>CLKH</sub>	100	—	—	ns	
CS High Time	t <sub>CSH</sub>	40	—	—	ns	
Reset Pulse Width	t <sub>RES</sub>	150	—	—	ns	Note 2
RES Rising to CS Falling Delay Time	t <sub>CSF</sub>	150	—	—	ns	Note 2
CS Rising to RES or STREN falling delay time	t <sub>RES</sub>	40	—	—	ns	Note 3
CS low time	t <sub>CSL</sub>	100	—	—	ns	Note 3
Shutdown Pulse Width	t <sub>SD</sub>	150	—	—	ns	Note 3

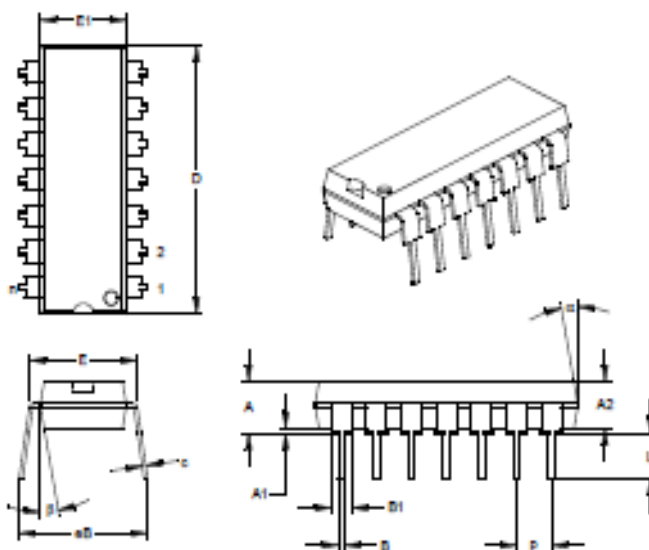
Note 1: When using the device in the delay-chain configuration, maximum clock frequency is determined by a combination of propagation delay time (t<sub>PD</sub>) and data input setup time (t<sub>SI</sub>). Max. clock frequency is therefore ~ 5.8 MHz based on SCK rise and fall times of 5 ns, t<sub>CH</sub> = 40 ns, t<sub>CL</sub> = 80 ns and t<sub>SI</sub> = 40 ns.

Note 2: Applies only to the MCP42XXX devices.

Note 3: Applies only when using hardware pins to exit software shutdown mode, MCP42XXX only.

## MCP41XXX/42XXX

14-Lead Plastic Dual In-Line (P) – 300 mil (PDIP)



Dimension Limits	Units	INCHES*			MILLIMETERS		
		MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX
Number of Pins	n		14			14	
Pitch	P		.100			2.54	
Top to Seating Plane	A	.140	.155	.170	3.56	3.94	4.32
Molded Package Thickness	A2	.115	.130	.145	2.92	3.30	3.68
Base to Seating Plane	A1	.015			0.38		
Shoulder to Shoulder Width	E	.300	.313	.325	7.62	7.94	8.25
Molded Package Width	E1	.240	.250	.260	6.10	6.35	6.60
Overall Length	D	.740	.750	.760	18.80	19.05	19.30
Tip to Seating Plane	L	.125	.130	.135	3.18	3.30	3.43
Lead Thickness	c	.005	.012	.015	0.20	0.29	0.38
Upper Lead Width	B1	.045	.055	.070	1.14	1.40	1.78
Lower Lead Width	B	.014	.018	.022	0.36	0.46	0.56
Overall Row Spacing	§ aB	.310	.370	.430	7.87	9.40	10.92
Mold Draft Angle Top	¶	5	10	15	5	10	15
Mold Draft Angle Bottom	§	5	10	15	5	10	15

\* Controlling Parameter

§ Significant Characteristics

Notes:

Dimensions D and E1 do not include mold flash or protrusions. Mold flash or protrusions shall not exceed

0.10" (2.54mm) per side.

JEDEC Equivalent: MS-001

Drawing No. 004-005



# LINEAR TECHNOLOGY

## LT1083/LT1084/LT1085

### 7.5A, 5A, 3A Low Dropout Positive Adjustable Regulators

#### FEATURES

- 3-Terminal Adjustable
- Output Current of 3A, 5A or 7.5A
- Operates Down to 1V Dropout
- Guaranteed Dropout Voltage at Multiple Current Levels
- Line Regulation: 0.015%
- Load Regulation: 0.1%
- 100% Thermal Limit Functional Test
- Fixed Versions Available
- Available in 3-Lead Plastic TO-220 and DD Packages

#### APPLICATIONS

- High Efficiency Linear Regulators
- Post Regulators for Switching Supplies
- Constant Current Regulators
- Battery Chargers

DEVICE	OUTPUT CURRENT*
LT1083	7.5A
LT1084	5.0A
LT1085	3.0A

\*For a 1.5A low dropout regulator see the LT1086 data sheet.

#### DESCRIPTION

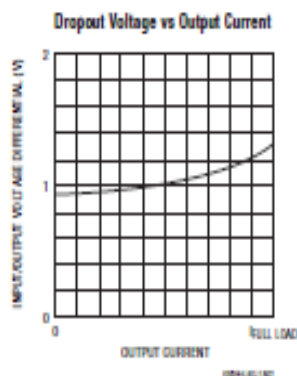
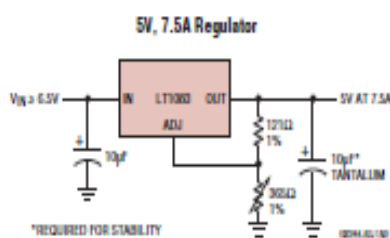
The **LT<sup>®</sup>1083** series of positive adjustable regulators are designed to provide 7.5A, 5A and 3A with higher efficiency than currently available devices. All internal circuitry is designed to operate down to 1V input-to-output differential and the dropout voltage is fully specified as a function of load current. Dropout is guaranteed at a maximum of 1.5V at maximum output current, decreasing at lower load currents. On-chip trimming adjusts the reference voltage to 1%. Current limit is also trimmed, minimizing the stress on both the regulator and power source circuitry under overload conditions.

The LT1083/LT1084/LT1085 devices are pin compatible with older 3-terminal regulators. A 10 $\mu$ F output capacitor is required on these new devices. However, this is included in most regulator designs.

Unlike PNP regulators, where up to 10% of the output current is wasted as quiescent current, the LT1083 quiescent current flows into the load, increasing efficiency.

LT<sup>®</sup>, LT, LTC, LTM, Linear Technology and the Linear logo are registered trademarks and UltraSect and ThinSOT are trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

#### TYPICAL APPLICATION





## LT1083/LT1084/LT1085

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

Power Dissipation ..... Internally Limited

Input-to-Output Voltage Differential

C-Grades ..... 30V

I-Grades ..... 30V

M-Grades (OBSOLETE) ..... 35V

Operating Junction Temperature Range (Note 9)

C-Grades: Control Section ..... 0°C to 125°C

Power Transistor ..... 0°C to 150°C

I-Grades: Control Section ..... -40°C to 125°C

Power Transistor ..... -40°C to 150°C

M-Grades: (OBSOLETE)

Control Section ..... -55°C to 150°C

Power Transistor ..... -55°C to 200°C

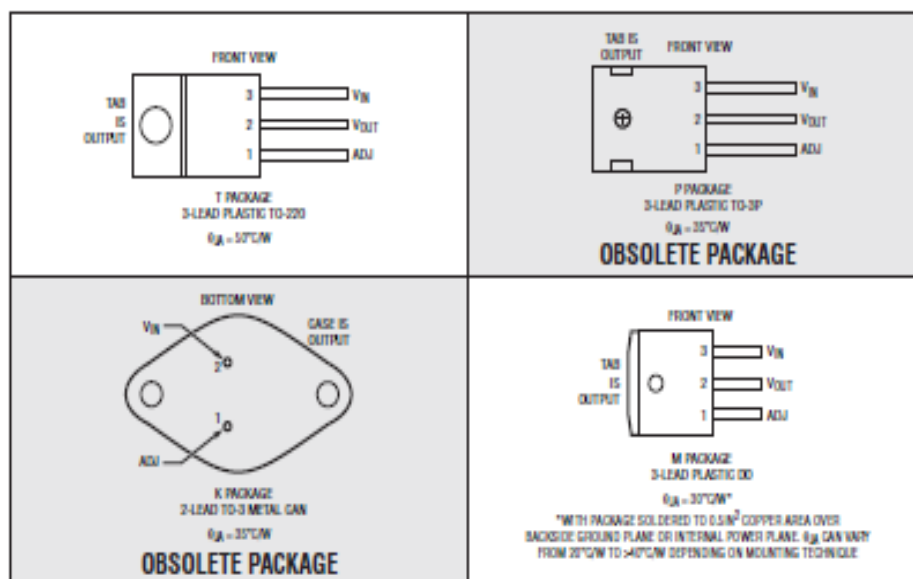
Storage Temperature Range ..... -65°C to 150°C

Lead Temperature (Soldering, 10 sec) ..... 300°C

### PRECONDITIONING

100% thermal shutdown functional test.

### PIN CONFIGURATION



1384-019

## LT1083/LT1084/LT1085

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** The • denotes the specifications which apply over the full operating temperature range, otherwise specifications are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
Reference Voltage	$I_{OUT} = 10\text{mA}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ , $(V_{IN} - V_{OUT}) = 2\text{V}$ $10\text{mA} \leq I_{OUT} \leq I_{FULL\_LOAD}$	1.238	1.250	1.262	V	
	$1.5\text{V} \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 25\text{V}$ (Notes 4, 6, 7)	• 1.225	1.250	1.270	V	
Line Regulation	$I_{LOAD} = 10\text{mA}$ , $1.5\text{V} \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 15\text{V}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ (Notes 2, 3)	•	0.015	0.2	%	
		•	0.035	0.2	%	
	M-Grade: $15\text{V} \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 30\text{V}$ (Notes 2, 3)	•	0.05	0.5	%	
	C-, I-Grades: $15\text{V} \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 30\text{V}$ (Notes 2, 3)	•	0.05	0.5	%	
Load Regulation	$(V_{IN} - V_{OUT}) = 2\text{V}$ , $10\text{mA} \leq I_{OUT} \leq I_{FULL\_LOAD}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ (Notes 2, 3, 4, 6)	•	0.1	0.3	%	
		•	0.2	0.4	%	
Dropout Voltage	$\Delta V_{REF} = 1\%$ , $I_{OUT} = I_{FULL\_LOAD}$ (Notes 5, 6, 8)	•	1.3	1.5	V	
Current Limit	$(V_{IN} - V_{OUT}) = 2\text{V}$ $(V_{IN} - V_{OUT}) = 25\text{V}$	LT1083	• 8.0	9.5	A	
			• 0.4	1.0	A	
		LT1084	• 5.5	6.5	A	
			• 0.3	0.6	A	
		LT1085	• 3.2	4.0	A	
			• 0.2	0.5	A	
Minimum Load Current	$(V_{IN} - V_{OUT}) = 25\text{V}$	•	5	10	mA	
Thermal Regulation	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , 30ms Pulse	LT1083		0.002	0.010	%/W
		LT1084		0.003	0.015	%/W
		LT1085		0.004	0.020	%/W
Ripple Rejection	$f = 120\text{Hz}$ , $C_{ADJ} = 25\mu\text{F}$ , $C_{OUT} = 25\mu\text{F}$ Tantalum $I_{OUT} = I_{FULL\_LOAD}$ , $(V_{IN} - V_{OUT}) = 2\text{V}$ (Notes 6, 7, 8)	•	60	75	dB	
Adjust Pin Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$	•	95		$\mu\text{A}$	
		•		120	$\mu\text{A}$	
Adjust Pin Current Change	$10\text{mA} \leq I_{OUT} \leq I_{FULL\_LOAD}$ , $1.5\text{V} \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 25\text{V}$ (Note 6)	•	0.2	5	$\mu\text{A}$	
Temperature Stability		•	0.5		%	
Long-Term Stability	$T_A = 125^\circ\text{C}$ , 1000 Hrs		0.3	1	%	
RMS Output Noise (% of $V_{OUT}$ )	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $10\text{Hz} \leq f \leq 10\text{kHz}$		0.003		%	
Thermal Resistance Junction-to-Case	Control Circuitry/Power Transistor	LT1083	K Package		0.6/1.6	$^\circ\text{C/W}$
			P Package		0.5/1.6	$^\circ\text{C/W}$
		LT1084	K Package		0.75/2.3	$^\circ\text{C/W}$
			P Package		0.65/2.3	$^\circ\text{C/W}$
		LT1085	T Package		0.65/2.7	$^\circ\text{C/W}$
			K Package		0.9/3.0	$^\circ\text{C/W}$
			M, T Package		0.7/3.0	$^\circ\text{C/W}$

## LT1083/LT1084/LT1085

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

**Note 1:** Stresses beyond those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. Exposure to any Absolute Maximum Rating condition for extended periods may affect device reliability and lifetime.

**Note 2:** See thermal regulation specifications for changes in output voltage due to heating effects. Load and line regulation are measured at a constant junction temperature by low duty cycle pulse testing.

**Note 3:** Line and load regulation are guaranteed up to the maximum power dissipation (60W for the LT1083, 45W for the LT1084 (K, P), 30W for the LT1084 (T) and 30W for the LT1085). Power dissipation is determined by the input/output differential and the output current. Guaranteed maximum power dissipation will not be available over the full input/output voltage range.

**Note 4:**  $I_{FULL\_LOAD}$  is defined in the current limit curves. The  $I_{FULL\_LOAD}$  curve is defined as the minimum value of current limit as a function of input-to-output voltage. Note that the 60W power dissipation for the LT1083 (45W for the LT1084 (K, P), 30W for the LT1084 (T), 30W for the LT1085) is only achievable over a limited range of input-to-output voltage.

**Note 5:** Dropout voltage is specified over the full output current range of the device. Test points and limits are shown on the Dropout Voltage curve.

**Note 6:** For LT1083  $I_{FULL\_LOAD}$  is 5A for  $-55^{\circ}\text{C} < T_J < -40^{\circ}\text{C}$  and 7.5A for  $T_J \geq -40^{\circ}\text{C}$ .

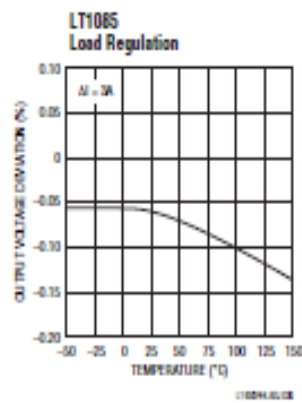
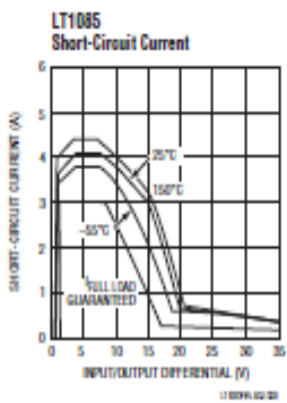
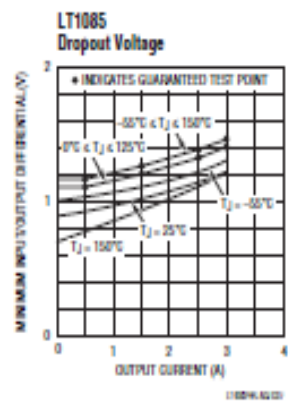
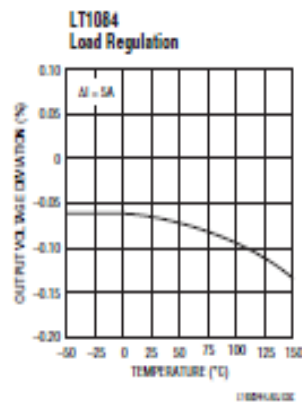
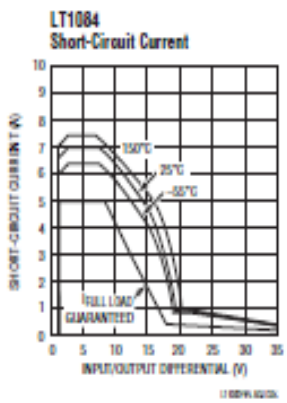
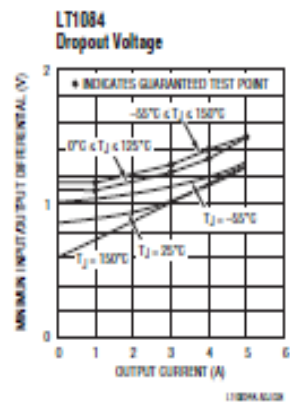
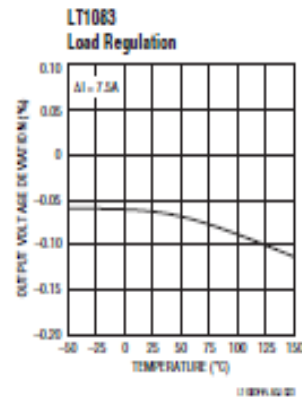
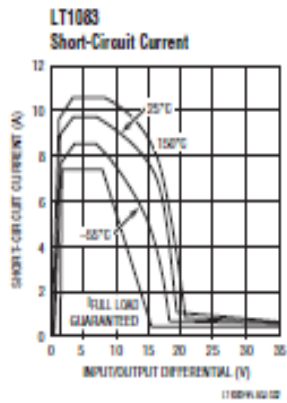
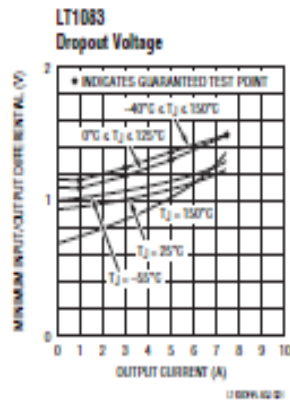
**Note 7:**  $1.7\text{V} < (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 25\text{V}$  for LT1084 at  $-55^{\circ}\text{C} < T_J < -40^{\circ}\text{C}$ .

**Note 8:** Dropout is 1.7V maximum for LT1084 at  $-55^{\circ}\text{C} < T_J < -40^{\circ}\text{C}$ .

**Note 9:** The LT1083/LT1084/LT1085 regulators are tested and specified under pulse load conditions such that  $T_J \leq T_A$ . The C-grade LT1083/LT1084/LT1085 are 100% tested at 25°C. The I-grade LT1084/LT1085 are guaranteed over the full  $-40^{\circ}\text{C}$  to 125°C operating ambient temperature range.

LT1083/LT1084/LT1085

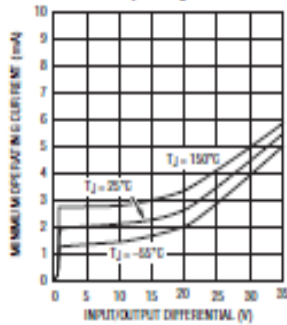
TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS



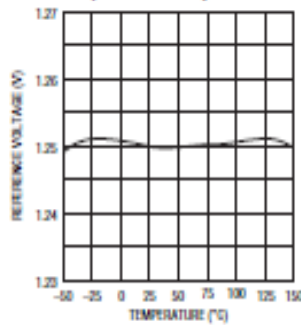
# LT1083/LT1084/LT1085

## TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

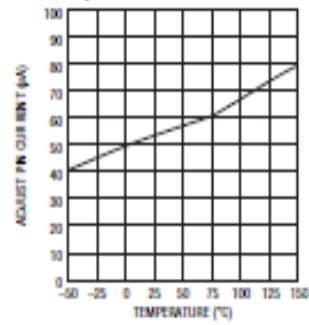
Minimum Operating Current



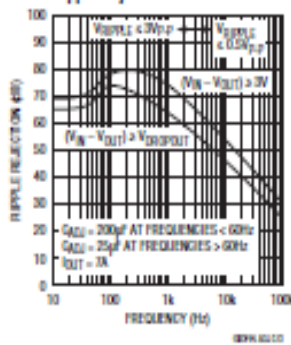
Temperature Stability



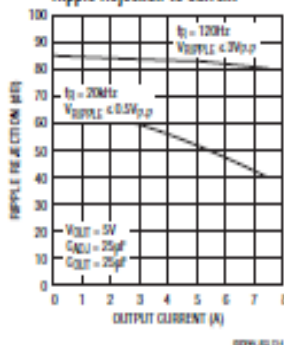
Adjust Pin Current



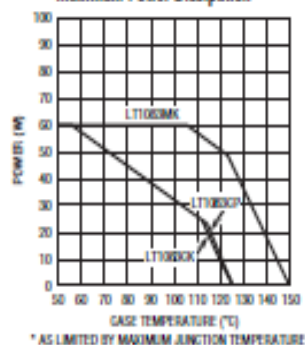
LT1083  
Ripple Rejection



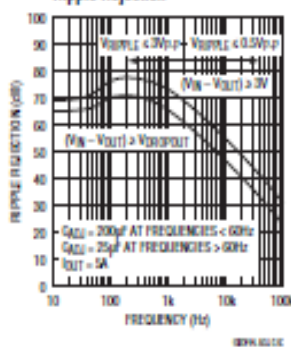
LT1083  
Ripple Rejection vs Current



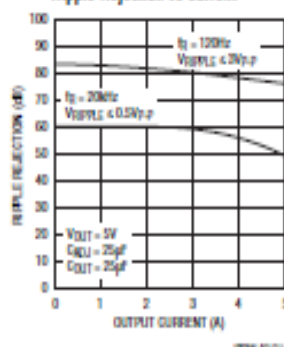
LT1083  
Maximum Power Dissipation\*



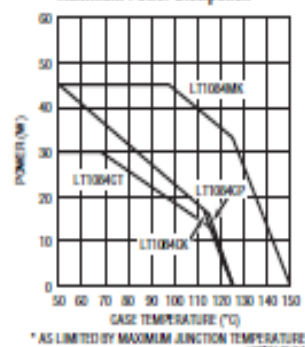
LT1084  
Ripple Rejection



LT1084  
Ripple Rejection vs Current

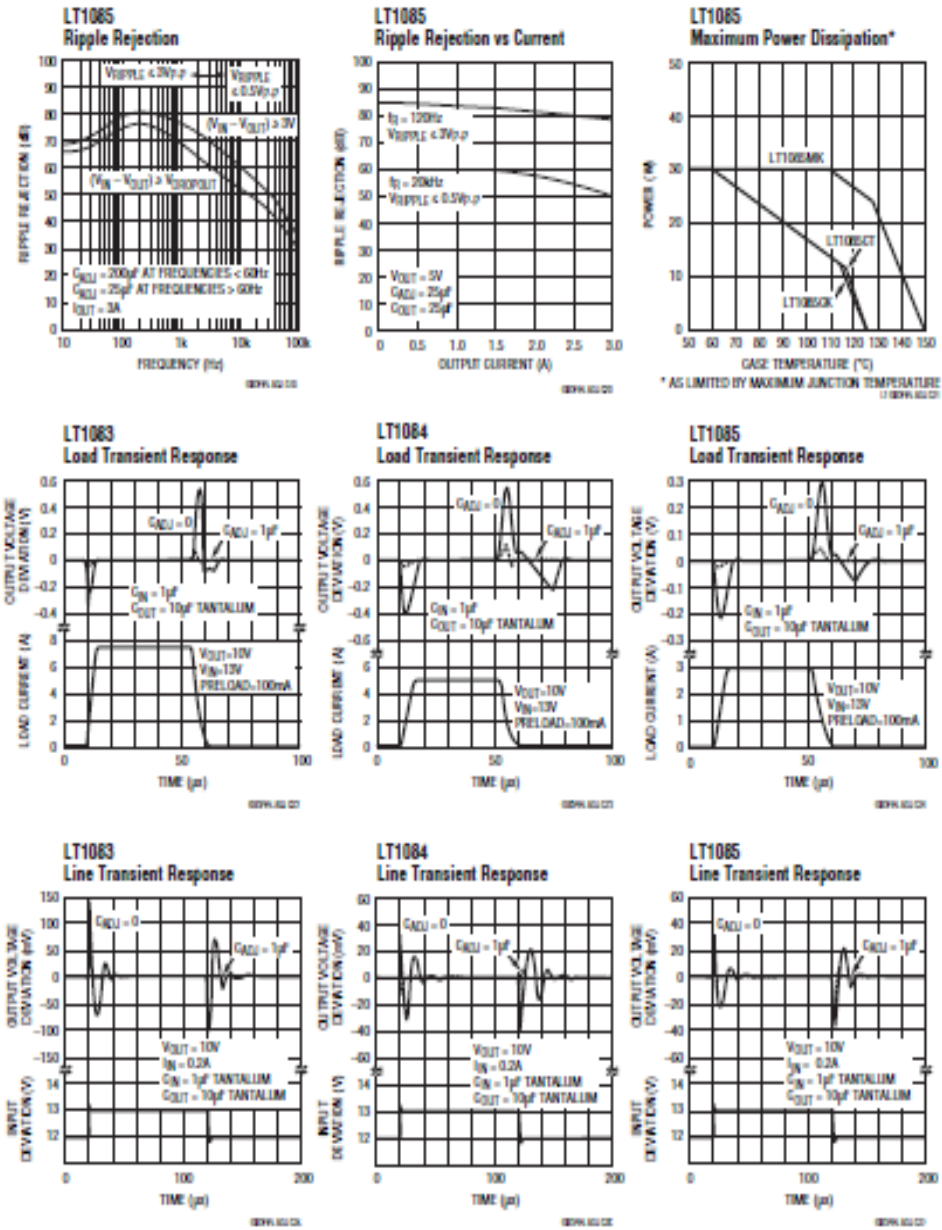


LT1084  
Maximum Power Dissipation\*



LT1083/LT1084/LT1085

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐนพิณช์ จรุงยศศักดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 14 เมษายน พ.ศ. 2534 จังหวัดตรัง

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วัสดุขั้นสูงและนาโนเทคโนโลยี) มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปี 2557

ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมชีวเวช (สหสาขาวิชา) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2557

