

การออกแบบและการสร้างเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบหึ่งชนิดคู่ความถี่ยวนำขนาด1.4 กิโลจูล



นายสิทธิศักดิ์ ไชยสมบัติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

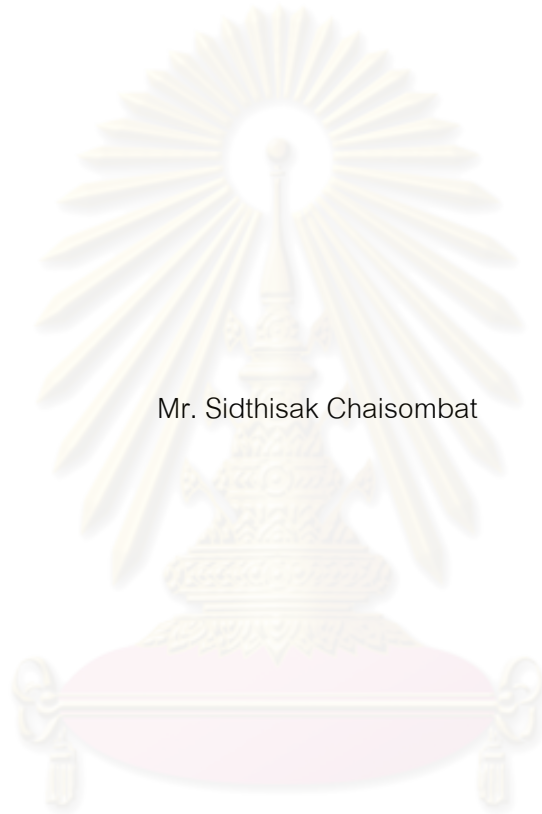
สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF 1.4 kJ PULSED INDUCTIVELY COUPLED
PLASMA DEVICE



Mr. Sidthisak Chaisombat

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Physics

Department of Physics

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบและการสร้างเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบห่วง
ชนิดคู่ควมเหนี่ยวนำขนาด 1.4 กิโลจูล

โดย

นายสิทธิศักดิ์ ไชยสมบัติ

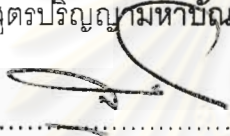
สาขาวิชา

ฟิสิกส์


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

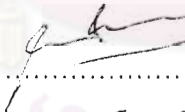
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

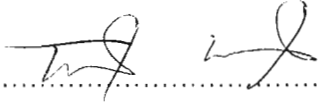

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุกคณศ ตุงคะสมิต)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย อ่อนจันทร์)

ลิขสิทธิ์ศักดิ์ ไชยสมบัติ: การออกแบบและการสร้างเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบห้วงชนิด
 คู่ควบเหนี่ยวนำขนาด 1.4 กิโลจูล (DESIGN AND CONSTRUCTION OF 1.4 kJ
 PULSED INDUCTIVELY COUPLED PLASMA DEVICE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน, 107 หน้า.

เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบห้วงชนิดควบคู่เหนี่ยวนำหรือเครื่องฟิวชันคือเครื่อง
 กำเนิดพลาสมาที่ดัดแปลงมาจากเครื่องกำเนิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันขนาดเล็ก ซึ่งปัจจุบัน
 ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานในหลายด้าน เนื่องด้วยกระบวนการเกิดพลาสมาภายในที่เกิดขึ้น
 ในช่วงเวลาที่สั้นจึงเหมาะกับการปรับปรุงพื้นผิววัสดุที่ไม่ทนความร้อน งานวิจัยนี้ได้
 ทำการสร้างเครื่องฟิวชันแล้วศึกษาสมบัติของเครื่องและสมบัติของพลาสมาที่กำเนิดจาก
 เครื่อง ซึ่งเป็นตัวแปรพื้นฐานที่มีประโยชน์ในการนำมาพัฒนา และศึกษาเครื่องกำเนิด
 ปฏิกิริยาฟิวชันได้ในอนาคต ขดลวดโรโกวสกีวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรถัด
 สนามแม่เหล็กวัดการเคลื่อนที่ของพลาสมา และสเปคโตรมิเตอร์วัดอุณหภูมิอิเล็กตรอน ได้
 นำมาวัดขณะที่เครื่องมีพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุเท่ากับ 1.4 2.4 และ 4.32 กิโลจูล ซึ่ง
 สามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรถัดได้ 256 336 และ 430 กิโลแอมแปร์ตามลำดับ เมื่อ
 เครื่องมีพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ 1.4 กิโลจูล สามารถวัดความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของ
 พลาสมาจากก๊าซอาร์กอน ออกซิเจน และไนโตรเจนได้ 2.4×10^4 3.5×10^4 และ 4.2×10^4 เมตร
 ต่อวินาทีตามลำดับ ซึ่งวัดได้จากตำแหน่ง 3.46 ถึง 1.46 เซนติเมตรจากแกนกลาง จากการ
 ทดลองพบว่าความเร็วเฉลี่ยของพลาสมาที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานที่ให้ ขณะที่ลดลง
 ตามระยะทางที่บีบตัว ตามความดันที่เพิ่มขึ้นและตามมวลโมเลกุลของพลาสมาที่เพิ่มขึ้น
 เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางทฤษฎีพบว่าความเร็วของพลาสมาเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและ
 ลดลงเมื่อเข้าใกล้ศูนย์กลางซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง ขณะที่อุณหภูมิอิเล็กตรอนจาก
 แบบจำลองทางทฤษฎีลดลงตามความดันที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าใน
 วงจรมีผลต่อความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของพลาสมา

ภาควิชา.....ฟิสิกส์.....
 สาขาวิชา.....ฟิสิกส์.....
 ปีการศึกษา2553.....

ลายมือชื่อนิติศ.....
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5072512223: MAJOR PHYSICS

KEYWORDS: PICP / THETA PINCH/ PULSED PLASMA

SIDTHISAK CHAISOMBAT: DESIGN AND CONSTRUCTION OF 1.4 kJ PULSED
INDUCTIVELY COUPLED PLASMA DEVICE. ADVISOR: ASST. PROF. RATTACHAT
MONGKOLNAVIN, Ph.D., 107 pp.

A pulsed inductively coupled plasma device (PICP) is modified from a small fusion device. The PICP has been used in many applications as a short pulse plasma generation such as taken to operate in the surface improvement of non-thermal materials. In this research, PICP device has been constructed which the properties of a PICP device were studied as well as the plasma dynamics and the plasma properties. These parameters are useful for future development and study of small fusion devices. Rogowski coil was used to measure the discharge current, magnetic probe was used to measure the position of plasma and the plasma velocity and optical spectrometer was used to measure plasma electron temperature. Results from the experiment show the energy stored of 1.4, 2.4 and 4.32 kJ in the capacitor bank produced the discharge current of 256, 336 and 430 kA, respectively. When the 1.4 kJ energy is stored in capacitor bank, the maximum average velocity of Ar, O₂ and N₂ plasma are 2.4×10^4 , 3.5×10^4 and 4.2×10^4 m/s, respectively there were measured at 3.46 – 1.46 cm. from the centre of quartz tube. The Experiment shows when the molecular mass, the operating pressure and the displacement increases, then the velocity of plasma decreases. Results from the experiment were compared with results from the simulation models in order to understand the dynamics particularly the corresponding results of the velocity of plasma and the displacement. Furthermore, results from the simulation models show the electron temperature decreases with the operating pressure increases. The frequency of discharge current also affected the velocity of plasma.

Department :Physics.....

Student's Signature



Field of Study :Physics.....

Advisor's Signature



Academic Year :2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากบุคคลต่างๆที่ให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำทางด้านวิชาการและกำลังใจในการทำงาน

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยกระตุ้นเตือนในการทำงาน ให้ความรู้ความเข้าใจ ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ และแนวคิดในการทำงานที่เป็นตัวอย่างอันดีเสมอมา ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. เขาชาน วง อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมาลายา (University of Malaya) ที่ช่วยเหลือให้ความรู้เพิ่มเติมซึ่งเป็นประโยชน์กับงานวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. สมฤทธิ์ วงศ์มณีโรจน์ ที่ได้ป้อนเพาะ ชัดเกล้า และเป็นกำลังใจให้เสมอมา

ขอขอบคุณ พี่หลิวิ คุณดุสิต งามรุ่งโรจน์ ซึ่ง ถ่ายทอด ความรู้ ช่วยปูพื้นฐานในงานวิจัยและความช่วยเหลือต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณปรัชญา ตั้งจิตสมบุญณ์ ซึ่งให้การช่วยเหลืองานด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณพี่เอก คุณ เอกลักษณ์ จันทะ สำหรับกำลังใจในการทำงาน และขอบคุณเพื่อนๆที่ๆน้องๆแลปพลัสภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่อยู่ร่วมกันมาตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอบคุณ คุณสุรางค์ สุมนาวดีที่เป็นห่วงและคอยให้กำลังใจเสมอ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นห่วงและสนับสนุนด้วยดีเสมอมา รวมถึงขอขอบคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือแต่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ ณ ที่นี้.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย	4
บทที่ 2 เครื่องพีไอซีพี	5
2.1 ส่วนประกอบของเครื่องพีไอซีพี	5
2.2 กระบวนการเกิดพลาสมาภายในเครื่องพีไอซีพีและเครื่องที่ด้าพินซ์	7
2.3 อุปกรณ์สำคัญของเครื่องพีไอซีพี	9
2.3.1 ตัวเก็บประจุความจุสูงและเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง	9
2.3.2 สปาร์คแก๊ปสวิทช์ และอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์	11
2.3.3 ขดลวดรอบเดี่ยว	13
2.3.4 ท่อควอทซ์และปั๊มสุญญากาศ	13
บทที่ 3 แบบจำลองทางทฤษฎีของการแผ่รังสีและการเคลื่อนที่ของพลาสมา	16
3.1 แบบจำลองการแผ่รังสีของพลาสมา	17
3.1.1 แบบจำลองสมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่	20
3.2 แบบจำลองของวงจรของเครื่องพีไอซีพี	22
3.3 แบบจำลองทางทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของกระแสพลาสมา	26
บทที่ 4 การออกแบบ การสร้างเครื่องพีไอซีพี และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง	30
4.1 การออกแบบและการสร้างเครื่องพีไอซีพี	30

	หน้า
4.1.1 การออกแบบและสร้างภาชนะสุญญากาศ	33
4.1.2 การออกแบบและสร้างสปาคเก็บสวิตช์	35
4.1.3 การออกแบบและสร้างขดลวดรอบเดียว	38
4.1.4 การสร้างเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง	41
4.1.5 การใช้งานเครื่องพีไอซีพี	44
4.2 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง	46
4.2.1 ขดลวดโรโกวสกี (Rogowski coil)	46
4.2.2 หัววัดสนามแม่เหล็ก (Magnetic probe)	52
4.2.3 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Optical Emission Spectroscopy : OES)	60
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	65
5.1 การวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรของเครื่องพีไอซีพี	66
5.2 การวัดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในเครื่องพีไอซีพี	70
5.3 การวัดค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนภายในเครื่องพีไอซีพี	83
บทที่ 6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	91
6.1 สมบัติของเครื่องพีไอซีพี	91
6.2 สมบัติของพลาสมาจากเครื่องพีไอซีพี	91
6.2.1 ความเร็วของพลาสมา	91
6.2.2 อุณหภูมิอิเล็กตรอน	92
6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต	92
รายการอ้างอิง	94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	97

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
5.1	ผลการหาตัวแปร K ที่ได้จากวงจรเสมือน	66
5.2	ผลการหากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรและช่วงเวลาการคายประจุ	67
5.3	รายละเอียดของตัวเก็บประจุของเครื่องพีไอซีพีและเครื่องที่ดำพินซ์	68
5.4	ผลการวัดเวลาที่พลาสติกเคลือบที่เคลื่อนที่มาถึงถ. ตำแหน่ง 3.46, 2.46 และ 1.46 เซนติเมตร	71
5.5	ผลการหาความเร็วเฉลี่ยของพลาสติกระหว่างตำแหน่ง 3.46 ถึง 2.46 เซนติเมตร และ 2.46 ถึง 1.46 เซนติเมตร	80
5.6	ผลการหาค่าอุณหภูมิเล็กตรอนของพลาสติกจากก๊าซอาร์กอน	83
5.7	ผลการหาค่าอุณหภูมิเล็กตรอนของพลาสติกจากก๊าซไนโตรเจน	83
5.8	ผลการหาค่าอุณหภูมิเล็กตรอนของพลาสติกจากก๊าซออกซิเจน	83

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ภาพเครื่องที่ตัดาพินซ์	5
2.2	แผนภาพแสดงการประกอบอุปกรณ์ของเครื่องพีไอซีพี	6
2.3	แผนภาพแสดงการเกิดพลาสมาภายในเครื่องพีไอซีพีและที่ตัดาพินซ์	7
2.4	แผนภาพแสดงทิศทางการกระแสไฟฟ้า กระแสพลาสมา และสนามแม่เหล็ก	8
2.5	ภาพของตัวเก็บประจุความจุสูงของเครื่องพีไอซีพีและเครื่องที่ตัดาพินซ์	9
2.6	รูปวาดแสดงวงจรการต่อตัวเก็บประจุ	10
2.7	วงจรของเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง	10
2.8	แบบร่างแสดงส่วนประกอบของสปาร์คแก๊ปสวิทช์	11
2.9	แผนภาพแสดงการต่อสปาร์คแก๊ปสวิทช์เข้ากับวงจรของเครื่องที่ตัดาพินซ์	12
2.10	แบบร่างแสดงขนาดของขดลวดรอบเดียว	13
2.11	รูปวาดแสดงขนาดของท่อควอทซ์	14
2.12	แผนภาพแสดงการต่อท่อควอทซ์เข้ากับอุปกรณ์ต่าง	14
3.1	รูปวาดแสดงวงจรของเครื่องพีไอซีพี	22
3.2	แผนภาพแสดงสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้า I_c ที่ไหลในวงจร	23
3.3	แผนภาพแสดงแบบจำลองสลักแสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาภายในเครื่องพีไอซีพี	26
4.1.1	แผนภาพของเครื่องพีไอซีพีตามแบบเสนออนุมัติโครงการวิทยานพนธ์	31
4.1.2	แบบร่างแสดงการจัดวางภาชนะสุญญากาศเหนือตัวเก็บประจุ	32
4.1.3	แผนภาพแสดงภาชนะสุญญากาศ	33
4.1.4	ภาพฝาปิดท่อควอทซ์ในการสร้างภาชนะสุญญากาศ	34
4.1.5	แบบร่างสปาร์คแก๊ปสวิทช์	36
4.1.6	ภาพสปาร์คแก๊ปเมื่อทำการติดตั้งแล้วเสร็จ	37
4.1.7	แบบร่างของขดลวดรอบเดียว	39
4.1.8	ภาพขดลวดรอบเดียวที่สร้างและทำการติดตั้งแล้วเสร็จ	40
4.1.9	ภาพข้อต่อสำหรับใช้เป็นทางเดินของกระแสไฟฟ้า	40
4.1.10	วงจรเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง	41

ภาพที่	หน้า	
4.1.11	วงจรรีเลย์ทรานซิสทริกเกอร์	41
4.1.12	ภาพเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง	42
4.1.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ลดทอนจากตัวเก็บประจุและความต่างศักย์ที่ตัวเก็บประจุขณะทำการชาร์จ	42
4.1.14	ภาพเครื่องฟิวส์ฟิวส์ที่ทำการสร้างแล้วเสร็จ	43
4.1.15	ภาพแสดงรายละเอียดของเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง	44
4.1.16	กราฟแสดงควมดันสูงสุดที่สามารถเกิดพลาสมาจากก๊าซไนโตรเจนที่พลังงานต่างๆของเครื่องฟิวส์ฟิวส์	45
4.2.1	รูปวาดขวดลวดโรโกวสกี	46
4.2.2	รูปวาดการต่อขดลวดโรโกวสกีรอบขั้วไฟฟ้า	47
4.2.3	ภาพขดลวดโรโกวสกีที่ใช้ในการทดลอง	47
4.2.4	ภาพการต่อขดลวดโรโกวสกีรอบขั้วไฟฟ้าในการทดลองจริง	48
4.2.5	รูปวาดวงจรเพื่อใช้วัดสัญญาณ	48
4.2.6	ภาพการต่อสายสัญญาณจากภายนอกเข้าสู่ออสซิลโลสโคป	49
4.2.7	วงจรเสมือน	50
4.2.8	รูปแสดงสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ขดลวดโรโกวสกี	50
4.2.9	แผนภาพแสดงการจัดวางหัววัดสนามแม่เหล็ก	52
4.2.10	รูปวาดหัววัดสนามแม่เหล็ก	53
4.2.11	แผนภาพแสดงการจัดวางหัววัดสนามแม่เหล็ก	53
4.2.12	ภาพการจัดวางหัววัดสนามแม่เหล็กในการทดลอง	53
4.2.13	ภาพสัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็กที่ออสซิลโลสโคป	54
4.2.14	ภาพสัญญาณที่วัดได้จากหัววัดสนามแม่เหล็ก	55
4.2.15	วงจรการต่อขดลวดคอปเปอร์ไดโอด	56
4.2.16	ภาพการติดตั้งขดลวดคอปเปอร์ไดโอด	56
4.2.17	ภาพแสดงสัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็กและขดลวดคอปเปอร์ไดโอด	57
4.2.18	ภาพขยายของสัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็ก	58
4.1.19	ภาพสัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็กที่ปรากฏในออสซิลโลสโคป	59
4.2.20	ภาพการจัดวางเครื่องสเปคโตรสโคปีในการทดลอง	60
4.2.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสง	61

ภาพที่		หน้า
4.2.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเล็กตรอน และค่า R	63
4.2.23	แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณหาค่าอุณหภูมิเล็กตรอน	64
5.1	แผนภาพการทดลองด้วยเครื่องมือทั้ง 3 ชนิด	65
5.2	รูปแสดงค่าที่ทำกรวัดในสัญญาณจากขดลวดโลโกวสกีที่วัดจากวงจรเสมือน	66
5.3	กราฟความสัมพันธ์ของพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุและกระแสไฟฟ้า ที่ไหลในวงจร	67
5.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ กับเวลาในการคายประจุ	68
5.5	กราฟแสดงสัญญาณจากขดลวดโรโกวสกี	69
5.6	แผนภาพการจัดวางหัววัดสนามแม่เหล็กและระยะที่วัดจากศูนย์ท่อควอทซ์	70
5.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหัววัดและระยะจากจุดศูนย์กลาง ท่อควอทซ์ของพลาสติกมาจากก๊าซอาร์กอนในเครื่องพีไอซีพีขนาด 1.4 kJ	72
5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหัววัดและระยะจากจุดศูนย์กลาง ท่อควอทซ์ของพลาสติกมาจากก๊าซออกซิเจนในเครื่องพีไอซีพีขนาด 1.4 kJ	72
5.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหัววัดและระยะจากจุดศูนย์กลาง ท่อควอทซ์ของพลาสติกมาจากก๊าซไนโตรเจนในเครื่องพีไอซีพีขนาด 1.4 kJ	73
5.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหัววัดและระยะจากจุดศูนย์กลาง ท่อควอทซ์ของพลาสติกมาจากก๊าซสามชนิดในเครื่องพีไอซีพีขนาด 1.4 kJ	73
5.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงตำแหน่ง 1.64 เซนติเมตรจากจุด ศูนย์กลางท่อควอทซ์ของพลาสติกมาจากก๊าซสามชนิด	74
5.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหัววัดและระยะจากจุดศูนย์กลาง ท่อควอทซ์ของพลาสติกมาจากก๊าซอาร์กอนในเครื่องพีไอซีพีพลังงานต่างๆ	75
5.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหัววัดและระยะจากจุดศูนย์กลาง ท่อควอทซ์ของพลาสติกมาจากก๊าซออกซิเจนในเครื่องพีไอซีพีพลังงานต่างๆ	75
5.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหัววัดและระยะจากจุดศูนย์กลาง ท่อควอทซ์ของพลาสติกมาจากไนโตรเจนในเครื่องพีไอซีพีพลังงานต่างๆ	76
5.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าในวงจรและเวลา	77
5.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าในวงจรและเวลาหลังจากการปรับ ค่าตัวแปร	77

ภาพที่		หน้า
5.17	กราฟแสดงตำแหน่งของพลาสมาจากแบบจำลองทางทฤษฎีของพลาสมาจาก ก๊าซอาร์กอนความดัน 2 ปาสคาล จากเครื่องพีไอซีพี ขนาด 1.4 กิโลจูล	78
5.18	กราฟแสดงตำแหน่งของพลาสมาจากแบบจำลองทางทฤษฎีของพลาสมาจาก ก๊าซออกซิเจนที่ความดัน 5 ปาสคาล จากเครื่องพีไอซีพี ขนาด 2.4 กิโลจูล	78
5.19	กราฟแสดงตำแหน่งของพลาสมาจากแบบจำลองทางทฤษฎีของพลาสมาจาก ก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 2 ปาสคาลจากเครื่องพีไอซีพี ขนาด 4.32 กิโลจูล	79
5.20	กราฟแสดงความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของพลาสมาซีท ระหว่าง 3.46 - 2.46 เซนติเมตร และระหว่างช่วง 2.46 - 1.46	81
5.21	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยของพลาสมาและความดันของก๊าซทั้งสาม จากเครื่องพีไอซีพีขนาด 1.4 กิโลจูล	82
5.22	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยของพลาสมาและความดันของก๊าซทั้งสาม จากเครื่องพีไอซีพีขนาด 4.32 กิโลจูล	83
5.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิเล็กตรอนจากเครื่อง พีไอซีพีที่ทำงานโดยใช้พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ 1.4 กิโลจูล	84
5.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิเล็กตรอนจากเครื่อง พีไอซีพีที่ทำงานโดยใช้พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ 2.4 กิโลจูล	84
5.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิเล็กตรอนจากเครื่อง พีไอซีพีที่ทำงานโดยใช้พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ 4.32 กิโลจูล	85
5.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิเล็กตรอนจากเครื่อง ที่ดำพินซ์ที่ทำงานโดยใช้พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ 2.4 กิโลจูล	85
5.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิเล็กตรอนของ พลาสมาจากก๊าซอาร์กอนที่กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพีที่ และเครื่องที่ดำพินซ์	86
5.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิเล็กตรอนของ พลาสมาจากก๊าซไนโตรเจนที่กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพีที่ และเครื่องที่ดำพินซ์	86
5.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิเล็กตรอนของ พลาสมาจากก๊าซออกซิเจนที่กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพีที่ และเครื่องที่ดำพินซ์	87
5.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิเล็กตรอนของ พลาสมาจากก๊าซอาร์กอนของเครื่องพีไอซีพีที่ได้จากแบบจำลอง	88

ภาพที่		หน้า
5.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิเล็กตรอนของ พลาสมาจากก๊าซออกซิเจนของเครื่องพีไอซีพีที่ได้จากแบบจำลอง	89
5.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิเล็กตรอนของ พลาสมาจากก๊าซไนโตรเจนของเครื่องพีไอซีพีที่ได้จากแบบจำลอง	89



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของงานวิจัย

โดยทั่วไปคนเราจะรู้จักสสารต่างๆว่ามีอยู่ด้วยกันสามสถานะ คือ สถานะของแข็ง สถานะของเหลว และสถานะก๊าซ กล่าวคือ หากสสารหนึ่งๆเริ่มต้นอยู่ในสถานะของแข็ง เมื่อได้รับความร้อนปริมาณมากพอ ก็จะเกิดการหลอมละลายและเปลี่ยนสถานะไปเป็นของเหลว ซึ่งก็คืออยู่ในสถานะของเหลว และเมื่อของเหลวยังคงได้รับความร้อนมากพอก็จะกลายเป็นไอ คืออยู่ในสถานะก๊าซ ซึ่งเป็นสถานะสุดท้ายที่เรารู้จักกันโดยทั่วไป แต่หากก๊าซหรือไอของสสาร ยังคงได้รับพลังงานเพียงพอ ก๊าซก็จะแตกตัวกลายเป็นประจุ กล่าวคือหากให้พลังงานปริมาณมากพอ สสารสามารถเปลี่ยนจากสถานะ จากสถานะก๊าซ มาเป็นสถานะก๊าซที่มีประจุไฟฟ้า กลุ่มก๊าซที่มีประจุเหล่านี้ เรียกว่า พลาสมา

พลาสมา คือกลุ่มก๊าซที่ดำรงสภาพมีทั้งอนุภาคที่เป็นประจุบวกหรือไอออน อิเล็กตรอน และอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า รูปแบบการให้พลังงานแก่สสารเพื่อให้แตกตัวกลายเป็นพลาสมา นั้น สามารถทำได้หลายวิธีการ อาทิเช่น การใช้สนามไฟฟ้า , การใช้คลื่นไมโครเวฟ, การใช้เลเซอร์, และอีกหนึ่งในวิธีการกำเนิดพลาสมาคือการใช้ สนามแม่เหล็ก[1] การที่พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า ทำให้พลาสมาสามารถนำไฟฟ้าได้ดี และมีอันตรกิริยากับสนามแม่เหล็ก จึงสามารถใช้สนามแม่เหล็กควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของพลาสมาได้

เครื่อง ที่ต้าพินช์ (Theta Pinch) คือเครื่องกำเนิดพลาสมาโดยอาศัยสนามแม่เหล็กและควบคุมพลาสมาให้เคลื่อนที่มาบีบอัดกัน(Pinch) จนเกิดเป็นปฏิกริยานิวเคลียร์ฟิวชันในห้วงเวลาสั้นๆ แล้วปลดปล่อยรังสีและอนุภาคต่างๆออกมา ในอดีตเครื่อง ที่ต้าพินช์ จึงถูกใช้ในงานศึกษาวิจัยนิวเคลียร์ฟิวชัน ที่ต้าพินช์เป็นเครื่องกำเนิดและควบคุมพลาสมาที่จัดอยู่ในกลุ่มของเครื่องลิเนียร์พินช์ [3] (Linear Pinch Device) ซึ่งเครื่องในกลุ่มนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะคือ แซดพินช์(Z-Pinch) และ ที่ต้าพินช์(Theta-Pinch) โดยชื่อของเครื่องทั้งสอง เรียกตามทิศทางการเคลื่อนที่พลาสมาเป็นกระแสพลาสมาที่เกิดภายในเครื่องตามทิศ Z และทิศ θ ในระบบพิกัดทรงกระบอก ตามลำดับ เครื่องทั้งสองถือเป็นต้นแบบของเครื่องกำเนิดนิวเคลียร์ฟิวชัน ที่ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นจนเกิดเป็นเครื่องรุ่นต่อๆมาที่มีชื่อคุ้นเคยกันดีได้แก่ เครื่องโทคา

มาค(Tokamak)[1,3], เครื่องสเทลลาเรเตอร์ (Stellarator)[1,3], ฯลฯ แต่การใช้งานเครื่องที่ต่ำพินซ์ มาศึกษาวิจัยควบคุมพลาสมาให้เกิดเป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันนั้น จำเป็นต้องใช้พลังงานที่สูงมาก ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากพลาสมาที่เครื่องที่ต่ำพินซ์สร้างขึ้น โดยการใช้พลาสมาที่อยู่ในช่วงกำลังถูกบีบอัดแต่ไม่ถึงกับหลอมรวมกันเป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน กล่าวคือไม่เกิดการ ฟินซ์ มาใช้กับงานหลายด้าน และกระบวนการดังกล่าวไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานมากเท่ากับกระบวนการเกิดนิวเคลียร์ฟิวชัน จึงสามารถเรียกเครื่องกำเนิดพลาสมาโดยอาศัยสนามแม่เหล็ก และควบคุมพลาสมาให้เคลื่อนที่วนเป็นกระแสตามทิศ θ แล้วบีบเข้ามาตามแนวรัศมี แต่ไม่เกิดการฟินซ์นี้ว่า **เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบห้วงชนิดคู่ควบเหนี่ยวนำ (PULSED INDUCTIVELY COUPLED PLASMA DEVICE: PICP) หรือ พีไอซีพี**

ปัจจุบัน มีการนำ เครื่องที่ต่ำพินซ์หรือเครื่องพีไอซีพี มาปรับปรุง ไปใช้ในการศึกษาวิจัยหลายด้าน อาทิเช่น ใช้ในการทำฟิล์มบาง ,เคลือบผิวหน้าวัสดุ และโดยเฉพาะการนำมาใช้งานด้าน การปรับปรุงพื้นผิววัสดุ [2] โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่บางชนิดที่พื้นผิวของวัสดุ (surface functional group) เพื่อให้วัสดุมีสมบัติที่ดีขึ้น ซึ่งเครื่องชนิดนี้ยังเหมาะกับการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของวัสดุที่ไม่ทนความร้อน เนื่องจากพลาสมาที่เกิดจากเครื่องชนิดนี้มีทิศทางพุ่งเข้ามาตามแนวรัศมีที่แน่นอน พลาสมาจึงสามารถลงไปเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลที่ผิววัสดุเป็นหมู่ฟังก์ชันใหม่ได้ลึกกว่าพลาสมาที่เกิดจากเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบต่อเนื่องทั่วไป และกระบวนการทั้งหมดเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นมาก จึงไม่เกิดการสะสมของความร้อนที่มากเกินไปบนพื้นผิววัสดุ

จะเห็นว่าเครื่องพีไอซีพีสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน แต่ยังคงต้องใช้พลังงานที่สูงในการกำเนิดพลาสมา ซึ่งถือเป็นข้อด้อยของเครื่องชนิดนี้และเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้งานด้านต่างๆรวมถึงใช้งานในระดับอุตสาหกรรม จึงเกิดแนวคิดที่จะสร้างเครื่องพีไอซีพีที่สามารถทำงานได้โดยใช้พลังงานที่น้อยลง แต่การสร้างเครื่องพีไอซีพีที่มีตัวแปรต่างๆแตกต่างจากเครื่องที่ต่ำพินซ์นั้น ย่อมส่งผลทำให้สมบัติเครื่อง และสมบัติของพลาสมาจากเครื่อง นั้นแตกต่างกันด้วย และความรู้ที่ได้รับยังเป็นพื้นฐานที่มีประโยชน์ในการพัฒนา และศึกษาเครื่องกำเนิดปฏิกิริยาฟิวชันในอนาคต

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบและสร้างเครื่องพีไอซีพี แล้วศึกษาสมบัติของเครื่องและสมบัติของพลาสมาที่กำเนิดจากเครื่องที่สร้างขึ้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการสร้างอุปกรณ์ในการวัดสมบัติของเครื่องพีไอซีพีได้แก่ ขดลวดโรโกวสกี (Rogowski Coil) เพื่อวัดกระแสที่ไหลภายในเครื่องพีไอซีพี และทำการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Probe) เพื่อวัดการเคลื่อนที่ของพลาสมา และใช้สเปคโตรมิเตอร์ (Optical Emission Spectrometer) เพื่อวัดอุณหภูมิ

อิเล็กทรอนิกส์ ผลที่ได้จากการวัดการเคลื่อนที่ของพลาสมาจะถูกนำไปใช้ร่วมกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎี และเปรียบเทียบกับผลจากเครื่องที่ดำพินซ์ที่วัดด้วยวิธีการเดียวกัน ข้อมูลต่างๆที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการนำเครื่องพีไอซีพีไปประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและสร้างเครื่องพีไอซีพี
2. ศึกษาสมบัติของเครื่องและสมบัติของพลาสมาที่กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพีที่สร้างขึ้น
3. เปรียบเทียบแนวโน้มของสมบัติพลาสมากับแบบจำลองทางทฤษฎี และเปรียบเทียบกับสมบัติดังกล่าวที่ได้จากเครื่องที่ดำพินซ์ เพื่อให้ได้มาซึ่งองค์ความรู้ที่จะเป็นพื้นฐานในการปรับปรุง แก้ไข และพัฒนาเครื่องพีไอซีพี ไปใช้กับงานวิจัยด้านอื่นๆต่อไป

1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

ศึกษากระบวนการเกิดพลาสมาและหลักการทํางานต่างๆของเครื่องพีไอซีพี แล้วทำการออกแบบและสร้างเครื่องพีไอซีพี จากนั้นศึกษาสมบัติของเครื่องที่สร้างขึ้นโดยทำการสร้างขดลวดโลโกวสกี เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในเครื่อง และศึกษาสมบัติของพลาสมาจากเครื่องพีไอซีพี โดยทำการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กเพื่อวัดการเคลื่อนที่ของพลาสมาภายในเครื่อง และใช้สเปคโตรมิเตอร์เพื่อหาค่าอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์ ศึกษาแบบจำลองทางทฤษฎี แล้วหาสมบัติของพลาสมาจากการคำนวณโดยวิธีการเชิงตัวเลขตามแบบจำลองทางทฤษฎี แล้วเปรียบเทียบกับผลการหาสมบัติของเครื่องและสมบัติของพลาสมาที่ศึกษาด้วยวิธีการเดียวกันจากเครื่องที่ดำพินซ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 ได้เครื่อง PICP ที่สามารถกำเนิดพลาสมา โดยใช้พลังงาน 1.4 kJ.
- 2 ได้รับความรู้ ความเข้าใจในระบบการทำงานของเครื่องพีไอซีพี รวมถึงกระบวนการเกิดและสมบัติของพลาสมา ภายในเครื่อง และได้องค์ความรู้ที่จะสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงพัฒนาเครื่องพีไอซีพี และประยุกต์เครื่องพีไอซีพีไปใช้กับงานวิจัยด้านอื่นๆต่อไป
- 3 ได้รับความรู้เกี่ยวกับเครื่องมือวัดที่ใช้วัดสมบัติของเครื่อง และสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องพีไอซีพี

1.5 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท โดยในบทที่ 1 ได้กล่าวถึง แนวเหตุผล วัตถุประสงค์ วิธีดำเนินการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงเครื่องพีไอซีพีซึ่งใช้เครื่องที่ด้าพินซ์เป็นต้นแบบในการสร้าง บทที่ 3 เป็นส่วนของแบบจำลองทางทฤษฎีซึ่งจะเป็น แบบจำลองทางทฤษฎีของวงจรเครื่อง พีไอซีพี และแบบจำลองทางทฤษฎีการเคลื่อนที่ของ กระแสพลาสมา บทที่ 4 เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องพีไอซีพี ในบทนี้จะแบ่งเป็นส่วนของการสร้างส่วนประกอบสำคัญของเครื่องพีไอซีพี และส่วนของเครื่องมือวัดรวมถึงวิธีการใช้เครื่องมือวัด ในการทดลอง บทที่ 5 เป็นส่วนของผลการทดลอง โดยจะแสดงผลการทดลองหาสมบัติของเครื่อง และสมบัติของพลาสมาจากเครื่องพีไอซีพีร่วมกับผลที่ได้จากเครื่องที่ด้าพินซ์เพื่อเปรียบเทียบกัน และบทที่ 6 เป็นการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

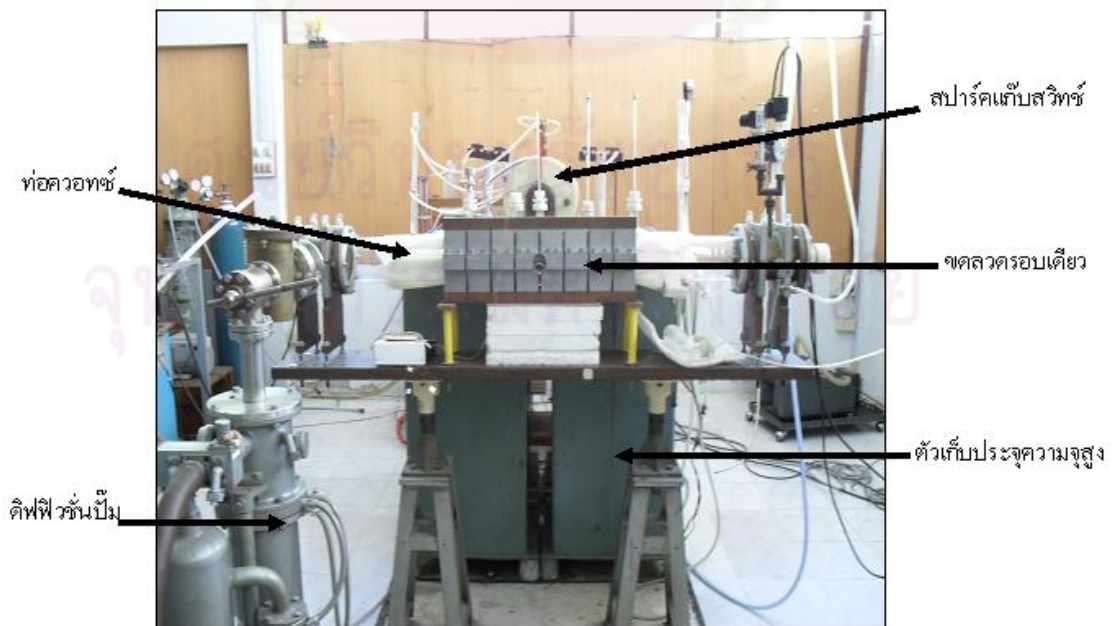
บทที่ 2

เครื่องพีไอซีพี

วิทยานิพนธ์เรื่องนี้เป็น การออกแบบและการสร้าง เครื่อง กำเนิด พลาสมา แบบห้อง ชนิด ควบคุมเหนี่ยวนำขนาด 1.4 กิโลจูล หรือเครื่องพีไอซีพีที่สามารถกำเนิดพลาสมาด้วยพลังงานที่เก็บสะสมในตัวเก็บประจุขนาด 1.4 กิโลจูล การสร้างเครื่องพีไอซีพีในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เครื่องที่ดำพินซ์เป็นต้นแบบ จึงควรมีความรู้ความเข้าใจในระบบการทำงาน กระบวนการเกิดพลาสมา รวมถึงอุปกรณ์สำคัญต่างๆในเครื่องที่ดำพินซ์ บทนี้จึงขอกกล่าวถึงส่วนประกอบและการทำงานของพีไอซีพีซึ่งจะอุปกรณ์หลักเช่นเดียวกับเครื่องที่ดำพินซ์ โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อหลักคือ ส่วนประกอบหลักของเครื่องพีไอซีพี กระบวนการเกิดพลาสมาภายในเครื่องพีไอซีพีและเครื่องที่ดำพินซ์ และอุปกรณ์หลักของเครื่องพีไอซีพี

2.1 ส่วนประกอบของพีไอซีพี

เครื่องพีไอซีพีมีส่วนประกอบหลักเช่นเดียวกับเครื่องที่ดำพินซ์ โดยเครื่องที่ดำพินซ์ที่ใช้เป็นต้นแบบเพื่อศึกษากระบวนการทำงาน อยู่ที่กลุ่มวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและนิวเคลียร์ฟิวชั่น ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นเครื่องที่ได้รับมอบจาก Asian African Association for Plasma Training (AAAPT) มีลักษณะดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ภาพเครื่องที่ดำพินซ์[1]

การทำงานของเครื่องฟิวส์เพื่อกำเนิดพลาสมาประกอบด้วย 4 ส่วนหลักๆคือ

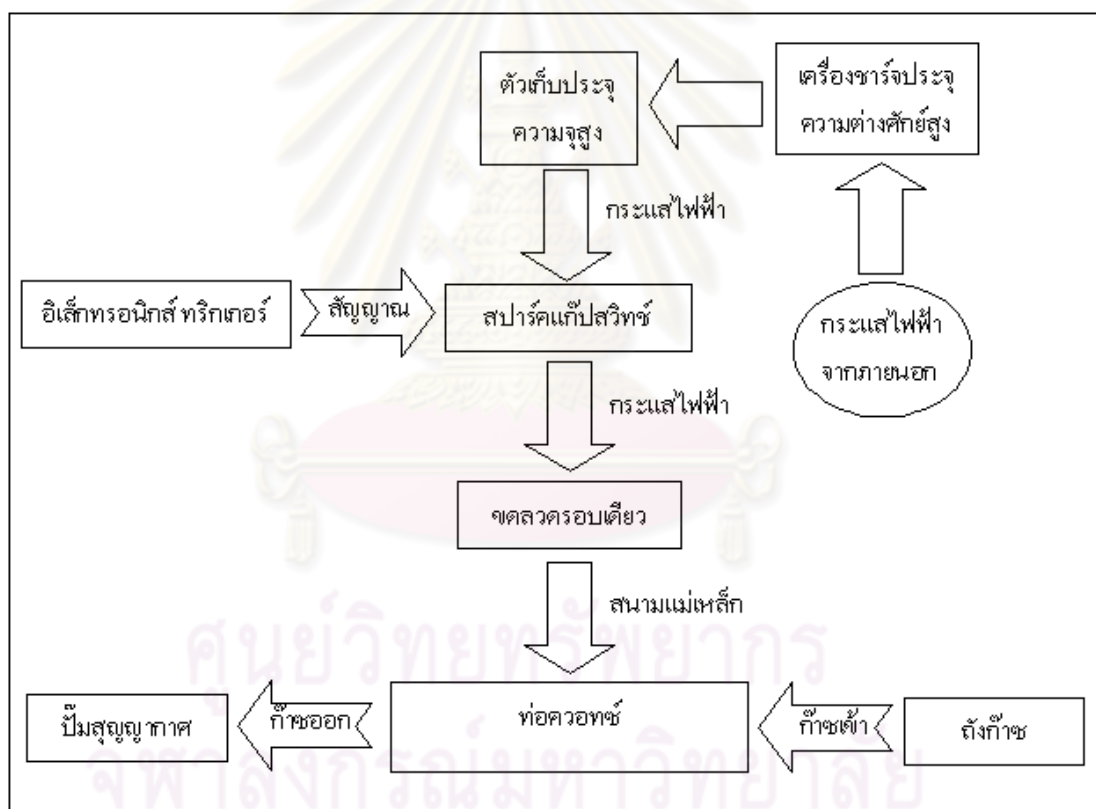
1 ส่วนเก็บสะสมประจุ ประกอบด้วยเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง(High Voltage Charger) และตัวเก็บประจุความจุสูง(Capacitor Bank)

2 ส่วนควบคุมการปล่อยประจุ ประกอบด้วย สปาร์กแก๊ปสวิตช์(Spark Gap Switch)และอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์(Electronics Trigger)

3 ส่วนที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ประกอบด้วย ขดลวดรอบเดี่ยว(Single Turn Coil)

4 ส่วนระบบสุญญากาศ ประกอบด้วย ภาชนะสุญญากาศคือ ท่อควอทซ์(Quartz Tube) และปั๊มสุญญากาศ(Vacuum Pump)

ส่วนประกอบต่างๆเขียนเป็นแผนผังดังรูปที่ 2.2



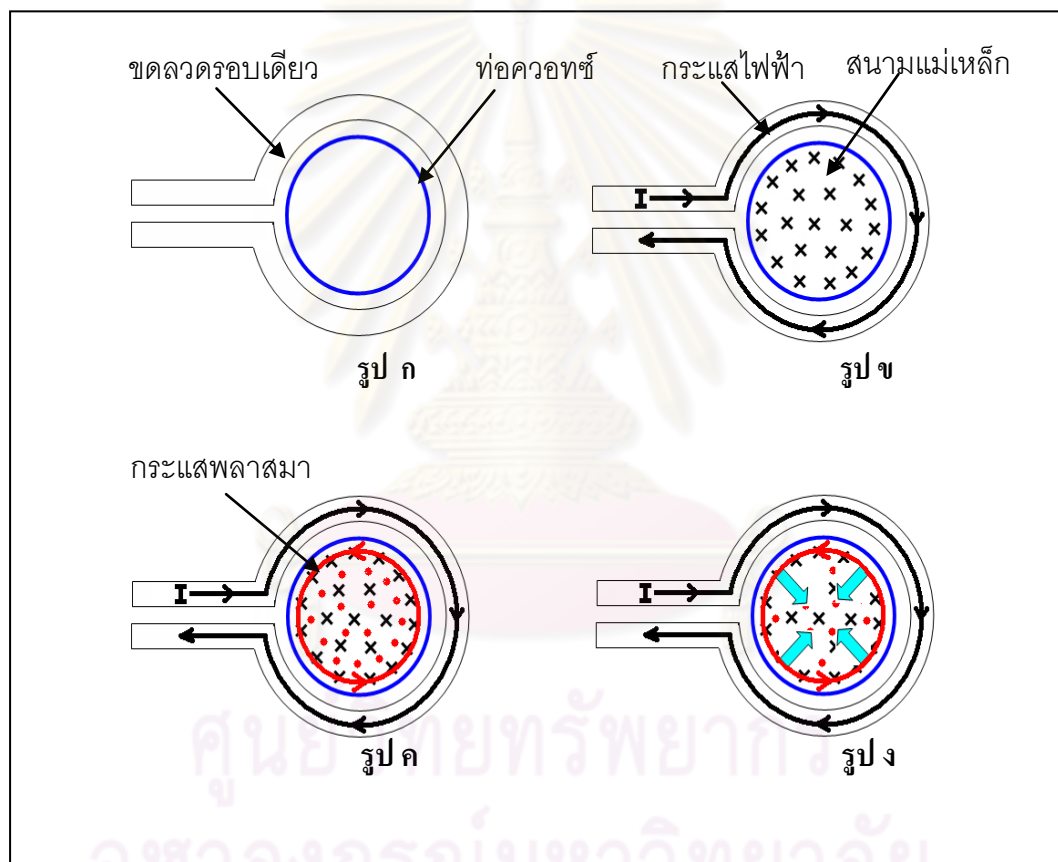
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องฟิวส์

ขั้นตอนการทำงานของเครื่องฟิวส์เริ่มต้นจาก ทำการเก็บประจุ ด้วยเครื่องชาร์จประจุ ความต่างศักย์สูงชาร์จประจุมาเก็บสะสมไว้ในตัวเก็บประจุความจุสูง หลังจากนั้นทำการปล่อย ประจุโดยจ่ายสัญญาณแบบห้วงจากอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์ไปยังสปาร์กแก๊ปสวิตช์ ทำให้ประจุไหล ออกจากตัวเก็บประจุผ่านสปาร์กแก๊ปสวิตช์ในครั้งเดียว ประจุจำนวนมหาศาลที่ถูกปล่อยจากตัว

เก็บประจุความจุสูงในช่วงเวลาสั้นๆ จะเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าปริมาณสูงไหลผ่านสปาร์คแก๊ปสวิตช์ไปยังขดลวดรอบเดี่ยวและเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ก๊าซในภาชนะสุญญากาศก็จะแตกตัวกลายเป็นพลาสมา

2.2 กระบวนการเกิดพลาสมาภายในเครื่องพีไอซีพีและเครื่องที่ดำพินซ์

พลาสมาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องพีไอซีพีจะถูกบีบอัดด้วยแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำจากกระแสไฟฟ้า ขั้นตอนเกิดและบีบอัดพลาสมาภายในเครื่องพีไอซีพีอย่างละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการเกิดพลาสมาภายในเครื่องพีไอซีพีและที่ดำพินซ์

ลำดับขั้นการเกิดพลาสมาภายในเครื่องพีไอซีพีเริ่มจากรูป ก , รูป ข, รูป ค และรูป ง ตามลำดับดังนี้

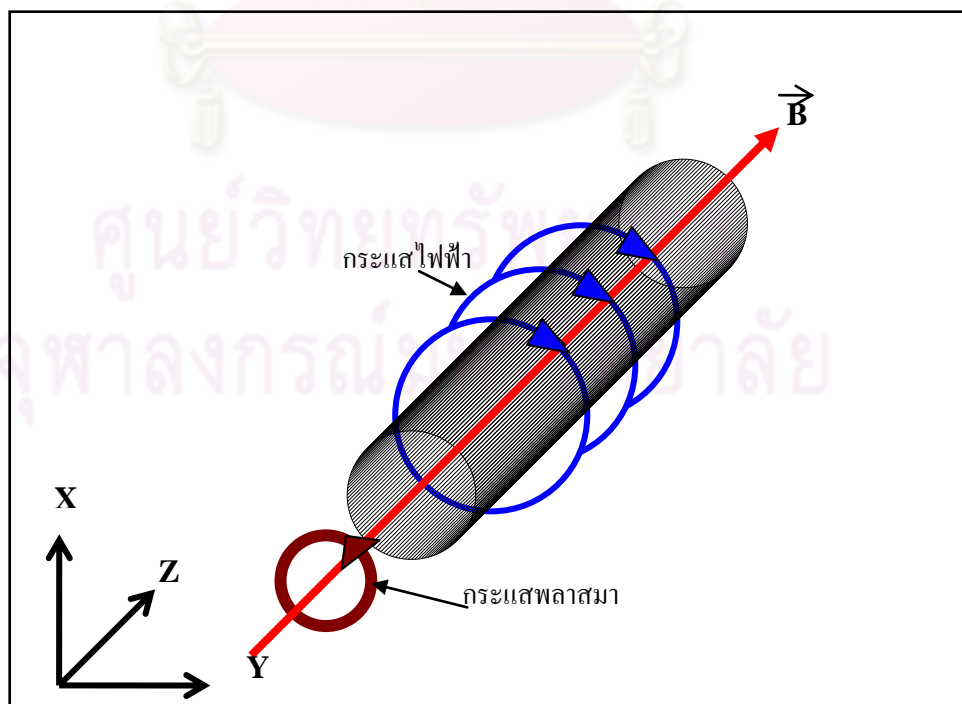
รูป ก แสดงภาคตัดขวางของขดลวดรอบเดี่ยว และท่อควอทซ์ ซึ่งภายในท่อควอทซ์ถูกดูดอากาศออกให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศและใส่ก๊าซที่ต้องการทำให้เกิดพลาสมา

รูป ข เมื่อกระแสไฟฟ้าถูกปล่อยผ่านสปาร์กแก๊ปสวิทช์เข้ามายังขดลวดรอบเดียว ก็จะทำให้เหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก

รูป ค ตามกฎของเลนส์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายในระบบ ระบบจะปรับตัวเพื่อต้านการเปลี่ยนแปลงนั้น โดยก๊าซในภาชนะสุญญากาศจะแตกตัวเป็นพลาสมาและฟอร์มตัวเป็นกระแสพลาสมา หากกระแสไฟฟ้าภายนอกเพิ่มขึ้น กระแสพลาสมาจะไหลวนในทิศตรงข้ามกับกระแสภายนอก เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กต้านสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสภายนอก

รูป ง กระแสพลาสมา เมื่อเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสภายนอกก็จะเกิดแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก (แรงลอเรนซ์) กระทำให้เคลื่อนที่เข้ามาตามแนวรัศมี แต่หากพลังงานมากพอ พลาสมาจะเคลื่อนที่เข้ามาจนหลอมรวมที่จุดศูนย์กลาง เรียกว่าเกิดการ ฟินช์ ซึ่งเป็นการปรากฏการณ์ที่เกิดภายในเครื่องที่ดำพินช์

การที่พลาสมาถูกบีบเข้ามาได้ลึกเท่าไร หรือจนมาหลอมรวมกันเป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันได้นั้นต้องอาศัยสนามแม่เหล็กความเข้มสูงซึ่งแปรผันโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดรอบเดียว จึงต้องทำการสะสมประจุจนมีปริมาณสูงแล้วปล่อยออกมาในทีเดียว เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าปริมาณสูงออกมาเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงนั่นเอง หากมองในระบบพิกัดทรงกระบอก จะเห็นว่า กระแสพลาสมาที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ในทิศ θ และเป็นที่มาในการเรียกเครื่องกำเนิดพลาสมาชนิดนี้ว่า ที่ดำพินช์ พิจารณาได้จากรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงทิศทางกระแสไฟฟ้า กระแสพลาสมา และสนามแม่เหล็ก

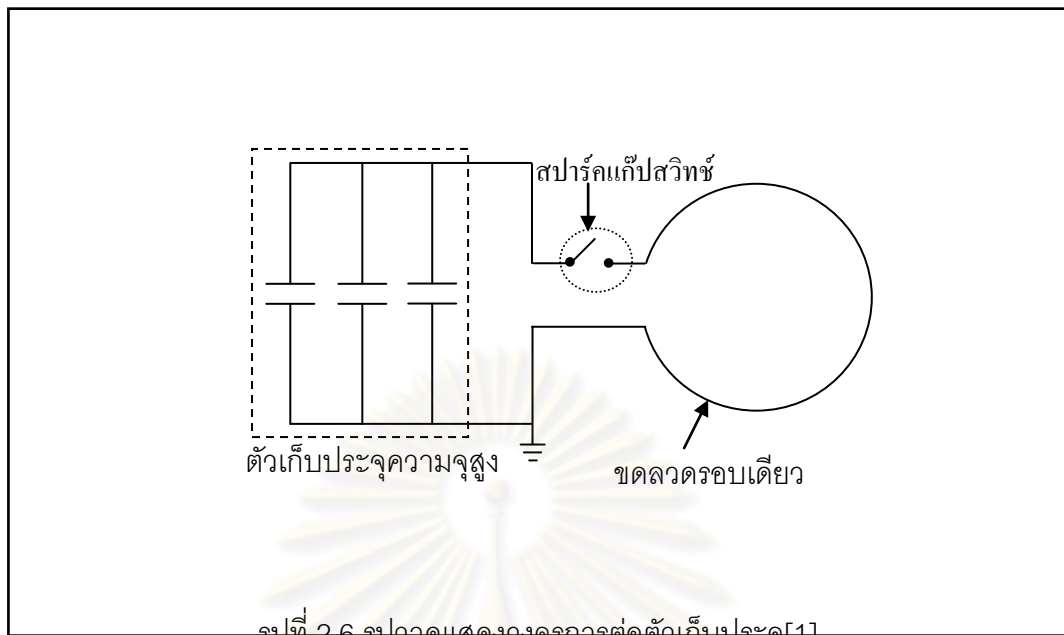
2.3 อุปกรณ์สำคัญของเครื่องพีไอซีพี

2.3.1 ตัวเก็บประจุความจุสูงและเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง

ตัวเก็บประจุความจุสูงคือ ส่วนเก็บประจุพีไอซีพี เพื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าปริมาณสูงออกมาเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก สำหรับตัวเก็บประจุความจุสูงที่จะใช้กับเครื่องพีไอซีพีเป็นตัวเก็บประจุขนาด 30 ไมโครฟารัด ที่สามารถรับความต่างศักย์ในการชาร์จประจุได้ 20 กิโลโวลต์ 2 ตัวต่อขนานกันรวมเป็น 60 ไมโครฟารัด ขณะที่ตัวเก็บประจุความจุสูงของเครื่องที่ด้าพินซ์มีขนาด 4 ไมโครฟารัด ที่สามารถรับความต่างศักย์ในการชาร์จประจุได้ถึง 40 กิโลโวลต์ จำนวน 3 ตัวต่อกันแบบขนานรวมเป็น 12 ไมโครฟารัด ดังรูปที่ 2.6

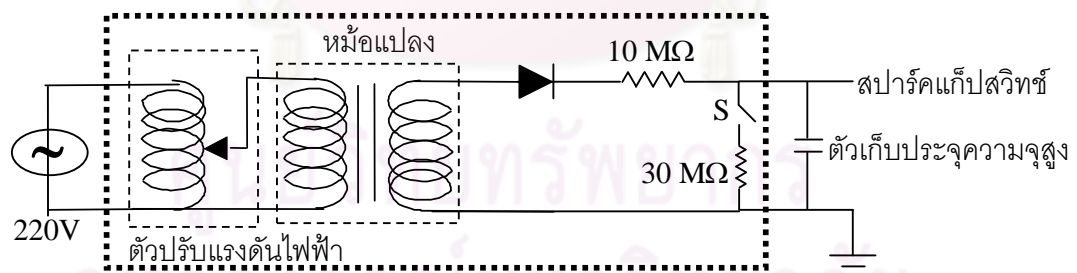


รูปที่ 2.5 ภาพของตัวเก็บประจุความจุสูงของพีไอซีพี(ซ้าย) และเครื่องที่ด้าพินซ์(ขวา)[1]



รูปที่ 2.6 รูปวาดแสดงวงจรการต่อตัวเก็บประจุ[1]

ตัวเก็บประจุความจุสูงนี้จะถูกชาร์จประจุด้วย เครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง สำหรับ เครื่องที่ต่ำพินซ์ ทำการ ชาร์จตัวเก็บประจุความจุสูง จนมีความต่างศักย์สูงสุดที่ 20 กิโลโวลต์ แต่ สำหรับเครื่องพีไอซีพีจะออกแบบให้สามารถ ชาร์จตัวเก็บประจุความจุสูงจนมีความต่างศักย์สูงสุด ไม่เกิน 18 กิโลโวลต์เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับตัวเก็บประจุของเครื่องพีไอซีพี วงจรของ เครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูงแสดงดังรูปที่ 2.7



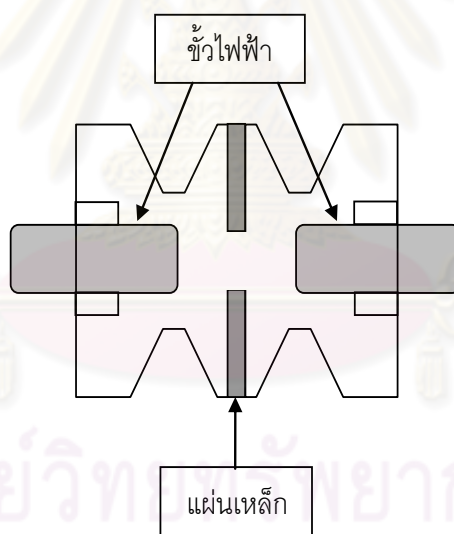
รูปที่ 2.7 วงจรของเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง[1]

รูปที่ 2.7 เป็นวงจรง่ายของ เครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง จากเครื่องที่ต่ำพินซ์ ประกอบด้วย ตัวปรับแรงดันไฟฟ้า (Variac) ใช้ในการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับตัวแปลงไฟฟ้า ความต่างศักย์สูง (High Voltage Transformer) เมื่อทำการชาร์จกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไดโอด และตัวต้านทานขนาด 10 เมกะโอมห์ เข้าสู่ตัวเก็บประจุความจุสูง โดยจะมีสวิตช์ฉุกเฉิน หรือคัมพ์ สวิตช์ (S) ไว้กดเพื่อให้ประจุจากตัวเก็บประจุความจุสูงสามารถคายประจุผ่านตัวต้านทาน 30 เมกะโอมห์ ลงสู่พื้นดินได้หากมีเหตุฉุกเฉิน

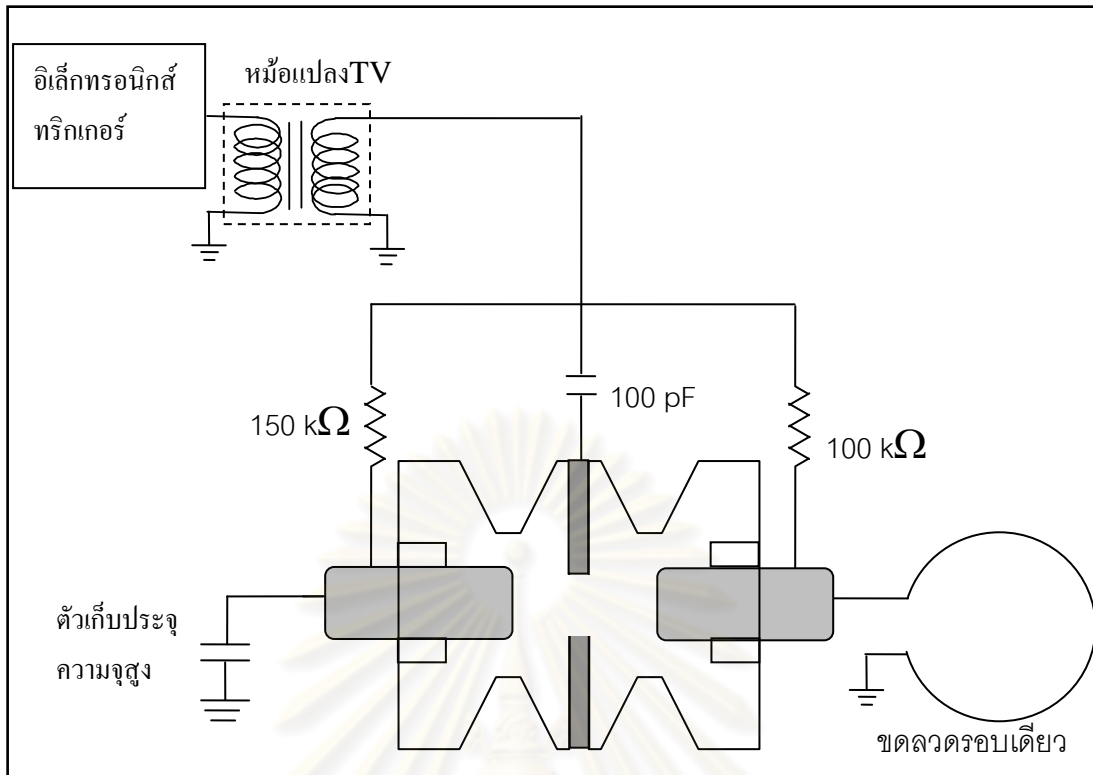
2.3.2 สปาร์คแก๊ปสวิทช์ และอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์

อิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์เป็นตัวจ่ายสัญญาณให้แก่สปาร์คแก๊ปสวิทช์ เพื่อให้ประจุสามารถไหลออกตัวเก็บประจุความจุสูงไปยังขดลวดรอบเดียวได้ สัญญาณที่จ่ายเป็นกระแสไฟฟ้าห้วงสั้นๆ ซึ่งจะจ่ายผ่านหม้อแปลงเพื่อให้มีศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจ่ายมายังสปาร์คแก๊ปสวิทช์

สปาร์คแก๊ปสวิทช์ถือเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญของเครื่องพีไอซีพี ทำงานสลับกับเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง โดยเราจะหยุดทำการชาร์จประจุ เมื่อประจุที่ตัวเก็บประจุความจุสูงถูกสะสมมาถึงความต่างศักย์ที่ต้องการ จากนั้นเมื่อสปาร์คแก๊ปทำงานจะเป็นตัวเชื่อมวงจรระหว่างตัวเก็บประจุความจุสูงกับขดลวดรอบเดียวให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าสูงขดลวดรอบเดียวเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก สปาร์คแก๊ปสวิทช์ในเครื่องที่ดำพินซ์ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ขั้วหนึ่งต่ออยู่กับตัวเก็บประจุความจุสูง และอีกขั้วหนึ่งต่ออยู่กับขดลวดรอบเดียว มีแผ่นเหล็กอยู่ตรงกลาง ส่วนที่เป็นฉนวนทำขึ้นจาก ไนลอน-6 มีลักษณะดังรูปที่ 2.8 และการต่อสปาร์คแก๊ปเข้ากับอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์และวงจรของเครื่องแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 แบบร่างแสดงส่วนประกอบของสปาร์คแก๊ปสวิทช์[1]

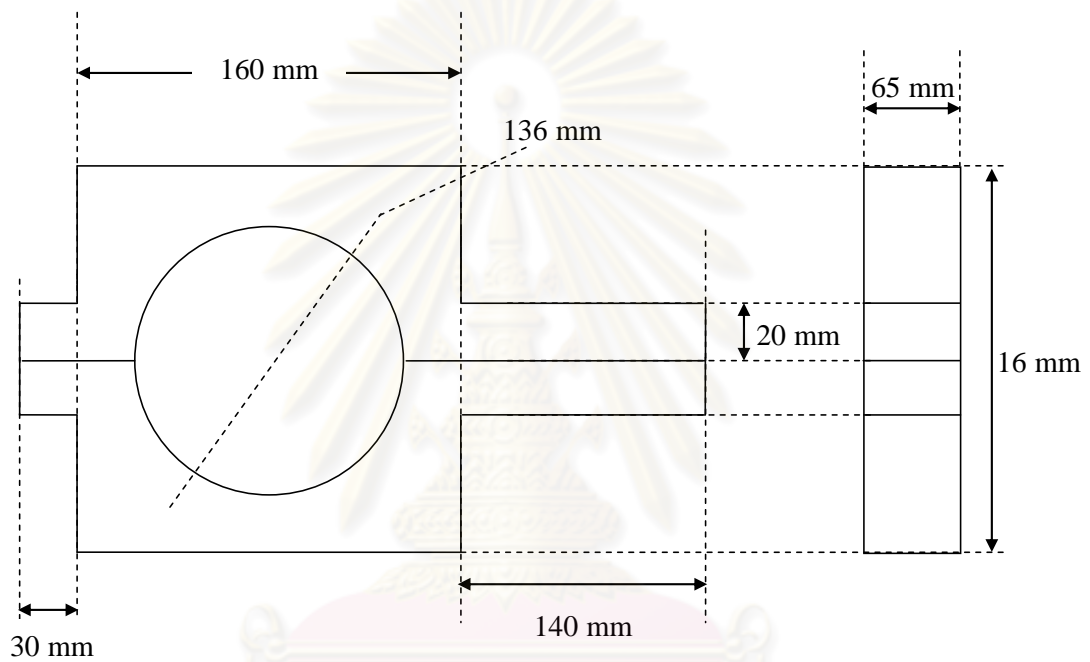


รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงการต่อสปาร์กแก๊ปสวิตช์เข้ากับวงจรของเครื่องที่ดำพินซ์

ในรูปที่ 2.9 ขณะที่สปาร์กแก๊ปยังไม่ได้รับสัญญาณจากอิเล็คทรอนิกทริกเกอร์ สปาร์กแก๊ปจะเป็นตัวเปิดวงจรระหว่างตัวเก็บประจุความจุสูงและขดลวดรอบเดียว ทำให้สามารถชาร์จประจุมาสะสมที่ตัวเก็บประจุได้โดยไม่ไหลลงกราวนด์ด้านขดลวดรอบเดียว เมื่อหยุดการชาร์จ ความต่างศักย์เนื่องจากประจุที่สะสมอยู่ที่ตัวเก็บประจุยังไม่มากพอ ที่ประจุสามารถกระโดดเข้าสู่ขดลวดรอบเดียวได้โดยตรง จนเมื่อมีการจ่ายสัญญาณจากอิเล็คทรอนิกทริกเกอร์ ทำให้แผ่นเหล็กและขั้วด้านขดลวดรอบเดียวมีศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น ประจุจากตัวเก็บประจุความจุสูงก็จะสามารถไหลผ่านสปาร์กแก๊ปเข้าสู่ขดลวดรอบเดียวได้ สัญญาณที่จ่ายจากอิเล็คทรอนิกส์ทริกเกอร์เป็นสัญญาณห้วงสั้นๆ ประจุในตัวเก็บประจุความจุสูงก็จะถูกปล่อยจากตัวเก็บประจุเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าปริมาณสูงไหลเข้าสู่ขดลวดรอบเดียวไปเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้

2.3.3 ขดลวดรอบเดียว

ขดลวดรอบเดียวเป็นส่วนที่เหนียวทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งขดลวดรอบเดียวของเครื่องพีไอซีพีจะออกแบบลักษณะเดียวกับเครื่องที่ดำพินซ์เนื่องจากมีความสะดวกในการติดตั้ง โดยขดลวดรอบเดียวของเครื่องที่ดำพินซ์ทำขึ้นจากอลูมิเนียม มีจำนวน 8 ชั้นต่อเรียงกันแบบขนาน มีลักษณะดังรูป 2.10



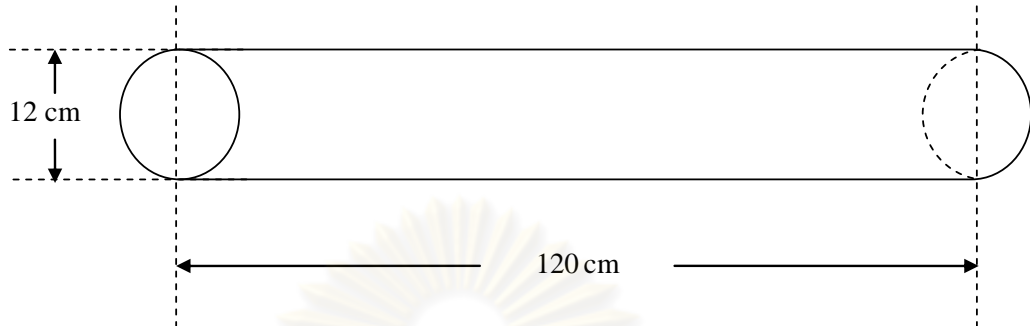
รูปที่ 2.10 แบบร่างแสดงขนาดของขดลวดรอบเดียว[1]

2.3.4 ท่อควอทซ์และปั๊มสุญญากาศ

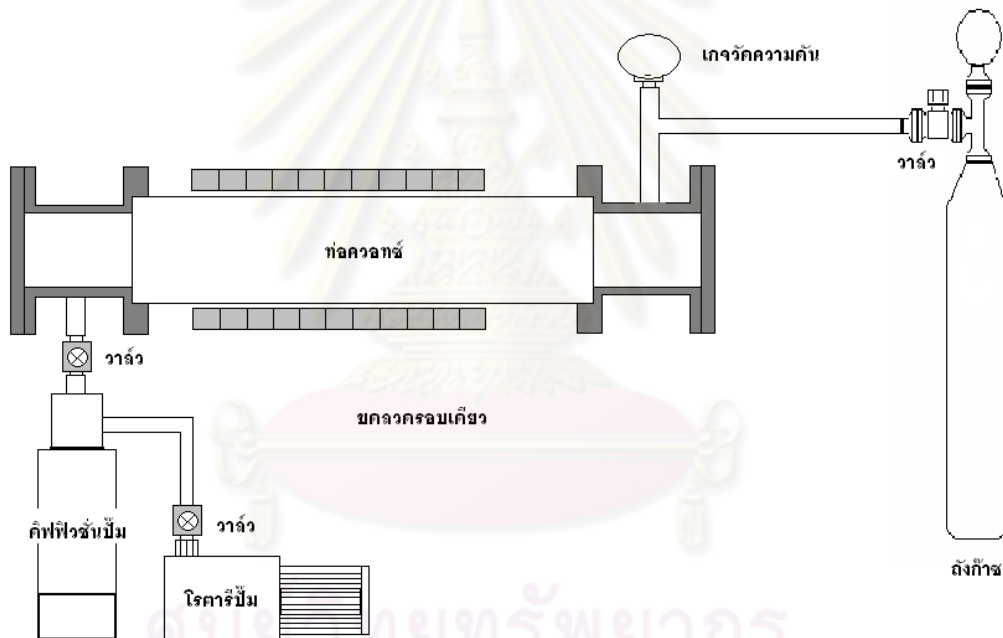
เครื่องที่ดำพินซ์ใช้ท่อควอทซ์เป็นภาชนะสุญญากาศ เป็นส่วนที่ใช้บรรจุก๊าซเพื่อสร้างพลาสมา ซึ่งอยู่ภายในขดลวดรอบเดียว ท่อควอทซ์ที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร และความยาว 120 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 2.11 ปลายทั้งสองด้านของท่อควอทซ์ต่อกับตัวสวมที่ทำมาปิดเพื่อต่อเข้ากับอุปกรณ์อื่นๆแสดงเป็นแผนภาพดังรูปที่ 2.12

ปั๊มสุญญากาศที่ใช้กับเครื่องที่ดำพินซ์ มีอยู่ 2 แบบคือ ดิฟฟิวชันปั๊ม และปั๊มแบบโรตารี ซึ่งจะต่ออยู่กับตัวสวมที่ปลายท่อควอทซ์ตามลำดับ ปั๊มสุญญากาศแบบโรตารี จะทำหน้าที่ดูดอากาศภายในท่อควอทซ์ตั้งแต่ที่ความดันบรรยากาศจนถึง 1-2 ปาสคาล จากนั้นดิฟฟิวชันปั๊มเริ่ม

ทำงานร่วมกับ บั้มสุญญากาศ แบบโรตารี ตั้งแต่ความดัน 1-2 ปาสคาล ลงไปจนถึงค ความดัน 5.5×10^{-3} ปาสคาล ซึ่งเป็นความดันต่ำสุดที่ดิฟฟิวชันบั้มสามารถทำได้



รูปที่ 2.11 รูปวาดแสดงขนาดของท่อควอทซ์



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงการต่อท่อควอทซ์เข้ากับอุปกรณ์ต่าง

สำหรับก่อนการใช้งานเครื่องที่ตาพินซ์ ต้องมีการเตรียมเครื่องที่ตาพินซ์เพื่อใช้งาน โดยเริ่มจากการเปิดบั้มสุญญากาศแบบโรตารีเพื่อบั้มอากาศออกจากดิฟฟิวชันบั้มและท่อควอทซ์ ซึ่งในการบั้มอากาศออกจากระบบนั้น บั้มสุญญากาศแบบโรตารีทำการดูดอากาศออกจากท่อควอทซ์ผ่านทางดิฟฟิวชัน จนมีความดันประมาณ 1-2 ปาสคาล จากนั้นทำการปิดวาล์วที่กั้นระหว่างท่อควอทซ์ และดิฟฟิวชันบั้ม แล้วทำการเปิดดิฟฟิวชันบั้มให้ทำงาน โดยดิฟฟิวชันบั้มใช้เวลาประมาณ 20 นาที จึงเริ่มให้ดิฟฟิวชันบั้มทำงาน ร่วมกับบั้มสุญญากาศแบบโรตารี โดยการ

เปิดวาล์วที่กั้นระหว่างท่อควอทซ์และดีฟิวชันปั๊ม ให้ปั๊มทำงานร่วมกันตั้งแต่ความดันประมาณ 1-2 ปาสคาล จนถึงความดันต่ำสุด จากนั้นทำการใส่ก๊าซที่ต้องการใช้ในการทดลองเข้าไปและปรับความดันให้อยู่ในระดับที่กำหนดเพื่อทำการทดลอง สำหรับเครื่องพีไอซีพีที่จะทำการสร้างขึ้นใช้เพียงปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีซึ่งไม่ต้องมีชั้นตอนยุ่งยากดังเช่นเครื่องที่ดำพินซ์ แต่ความดันต่ำสุดก็ไม่สามารถทำได้เท่ากับเครื่องที่ดำพินซ์จึงต้องมีการออกแบบภาชนะสุญญากาศเป็นอย่างดี เพื่อให้เกิดการรั่วน้อยที่สุด

การใช้งานเครื่องที่ดำพินซ์เริ่มจาก ทำการตั้งค่าความต่างศักย์ของเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูงเพื่อใช้ในการชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุความจุสูง จากนั้นทำการกดสวิตช์เปิดให้เครื่องชาร์จ ชาร์จตัวเก็บประจุความจุสูง และกดสวิตช์หยุดเมื่อความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุความจุสูงถึงระดับที่ต้องการ กดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์ส่งสัญญาณไฟฟ้าไปที่สปาร์คแก๊ปสวิตช์ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุความจุสูงไหลเข้ามาที่ขั้วลวดรอบเดียว ก๊าซที่อยู่ภายในท่อควอทซ์ก็จะแตกตัวเป็นพลาสมา



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองทางทฤษฎีของการแผ่รังสีและการเคลื่อนที่ของพลาสมา

งานศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องพีไอซีพีแล้วศึกษาสมบัติของพลาสมาที่ได้จากเครื่องที่สร้างขึ้น ดังนั้นการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพลาสมาจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง การทำงานของเครื่องพีไอซีพีเริ่มจากการทำการชาร์จประจุมาเก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุความจุสูง จากนั้นปล่อยประจุออกมาจากตัวเก็บประจุในครั้งเดียว เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าปริมาณสูงไหลผ่านขดลวดรอบเดียวทำให้เกิดสนามแม่เหล็กภายในท่อควอทซ์ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสพลาสมาไหลวนในทิศทางตรงข้ามกับกระแสภายนอกที่ไหลภายในวงจรของเครื่องพีไอซีพี และการเคลื่อนที่ของพลาสมาเป็นกระแสพลาสมานั้นทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ บีบให้เข้ามาตามแนวรัศมี

ค่าของกระแสไฟฟ้า ที่ออกจากตัวเก็บประจุแล้ว ไหลในวงจรเครื่อง พีไอซีพี ค่าของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดแบบรอบเดียว และ สมบัติของพลาสมา อาทิเช่นพลังงานของพลาสมาและความเร็วของพลาสมาล้วนมี ความสัมพันธ์กัน การเคลื่อนที่ กระแสพลาสมา เข้ามาตามแนวรัศมี เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องการทราบ การเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเครื่องและ การเคลื่อนที่กระแสพลาสมาที่เกิดขึ้น จึงเป็นสิ่งที่ควรให้ความสนใจ เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ ของ การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟฟ้าในวงจร ของเครื่องพีไอซีพี และการเปลี่ยนแปลง สมบัติของ พลาสมาที่เกิดขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอแบบจำลองทางทฤษฎีสำหรับใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยแบ่งแบบจำลองออกเป็น 2 แบบ ที่ต้องใช้ร่วมกัน คือ แบบจำลองทางทฤษฎีของวงจรเครื่อง พีไอซีพี และแบบจำลองทางทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของกระแสพลาสมา แล้วนำผลที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎีมาวิเคราะห์ร่วมผลที่ได้จากการทดลอง

เราสามารถสังเกตเห็นพลาสมาจากแสงที่แผ่ออกมา ซึ่งก็คือโฟตอนที่แผ่มาจากพลาสมา เนื่องมาจากอันตรกิริยาต่างๆระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคภายในพลาสมาทำให้อิเล็กตรอนปลดปล่อยโฟตอนออกมา แสงที่แผ่ออกมาจากพลาสมาสามารถนำมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติอิเล็กตรอนซึ่งถือเสมือนเป็นพลังงานของพลาสมาโดยรวม [3] จึงขออธิบายถึงแบบจำลองการแผ่รังสีก่อน ที่เราจะไปศึกษาแบบจำลองทางทฤษฎีของวงจรของเครื่องพีไอซีพี และของเคลื่อนที่ของพลาสมาในลำดับถัดไป

3.1 แบบจำลองการแผ่รังสีของพลาสมา

พลาสมาเป็นกลุ่มก๊าซที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอน ไอออน และอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า แทบจะทั้งหมดของอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคเหล่านี้เกี่ยวข้องกับกระบวนการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนหรือกับอะตอมที่เป็นกลาง [7] ซึ่งทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ต่างๆ บางปรากฏการณ์ทำให้เกิดการปลดปล่อยโฟตอนที่มิระดับพลังงานต่างๆ อาจจะต้องเป็นสเปกตรัมในช่วงที่ตามองเห็น (Visible light) ไปจนถึง รังสีแกมมา (Gamma Ray) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของพลาสมา การที่พลาสมาปลดปล่อยโฟตอนออกมาเรียกว่า การแผ่รังสีของพลาสมา หรืออาจนิยามสั้นๆว่าการที่อิเล็กตรอนปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กระบวนการแผ่รังสีของพลาสมาที่พิจารณาแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ การแผ่รังสีแบบเบรมสตราลุง (Bremsstrahlung) การแผ่รังสีแบบรีคอมบิเนชัน (recombination radiation) กระบวนการแผ่รังสีแบบเส้น (line radiation)[7] สำหรับกระบวนการต่างๆ สามารถอธิบายดังต่อไปนี้

การแผ่รังสีแบบเบรมสตราลุง (Bremsstrahlung) เป็นกระบวนการ ที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ผ่านนิวเคลียสของอะตอมหรือไอออนแล้ว สูญเสียพลังงานจลน์ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากนิวเคลียส อิเล็กตรอนอิสระปลดปล่อยพลังงานออกมา ภายหลังอันตรกิริยานี้ อิเล็กตรอนยังคงอยู่ในสถานะอิเล็กตรอนอิสระ จึงเรียกกระบวนการแผ่รังสีแบบนี้ว่า กระบวนการฟรี - ฟรี แทรนซิชัน (free - free transition)[5] รังสีที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้มีความยาวคลื่นต่อเนื่อง

การแผ่รังสีแบบรีคอมบิเนชัน (recombination radiation) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระเข้าชนกับอะตอมหรือไอออนแล้วถูกจับให้มาอยู่ในระดับชั้นพลังงาน ของอะตอม จึงเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการฟรี - บาวนด์ แทรนซิชัน (free - bound transition) ผลก็คืออิเล็กตรอน จะปลดปล่อยโฟตอนพลังงานออกมา พลังงานของโฟตอนขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอนเดิมที่เข้ามา รังสีที่เกิดจากกระบวนการนี้มีความยาวคลื่นต่อเนื่อง

กระบวนการแผ่รังสีแบบเส้น (line radiation) เป็นกระบวนการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นหลังจากอะตอมหรือไอออนถูกชนด้วยอิเล็กตรอน แล้วกระตุ้นไปให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการเปลี่ยนสถานะที่ระดับชั้นพลังงานต่ำไปสู่ระดับชั้นที่มีพลังงานสูง และเมื่ออิเล็กตรอนกลับมายังระดับพลังงานเดิมก็จะปลดปล่อยโฟตอนออกมา จึงเรียกกระบวนการแผ่รังสีแบบนี้ว่า กระบวนการบาวนด์ - บาวนด์ แทรนซิชัน (bound - bound transition) พลังงานของโฟตอนจึง

ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของสองระดับชั้นพลังงาน โฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจึงมีพลังงานที่กระจาย และเป็นที่มาในการเรียกการแผ่รังสีแบบนี้ว่า กระบวนการแผ่รังสีแบบเส้น (line radiation) [6]

สำหรับการแผ่รังสีในแต่ละกระบวนการ สามารถคำนวณหาพลังงานได้ดังสมการที่ 3.1, 3.2, 3.3[14]

ความหนาแน่นกำลังของการแผ่รังสีแบบเบรมสตราลุง(Power density of Bremsstrahlung: P_B)

$$P_B \approx \frac{64}{3} \left(\frac{\pi}{3}\right)^{\frac{1}{2}} (\alpha a_o)^3 \left(\frac{kT}{E_H}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{E_H^2}{\hbar} (Z_{eff})^2 N_i N_e \quad \text{วัตต์/ลูกบาศก์เมตร} \quad 3.1$$

ความหนาแน่นกำลังของการแผ่รังสีแบบรีคอมบิเนชัน(Power density of recombination: P_R)

$$P_R \approx \frac{64}{3} \left(\frac{\pi}{3}\right)^{\frac{1}{2}} (\alpha a_o)^3 \left(\frac{E_H}{kT}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{E_H E_\infty}{\hbar} (Z_n)^2 N_i N_e \quad \text{วัตต์/ลูกบาศก์เมตร} \quad 3.2$$

ความหนาแน่นกำลังของการแผ่รังสีแบบเส้น(Power density of line radiation: P_L)

$$P_L \approx 32\pi \left(\frac{\pi}{3}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{E_H}{kT}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{E^2}{\hbar} \left(\sum_m \bar{g} f_{mm} \exp\left(-\frac{E_{mm}}{kT}\right)\right) a_o^3 N_i N_e \quad \text{วัตต์/ลูกบาศก์เมตร} \quad 3.3$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อกำหนดให้

E_H คือ พลังงานไอออไนเซชันของอะตอมไฮโดรเจน (ionization energy of hydrogen)

E_∞ คือ พลังงานไอออไนเซชัน (ionization energy)

E_{mn} คือ ผลต่างของพลังงานระหว่างสถานะ m กับ n

f_{mn} คือ ความแรงของออสซิลเลเตอร์การปล่อยรังสี (emission oscillator strength)

N_e คือ เลขความหนาแน่นอิเล็กตรอน (number of electron density)

N_i คือ เลขความหนาแน่นไอออน (number of ion density)

α คือ ค่าคงที่โครงสร้างรายละเอียด (fine structure constant)

a_0 คือ รัศมีของโบร์ (Bohr radius)

k คือ ค่าคงที่ของโบลซ์มันน์ (Boltzmann's factor)

Z_{eff} คือ ค่าประจักษ์ผล (effective charge)

Z_n คือ เลขอะตอม (atomic number)

\bar{g} คือ ค่ายังผลกัณฑ์ (effective gaunt factor)

T คือ อุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยเคลวิน (plasma temperature: Kelvin)

เราสามารถคำนวณหาพลังงานของพลาสมาโดยการวิเคราะห์ รังสีที่แผ่ออกมาจากพลาสมา โดยอาศัย แบบจำลองสมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่ (local thermodynamics equilibrium model) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.1 แบบจำลองสมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่ (local thermodynamics equilibrium model)

หากพลาสมาที่มีความเป็นเนื้อเดียว (homogeneous) รวมถึงมีสมดุลอุณหพลศาสตร์แล้ว ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะสามารถอธิบายได้โดยง่าย แต่ในความเป็นจริงความหนาแน่นของพลาสมาไม่ได้สม่ำเสมออย่างสมบูรณ์ ดังนั้นแบบจำลอง สมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่ นี้ จึงทำการศึกษาพลาสมาเฉพาะที่โดยการแบ่งปริมาตรของพลาสมาทั้งหมดให้มีขนาดเล็กและสมมติให้พลาสมาภายในปริมาตรเล็กๆ นั้นมีความเป็นเนื้อเดียว และมีสมดุลอุณหพลศาสตร์ โดยขนาดของปริมาตรที่ถูกแบ่งนี้มีค่ามากกว่าค่า มิน-ฟรี-พาท (mean free path) ของอนุภาคในพลาสมา หรือโฟตอน

กำหนดให้ทุกอิเล็กตรอนอยู่ในสถานะพื้น (ground state) ของตัวเอง อัตราส่วนของความหนาแน่นไอออนของสองสถานะที่มีสถานะไอออนิกถัดกัน (i และ $i+1$) สามารถแทนด้วย สมการซาฮา (Saha Equation)[7] ดังนี้

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} = \frac{2}{N_e} \left(\frac{U_{i+1}}{U_i} \right) \left(\frac{2\pi m_e k T_e}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{\chi}{k T_e}\right) \quad 3.4$$

เมื่อ

N_{i+1} คือ ความหนาแน่นของไอออนที่สถานะ $i+1$

N_i คือ ความหนาแน่นของไอออนที่สถานะ i

U_i คือ พาร์ทิชัน ฟังก์ชัน (partition function) ของไอออนสถานะ i

χ_i คือ ศักย์ไอออนไนเซชันของไอออนในสถานะ i (ionization potential of i^{th} ion)

T_e คือ อุณหภูมิอิเล็กตรอนในหน่วยอิเล็กตรอนโวลท์ (electron temperature)

E_i คือ ศักย์ไอออนไนเซชันของไอออนในสถานะไอออนที่ i ไปสู่สถานะที่ $i+1$

N_e คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

การกระจายตัวความหนาแน่นของไอออนที่มีสถานะพื้นด้วยกัน สามารถแทนด้วยความสัมพันธ์แบบโบลทซ์มาน (Boltzmann relation) ดังสมการ

$$\frac{N(p)}{N(q)} = \frac{g_p}{g_q} \exp\left(-\frac{E_p - E_q}{kT_e}\right) \quad 3.5$$

โดยที่ $N(p)$ และ $N(q)$ คือความหนาแน่นโอกาส(The Population density) ของสถานะที่ p และ q ตามลำดับ ซึ่ง p และ q คือสองระดับชั้นพลังงานที่มีพลังงาน E_p และ E_q และที่มีตัวถ่วงน้ำหนักทางสถิติ(statistical weights)เป็น g_p และ g_q ตามลำดับ และสำหรับแต่ละระดับชั้นพลังงาน ความหนาแน่นไอออนสามารถเขียนได้เป็น

$$N_p = N \frac{g_p}{U_e} \exp\left(-\frac{E_p}{kT_e}\right) \quad 3.6$$

เมื่อ U_e คือ พาร์ทิชัน ฟังก์ชัน(partition function)ของอิเล็กตรอนซึ่งมีค่าดังสมการ

$$U_e = \sum_{allj} g_j \exp\left(-\frac{E_j}{kT_e}\right) \quad 3.7$$

และ

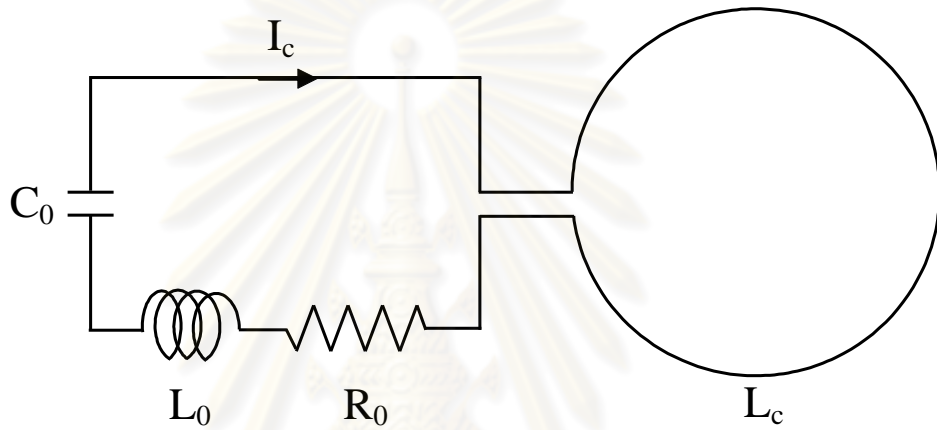
$$N = \sum_{allj} N(j) \quad 3.8$$

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้สมการ 3.6 จากแบบจำลองสมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่มา คำนวณหาอุณหภูมิอิเล็กตรอน เพื่อให้ทราบถึงพลังงานของพลาสมาที่กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพีที่สร้างขึ้น ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมในการนำไปใช้คำนวณจะได้กล่าวในบทถัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 แบบจำลองของวงจรของเครื่องฟิโอสี่พี

ดังที่ได้ทราบมาแล้วว่า เครื่องฟิโอสี่พีประกอบด้วยตัวเก็บประจุ ขดลวด รอบเดียว และตัวต้านทาน เราสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในวงจรของเครื่อง ฟิโอสี่พีได้โดยอาศัยวงจรเสมือน RLC โดยถือว่าค่า ความเหนี่ยวนำ (L) ภายในวงจรเกิดจาก 2 ส่วน คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแบบรอบเดียว (L_0) และค่าความเหนี่ยวนำของอุปกรณ์ภายในวงจร (L_c) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปวาดแสดงวงจรของเครื่องฟิโอสี่พี[1]

โดยที่

I_c คือค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจร

C_0 คือค่าความจุประจุรวมของทั้งวงจร (ทั้งจากตัวเก็บประจุความจุสูงและอุปกรณ์ต่างๆ)

R_0 คือความต้านทานรวมของทั้งวงจร

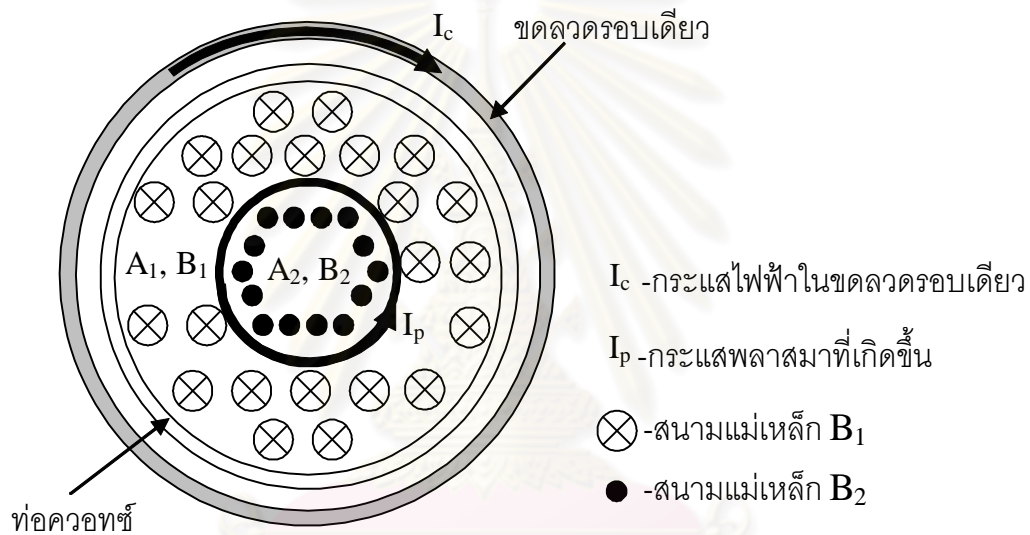
เมื่อ ค่าความต่างศักย์ที่ให้กับตัวเก็บประจุคือ V_0 ซึ่งความต่างศักย์ V_0 นี้มีค่าเท่ากับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมอุปกรณ์ต่างๆรวมกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น[8]

$$V_0 = R_0 I_c + \frac{\int I_c dt}{C_0} + \frac{d}{dt} \{L_0 I_c + L_c I_c\} \quad 3.9$$

จัดรูปสมการ 3.9 ใหม่เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณได้เป็น

$$\frac{d}{dt} \{L_0 I_c + L_c I_c\} = V_0 - R_0 I_c - \frac{\int I_c dt}{C_0} \quad 3.10$$

ในสมการที่ 3.2.3 ค่า I_c , L_c เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จึงต้องหาค่ามาแทนในสมการเพื่อทำการคำนวณโดยค่า I_c สามารถหาได้จากการทดลอง ซึ่งจะศึกษาในบทถัดไป แต่ค่า L_c สามารถหาจากการคำนวณ โดยพิจารณาสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของ กระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรรวม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก และระบบจะทำการสร้างสนามแม่เหล็กต้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก จากกระแสภายนอก ตาม กฎของเลนส์ (Lentz's Law) ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปวาดแสดงสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้า I_c ที่ไหลในวงจรรวม[1]

โดยที่ A_1 คือพื้นที่อยู่ระหว่างขดลวดรอบเดียวกับ กระแสพลาสมา, A_2 คือพื้นที่ภายในกระแสพลาสมา, B_1 คือสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้า I_c ที่ไหลในขดลวดแบบรอบเดียว และ B_2 คือสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสพลาสมา I_p ที่ระบบสร้างขึ้น

จาก $\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu I$ สนามแม่เหล็กมีค่าเป็น

$$B_1 = \frac{\mu I_c}{l} \quad 3.11$$

$$B_2 = \frac{\mu}{l} (I_c - I_p) \quad 3.12$$

และจาก $L = \Phi / I$ โดยที่ $\Phi = BA$ จึงสามารถเขียนค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดรอบเดียว (L_c) ได้ดังสมการ 3.13

$$L_c = \frac{B_1 A_1 - B_2 A_2}{I_c} \quad 3.13$$

$$L_c = \frac{\frac{\mu I_c \pi}{l} (r_c^2 - r_p^2) - \frac{\mu \pi r_p^2}{l} (I_p - I_c)}{I_c} \quad 3.14$$

โดยที่ r_c, r_p คือรัศมีของขดลวดรอบเดียวและรัศมีของพลาสติกตามลำดับ จัดรูปสมการ

$$L_c = \frac{\mu \pi}{l} (r_c^2 - r_p^2) - \frac{\mu \pi r_p^2}{l} (m - 1) \quad 3.15$$

โดยที่ $m = I_p / I_c$ ค่า m นี้อาจเรียกว่าความเหนี่ยวนำซึ่งกันและกัน (mutual inductance)

$$L_c = \frac{\mu \pi}{l} \left\{ (r_c^2 - r_p^2) - r_p^2 (m - 1) \right\} \quad 3.16$$

$$L_c = \frac{\mu \pi}{l} (r_c^2 - r_p^2 m) \quad 3.17$$

แทนค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแบบรอบเดียวลงในสมการ 3.10

$$\frac{d}{dt} \left\{ L_0 I_c + \frac{\mu \pi}{l} (r_c^2 - r_p^2 m) I_c \right\} = V_0 - R_0 I_c - \frac{\int I_c dt}{C_0} \quad 3.18$$

ทำการหาอนุพันธ์ และจัดรูปสมการ ก็จะได้สมการเป็น

$$\frac{dI_c}{dt} = \frac{V_0 - R_0 I_c - \frac{\int I_c dt}{C_0} + \frac{2\mu \pi}{l} m r_p I_c \frac{dr_p}{dt}}{L_0 + \frac{\pi \mu}{l} r_c^2 - \frac{\pi \mu}{l} m r_p^2} \quad 3.19$$

จากสมการ 3.19 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในวงจรของเครื่องพีไอซีพีที่ขึ้นกับเวลา เพื่อให้การคำนวณสามารถทำได้ง่ายขึ้น จึงทำการกำหนดตัวแปรใหม่เพื่อนำมาใช้ในการปรับสมการโดยกำหนดให้ $i_c = I_c / I_0$, $\tau = t / t_0$, $K_p = r_p / r_c$, $K_s = r_s / r_c$ แทนค่าของตัวแปรทั้งหมดลงในสมการ 3.19 และจัดรูปของสมการได้เป็น

$$\frac{I_0}{t_0} \frac{di_c}{d\tau} = \frac{V_0 - R_0 I_0 i_c - \frac{t_0 I_0 \int i_c d\tau}{C_0} + \frac{2\mu\pi}{1} m r_c^2 i_c \kappa_p \frac{I_0}{t_0} \frac{d\kappa_p}{d\tau}}{L_0 + \frac{\pi\mu}{1} r_c^2 - \frac{\pi\mu}{1} m r_c^2 \kappa_p^2} \quad 3.20$$

$$\frac{di_c}{d\tau} = \frac{1 - \delta i_c - \int i_c d\tau + 2\beta m i_c \kappa_p \frac{d\kappa_p}{d\tau}}{1 + \beta - \beta m \kappa_p^2} \quad 3.21$$

โดยที่ I_0 = กระแสไฟฟ้าสูงสุดในวงจร, $t_0 = T/2\pi$, T คือคาบเวลาของกระแสไฟฟ้า

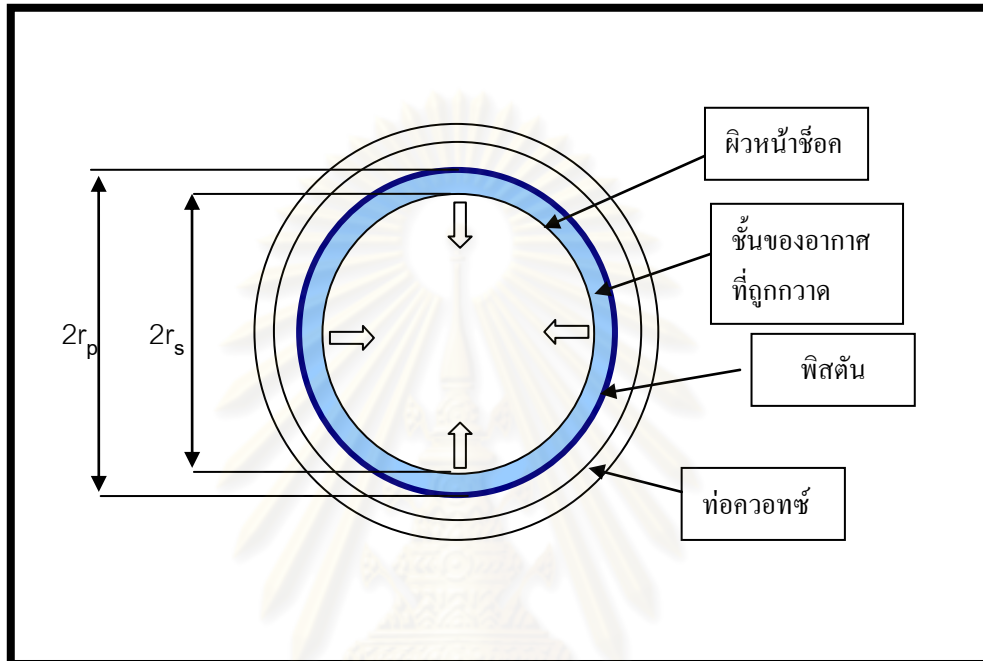
$\delta = r_0 / \sqrt{L_0 / C_0}$ และ $\beta = \frac{\pi\mu r_c^2 / 1}{L_0}$ และเรียกสมการ 3.21 ว่า สมการวงจร (Circuit Equation)

โดยการปรับค่า m ในสมการ 3.21 ให้สอดคล้องกับการทดลอง ก็จะได้ค่า m เพื่อไปใช้ในแบบจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 แบบจำลองทางทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของกระแสพลาสมา

การเคลื่อนที่ของพลาสมาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดรอบเดียว ให้เคลื่อนที่เข้ามาตามแนวรัศมี นั้น สมการการเคลื่อนที่ที่สามารถที่จะหาได้โดยอาศัยแบบจำลองสลัก[10] (Slug Model)



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงแบบจำลองสลักแสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาภายในเครื่องพีไอซีพี

โดยแบบจำลองสลักแสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาเข้ามาตามแนวรัศมีเป็นลักษณะของคลื่นกระแทก ประกอบด้วยพิสตัน (piston) หรือพลาสมาชีท (Plasma Sheet) ซึ่งก็คือแผ่นกระแสพลาสมาที่เคลื่อนที่เข้ามาตามแนวรัศมีด้วยความเร็วสูง โดยในขณะที่เคลื่อนที่ก็จะกวาดอากาศที่อยู่ข้างหน้าไปด้วย ชั้นของอากาศที่ถูกกวาดเข้ามาด้วยความเร็วสูงนี้ก็มีโอกาสแตกตัวกลายเป็นพลาสมา และ ผิวหน้าคลื่นกระแทก (Shock Front) ในรูปที่ 3.3 r_s คือ รัศมีช็อค (shock radius) และ r_p คือ รัศมีพิสตัน (piston radius) โดยในการเคลื่อนที่ของคลื่นกระแทกนั้นมวลรวมมีค่าคงที่แบบจำลองสลัก เริ่มจากความสัมพันธ์แบบอเดียบาติก (Adiabatic Relationship) โดยที่กำหนดให้มวลของก๊าซภายในมีมวลคงที่ ในที่มีการเปลี่ยนแปลงของรัศมี dr_s ซึ่งจะได้ว่า [8]

$$PV^\gamma = \text{constant}$$

3.22

หรือ

$$\frac{\gamma dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0 \quad 3.23$$

และจากความดันสถัก $P \sim v_s^2$ เมื่อแทนค่าได้เป็น

$$\frac{dP}{P} = \frac{2dv_s}{v_s} \quad 3.24$$

และจากความสัมพันธ์ $v_s \sim \frac{I_c}{r_p}$ ดังนั้นสมการ 3.24 ได้ค่าเป็น[9]

$$\frac{dP}{P} = 2 \left(\frac{dI_c}{I_c} - \frac{dr_p}{r_p} \right) \quad 3.25$$

จากรูปที่ 3.3 หากเราพิจารณาปริมาตรของพลาสมาที่เคลื่อนที่

$$V = \pi (r_p^2 - r_s^2) z$$

หรือ $dV = 2\pi(r_p dr_p - r_s dr_s)z$

แต่ก๊าซที่ถูกกวาดไปกับการเคลื่อนที่ของหน้าคลื่นกระแทกเป็นระยะ dr_s จะถูกบีบด้วยอัตราส่วน $(\gamma+1)/(\gamma-1)$ และอยู่ในส่วนของปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงนี้ด้วย ดังนั้นค่าที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลง ปริมาตรนั้นไม่ใช่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของแค่ dr_s แต่ต้องเป็นผลมาจาก $dr_s (2/(\gamma+1))$ ผลที่ถูกต้องจึงเป็น[10]

$$dV = 2\pi \left(r_p dr_p - \frac{2}{\gamma+1} r_s dr_s \right) z \quad 3.26$$

เมื่อ γ คืออัตราส่วนความร้อนจำเพาะ (specific heat ratio)

$$\frac{\gamma dV}{V} = \frac{2\gamma \left(r_p dr_p - \frac{2}{\gamma+1} r_s dr_s \right)}{(r_p^2 - r_s^2)} \quad 3.27$$

เมื่อแทนค่าทั้งหมดในสมการ 3.23 จะได้เป็นสมการใหม่คือ

$$\frac{2\gamma \left(r_p dr_p - \frac{2}{\gamma+1} r_s dr_s \right)}{(r_p^2 - r_s^2)} + 2 \frac{dI_c}{I_c} - \frac{2dr_p}{r_p} = 0 \quad 3.28$$

จากนั้นจัดรูปสมการใหม่เพื่อหาการเคลื่อนที่ของพลาสมาได้เป็น

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{\frac{2\gamma}{\gamma+1} \frac{r_s r_p}{(r_p^2 - r_s^2)} \frac{dr_s}{dt} - \frac{r_p}{I_c} \frac{dI_c}{dt}}{\frac{\gamma r_p^2}{(r_p^2 - r_s^2)} - 1} \quad 3.29$$

dr_p/dt คือ อัตราเร็วของพิสตัน (piston's speed) หรือคือความเร็วของพลาสมา และจากค่าตัวแปรที่ได้กำหนดไว้ในตอนต้น เมื่อแทนในสมการ 3.29 ได้สมการใหม่เป็น[11]

$$\frac{dk_p}{d\tau} = \frac{\frac{2}{\gamma+1} \frac{\kappa_s}{\kappa_p} \frac{d\kappa_s}{d\tau} - \frac{\kappa_p}{\gamma i_c} \left(1 - \frac{\kappa_s^2}{\kappa_p^2}\right) \frac{di_c}{d\tau}}{\frac{\gamma-1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma} \frac{\kappa_s^2}{\kappa_p^2}} \quad 3.30$$

ในส่วนของที่ได้กล่าวถึงต่อไป เป็นการกล่าวถึงการเคลื่อนที่ของพลาสมาภายใต้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลในขดลวด โดยเราจะพิจารณาจากความดันของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Pressure: P_m) ซึ่งมีค่าตามสมการ

$$P_m = B^2 / 2\mu \quad 3.31$$

โดยที่ความดันของสนามแม่เหล็กที่เป็นตัวขับเคลื่อนพลาสมามีค่าเท่ากับผลต่างของความดันของสนามแม่เหล็กในสองบริเวณตามสมการ

$$P_{m12} = P_{m1} - P_{m2} \quad 3.32$$

เมื่อแทนค่าความดันของสนามแม่เหล็กในแต่ละบริเวณลงไปในสมการได้[8]

$$P_{m12} = \frac{m\mu I_c^2}{2I^2} (2-m) \quad 3.33$$

ความดันขับเคลื่อนของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากผลต่างของความดันสนามแม่เหล็กในสองบริเวณนี้ เท่ากับความดันของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\frac{m\mu I_c^2}{2I^2} (2-m) = \frac{2}{\gamma+1} f_m \rho_0 V_s^2 \quad 3.34$$

โดยที่ f_m = อัตราส่วนมวล , ρ_0 = ความหนาแน่นของก๊าซ และ V_s^2 คือความเร็วของผิวหน้าคลื่นกระแทก[10] จัดรูปสมการเพื่อหาความเร็วของคลื่นกระแทก ได้เป็น

$$v_s = \frac{dr_s}{dt} = \left[\frac{m\mu I_c^2}{2l^2} (2-m) \left(\frac{\gamma+1}{2f_m \rho_0} \right) \right]^{1/2} \quad 3.35$$

dr_s / dt คือ อัตราเร็วของผิวหน้าคลื่นกระแทก (shock's speed)

และจาก $i_c = I_c / I_0$, $\tau = t / t_0$, $\kappa_s = r_s / r_c$ แทนค่าตัวแปรลงในสมการด้านบน และทำการจัดสมการใหม่

ได้

$$\frac{d\kappa_s}{d\tau} = \left[\frac{m\mu(2-m)(\gamma+1)}{4f_m \rho_0} \right]^{1/2} \frac{I_0}{l} \frac{t_0}{r_c} i_c \quad 3.36$$

เมื่อกำหนดให้ $t_p = \frac{r_c l}{I_0} \left[\frac{4f_m \rho_0}{m\mu(2-m)(\gamma+1)} \right]^{1/2}$ ดังนั้นสมการ 3.36 จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{d\kappa_s}{d\tau} = \frac{t_0}{t_p} i_c \quad 3.37$$

หรือ

$$\frac{d\kappa_s}{d\tau} = -\alpha_s i_c \quad 3.38$$

โดยที่ $-\alpha_s = t_0 / t_p$

สาเหตุที่กำหนดให้ความเร็วของคลื่นกระแทกมีค่าเป็นลบเนื่องมาจากคลื่นกระแทกเคลื่อนที่เข้าหาจุดศูนย์กลาง ทำให้ค่ารัศมีของคลื่นกระแทกมีค่าลดลง จากที่ได้ทำมาในสมการ 3.38 คือสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นภายใน ซึ่งคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นนี้อยู่ภายในของพลาสมาที่กำลังบีบตัวเข้ามาตามแนวรัศมี [11] เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆรวมถึงค่า m ที่ได้จากสมการวงจรร แล้วทำการปรับค่า f_m ให้สอดคล้องกับตำแหน่งของพลาสมาที่วัดจากการทดลองก็จะได้ค่า f_m และตำแหน่งของพลาสมาที่เวลาต่างๆ

และจากอัตราเร็วของผิวหน้าคลื่นกระแทกสามารถหาอุณหภูมิอิเล็กตรอนรวมสมการ[8]

$$T_e = \frac{M}{R} \frac{\gamma-1}{(\gamma+1)^2} \frac{v_s^2}{(1+Z_{eff})} \quad 3.39$$

เมื่อ M และ R คือมวลอะตอมและค่าคงที่ของก๊าซตามลำดับ

บทที่ 4

การออกแบบ การสร้างเครื่องพีไอซีพี และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

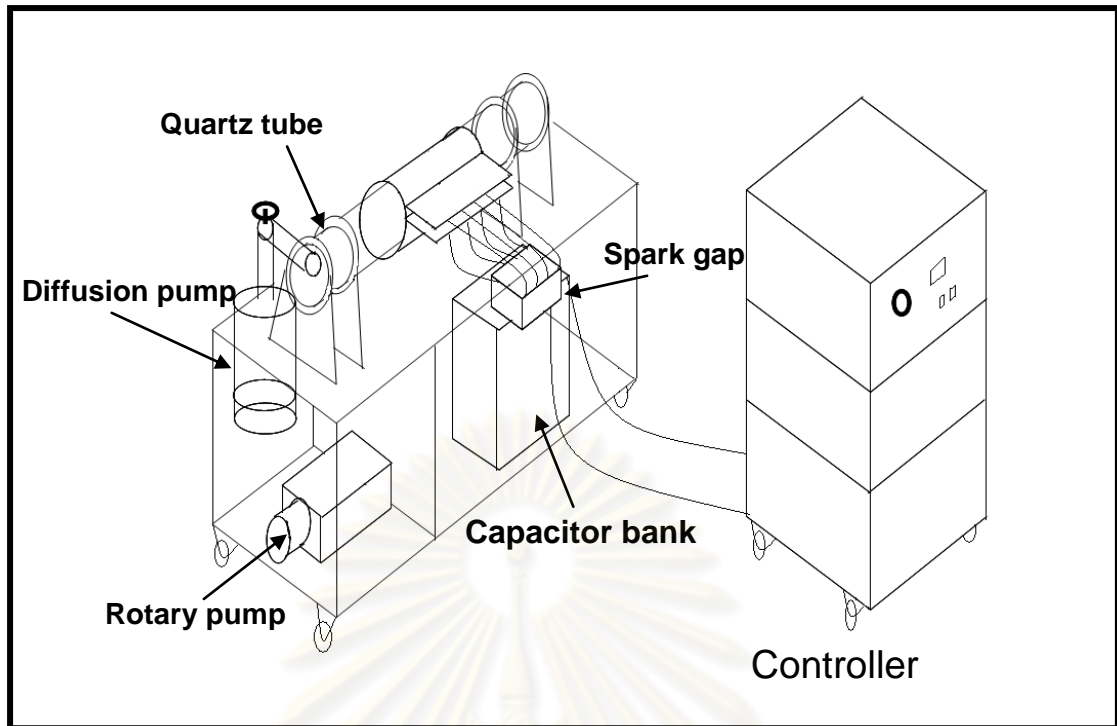
ในบทนี้อธิบายถึงการออกแบบ และการสร้างเครื่องพีไอซีพี อุปกรณ์หลักของเครื่องพีไอซีพีประกอบด้วย ตัวซาร์จประจุความจุสูง ภาชนะสุญญากาศ ตัวเก็บประจุความจุสูง สปาร์คแก๊ป สวิตช์ ขดลวดรอบเดียว และปั๊มสุญญากาศ แต่ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะการออกแบบและการสร้าง ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องเท่านั้น เพื่อให้ทราบถึงที่มาในการออกแบบ และรายละเอียดสำคัญที่พึงคำนึงถึงในส่วนประกอบนั้นๆ ของเครื่องพีไอซีพี รายละเอียดแบบงานของส่วนประกอบอื่นๆ สามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ก ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องที่จะอธิบายในบทนี้คือ ภาชนะสุญญากาศ สปาร์คแก๊ป สวิตช์ ขดลวดรอบเดียว และชุดซาร์จประจุความต่างศักย์สูง ลำดับถัดไป ก็จะเป็นการศึกษาเครื่องมือวัดที่จะใช้ในการทดลองซึ่งประกอบด้วย ขดลวดโลโกสกี หัววัดสนามแม่เหล็ก และเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ตามลำดับ

4.1 การออกแบบและการสร้างเครื่องพีไอซีพี

เครื่องพีไอซีพีในงานวิจัยครั้งนี้ ได้ใช้ อุปกรณ์สำคัญและวัสดุพื้นฐาน ที่หน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและนิวเคลียร์ฟิวชั่นได้มีอยู่แล้ว บางส่วนประกอบด้วย

- 1 ท่อควอทซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 117.2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 109.2 มิลลิเมตร และยาว 42 เซนติเมตร
- 2 ตัวเก็บประจุความจุสูงของ Maxwell Technology รุ่น 33464 ขนาด 30 ไมโครฟารัด ที่สามารถทนความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด 20 กิโลโวลต์ จำนวน 2 ตัว
- 3 ปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีของ EDWARDS รุ่น A363-15-903
- 4 แผ่นทองแดงขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร จำนวน 1 แผ่น และแท่งทองแดงกว้าง 10 เซนติเมตร หนา 10 มิลลิเมตร ยาว 180 เซนติเมตร จำนวน 1 แท่ง

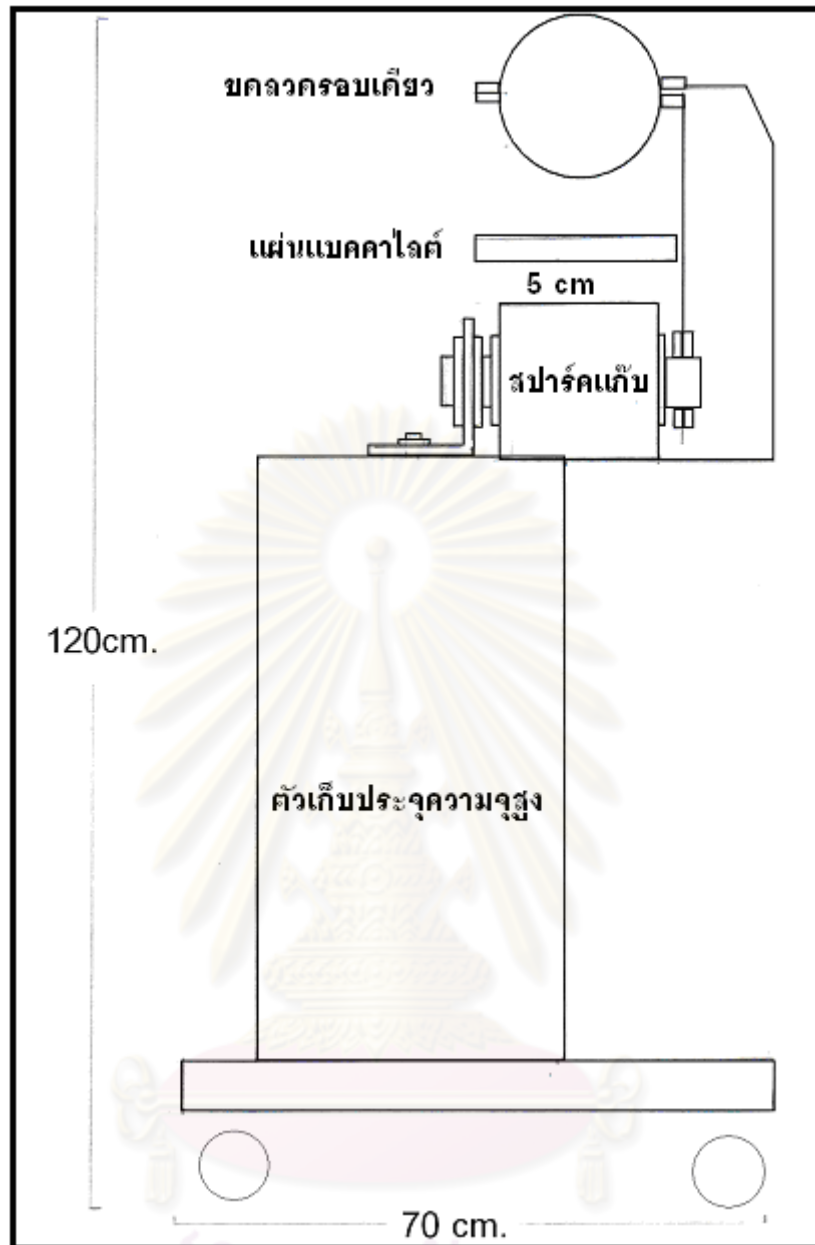
ขั้นตอนการ สร้างเครื่องพีไอซีพีได้เริ่มออกแบบจากอุปกรณ์ และวัสดุพื้นฐานที่มี เพื่อเป็นการประหยัดลดต้นทุน



รูปที่ 4.1.1 แผนภาพของเครื่องฟิวส์ที่ตามแบบเสนออนุมัติโครงการวิทยานพนธ์

เนื่องจากตัวเก็บประจุความจุสูงมีขนาด กว้าง 21.5 ยาว 3.5 และสูง 61.2 เซนติเมตร หากวางภาชนะสุญญากาศไว้ที่ระดับเดียวกับตัวเก็บประจุดังเช่นเครื่องที่ดำพินซ์ซึ่งตัวเก็บประจุมีความสูง 120 เซนติเมตร จะไม่สะดวกในการเปิดปิดภาชนะสุญญากาศจึงได้ออกแบบในการจัดวางภาชนะสุญญากาศเหนือตัวเก็บประจุเพื่อให้มีความสูงจากพื้นขณะวางบนรถเข็น 120 เซนติเมตรซึ่งเป็นความสูงที่สะดวกต่อการใช้งาน บนรถเข็นที่มีความกว้าง 70 ซึ่งกว้างพอสำหรับวางตัวเก็บประจุสูงจำนวนสองตัว ดังภาพที่ 4.1.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

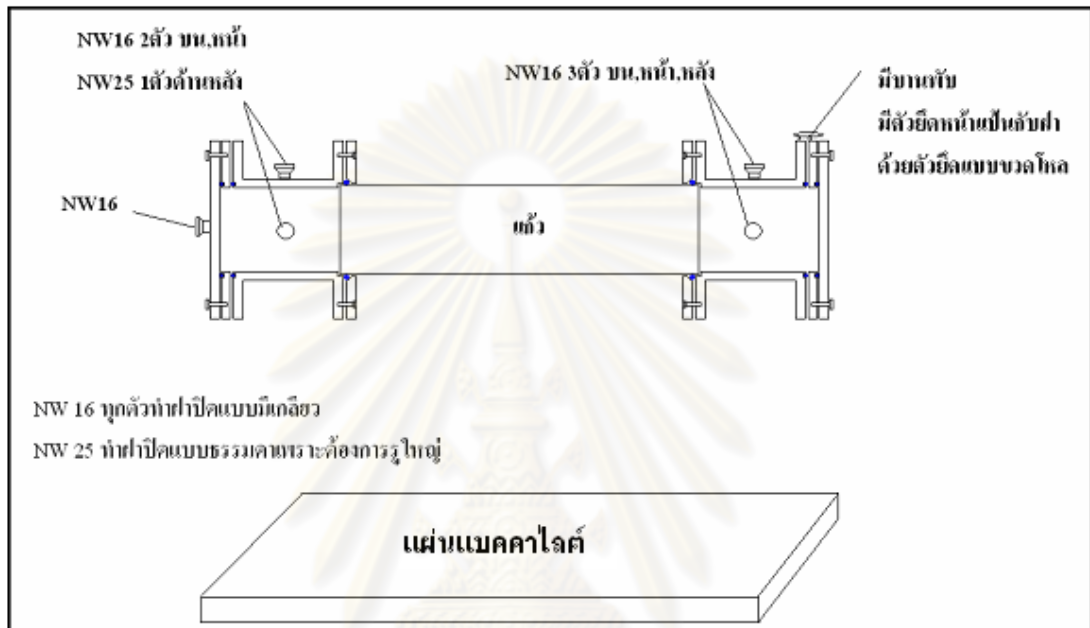


รูปที่ 4.1.2 แบบร่างแสดงการจัดวางภาชนะสุญญากาศเหนือตัวเก็บประจุ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

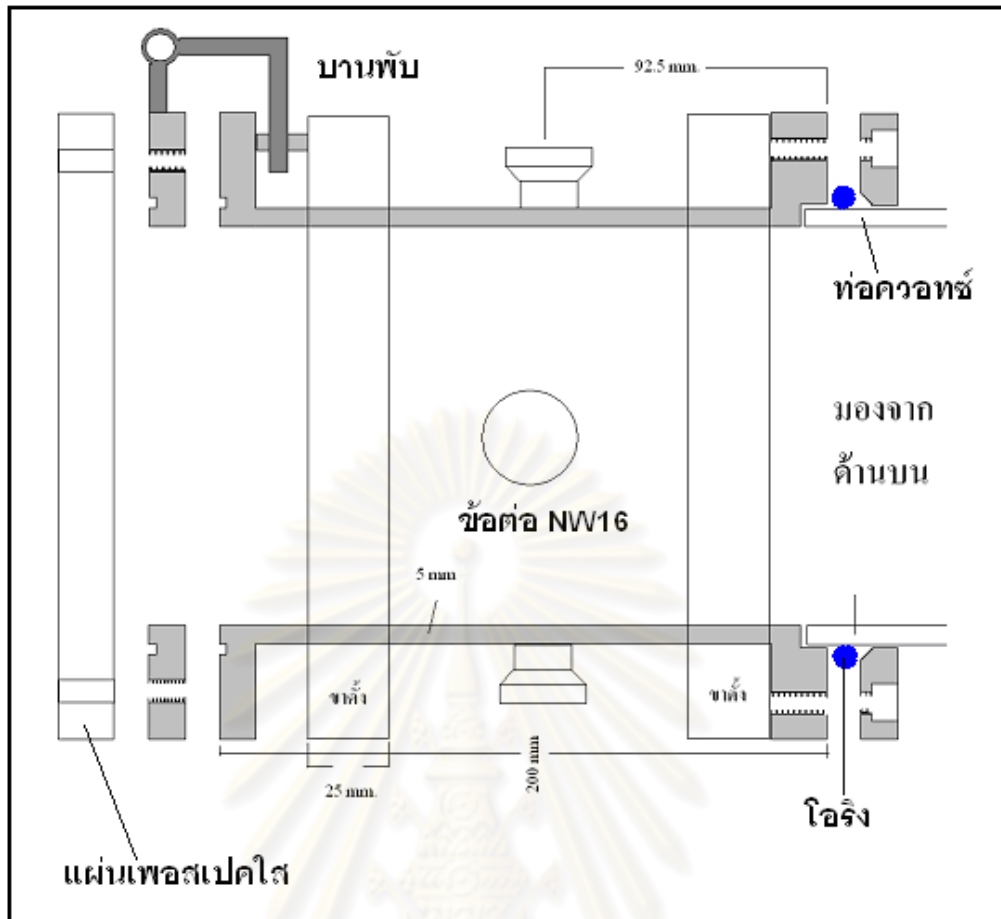
4.1.1 การออกแบบและสร้างภาชนะสุญญากาศ

ในเครื่องพีไอซีพีพลาสติกจะเกิดขึ้นภายในภาชนะสุญญากาศซึ่งทำจากท่อควอทซ์ เนื่องจากเป็นวัสดุใสสามารถสังเกตพลาสติกได้จากภายนอกและทนความร้อนได้สูง การออกแบบภาชนะสุญญากาศจากท่อควอทซ์ปลายเปิด 2 ด้านมีรายละเอียด ที่ควรคำนึงถึงดังนี้



รูปที่ 4.1.3 แผนภาพแสดงภาชนะสุญญากาศ

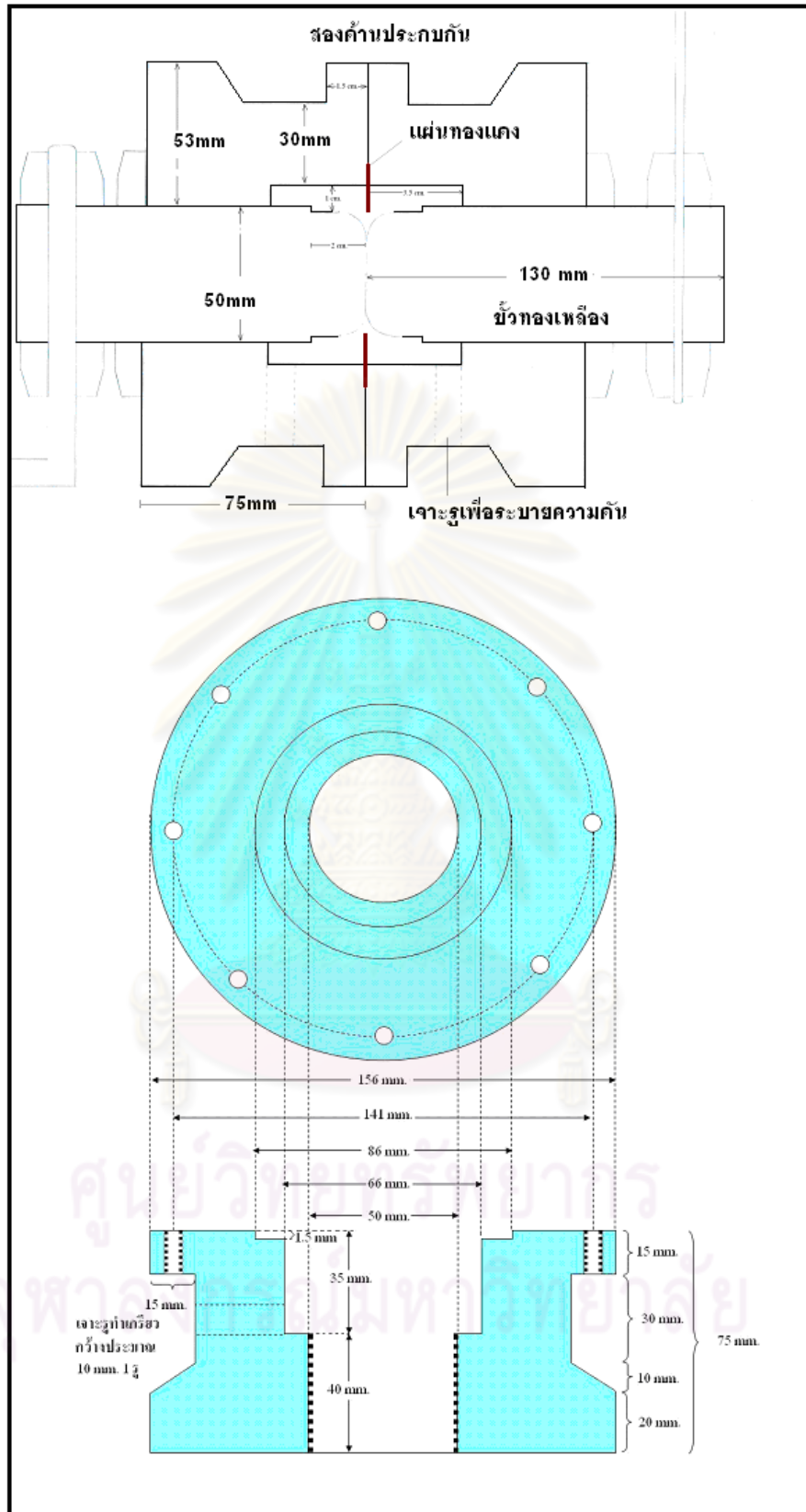
ภาชนะสุญญากาศที่สร้างขึ้นวางอยู่บนแบคคาไลต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความเป็นฉนวนสูง การปิดทั้งสองด้านใช้วิธีการขันน็อตบีบอัดโอรัง สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือต้องเว้นระยะห่างระหว่างฝาปิดที่เป็นโลหะกับท่อควอทซ์เนื่องจากขณะเกิดพลาสติกนั้นท่อควอทซ์จะเกิดการสั่นเล็กน้อย ซึ่งถ้าหากเว้นระยะมากเกินไปภาชนะสุญญากาศก็จะเกิดการรั่วหรือไม่สามารถปั๊มลงต่ำได้ และหากน้อยเกินไปก็อาจทำให้ควอทซ์แตกได้ ในที่นี้เว้นระยะไว้ 1.4 มิลลิเมตร แบบงานอย่างละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก โครงสร้างอย่างง่าย และฝาปิดที่สร้างเสร็จแสดงดังรูปที่ 4.1.4



รูปที่ 4.1.4 ภาพแสดงฝาปิดท่อควอทซ์ในการสร้างภาชนะสุญญากาศ

4.1.2 การออกแบบและสร้างสปาคกับสวิทช์

ในการปล่อยประจุออกจากตัวเก็บประจุความจุสูงในครั้งเดียวนั้น อาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่าสปาร์คกับสวิทช์ซึ่งจะใช้งานร่วมกับอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ ลักษณะของสปาร์คกับสวิทช์ที่ออกแบบนั้นเป็นลักษณะเดียวกับของเครื่องที่ดำพินซ์แต่มีขนาดประมาณ 1 ใน 3 ของสปาร์คกับจากเครื่องที่ดำพินซ์ เนื่องจากใช้งานที่ความต่างศักย์ต่ำกว่า ระยะห่างระหว่างขั้วจึงน้อยกว่า สัดส่วนอื่นๆจึงเล็กลงตามมา โดยใช้วัสดุ ไนลอน-6 มาเป็นฉนวนซึ่งทำหน้าที่ห่อหุ้มขั้วทั้งสองด้านที่เชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุความจุสูงและขดลวดรอบเดียว ขั้วของสปาร์คกับเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรวมเก็ยวเท่ากับ 50 มิลลิเมตร โดยเป็นขนาดที่ใหญ่เพื่อให้ความต้านทานต่ำ และขนาดของขั้วเมื่อรวมกับฉนวนห่อหุ้มแล้วมีขนาด 156 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่พอดีเมื่อนำไปติดตั้งแล้วจะเหลือระยะระหว่างตัวเก็บประจุและแผ่นแบคคาไลต์ที่วางภาชนะสุญญากาศ 5 เซนติเมตรเพียงพอสำหรับการทำงาน ตามรูปที่ 4.1.2 ขั้วทั้งสองของสปาร์คกับเลือกวัสดุที่นำมาใช้เป็นทองเหลืองที่ถึงแม้จะมีสภาพต้านทานสูงกว่าทองแดงแต่เป็นโลหะที่แข็งกว่าเนื่องจากต้องกลึงเก็ยวและมีการขยับปรับระยะห่างระหว่างขั้ว เก็ยวของขั้วจึงมีโอกาสสึกหรอได้น้อยกว่าในระยะยาว สปาคกับที่ออกแบบมีลักษณะดังรูปที่ 4.1.5



รูปที่ 4.1.5 แบบร่างสปาร์คแก๊บสวิทช์



รูปที่ 4.1.6 ภาพแสดงสปาร์กแก๊ปเมื่อทำการติดตั้งแล้วเสร็จ

การที่จะให้ตัวเก็บประจุความจุสูงปลดปล่อยประจุ ออกมา ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขั้ว กับแผ่นทองแดงตรงกลาง และความต่างศักย์ที่ตัวเก็บประจุความจุสูง โดยการปรับระยะห่างทั้งสองด้านให้พอดี คือเมื่อทำการทดสอบให้สัญญาณจากอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ก็จะเพิ่มความต่าง ศักย์ระหว่างแผ่นโลหะและขั้วด้านตัวเก็บประจุ ประจุจากตัวเก็บประจุความจุสูงก็สามารถกระโดด ผ่านไปสู่ขั้วด้านขดลวดรอบเดียวเหนียวทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ หากระยะห่างนี้น้อยไปประจุก็ จะกระโดดก่อนที่จะทำการชาร์จประจุแล้วเสร็จและก่อนกดให้สัญญาณจากอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ แต่หากระยะห่างนี้มากไปประจุก็จะไม่สามารถกระโดดไปสู่ขั้วด้านขดลวดรอบเดียวได้แม้จะกดให้ สัญญาณจากอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์แล้วก็ตาม (อาจดูรูปที่ 2.9 ประกอบ) เพราะฉะนั้นการที่จะให้ เครื่องพีไอซีพีทำงานขณะมีพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุค่าใดหรือความต่างศักย์ค่าได้นั้นขึ้นอยู่กับ การปรับระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงตรงกลางกับขั้วทั้งสองด้านของสปาร์กแก๊ปสวิตช์

ในงานวิจัยทำการทดลองเครื่องพีไอซีพีที่มีพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุคือ 1.4, 2.4, และ 4.32 กิโลจูลซึ่งเกิดจากการชาร์จประจุที่มีความต่างศักย์เป็น 6.83, 8.94 และ 12 กิโลโวลต์ ตามลำดับ เพราะฉะนั้นจึงต้องทำการปรับระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสองด้านกับแผ่นทองแดงตรง กลางให้เหมาะสมกับทั้งสามความต่างศักย์ งานวิจัยนี้ได้ให้เครื่องพีไอซีพีทำงานที่ระดับพลังงาน ต่างๆเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบสมบัติของพลาสมาที่กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพีที่มีพลังงานสะสม ในตัวเก็บประจุที่น้อยกว่า เท่ากัน และที่พลังงานมากกว่าเครื่องที่ดำพินซ์ ตามลำดับ โดยพลังงาน สูงสุดของเครื่องพีไอซีพีที่ 4.32 กิโลจูลเกิดจากการสะสมประจุที่ตัวเก็บประจุความจุสูงจนถึงความ ต่างศักย์ 12 กิโลโวลต์เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับตัวเก็บประจุความจุสูงซึ่งสามารถรับ ความต่างศักย์ได้สูงสุด 20 กิโลโวลต์ ทั้งนี้เพราะการชาร์จประจุเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหากทำการตั้ง ค่าความต่างศักย์สูงสุดใกล้กับ 20 กิโลโวลต์ โอกาสที่จะทำการชาร์จประจุที่มีความต่างศักย์เกิน 20 กิโลโวลต์และสร้างความเสียหายต่อตัวเก็บประจุความจุสูงอาจเกิดขึ้นได้

4.1.3 การออกแบบและสร้างขดลวดรอบเดี่ยว

เนื่องจากสนามการออกแบบขดลวดรอบเดี่ยวได้คำนึงถึงการลดค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self Inductance: L) เป็นสำคัญ ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำตัวเองเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งจะต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแสภายในขดลวด พิจารณาจากค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดโซลินอยด์เป็นไปตามสมการ

$$L = \mu n^2 l A \quad 4.1.1$$

โดยที่ μ คือสภาพซึมได้ของตัวกลางที่ขดลวดพันรอบ n คือจำนวนรอบของขดลวดต่อหน่วยความยาว l คือความยาวขดลวด และ A คือพื้นที่หน้าตัดขดลวด

เพื่อให้ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองมีค่าต่ำสุด การสร้างขดลวดจึงควรมีจำนวนรอบของขดลวดน้อยสุด นั่นคือรอบเดี่ยว (ขณะที่พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดต้องมากพอให้ความต้านทานมีค่าน้อย) และมีพื้นที่หน้าตัดน้อยสุด นั่นคือมีรัศมีน้อยสุด ในที่นี้ได้ออกแบบขดลวดรอบเดี่ยวได้ใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียมเพราะต้องใช้ในปริมาณมากซึ่งเป็นโลหะที่ราคาไม่สูงขณะที่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ดี เนื่องจากท่อควอทซ์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 117.2 มิลลิเมตร จึงออกแบบขดลวดรอบเดี่ยวให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 128 มิลลิเมตร เพื่อให้มีช่องว่างระหว่างควอทซ์กับขดลวดเหลือเป็นระยะ 5.4 มิลลิเมตร เมื่อรองแผ่นไมลาร์ด้านละ 10 แผ่นก็จะมีช่องว่างระหว่างขดลวดกับท่อควอทซ์ 3.4 มิลลิเมตรเพียงพอสำหรับการสั้นของท่อควอทซ์โดยไม่กระทบกับขดลวดรอบเดี่ยวขณะเกิดพลาสมาภายใน ในงานวิจัยนี้สร้างขดลวดรอบเดี่ยวจากอลูมิเนียมแผ่นซึ่งมีความหนา 64 มิลลิเมตร วางเรียงกัน 4 ชุดโดยแต่ละชุดห่างกัน 5 มิลลิเมตร โดยถือว่าขดลวดรอบเดี่ยวที่แยกเป็น 4 ชุดนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กที่ต่างกันเพียงเล็กน้อยกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดลวดรอบเดี่ยวที่เป็นชิ้นเดียวกัน แต่เนื่องจากความหนาของแผ่นอลูมิเนียมที่มีขายตามท้องตลาดมีความหนามากสุดที่ 64 มิลลิเมตร จึงได้ออกแบบเป็น 4 ชุดเพื่อให้มีพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดรวมมากที่สุดให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ดี และเมื่อทำการติดตั้งขอบของขดลวดอันที่ 1 และ 4 จะมีระยะห่างจากฝาปิดท่อควอทซ์ที่ทำจากสแตนเลส 8 เซนติเมตร เป็นระยะที่เพียงพอที่กระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ 20 กิโลโวลต์ (หากให้เครื่องทำงานที่พลังงานสูงสุดของตัวเก็บประจุ) จะกระโดดไปไม่ถึง การออกแบบขดลวดรอบเดี่ยวได้ออกแบบเป็นสองส่วนเพื่อความสะดวกในการติดตั้งโดยไม่กระทบกับท่อควอทซ์ แบบงานของขดลวดรอบเดี่ยวมีลักษณะดังรูป 4.1.7 และแสดงการติดตั้งเมื่อทำการสร้างเสร็จดังรูปที่ 4.1.8



รูปที่ 4.1.8 ภาพแสดงขดลวดรอบเดียวที่สร้างและทำการติดตั้งแล้วเสร็จ

โดยขดลวดรอบเดียวจะถูกต่อเข้ากับสปาร์กแก๊บสวิตช์และด้วยข้อต่อที่ทำจากแผ่นทองแดง ดังรูปที่ 4.1.9



ขั้วนำของตัวเก็บประจุเข้าสู่สปาร์กแก๊บ

กราวด์ของตัวเก็บประจุ

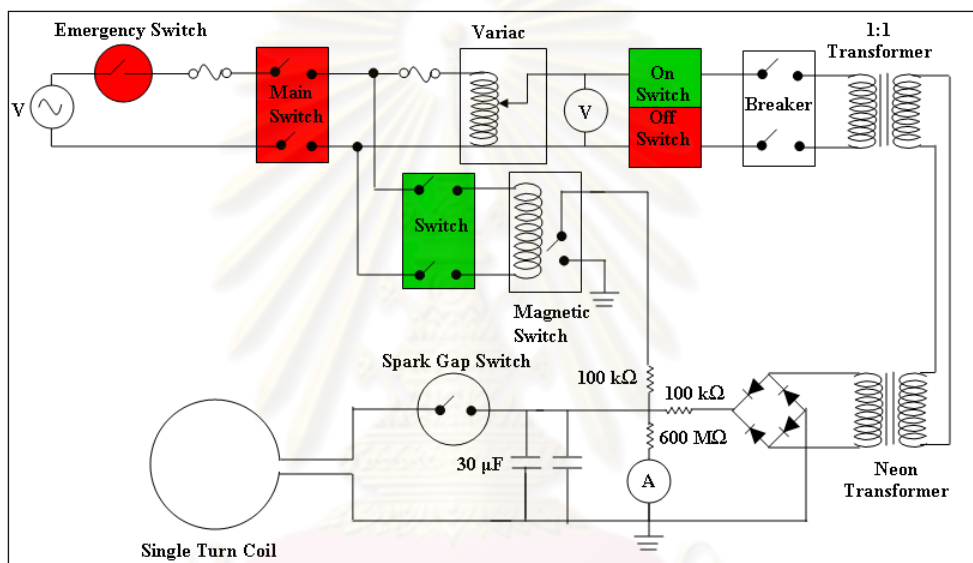
จากสปาร์กแก๊บเข้าสู่ขดลวดรอบเดียว

จากขดลวดรอบเดียวเข้าสู่กราวด์

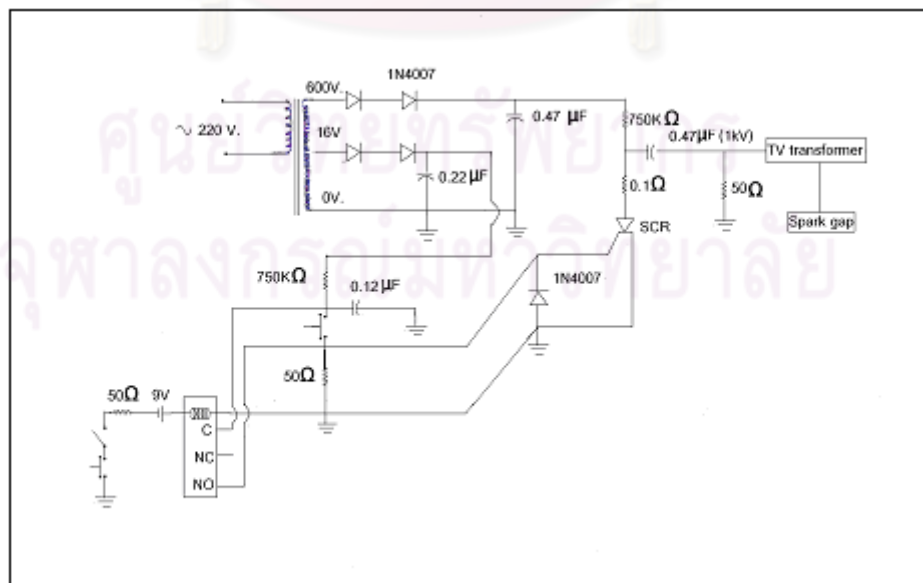
รูปที่ 4.1.9 ภาพข้อต่อสำหรับใช้เป็นทางเดินของกระแสไฟฟ้า

4.1.4 การสร้างเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง

การสร้างเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูงในการวิจัยครั้งนี้ได้แยกระบบชาร์จออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่มีความต่างศักย์ต่ำคือส่วนควบคุม และส่วนที่มีความต่างศักย์สูงซึ่งจะแปลงกระแสไฟฟ้าจากศักย์ต่ำเป็นศักย์สูง โดยจะวางไว้ใกล้กับตัวเก็บประจุความจุสูงเพื่อป้องกันอันตรายและได้ติดตั้งส่วนควบคุมของอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์ไว้กับส่วนควบคุมของเครื่องชาร์จประจุด้วยเพื่อความสะดวกในการใช้งาน วงจรของเครื่องชาร์จประจุความจุสูงมีลักษณะดังรูปที่ 4.1.10 และวงจรของอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์แสดงดังรูป 4.1.11



รูปที่ 4.1.10 วงจรเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง

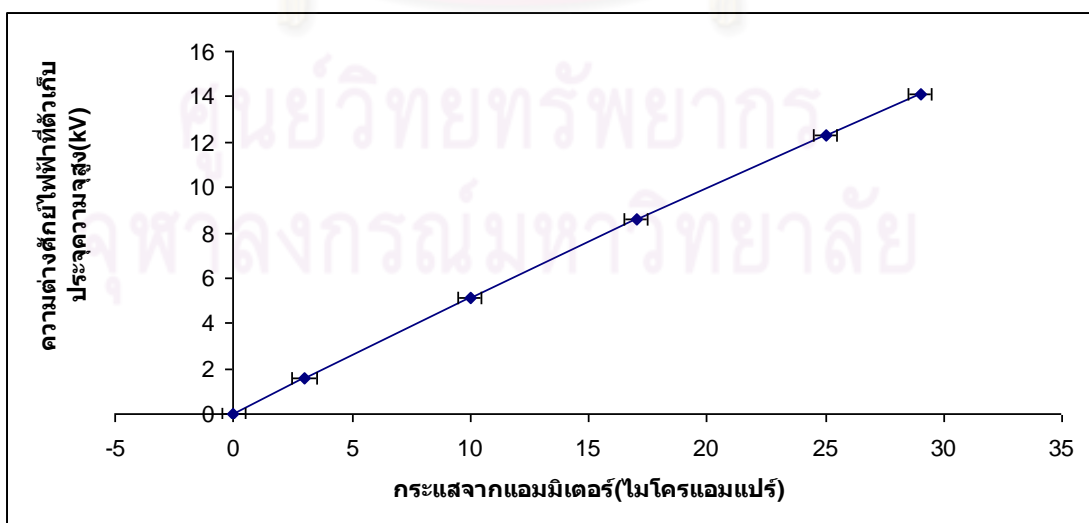


รูปที่ 4.1.11 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์



รูปที่ 4.1.12 ภาพเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง แสดงส่วนควบคุม (รูปซ้าย)
และส่วนไฟฟ้าความต่างศักย์สูง(รูปขวา)

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้วางแผนหาสมบัติของเครื่องและสมบัติของพลาสมาจากเครื่องพีไอซีพีที่พลังงาน 1.4, 2.4 และ 4.32 กิโลจูล จากตัวเก็บประจุความจุสูงขนาด 60 ไมโครฟารัด (30 ไมโครฟารัดสองตัวต่อขนานกัน) เพราะฉะนั้นจึงต้องทำการชาร์จประจุ ไปจนมีความต่างศักย์ขนาด 6.83, 8.94 และ 12 กิโลโวลต์ตามลำดับ แต่เราสามารถชาร์จประจุไปถึงความต่างศักย์ดังกล่าวโดยดูจากแอมมิเตอร์ที่ส่วนควบคุมของเครื่องชาร์จประจุ ซึ่งอ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ลดทอนจากวงจรผ่านตัวต้านทานขนาด 600 เมกะโอมห์ โดยดูจากความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากแอมมิเตอร์และความต่างศักย์ที่ตัวเก็บประจุความจุสูงในขณะที่ทำการชาร์จประจุ แสดงดังรูปที่ 4.1.13



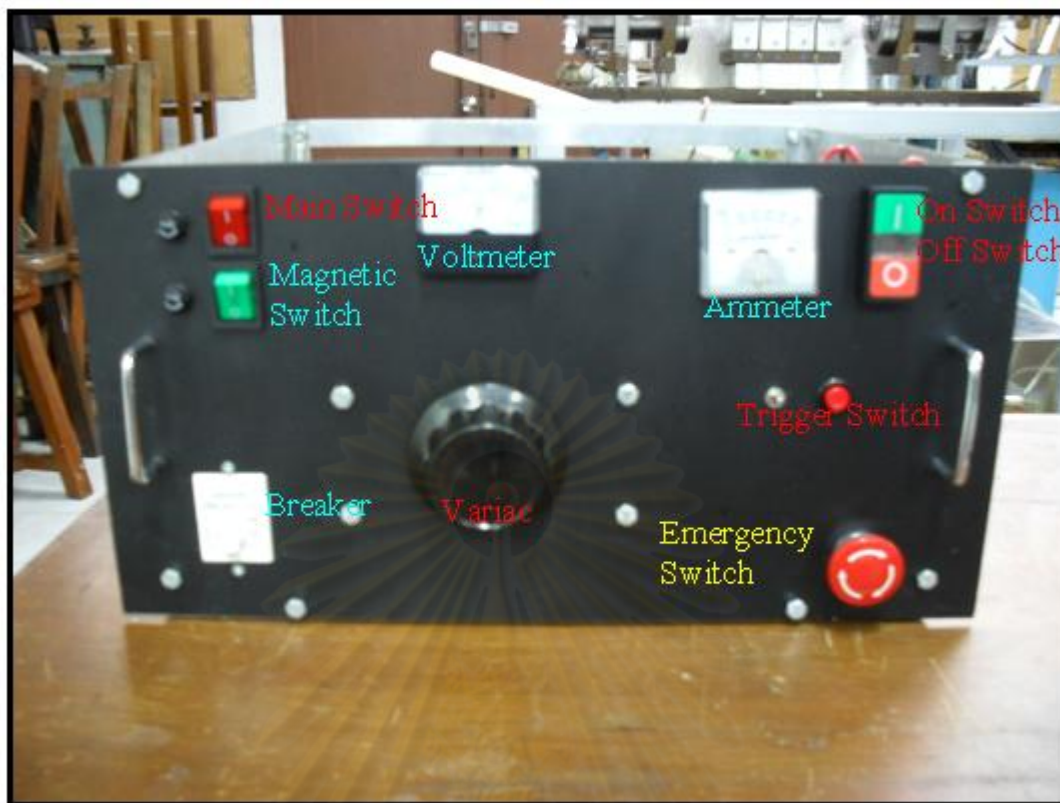
รูปที่ 4.1.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ลดทอนจากตัวเก็บประจุ
และความต่างศักย์ที่ตัวเก็บประจุขณะทำการชาร์จ



รูปที่ 4.1.14 ภาพเครื่องพีไอซีพีที่ทำการสร้างแล้วเสร็จ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.5 การใช้งานเครื่องฟิไอซีพี



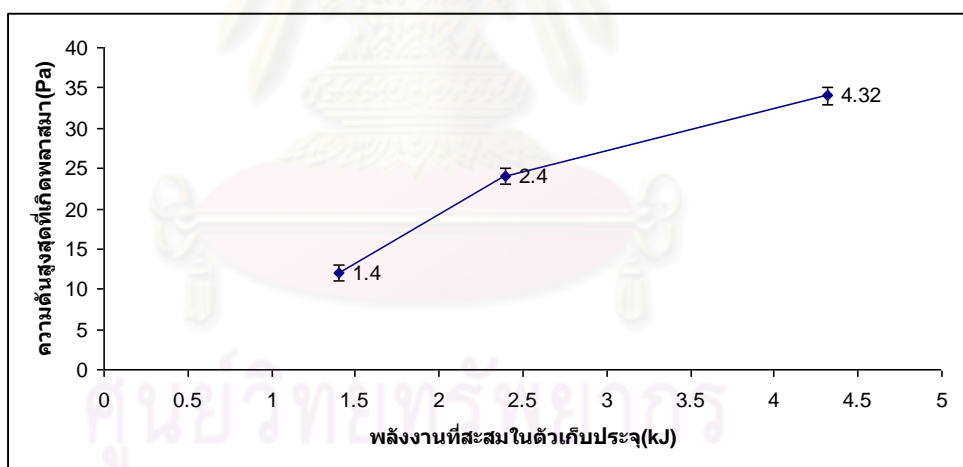
รูปที่ 4.1.15 ภาพแสดงรายละเอียดของเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง

การใช้งานเครื่องฟิไอซีพี เริ่มจาก

1. ทำการทำการชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุความจุสูง เริ่มต้นจากเปิดสวิตช์หลักของเครื่องชาร์จประจุ (Main Switch) จากนั้นหมุนวารีแอคเพื่อตั้งศักย์ไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับวงจรส่วนไฟสูง ในงานวิจัยนี้ตั้งไว้ที่ 200 โวลต์โดยดูจากโวลต์มิเตอร์ เพื่อป้องกันการเสียหายที่จะเกิดกับสายไฟและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆในระยะยาว
2. เปิดแมกเนติกสวิตช์ เพื่อตัดวงจรระหว่างตัวเก็บประจุกับกราวน์ และสับเบรคเกอร์เพื่อเชื่อมต่ วงจรระหว่างวงจรส่วนความต่างศักย์สูงและความต่างศักย์ต่ำ
3. เมื่อต้องการชาร์จประจุทำการเปิดสวิตช์ (On Switch) กระแสไฟฟ้าจะไหลจากวารีแอคผ่านวงหม้อแปลงขาขึ้นความต่างศักย์สูง (Neon Transformer) ผ่านวงจรแปลงกระแสเป็นกระแสตรง(Bridge) ผ่านตัวต้านทาน แล้วเข้าสู่ตัวเก็บประจุความจุสูง ความต่างศักย์ที่ตัวเก็บประจุความจุสูงจะสูงขึ้นเรื่อยๆโดยดูจากแอมมิเตอร์
4. เมื่อถึงความต่างศักย์ที่ต้องการแล้วทำการปิดสวิตช์ (Off Switch)กระแสไฟฟ้าก็จะหยุดไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุความจุสูง

5. เมื่อความดันภายในภาชนะสูญญากาศมาถึงระดับที่ต้องการ ทำการปิดวาล์วปั๊ม ปิดวาล์วและสวิตช์เกจเพื่อป้องกันความเสียหายจากสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าที่อาจกระโดดเข้ามา
6. ทำการปล่อยประจุจากตัวเก็บประจุความจุสูงโดยการเปิดและกดสวิตช์ทริกเกอร์ ประจุไฟฟ้าก็จะไหลออกจากตัวเก็บประจุเข้าสู่ขดลวดรอบเดียว
7. เมื่อทำการปล่อยประจุแล้วทำการยกเบลคเกอร์เพื่อตัดวงจร และปิดแมกเนติกสวิตช์ เพื่อให้ประจุที่ค้างอยู่ที่ตัวเก็บประจุความจุสูงไหลผ่านตัวต้านทานลงกราวด์
8. หากมีกรณีฉุกเฉิน ต้องทำการปลดปล่อยประจุลงกราวด์โดยการปิดแมกเนติกสวิตช์ หรือ กดสวิตช์ฉุกเฉิน (Emergency Switch) ก็จะตัดกระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่เข้าสู่วงจรควบคุม แมกเนติกสวิตช์ก็จะปิด ประจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุก็จะไหลผ่านตัวต้านทานลงกราวด์ในที่สุด

จากนั้นทำการทดสอบเครื่องพีไอซีพีโดยการหาความดันสูงสุดที่สามารถกำเนิดพลาสมาจากก๊าซไนโตรเจน โดยดูจากความดันสูงสุดที่ไม่เกิดพลาสมาสังเกตจากการที่ไม่ปรากฏสัญญาณจากเครื่องสเปคโตรมิเตอร์(จะอธิบายในหัวข้อถัดไป) ผลที่ได้แสดงดังรูป



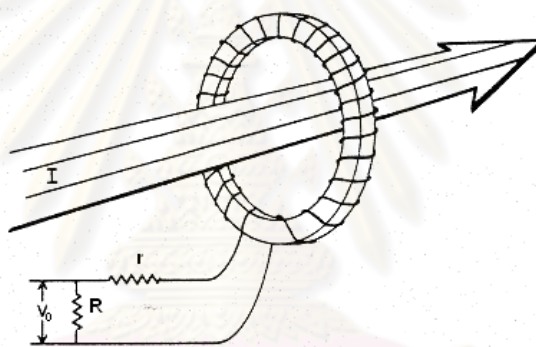
รูปที่ 4.1.16 กราฟแสดงความดันสูงสุดที่สามารถเกิดพลาสมาจากก๊าซไนโตรเจนที่พลังงานต่างๆของเครื่องพีไอซีพี

จากรูปแสดงให้เห็นว่าเครื่องพีไอซีพีที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้โดยมีพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุขนาด 1.4 กิโลจูล หัวข้อต่อไปจะมาศึกษาสมบัติเครื่องและสมบัติของพลาสมาพีไอซีพีที่สร้างขึ้น

4.2 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

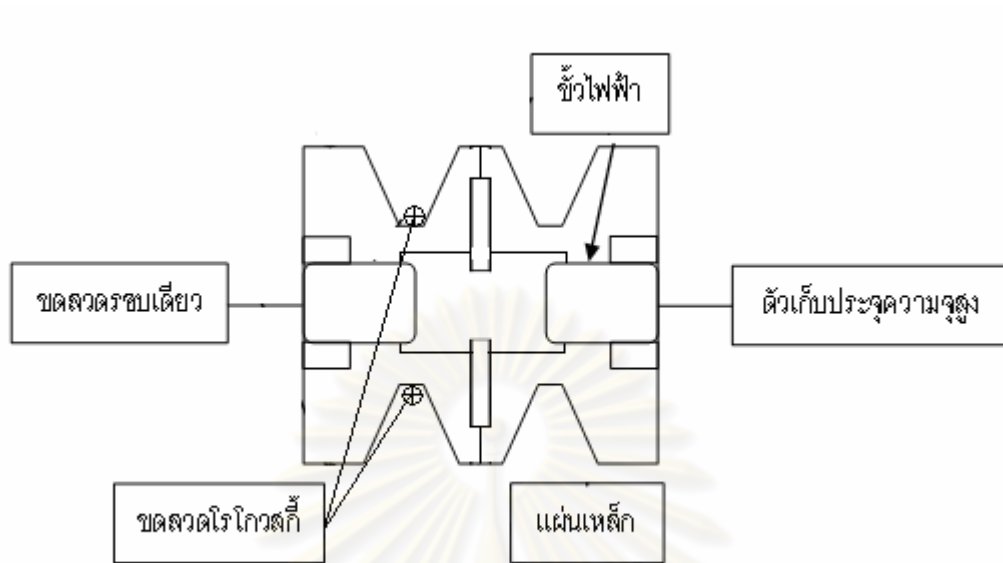
หลังจากเครื่องพีไอซีพีถูกสร้างขึ้นเสร็จสมบูรณ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการศึกษาสมบัติของเครื่องซึ่งก็คือค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรมัดด้วยขดลวดโรโกวสกี และ ทำการวัด ตำแหน่งของพลาสมาที่เวลาต่างๆ ด้วยหัววัดสนามแม่เหล็ก เพื่อหาความเร็วของพลาสมา วัดอุณหภูมิ อิเล็กตรอนด้วยเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ สรุปเครื่องมือวัดที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย ขดลวดโรโกวสกี หัววัดสนามแม่เหล็ก และเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ โดยเครื่องมือสองชนิดแรก จะต้องทำการจัดสร้างขึ้น รายละเอียดของเครื่องมือต่างๆ และทฤษฎีในการหาค่าสมบัติที่ต้องการ จะอธิบายดังต่อไปนี้

4.2.1 ขดลวดโรโกวสกี (Rogowski coil)

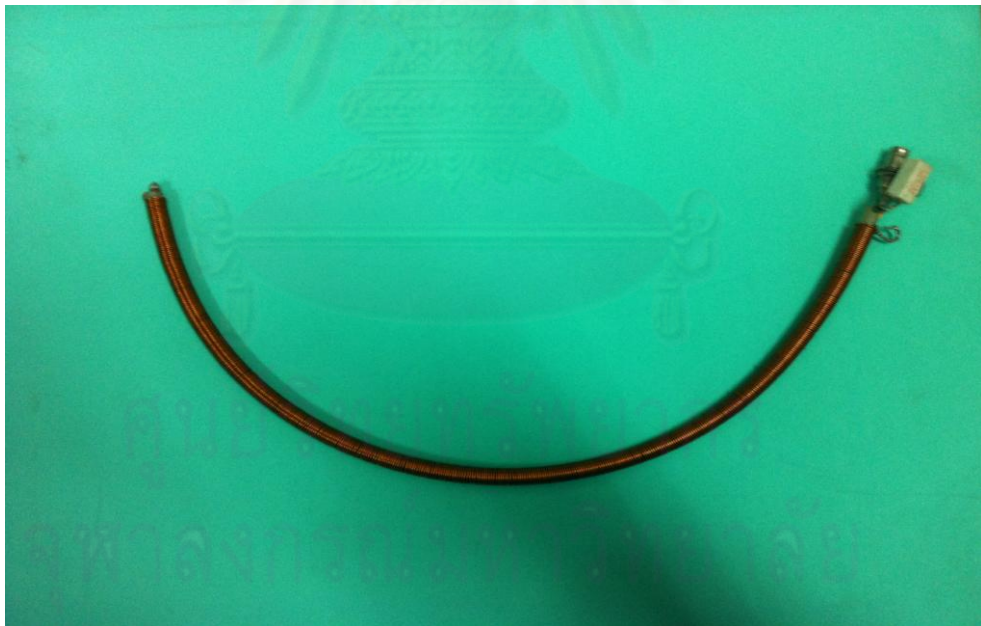


รูปที่ 4.2.1 รูปวาดขดลวดโรโกวสกี เมื่อ r คือความต้านทานภายในของเส้นลวด และ R คือความต้านทานภายนอก [7]

กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรมัดของเครื่องพีไอซีพีผ่านขดลวดรอบเดียว เป็นกระแสไฟฟ้าที่มากจากการสะสมประจุในตัวเก็บประจุแล้วปล่อยออกมาในช่วงเวลาสั้นๆ กระแสไฟฟ้าที่ได้จึงมีค่าสูงมาก หากทำการวัดกระแสไฟฟ้าจากวงจรมัดโดยตรงอาจสร้างความเสียหายต่อเครื่องมือวัดได้ การวัดกระแสไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดโรโกวสกีอาศัยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรมัด สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดโรโกวสกี จากรูปที่ 4.2.1 เมื่อทำการวัดสัญญาณคร่อมความต้านทานภายนอกแล้วนำสัญญาณที่วัดได้ มาทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรมัด โดยขดลวดโรโกวสกี ถูกนำไปวางไว้ที่รอบขั้วไฟฟ้า ซึ่งต่ออยู่กับขดลวดแบบรอบเดียวดังรูปที่ 4.2.2



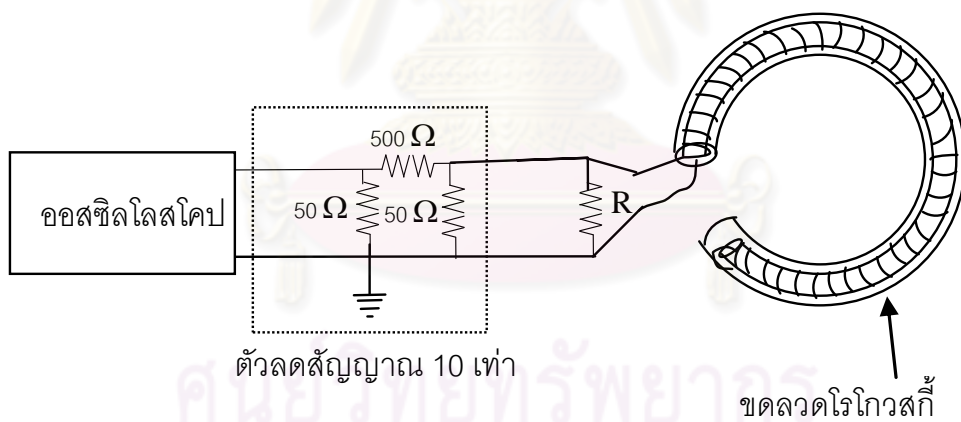
รูปที่ 4.2.2 รูปวาดแสดงการต่อขดลวดโรโกวสกีกับขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 4.2.3 ภาพขดลวดโรโกวสกีที่ใช้ในการทดลอง

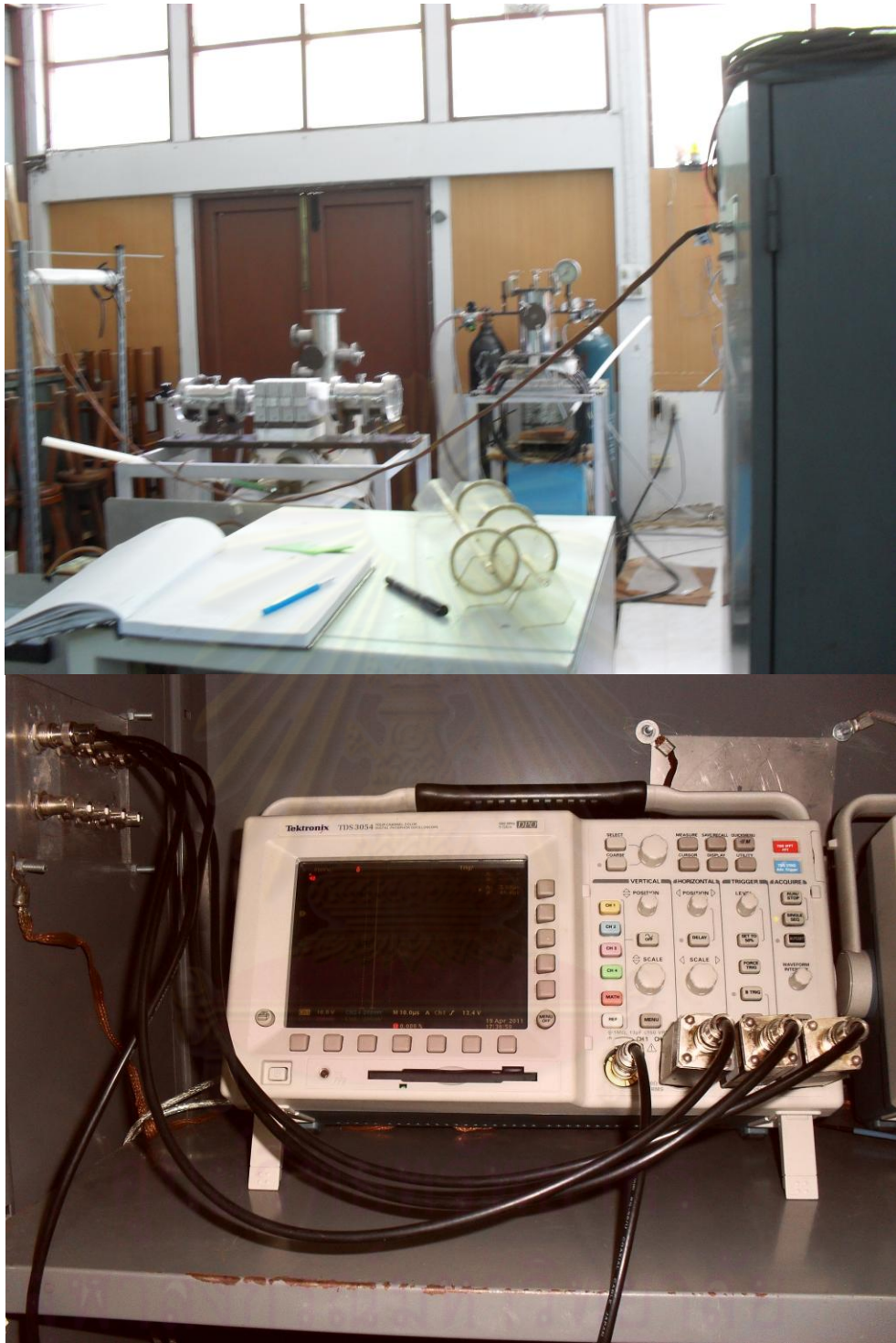


รูปที่ 4.2.4 ภาพการต่อขดลวดโรโกวสกีที่รอบหัวไฟฟ้าในการทดลองจริง



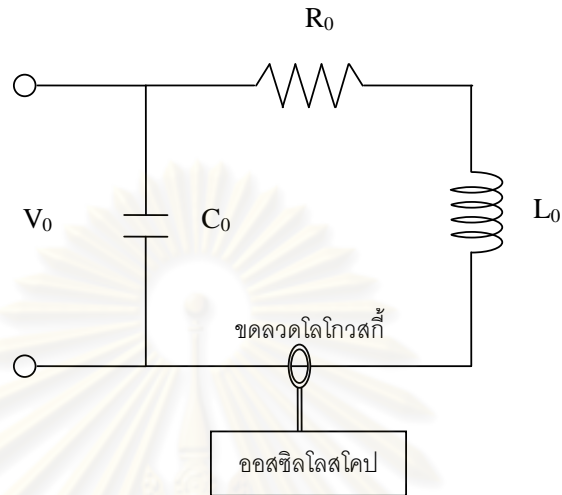
รูปที่ 4.2.5 รูปวาดวงจรเพื่อใช้วัดสัญญาณ[1]

สัญญาณจากขดลวดโรโกวสกี จะถูกส่งมาตามสายสัญญาณแบบแกนร่วม (coaxial) และถูกบันทึกไว้ด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป Tektronik รุ่น TDS 3054 ซึ่งจะถูกวางไว้ในตู้โลหะตลอดเวลา เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน แสดงตามรูป 4.2.6 สัญญาณการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดโรโกวสกีสามารถวัดได้ดังรูปที่ 4.2.7

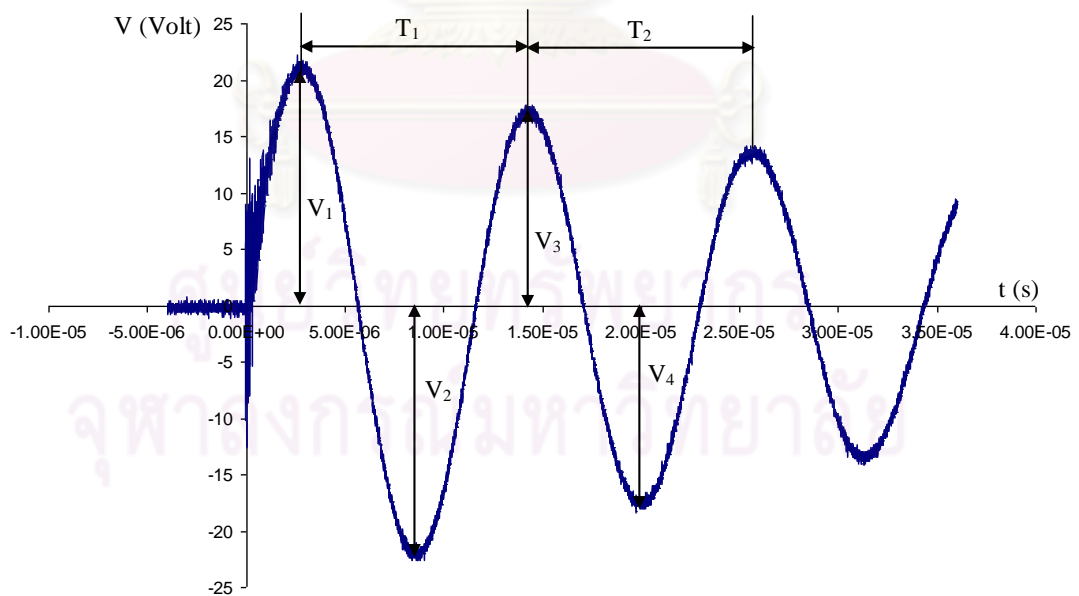


รูปที่ 4.2.6 ภาพการต่อสายสัญญาณจากภายนอกเข้าสู่ออสซิลโลสโคป

การคำนวณหาค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจร ทำได้โดยการนำค่าจากสัญญาณที่วัดได้มาเทียบกับค่า K ซึ่งเป็นตัวแปรที่คำนวณได้จากวงจรเสมือนของวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.2.7 สัญญาณการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดโรโกวสก็สามารถวัดได้ดังรูปที่ 4.2.8^[12]



รูปที่ 4.2.7 วงจรเสมือน[1]



รูปที่ 4.2.8 รูปแสดงสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากขดลวดโรโกวสก็

การคำนวณหาค่าตัวแปร K เริ่มจากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร (I_0) เป็นไปตามสมการ 4.1[12]

$$I_0 = \frac{\pi C_0 V_0 (1+f)}{T} \quad 4.1$$

โดยที่

$$f = \frac{1}{3} \left(\frac{V_2}{V_1} + \frac{V_3}{V_2} + \frac{V_4}{V_3} \right) \quad 4.2$$

C_0 = ค่าความจุของตัวเก็บประจุ

V_0 = ค่าความต่างศักย์ที่ให้กับตัวเก็บประจุในตอนเริ่มต้น

T = คาบเวลาที่วัดได้จากสัญญาณ

วงจรเสมือนที่ในงานวิจัยครั้งนี้มีค่า C_0 12 ไมโครฟารัด $V_0=20$ กิโลโวลต์ ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเสมือนที่ได้จากการคำนวณ และค่าของความต่างศักย์ที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป สามารถนำมาหาเป็นค่า K เป็นไปตามสมการ

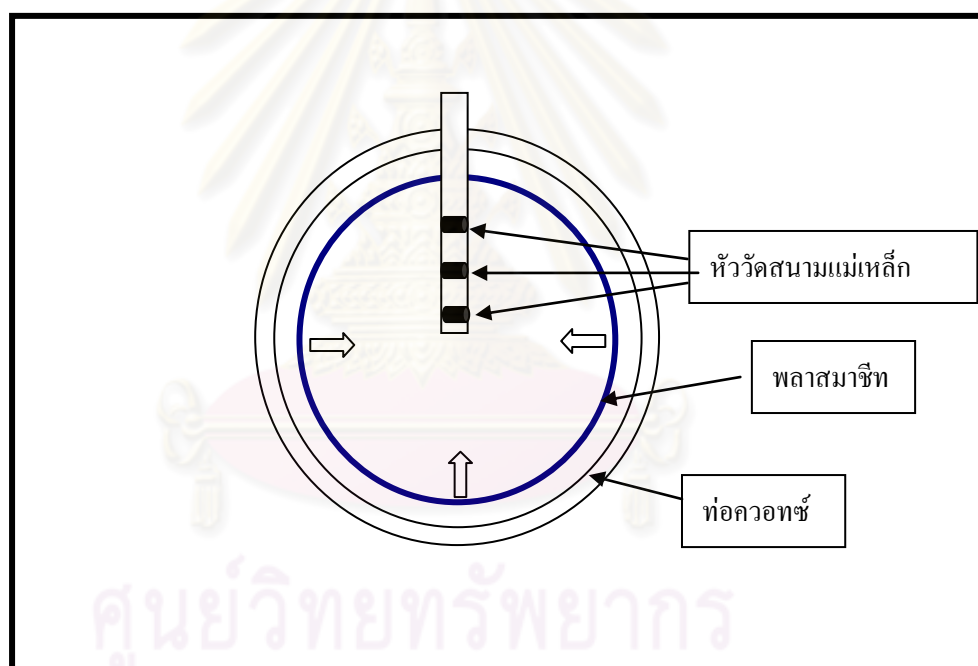
$$K = \frac{I_0}{V_1} \quad 4.3$$

ตัวแปร K ที่ได้เป็นแปรเพื่อใช้ในการเปลี่ยนเทียบจากสัญญาณที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป เป็นกระแสไฟฟ้าของวงจรนั้นๆได้ โดยการวัดค่าความต่างศักย์จากออสซิลโลสโคปแล้วนำมาคูณกับตัวแปร K ก็จะสามารถทราบค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ไหลในวงจรสำหรับการทดลองครั้งนั้นๆได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

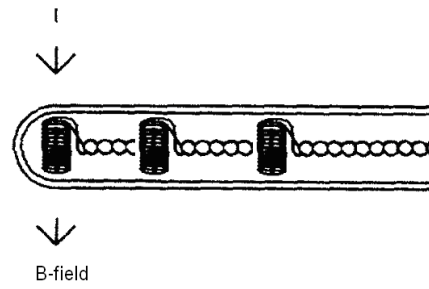
4.2.2 หัววัดสนามแม่เหล็ก (Magnetic probe)

ดังที่ทราบมาแล้วว่าพลาสมาภายในเครื่องฟิวชั่นนั้นจะมีการเคลื่อนที่เข้ามาตามแนวรัศมี พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุ เมื่อแผ่นพลาสมาเคลื่อนผ่านบริเวณไดสนามแม่เหล็ก บริเวณนั้นก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงหากมีขดลวดเล็กๆวางอยู่บริเวณที่พลาสมาที่เคลื่อนที่ผ่านก็จะเกิดกระแสเหนี่ยวนำในเส้นลวดของขดลวดนั้น หากมีขดลวดเล็กนี้มากกว่า 1 อันวางที่ตำแหน่งต่างกัน กันกระแสเหนี่ยวนำในขดลวดแต่ละอันก็จะเกิดที่เวลาต่างกัน ความต่างของเวลาจากสัญญาณที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำนี้ และระยะห่างระหว่างขดลวดเล็ก ก็จะทำให้เราทราบถึงตำแหน่งที่เวลาต่างกันในการเคลื่อนที่ของพลาสมา รวมถึงความเร็วเฉลี่ยของพลาสมาในช่วงระยะห่างนั้น ขดลวดเล็กนี้เรียกว่า หัววัดสนามแม่เหล็ก

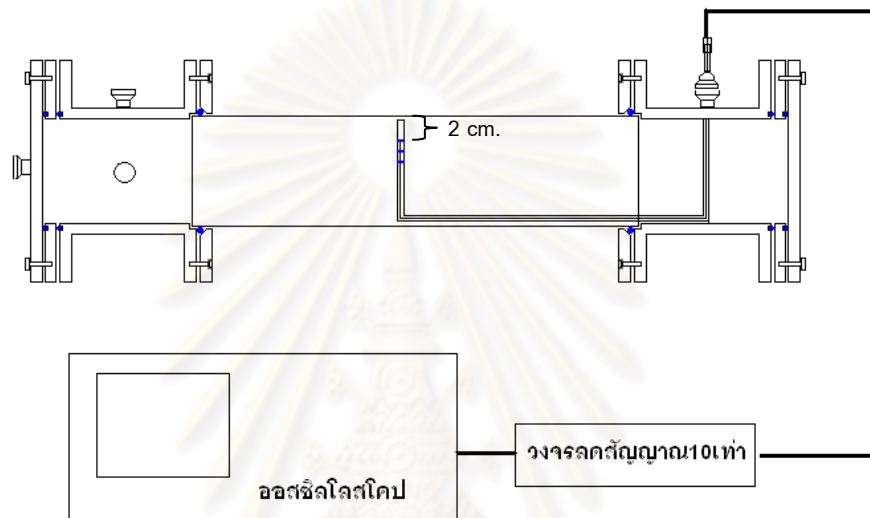


รูปที่ 4.2.9 แผนภาพแสดงการจัดวางหัววัดสนามแม่เหล็ก

งานวิจัยนี้ใช้หัววัดสนามแม่เหล็กในการหาตำแหน่งที่พลาสมาเคลื่อนที่ และความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของพลาสมาภายในเครื่องฟิวชั่น โดยทำการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กที่มีจำนวนรอบของขดลวด 30 รอบ จำนวน 3 อัน แต่ละอันมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.5 มิลลิเมตร และยาว 3 มิลลิเมตร จัดวางห่างกันอันละ 1 เซนติเมตร และพันเส้นลวดส่วนที่เหลือไขว้กัน แล้วใส่ไว้ในหลอดแก้ว ดังรูป



รูปที่ 4.2.10 รูปวาดหัววัดสนามแม่เหล็ก[7]

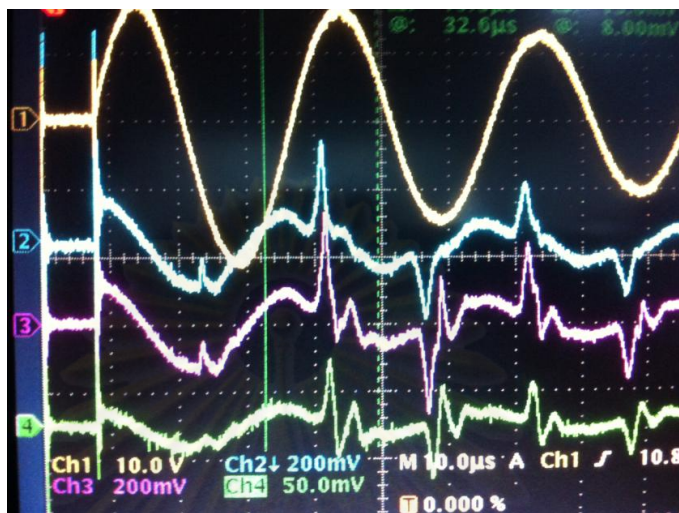


รูปที่ 4.2.11 แผนภาพแสดงการจัดวางหัววัดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.2.12 ภาพการจัดวางหัววัดสนามแม่เหล็กในการทดลอง

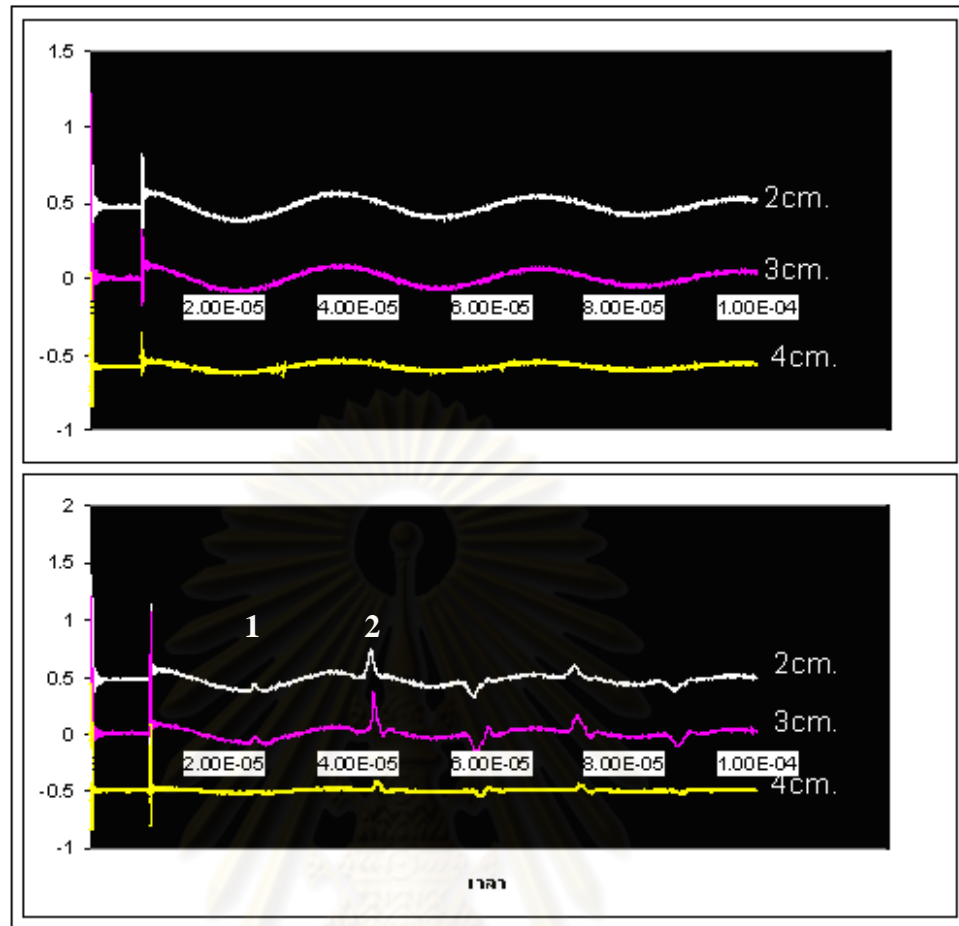
จัดวางหัววัดสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.2.11 โดยให้หัววัดสนามแม่เหล็กอันแรก ห่างจากขอบท่อควอท์เป็นระยะ 2 เซนติเมตร อันถัดมาจึงเป็น 3 และ 4 เซนติเมตรตามลำดับ สัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็กที่ออสซิลโลสโคปบันทึกไว้ได้ขณะเกิดพลาสมาเป็นดังรูปที่



รูปที่ 4.2.13 ภาพสัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็กที่ออสซิลโลสโคป บันทึกได้ขณะเกิดพลาสมาเส้นที่ 1 บนสุดคือสัญญาณของกระแสไฟฟ้าจากขดลวดโรโกวสกี 2,3,4 คือสัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็กตัวที่ห่างจากขอบเป็นระยะ 2,3 และ 4 เซนติเมตรตามลำดับ

ในขณะที่ทำการทดลองเราจะกำหนดให้เครื่องออสซิลโลสโคปเริ่มทำการบันทึกเมื่อมีสัญญาณจากขดลวดโรโกวสกีเข้ามาสูงถึงระดับ 10.8 โวลต์ซึ่งหมายถึงเมื่อประจุถูกปล่อยจากตัวเก็บประจุความจุสูง เนื่องจากพลาสมาที่เคลื่อนที่เข้ามาตามแนวรัศมีจึงผ่านหัววัดสนามแม่เหล็กแต่ละอันที่เวลาต่างกัน สัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็กเมื่อเกิดพลาสมาจึงเกิดยอดจากการรบกวนของพลาสมาที่เวลาต่างกัน โดยอันที่อยู่ใกล้ขอบจะปรากฏก่อนตามด้วยอันถัดมา

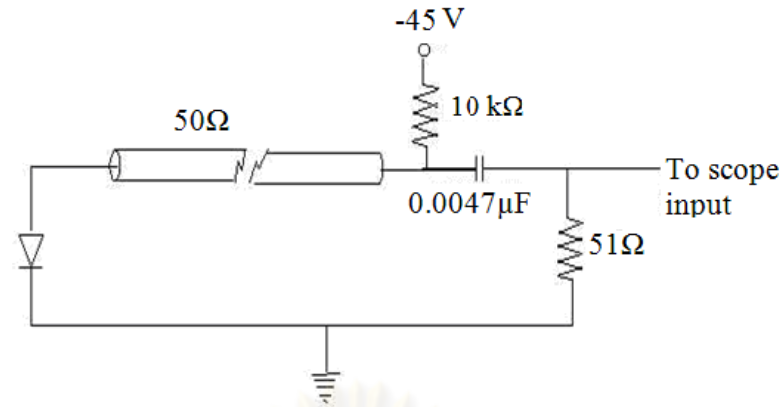
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2.14 ภาพสัญญาณที่วัดได้จากหัววัดสนามแม่เหล็ก ขณะไม่เกิดพลาสมาที่ความดัน 100 ปาสคาล(บน) และ เกิดพลาสมาจากก๊าซอาร์กอนที่ความดัน 2 ปาสคาล(ล่าง) จากเครื่องพีไอซีพีขนาด 1.4 กิโลจูล

จากรูปที่ 4.2.14 จะเห็นว่าเมื่อเกิดพลาสมาสัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็กจะปรากฏยอดชัดเจน ยอดที่ 1 ของหัววัดแต่ละอันปรากฏที่เวลาเดียวกัน ในขณะที่ ยอดที่ 2 ปรากฏที่เวลาเหลื่อมกันคือเริ่มต้นจากหัววัด 2, 3 และ 4 เซนติเมตรจากขอบตามลำดับ แต่พลาสมาเริ่มเกิดขึ้นเวลาไหนนั้นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้ซิลิคอนพินไดโอด (BPX65) ซึ่งเป็นเครื่องมือตรวจจับแสงได้ตั้งแต่แสงความถี่ช่วงที่ตามองเห็นจนถึงความถี่ย่านรังสีเอ็กซ์ โดยการใช้ซิลิคอนพินไดโอดตรวจวัดสัญญาณพร้อมกับหัววัดสนามแม่เหล็กก็จะทำให้ทราบเวลาเริ่มต้นของการเกิดพลาสมา

การต่อซิลิคอนพินไดโอดจะต้องทำการไบอัสลบให้กับไดโอด โดยมีวงจรดังรูปที่ 4.2.15 และต่อเข้ากับเครื่องพีไอซีพี ตรงแกนกลางของภาชนะสุญญากาศดังรูปที่ 4.2.16

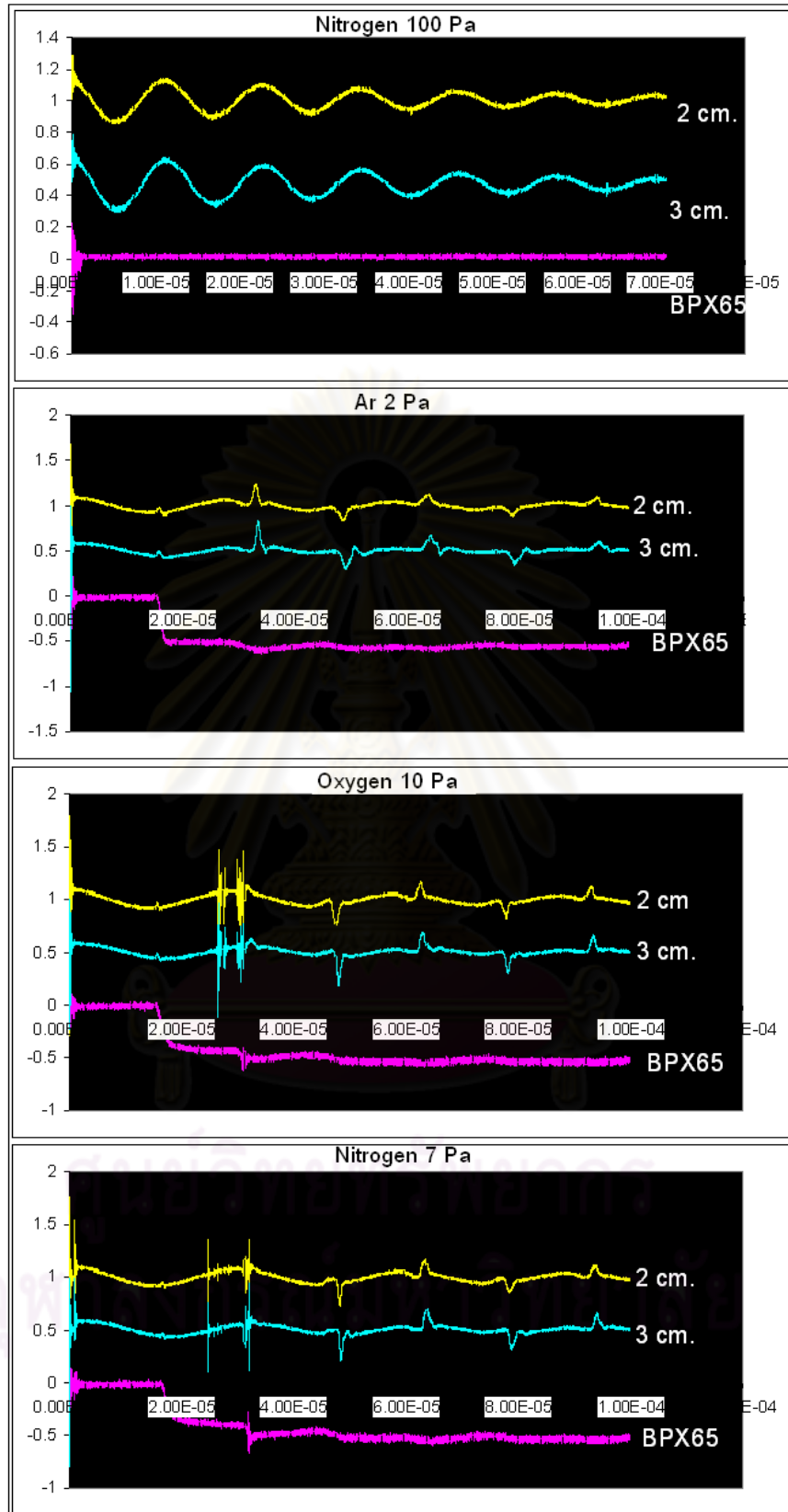


รูปที่ 4.2.15 วงจรการต่อซีลิกอนพินไดโอด[7] เพื่อวัดแสงที่เกิดจากพลาสมา



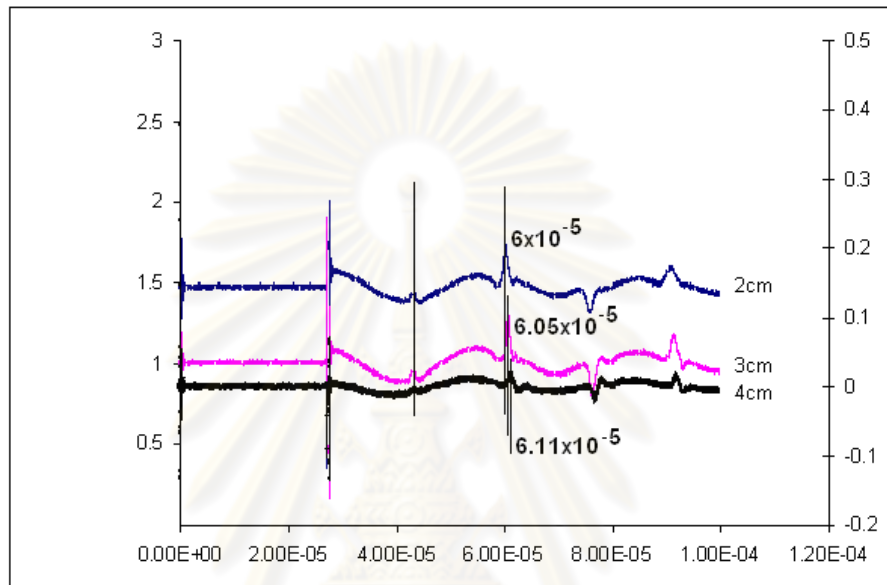
รูปที่ 4.2.16 ภาพการติดตั้งซีลิกอนพินไดโอด

สัญญาณจากซีลิกอนพินไดโอดที่วัดพร้อมกับหัววัดสามแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 4.1.17



รูปที่ 4.2.17 ภาพแสดงสัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็กและซิลิคอนฟิโนไดโอด

จากรูป การวัดไนโตรเจนที่ 100 ปาสคาลเป็นการวัดขณะที่ไม่เกิดพลาสมา จึงไม่มีสัญญาณจากซิลิคอนพินไดโอด แต่เมื่อวัดขณะเกิดพลาสมาได้ปรากฏสัญญาณจากซิลิคอนพินไดโอด นั่นคือจุดที่มีแสงเกิดขึ้นหรือจุดเริ่มต้นของการเกิดพลาสมา และสัญญาณจากซิลิคอนพินไดโอดปรากฏตรงยอดที่ 1 ของสัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็กในทุกๆกราฟ เพราะฉะนั้นเราสามารถใช้เวลาตรงยอดที่ 1 ของสัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็กเป็นจุดเริ่มของการเกิดพลาสมาได้



รูปที่ 4.2.18 ภาพขยายของสัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็กที่ได้จากการวัดพลาสมาจากแก๊สอาร์กอนที่ความดัน 2 ปาสคาล กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพีขนาด 1.4 กิโลจูล

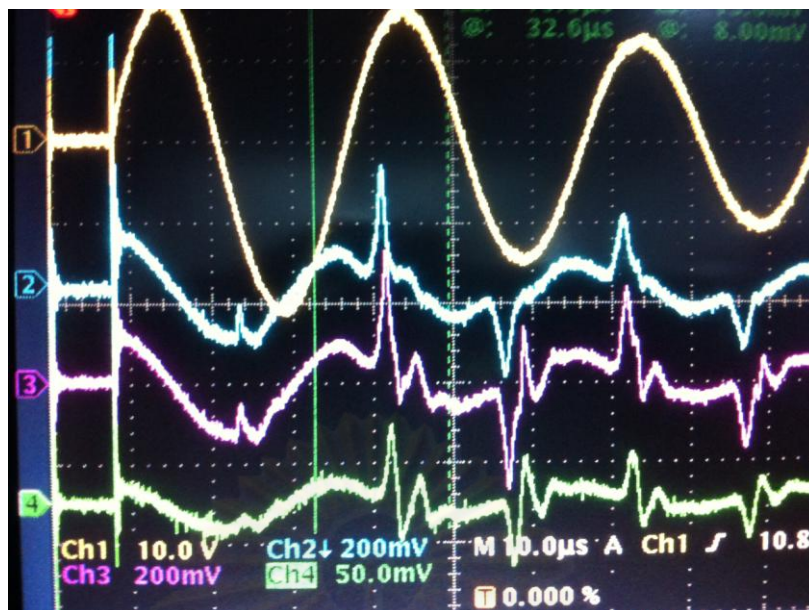
โดยการดูเวลาที่ปรากฏของยอดที่สองจากหัววัดสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆก็สามารถหาตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของพลาสมาได้ และจากช่วงเวลาที่ต่างกันในช่วงระยะทาง 1 เซนติเมตรก็จะสามารถหาความเร็วเฉลี่ยในช่วงนั้นได้ ในที่นี้เราทำการวัดช่วงเวลาที่ต่างกันเฉพาะยอดที่สองหลังจากเริ่มเกิดพลาสมา และสามารถนำสัญญาณที่บันทึกขณะเกิดพลาสมาด้วยสัญญาณที่ทำการบันทึกขณะไม่เกิดพลาสมา (100 Pa) เพื่อให้สังเกตยอดที่ทำการวัดได้ง่ายขึ้น หากยอดที่จะทำการวัดนั้นปรากฏไม่ชัดเจน

จากรูป	เวลาขณะผ่านหัววัดอันแรก	คือ 6.00×10^{-5} วินาที
	เวลาขณะผ่านหัววัดอันที่สอง	คือ 6.05×10^{-5} วินาที
	เวลาขณะผ่านหัววัดอันที่สาม	คือ 6.11×10^{-5} วินาที

หัววัดแต่ละตัววางห่างกัน 1 เซนติเมตรเพราะฉะนั้นก็จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วเฉลี่ยระหว่างหัววัดตัวที่ 1 และ 2} \quad \text{คือ } 0.01\text{m} / 0.05 \times 10^{-5} \text{ s} = 2.0 \times 10^4 \text{ m/s}$$

$$\text{ความเร็วเฉลี่ยระหว่างหัววัดตัวที่ 2 และ 3} \quad \text{คือ } 0.01\text{m} / 0.06 \times 10^{-5} \text{ s} = 1.7 \times 10^4 \text{ m/s}$$



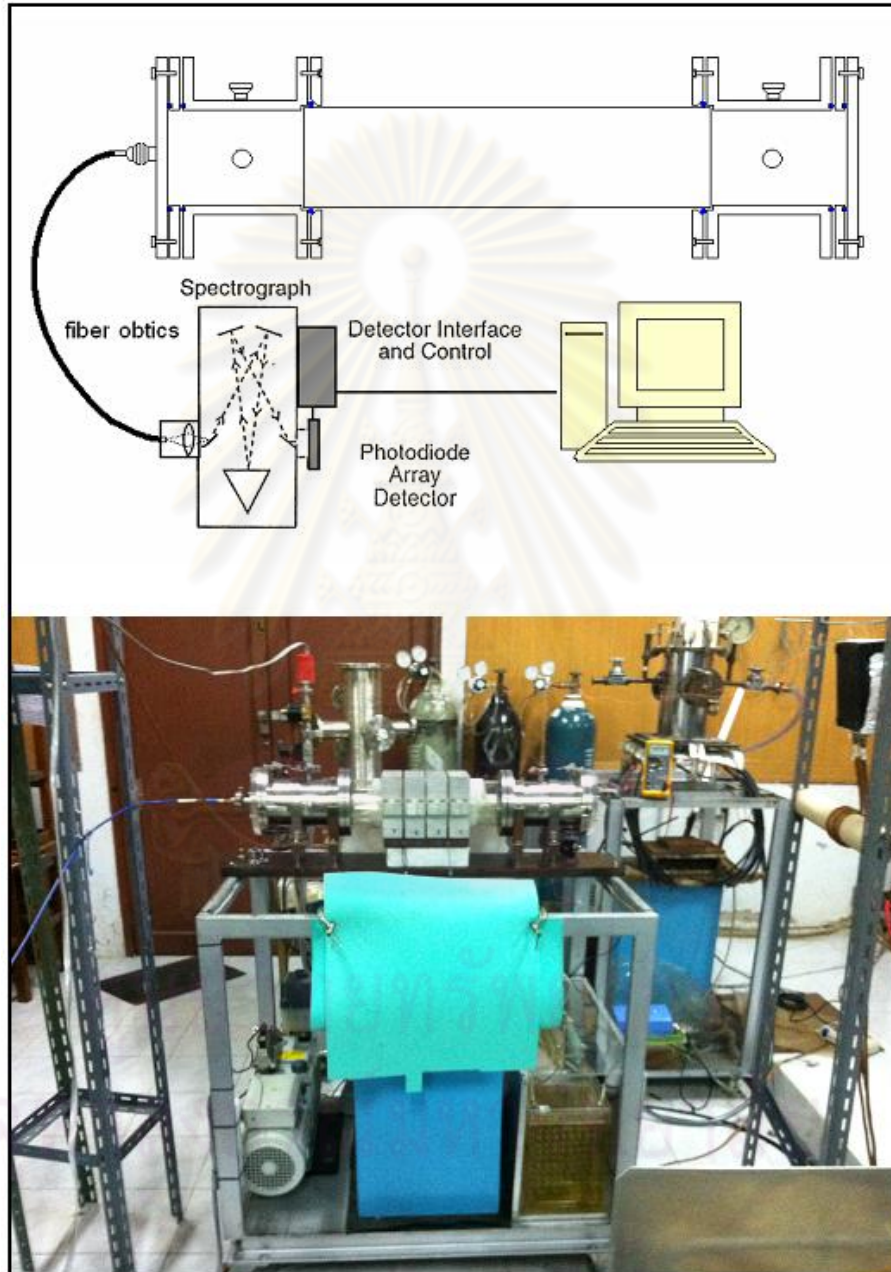
รูปที่ 4.2.19 ภาพสัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็กที่ปรากฏในออสซิลโลสโคป จากการเคลื่อนที่ของพลาสมาไนโตรเจนภายในเครื่องพีไอซีพี

วิเคราะห์สัญญาณจากออสซิลโลสโคป จากรูปที่ 4.2.19 เป็นสัญญาณที่ได้จากการทดลอง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองทางทฤษฎีที่กล่าวว่าพลาสมาจะฟอร์มตัวเป็นแผ่นกระแสหมุนวนเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กด้านการเปลี่ยนแปลงจากกระแสภายนอก แล้วเคลื่อนที่เข้ามาตามแนวรัศมีเนื่องจากแรงลอเรนซ์ เมื่อพลาสมาซีทที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เคลื่อนที่ผ่านหัววัดสนามแม่เหล็ก ก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดของหัววัดสนามแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กผ่านพื้นที่หน้าตัดหัววัดสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของหัววัดเล็กมากและความเร็วของพลาสมาจะมีความสูง ลักษณะของสัญญาณจึงเป็นรูปไซน์ที่มีคาบสั้นและแอมพลิจูดสูงจนเกิดเป็นยอดตามรูป ความสูงของยอดบอกได้ถึงความเร็วของพลาสมาซีทขณะเคลื่อนที่ผ่านและปริมาณอนุภาคที่มีสนามแม่เหล็กจากพลาสมาโดยในขณะเคลื่อนที่ลึกลงมาก็จะกวาดเอาก๊าซที่อยู่ด้านหน้าเข้ามาด้วยความดันด้านหน้าพลาสมาซีทเพิ่มขึ้นความเร็วของพลาสมาจึงมีโอกาสลดลง พลาสมาซีทอาจกวาดก๊าซลึกลงเข้ามาถึงตำแหน่งหนึ่งที่อยู่นอกจุดวางหัววัดสนามแม่เหล็กจนความดันเพิ่มขึ้นและไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปได้อีก ความสูงของยอดเส้นที่สามเมื่อนับจากเส้นบนนั้นจะสูงสุด แสดงให้เห็นว่าความเร็วพลาสมาจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและช้าลงในช่วงหลัง ซึ่งคำตอบที่ถูกต้องพิสูจน์จากผลการทดลอง

การเกิดยอดหลังๆ นั้นยังไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าเกิดจากการเคลื่อนที่ของพลาสมาหรือจากการสะท้อนของสัญญาณภายในวงจรของหัววัดเองในที่นี้การวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของพลาสมาจึงทำการวัดเฉพาะที่ยอดที่สองจากที่เกิดพลาสมา

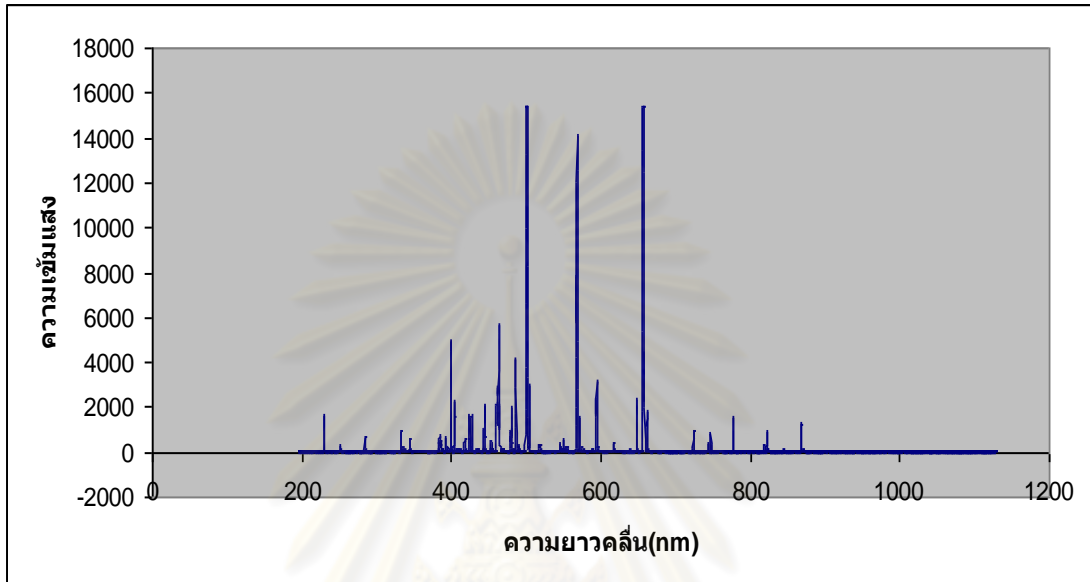
4.2.3 เครื่องสเปคโตรมิเตอร์ (Optical Emission Spectroscopy: OES)

จากบทที่ 3 เราได้เรียนรู้ถึงที่มาของแสงที่แผ่ออกมาจากพลาสมา ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การหาอุณหภูมิอิเล็กตรอน โดยอาศัยเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ ซึ่งมีวิธีการจัดวางเครื่องมือดังรูปที่ 4.2.20



รูปที่ 4.2.20 ภาพการจัดวางเครื่องสเปคโตรสโคปีในการทดลอง

สเปกตรัมจากพลาสมาที่มีความยาวคลื่นต่างกันจะถูกแยกออกด้วยสเปคโตรกราฟ ภายใต้อุปกรณ์สเปคโตรมิเตอร์ และสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันจะถูกรับด้วยไดโอดรับแสง (Photodiode Array: PDA หรือ CCD) แล้วโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะแสดงผลออกมาเป็น ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงของความยาวคลื่นนั้นๆ ดังรูป



รูป 4.2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสง จากสเปกตรัมของ ไนโตรเจนพลาสมา ที่ความดัน 5 ปาสคาล กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพีขนาด 1.4 กิโลจูล

สัญญาณที่เครื่องสเปคโตรมิเตอร์บันทึกเป็นดังรูปที่ 4.2.21 ซึ่งแสดงเป็นสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและความเข้มในแต่ละความยาวคลื่นของรังสีที่แผ่ออกมาจากพลาสมา จากรูปแสดงให้เห็นว่าของรังสีที่แผ่ออกมามีความยาวคลื่นไม่ต่อเนื่อง ความยาวคลื่นแสงที่แผ่ออกมาจากพลาสมาเป็นลักษณะของการแผ่รังสีแบบเส้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและความหนาแน่นของโอกาสที่สถานะนั้นๆ ของการแผ่รังสีแบบเส้นคือ [7]

$$I_{pq} = \frac{hc}{\lambda} A_{pq} N_p \quad 4.11$$

A_{pq} คือโอกาสที่เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานที่ p ไปสู่ระดับชั้นที่ q เขียนสามการ 4.11 เป็น

$$I_1 = \frac{hc}{\lambda_1} A_1 N_0^1 \quad 4.12$$

และจากสมการ 3.6 ของแบบจำลองสมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่

$$N_0^1 = N_0 \frac{g_1}{U_0} \exp\left(-\frac{E_0}{kT_e}\right) \quad 4.13$$

เพราะฉะนั้นอัตราส่วนของความเข้มแสงเส้น 1 และ เส้น 2 คือ

$$R_1 = \frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1 \lambda_2 N_0 U_1}{A_2 g_2 \lambda_1 N_1 U_0} \cdot \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{kT_e}\right) \quad 4.14$$

ในที่นี้ค่า λ_1, λ_2 ก็คือความยาวคลื่นแสงที่มีความเข้มแสง I_1 และ I_2 ตามลำดับที่เราเลือกจากกราฟ โดยจะต้องเลือกเส้นที่มีสถานะไฮออนถัดกัน 1 สถานะ คือหากสเปกตรัมเส้นหนึ่งมาจากไฮออนสถานะ i อีกเส้นต้องมาจากไฮออนสถานะ $i+1$ (ในที่นี้คือ 0 กับ 1 นั้นเอง) ส่วนค่า A และ g ซึ่งก็คือโอกาสที่เกิดการเปลี่ยนชั้นพลังงาน และตัวถ่วงน้ำหนักทางสถิติ รวมถึงสถานะของไฮออนที่ความยาวคลื่นใดๆ นั้นสามารถสืบค้นได้จากเว็บไซต์ของ National Institute of Standards and Technology. (NIST) ส่วนค่า U_i และ N_i สามารถหาจากสมการที่ 3.7 และ 3.8 แต่จะเป็นการยุ่งยาก เราสามารถแก้ปัญหานี้โดยการเลือกสเปกตรัมอีกสองเส้นเป็น λ_3 และ λ_4 ที่มีความเข้ม I_3 และ I_4 ที่มีสถานะไฮออนเป็น i และ $i+1$ เช่นเดียวกัน จากนั้นหาอัตราส่วนของความเข้มของสองเส้นนี้ได้เป็น

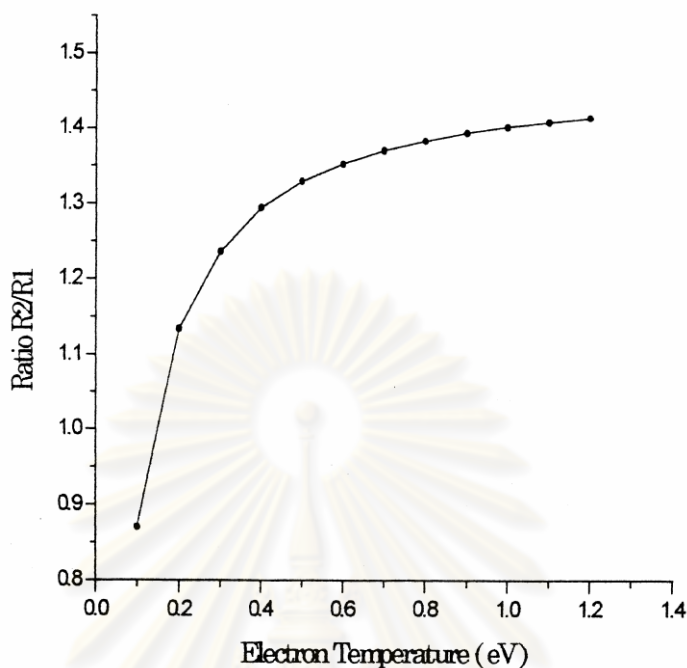
$$R_2 = \frac{I_3}{I_4} = \frac{A_3 g_3 \lambda_4 N_0 U_1}{A_4 g_4 \lambda_3 N_1 U_0} \cdot \exp\left(\frac{E_4 - E_3}{kT_e}\right) \quad 4.15$$

ทำการกำจัดตัวแปรทั้งสองที่เราไม่ทราบค่าก็จะได้เป็นสมการที่ 4.16[7]

$$R = \frac{R_1}{R_2} = \frac{I_1}{I_2} \frac{I_4}{I_3} = \frac{A_1 A_4 g_1 g_4 \lambda_2 \lambda_3}{A_2 A_3 g_2 g_3 \lambda_1 \lambda_4} \cdot \exp\left(-\frac{E_1 - E_2 + E_4 - E_3}{kT_e}\right) \quad 4.16$$

จากสมการนี้เราทำการเลือกสเปกตรัม 2 คู่ที่มีสถานะไฮออนเป็น i และ $i+1$ เช่นเดียวกัน แล้วแทนค่าตัวแปรต่างๆ ที่นำมาจากเว็บไซต์ดังกล่าวก็จะสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนในรูปที่ติดค่าคงที่โบลทซ์มาน โดยมีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ และทำการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R และ kT_e เพื่อนำค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่คำนวณได้มาเทียบกับเส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์นี้ โดยค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่คำนวณได้จะต้องอยู่ในช่วงความสัมพันธ์แบบเส้นตรงของสัมพันธ์นี้ เนื่องจากขณะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอิเล็กตรอน ในช่วงเส้นตรงของ

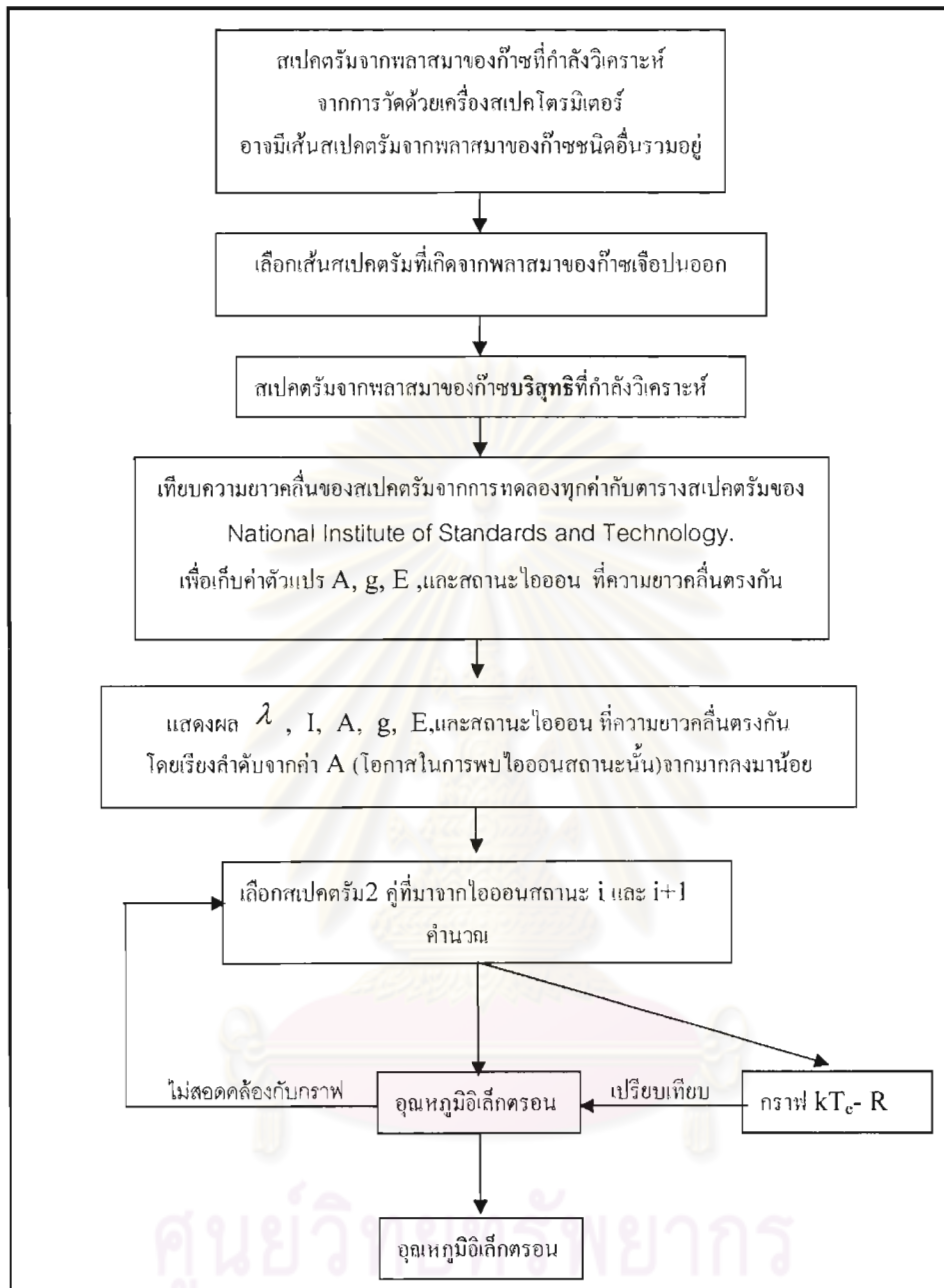
สัมพันธ์นี้ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า R ที่ชัดเจน เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R และ kT_e เพื่อให้เป็นช่วงในการเลือกอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่คำนวณได้แสดงดังรูป 4.2.22



รูปที่ 4.2.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนและค่า R [7]

สเปคโตรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นยี่ห้อ Ocean Optics รุ่น HR4C3461 สามารถตรวจวัดความยาวคลื่นได้ตั้งแต่ 195.21 นาโนเมตรถึง 1128.57 นาโนเมตร สเปคตรัมของแสงที่มีความยาวคลื่นนอกช่วงนี้จะไม่สามารถตรวจวัดได้

ในการเก็บสัญญาณสเปคตรัมที่แผ่ออกมาจากพลาสมานั้น ได้ติดตั้งจุดรับแสงบริเวณด้านข้างตรงแกนกลางของท่อควอทซ์ เนื่องจากไม่สามารถเจาะท่อควอทซ์ เพื่อสร้างจุดติดตั้งบริเวณด้านบนได้ สัญญาณสเปคตรัมที่แผ่จากพลาสมา ถูกส่งผ่านไปตามเคเบิลใยแก้วนำแสง โดยการเก็บสัญญาณ ได้ทำการตั้งโปรแกรมให้เครื่องสเปคโตรมิเตอร์ ตัดสัญญาณของแสงปกติ ก่อนทำการทดลอง เพื่อที่ในขณะที่ทำการทดลองสัญญาณที่รับจะได้เป็นสัญญาณของรังสีที่แผ่ออกมาจากพลาสมาเท่านั้น ดังนั้นค่าที่ได้จึงเป็นความเข้มจากการแผ่รังสีของพลาสมาเพียงอย่างเดียว การเก็บค่าสัญญาณสเปคตรัมทำการเก็บสัญญาณเป็นเวลา 0.1 วินาที โดยช่วงเวลาดังกล่าวนี้ครอบคลุมช่วงเวลาที่เกิดพลาสมาทั้งหมด ซึ่งในการทำการทดลองได้ตั้งโปรแกรมให้สเปคโตรมิเตอร์เริ่มต้นเก็บค่าเมื่อมีแสงจากพลาสมาเข้ามาเกิน 50 และเครื่องสเปคโตรมิเตอร์หยุดเก็บข้อมูลหลังจากเวลาผ่านไป 0.1 วินาที ซึ่งพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในได้สลายตัวไปแล้ว จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาคำนวณหาค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนด้วยขั้นตอนตามแผนภาพดังรูป



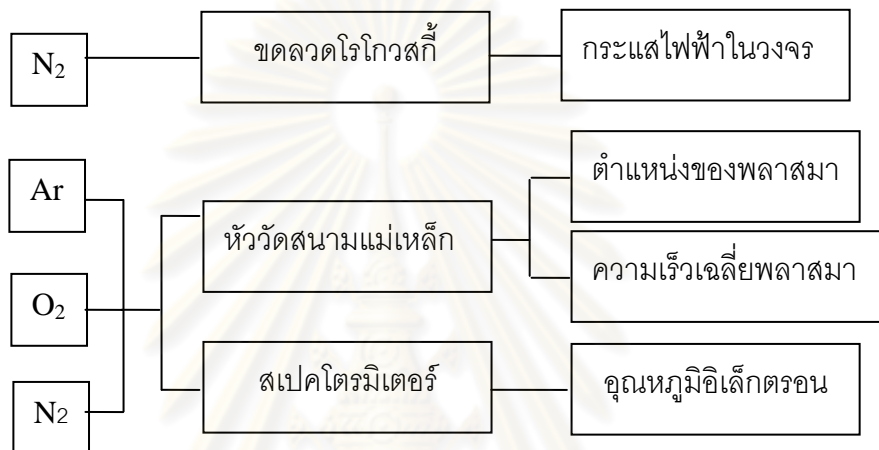
รูปที่ 4.2.23 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณหาค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอน

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองวัดการเคลื่อนที่ของพลาสมา และหาค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอน จากพลาสมาของก๊าซอาร์กอน ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซออกซิเจน ที่ความดัน 2, 3, 5, 7 และ 10 ปาสคาล ที่กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพี โดยใช้พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุขนาด 1.4, 2.4 และ 4.32 กิโลจูล และจากเครื่องที่ดำพินซ์ที่มีพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุขนาด 2.4 กิโลจูล เพื่อสามารถเปรียบเทียบสมบัติของพลาสมาที่กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพีที่มีพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุน้อยกว่าเครื่องที่ดำพินซ์ ที่ระดับพลังงานเดียวกับเครื่องที่ดำพินซ์ และที่ระดับพลังงานสูงกว่าเครื่องที่ดำพินซ์ตามลำดับ

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย ขดลวดโรโกวสกีใช้ในการวัดหากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรของเครื่อง หัววัดสนามแม่เหล็กใช้หาตำแหน่งและความเร็วเฉลี่ยของพลาสมา และสเปคโตรมิเตอร์ใช้วัดหาอุณหภูมิอิเล็กตรอน แสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 5.1

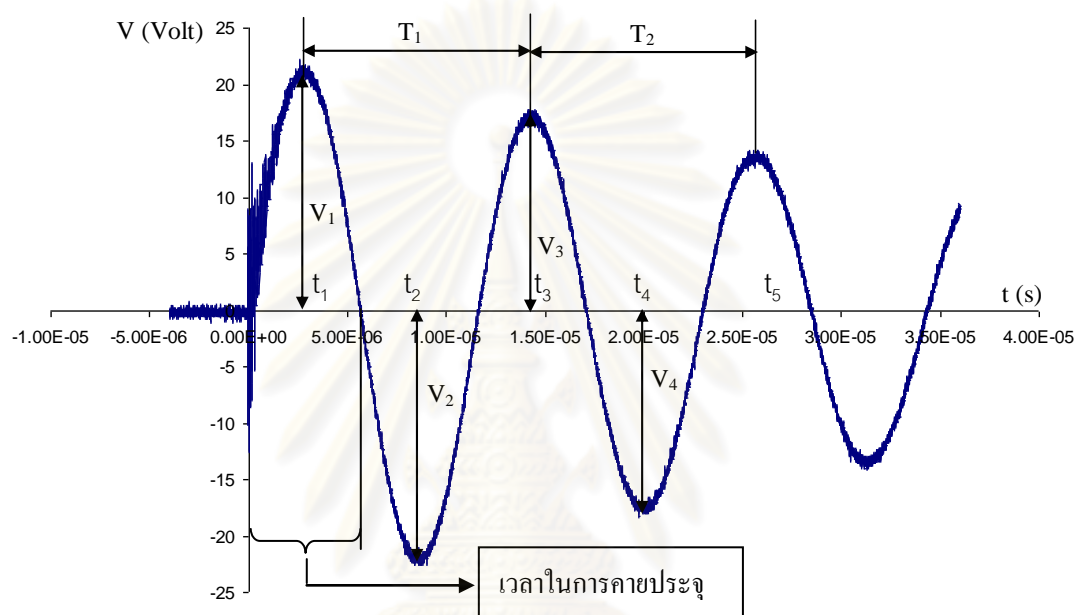


รูปที่ 5.1 แผนภาพการทดลองด้วยเครื่องมือทั้ง 3 ชนิด

ขดลวดโรโกวสกี และหัววัดสนามแม่เหล็กที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการสร้างขึ้น ก๊าซที่ใช้ทดลองงานวิจัยนี้ประกอบด้วยก๊าซอาร์กอน ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.99% สำหรับการทดลองเพื่อหากระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรของเครื่องพีไอซีพีด้วยขดลวดโรโกวสกีนั้น ทำการทดลองทุกครั้งด้วยก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 100 ปาสคาลซึ่งมีความดันที่ไม่เกิดพลาสมาภายในภาชนะสุญญากาศ ส่วนการทดลองเพื่อหาสมบัติของพลาสมาด้วยหัววัดสนามแม่เหล็กและเครื่องสเปคโตรมิเตอร์นั้นใช้ก๊าซทั้งสามชนิดที่ความดัน 2, 3, 5, 7 และ 10 ปาสคาล โดยก่อนเริ่มทำการทดลองและทุกครั้งหรือทำการเปลี่ยนชนิดก๊าซในขณะทำการทดลอง จะทำการปั๊มภาชนะสุญญากาศทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจนถึงความดันต่ำสุด จากนั้นทำการเติมก๊าซที่ต้องการทดลองแล้วปั๊มทิ้งจนถึงความดันต่ำอีกครั้งจำนวน 4 รอบ เพื่อให้ภายในภาชนะสุญญากาศมีเฉพาะก๊าซที่ต้องการวัดผลบริสุทธิ์ที่สุด และทำการเติมก๊าซใหม่ทุกครั้งขณะวัดผลแต่ละค่า ค่าต่างๆที่แสดงในกราฟในบทนี้เป็นค่าเฉลี่ยที่เกิดจากการเก็บข้อมูลอย่างต่ำ 4 ครั้ง

5.1 การวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรของเครื่องพีไอซีพี

ในการทดลองนี้ได้ทำการบันทึกค่าเพิ่มเติมคือช่วงเวลาในการคายประจุจากตัวเก็บประจุ ดังรูปซึ่งก็คือค่าช่วงเวลาตั้งแต่ประจุเริ่มออกจากตัวเก็บประจุจนกระทั่งสัญญาณกลับมาเป็นศูนย์อีกครั้ง สังเกตได้จากสัญญาณจากขดลวดโรโกวสกีดังรูปที่ 5.2 ผลการทดลองหาค่าตัวแปร K แสดงดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.2 รูปแสดงการวัดค่าความต่างศักย์และเวลาในสัญญาณที่ได้จากขดลวดโรโกวสกีที่วัดจากวงจรเสมือนและแสดงการวัดเวลาการคายประจุจากตัวเก็บประจุในสัญญาณจากเครื่องพีไอซีพี ในที่นี้แสดงรูปพร้อมกัน

ครั้งที่	t1	v1	t2	v2	t3	v3	t4	v4	t5	v5	K (A/V)
1	3.03	6.80	3.62	7.80	4.20	5.20	4.78	5.72	5.36	3.88	593
2	1.08	6.60	1.68	7.76	2.25	5.00	2.84	5.36	3.42	3.64	606
3	3.53	6.60	4.13	7.68	4.70	5.08	5.29	5.52	5.86	3.84	611
4	4.29	6.56	4.88	7.44	5.46	4.76	6.04	5.20	6.63	3.44	607
5	0.87	6.56	1.46	7.64	2.04	5.00	2.62	5.48	3.19	3.72	618
6	4.13	6.72	4.71	7.80	5.29	5.24	5.87	5.64	6.44	3.88	605
K เฉลี่ย											607
S.D.											8.21

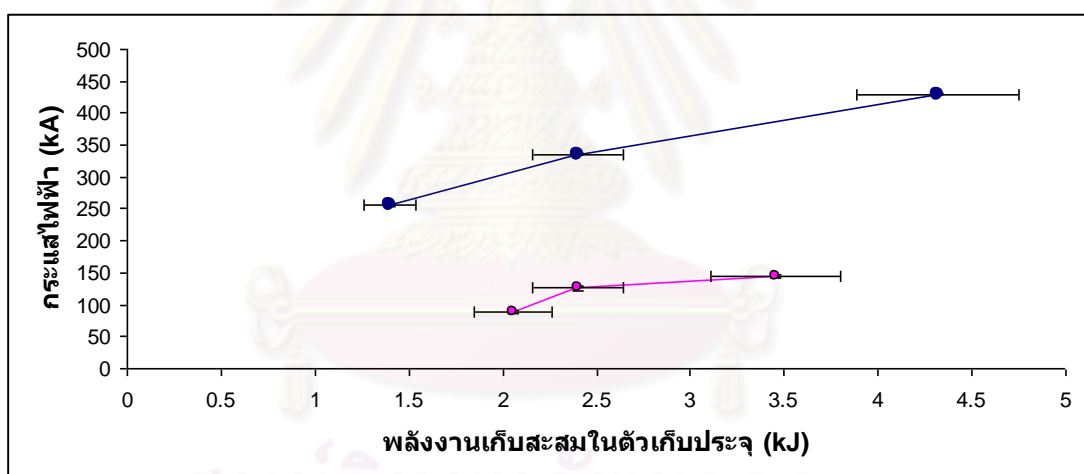
ตารางที่ 5.1 แสดงผลการหาตัวแปร K ที่ได้จากวงจรเสมือน

เวลาและความต่างศักย์ที่บันทึก มีหน่วยเป็น 10^{-5} วินาทีและโวลต์ตามลำดับ

ตัวแปร K เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 607 แอมแปร์ต่อโวลต์โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 8.21 สามารถนำมาคำนวณหากระแสที่ไหลในวงจรของเครื่องพีไอซีพีได้ ผลการหากระแสที่ไหลในวงจรและช่วงเวลาการคายประจุสำหรับการทดลองให้เครื่องพีไอซีพีทำงานที่พลังงาน 1.4, 2.4 และ 4.32 กิโลจูล แสดงดังตารางที่ 5.2

พลังงาน(J)	เวลาในการคายประจุ (μ s)	V1 (V)						กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร (kA)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย	
PICP 1400	12.6	13.4	13.4	13.2	13.4	13.4	13.4	256
PICP 2400	12.7	17.6	17.4	17.6	17.4	17.6	17.5	336
PICP 4320	13.0	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	430
ThetaPinch2054	5.14	4.60	4.60	4.80	4.80	4.40	4.64	89.0
ThetaPinch2400	5.40	6.60	6.60	6.56	6.56	6.54	6.57	126
ThetaPinch3456	5.40	7.40	7.60	7.40	7.60	7.60	7.52	144

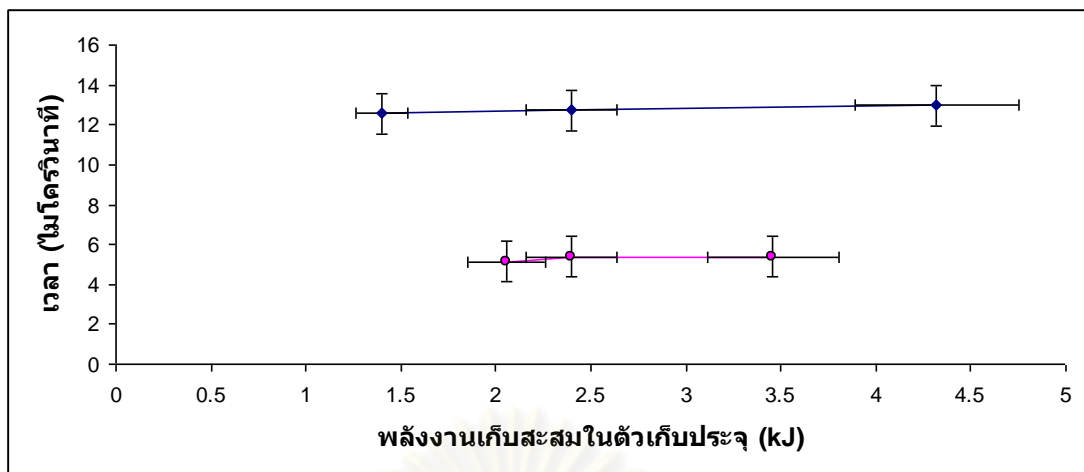
ตารางที่ 5.2 แสดงผลการหากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรและช่วงเวลาการคายประจุจากเครื่องพีไอซีพีที่ทำงานโดยมีพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุขนาด 1.4, 2.4 และ 4.32 กิโลจูล



รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ของพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ

และกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

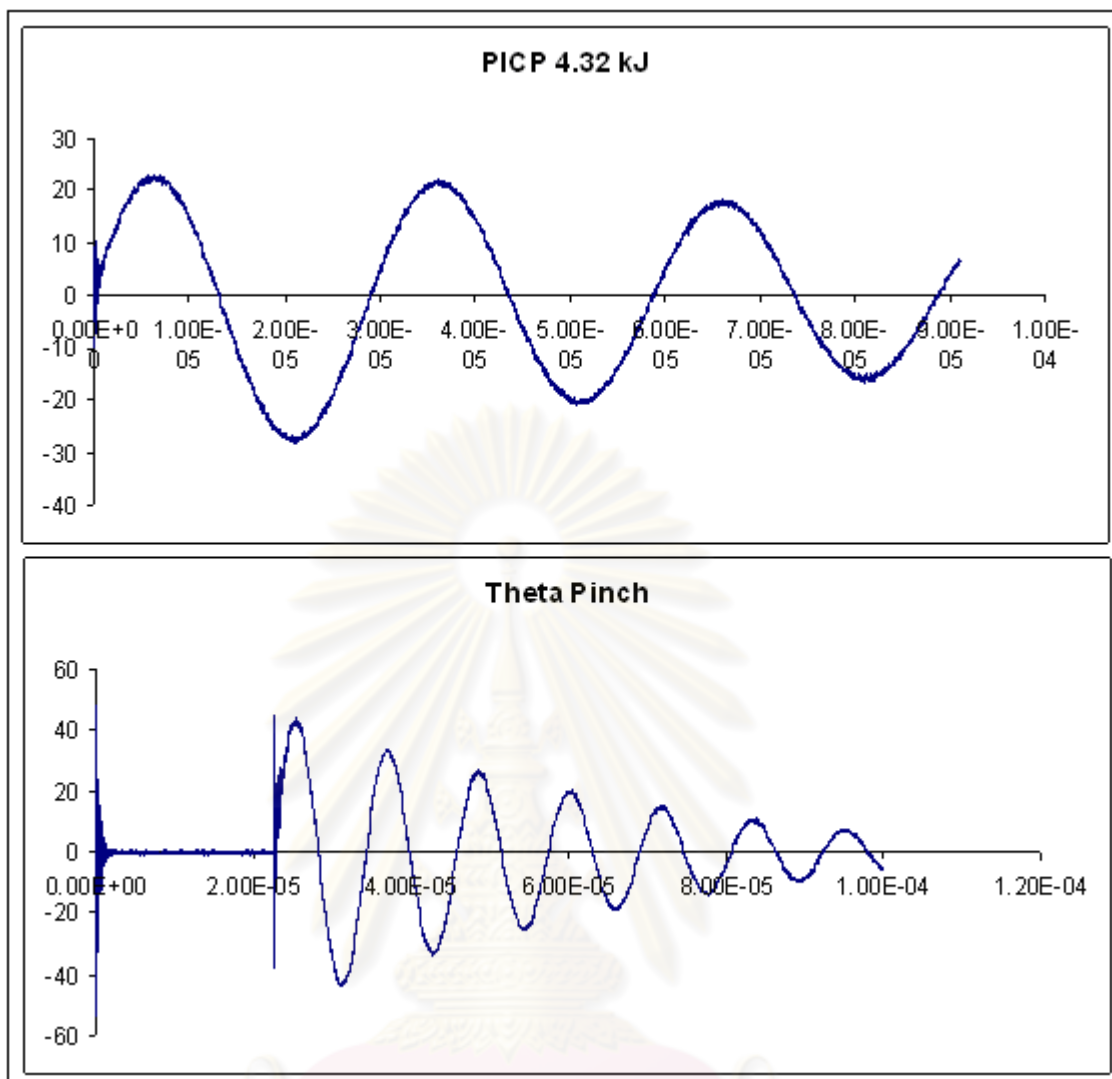


รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุกับเวลาในการคายประจุ

พลังงาน (J)	ความจุของตัวเก็บประจุ (μF)	ความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุ (kV)	ประจุที่สะสมตามทฤษฎี (mC)	เวลาในการคายประจุ (μs)
PICP 1400	60.0	6.83	410	12.6
PICP 2400	60.0	8.94	536	12.7
PICP 4320	60.0	12.0	720	13.0
Theta Pinch 2054	12.0	18.5	222	5.14
Theta Pinch 2400	12.0	20.0	240	5.40
Theta Pinch 3456	12.0	24.0	288	5.40

ตารางที่ 5.3 รายละเอียดของตัวเก็บประจุจากเครื่องพีไอซีพีและเครื่องที่ด้าพินซ์

จากผลการทดลองเห็นได้ว่าเมื่อค่าความต่างศักย์ที่ให้กับตัวเก็บประจุความจุสูงของเครื่องพีไอซีพีมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น และกระแสในวงจรในเครื่องพีไอซีพีอยู่ในระดับที่สูงกว่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรของเครื่องที่ด้าพินซ์ เนื่องจากมีจำนวนประจุที่สะสมในตัวเก็บประจุมีค่ามากกว่า เมื่อพิจารณาเวลาในการคายประจุในขณะที่ ค่าความต่างศักย์ที่ให้กับตัวเก็บประจุของเครื่องพีไอซีพีมีค่าเพิ่มขึ้น ช่วงเวลาในการคายประจุเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ช่วงเวลานี้ก็อยู่ในระดับที่สูงกว่าเครื่องที่ด้าพินซ์ การที่ช่วงเวลาในการคายประจุของเครื่องที่ด้าพินซ์สั้นกว่านั้น เกิดจากจำนวนประจุที่น้อยในขณะที่ความต่างศักย์มีค่ามาก ช่วงเวลาในการคายประจุที่แตกต่างกันนี้ส่งผลให้ ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรมันต่างกันดังรูปที่ 5.5

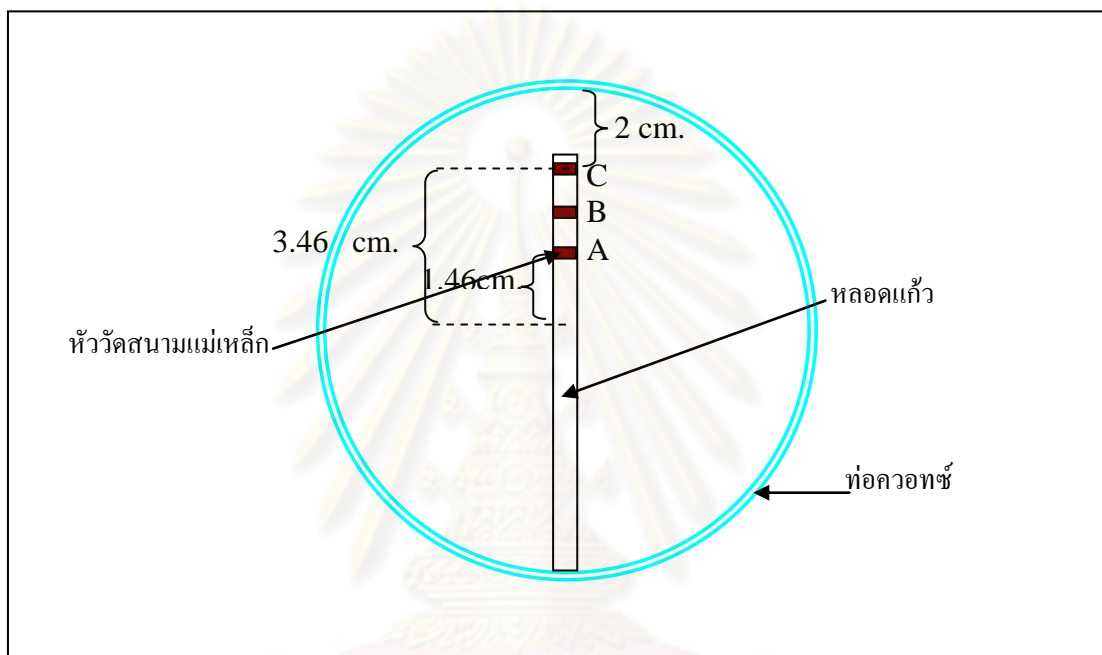


รูปที่ 5.5 กราฟแสดงสัญญาณจากขดลวดโรโกวสกี ความสูงของสัญญาณจากเครื่องที่ดำพินซ์ที่มากกว่านั้นเกิดจากการใช้วงจรลดสัญญาณที่น้อยกว่า

ได้กล่าวมาแล้วว่าวงจรของเครื่องพีไอซีพีเป็นลักษณะของวงจร RLC และลักษณะของสัญญาณของกระแสไฟฟ้าในวงจรที่ได้เป็นลักษณะของสัญญาณที่เป็นการแกว่งแบบถูกหน่วงซึ่งคาบของกระแสเป็นไปตามความสัมพันธ์ $T = 2\pi\sqrt{LC}$ เมื่อแทนค่าคาบและค่าความจุของตัวเก็บประจุจากเครื่องทั้งสองจะได้ $L_{picp} = 1.16L_{thetapinch}$ ทำให้ทราบว่าค่าความเหนี่ยวนำจากเครื่องพีไอซีพีมีค่ามากกว่าเครื่องที่ดำพินซ์

5.2 การวัดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในเครื่องพีไอซีพี

หัววัดสนามแม่เหล็ก 3 อัน ถูกจัดวางภายในท่อควอทซ์ตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยหัววัดอันแรกอยู่ห่างจากผิวด้านในของท่อควอทซ์เป็นระยะ 2 เซนติเมตร ท่อควอทซ์มีรัศมีภายใน 5.46 เซนติเมตรตำแหน่งของหัววัดทั้งสามอันเมื่อวัดจากศูนย์กลางจึงเป็น 3.36, 2.46 และ 1.46 เซนติเมตรที่ตำแหน่ง C, B และ A ตามลำดับ ตามรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แผนภาพแสดงการจัดวางหัววัดสนามแม่เหล็กและระยะที่วัดจากศูนย์กลางท่อควอทซ์

สำหรับท่อควอทซ์ของเครื่องที่ดำพินซ์มีรัศมีภายใน 5.6 เซนติเมตรซึ่งใหญ่กว่าท่อควอทซ์จากเครื่องพีไอซีพีเล็กน้อย และหัววัดสนามแม่เหล็กอันแรกถูกวางห่างจากผิวด้านในเป็นระยะ 2 เซนติเมตร จุด C, B และ A จึงห่างจากแกนกลางเป็นระยะ 3.6, 2.6 และ 1.6 เซนติเมตรตามลำดับ

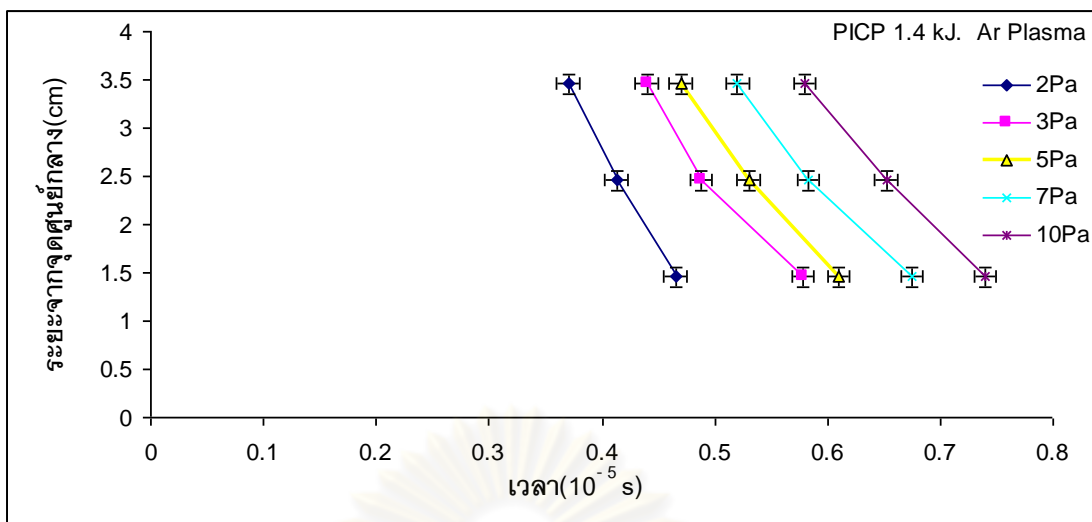
จากวิธีการที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 สามารถวัดเวลาการเคลื่อนที่ของพลาสมามาถึงตำแหน่งที่จัดวางหัววัดสนามแม่เหล็กได้ แสดงดังตารางที่ 5.4 และแสดงความสัมพันธ์ของเวลาที่มาถึงหัววัดกับระยะจุดศูนย์กลางท่อควอทซ์ของเครื่องพีไอซีพีขนาด 1.4 กิโลจูลตามรูปที่ 5.7-5.10

ในงานวิจัยครั้งนี้ ค่าความคลาดเคลื่อนในการจัดวางหัววัดสนามแม่เหล็กมีค่าไม่เกิน 0.1 เซนติเมตร ความคลาดเคลื่อนในการวัดเวลามีค่าเท่ากับ 0.01×10^{-5} วินาที และความคลาดเคลื่อนในการวัดความดันมีค่าไม่เกิน 0.2 ปาสคาล

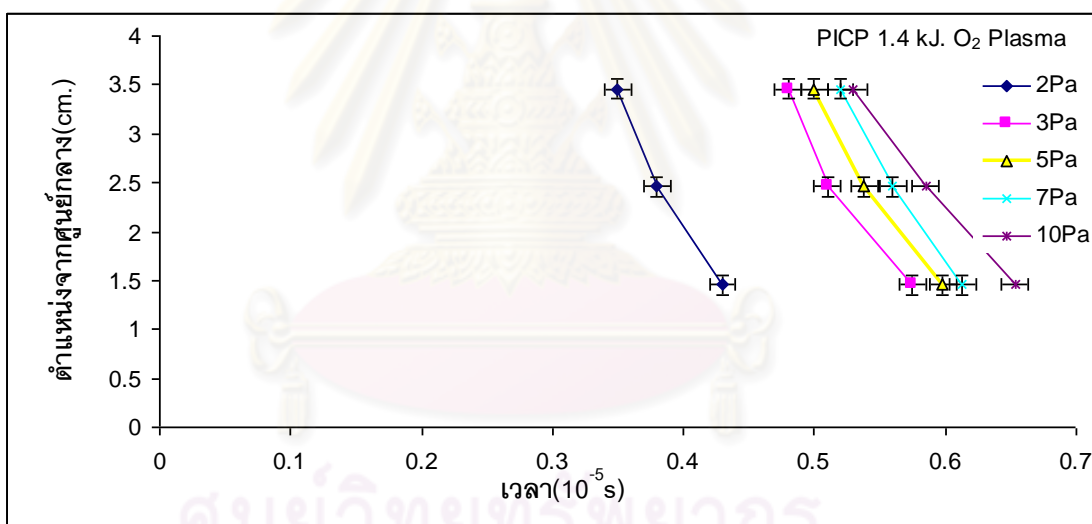
PICP 1.4 kJ					PICP 2.4 kJ				
ความดันก๊าซ (Pa)		เวลาเมื่อมาถึงตำแหน่งวัด (10^{-5} s)			ความดันก๊าซ (Pa)		เวลาเมื่อมาถึงตำแหน่งวัด (10^{-5} s)		
		C	B	A			C	B	A
Ar	2	0.37	0.41	0.47	Ar	2	0.34	0.38	0.43
	3	0.44	0.49	0.58		3	0.38	0.43	0.48
	5	0.47	0.53	0.61		5	0.42	0.47	0.54
	7	0.52	0.58	0.81		7	0.48	0.53	0.61
	10	0.58	0.65	0.74		10	0.48	0.54	0.62
O ₂	2	0.35	0.38	0.43	O ₂	2	0.34	0.37	0.42
	3	0.48	0.51	0.58		3	0.35	0.39	0.44
	5	0.50	0.54	0.60		5	0.38	0.43	0.48
	7	0.52	0.56	0.61		7	0.41	0.45	0.52
	10	0.53	0.59	0.65		10	0.41	0.47	0.52
N ₂	2	0.34	0.37	0.42	N ₂	2	0.28	0.31	0.35
	3	0.40	0.43	0.49		3	0.32	0.35	0.40
	5	0.42	0.46	0.51		5	0.36	0.39	0.44
	7	0.43	0.47	0.54		7	0.37	0.41	0.45
	8	0.45	0.49	0.55		10	0.49	0.53	0.58
PICP 4.32 kJ					Theta Pinch (2.4 kJ)				
ความดันก๊าซ (Pa)		เวลาเมื่อมาถึงตำแหน่งวัด (10^{-5} s)			ความดันก๊าซ (Pa)		เวลาเมื่อมาถึงตำแหน่งวัด (10^{-5} s)		
		C	B	A			C	B	A
Ar	2	0.33	0.37	0.41	Ar	2	0.19	0.23	0.27
	3	0.34	0.38	0.43		3	0.22	0.26	0.30
	5	0.36	0.41	0.47		5	0.26	0.30	0.35
	7	0.43	0.48	0.54		7	0.28	0.35	0.44
	10	0.53	0.58	0.65		10	0.26	0.34	0.43
O ₂	2	0.27	0.3	0.33	O ₂	2	0.18	0.21	0.25
	3	0.32	0.36	0.40		3	0.18	0.22	0.26
	5	0.34	0.38	0.42		5	0.20	0.24	0.29
	7	0.38	0.42	0.47		7	0.26	0.31	0.37
	10	0.39	0.44	0.49		10	0.24	0.29	0.36
N ₂	2	0.27	0.30	0.33	N ₂	2	0.22	0.25	0.29
	3	0.28	0.31	0.34		3	0.25	0.28	0.33
	5	0.32	0.35	0.39		5	0.23	0.27	0.32
	7	0.35	0.39	0.43		7	0.25	0.29	0.35
	10	0.38	0.42	0.46		10	0.26	0.30	0.35

ตารางที่ 5.4 ผลการวัดเวลาที่พลาสมาซีทเคลื่อนที่มาถึงถ.ตำแหน่ง 3.46, 2.46

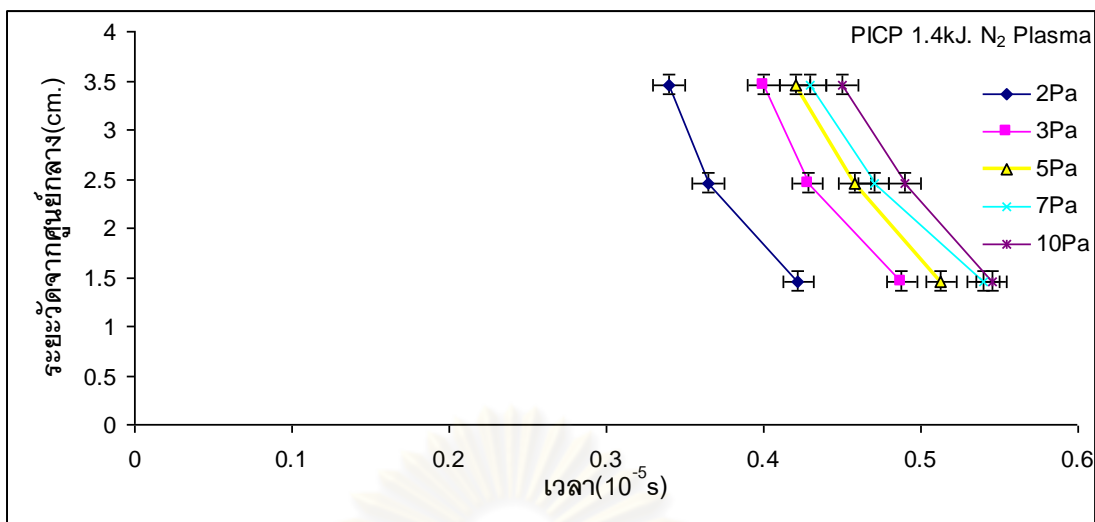
และ 1.46 เซนติเมตร จากจุดศูนย์กลางท่อควอทซ์



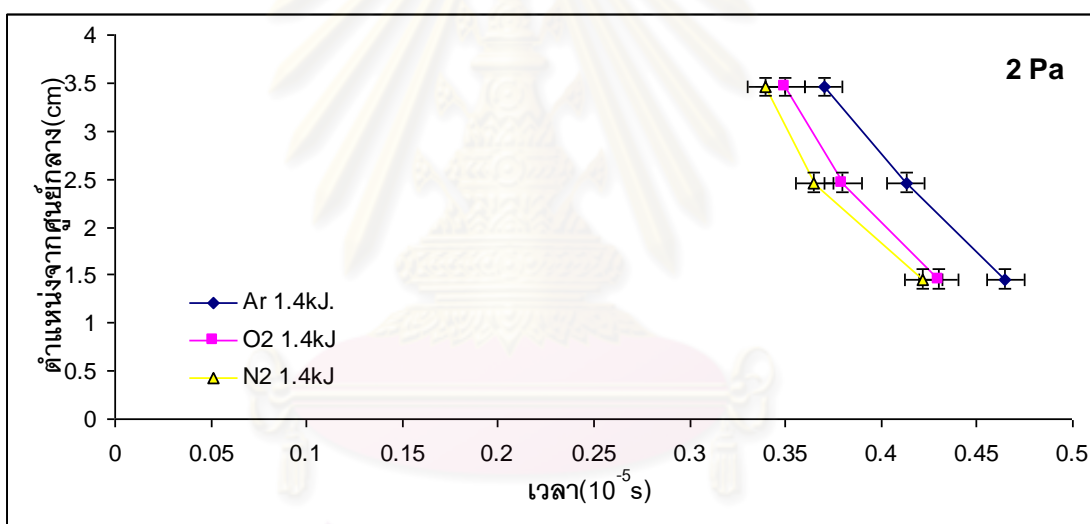
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหัววัดและระยะจากจุดศูนย์กลางต่อควอท์ซ์ของพลาสมาจากก๊าซอาร์กอนในเครื่องพีไอซีพีขนาด 1.4 kJ



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหัววัดและระยะจากจุดศูนย์กลางต่อควอท์ซ์ของพลาสมาจากก๊าซออกซิเจนในเครื่องพีไอซีพีขนาด 1.4 kJ



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหัววัดและระยะจากจุดศูนย์กลางท่อควอท์ซ์ของพลาสมาจากก๊าซไนโตรเจนในเครื่องพีไอซีพีขนาด 1.4 kJ



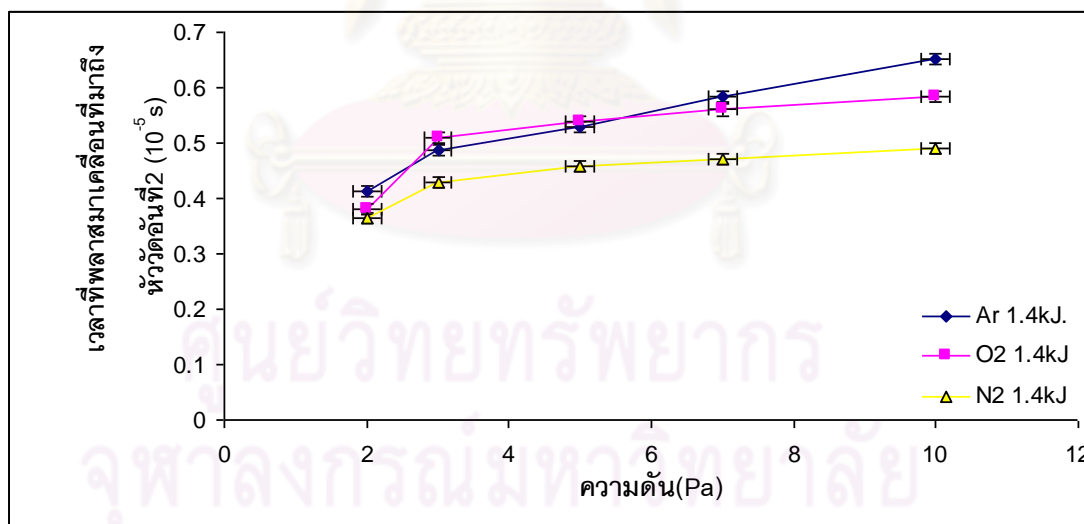
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหัววัดและระยะจากจุดศูนย์กลางท่อควอท์ซ์ของพลาสมาจากก๊าซสามชนิดในเครื่องพีไอซีพีขนาด 1.4 กิโลจูล

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.7-5.10 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าในก๊าซชนิดเดียวกันเมื่อความดันของก๊าซลดลงเวลาที่มาถึงหัววัดก็จะน้อยลง ความห่างของเวลาทั้งสองช่วงความบอกถึงความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ระหว่างสองช่วงตำแหน่งที่จัดวางหัววัดโดยเวลาช่วงแรกมีแนวโน้มแคบกว่าช่วงที่สองแสดงถึงความเร็วในช่วงแรกมากกว่าในช่วงถัดมา ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาที่กล่าวว่า ในขณะที่พลาสมาซึ่งมีการเคลื่อนที่เข้ามาจากผิวควอท์ซ์จะกวาดเอาก๊าซที่อยู่ข้างหน้าเข้ามาตามแนวรัศมีด้วย ซึ่งความดันด้านหน้าพลาสมาซึ่งจะมากขึ้นตามความลึกหรือตามระยะทางที่สั้นลงเมื่อวัดจากจุดศูนย์กลาง แรงต้านก็จะมีค่ามากขึ้น

ตามลำดับ ความเร็วในช่วงที่สองจึงช้าลง และขณะที่ความดันลดลงแรงต้านดังกล่าวก็จะลดลง เช่นเดียวกัน

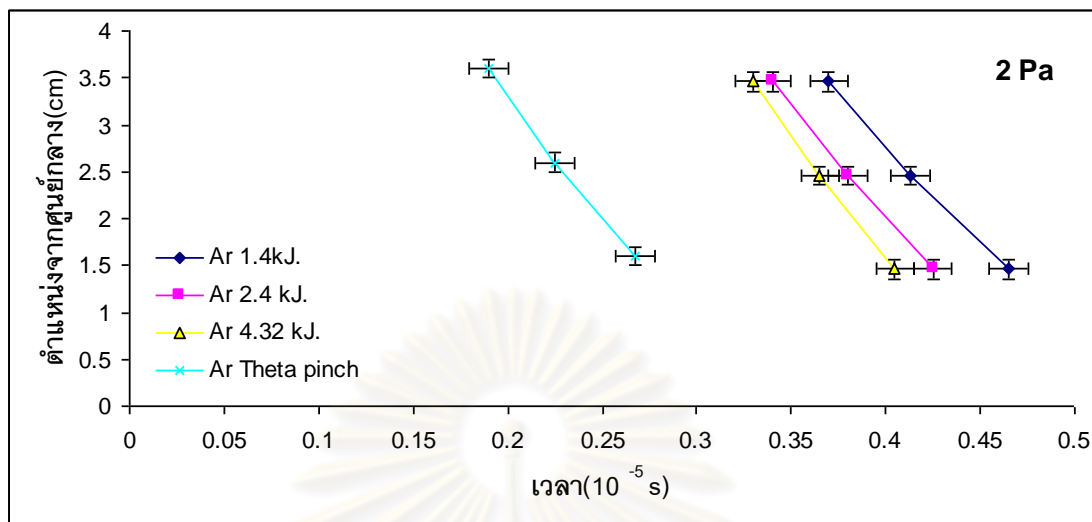
ความคลาดเคลื่อนในงานวิจัยครั้งนี้ ผลสำคัญเกิดมาจากการคายประจุออกจากตัวเก็บประจุความจุสูงของเครื่องพีไอซีพีนั้นไม่เท่ากัน จะส่งผลต่อปริมาณกระแสที่ไหลในวงจรต่างกันแรงลอเรนตซ์ที่เหนี่ยวนำให้พลาสมาเคลื่อนที่จึงต่างกัน ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดปริมาณต่างๆในงานวิจัยครั้งนี้

เมื่อพิจารณาที่พลังงานจากเครื่องพีไอซีพีและความดันเดียวกัน ของก๊าซทั้งสามชนิด พบว่าเวลาในเคลื่อนที่มาถึงหัววัดคือ ไนโตรเจน < ออกซิเจน < อาร์กอน น่าจะเป็นผลมาจากมวลของก๊าซที่แตกตัวเป็นพลาสมาโดยเมื่อพิจารณาจาก ไนโตรเจน < ออกซิเจน < อาร์กอน แสดงให้เห็นว่าเมื่อมวลของก๊าซมากขึ้นเวลาในการเคลื่อนที่ก็จะช้าลง พิจารณาที่ความดันอื่นในการเคลื่อนที่ของพลาสมาจากก๊าซทั้งสามชนิดก็มีแนวโน้มเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 5.11 กราฟแสดงเวลาในการเคลื่อนที่มาถึงหัววัด ณ ตำแหน่ง 1.46 เซนติเมตร ผลในการวัดได้เวลาของอาร์กอนที่ต่ำกว่า ออกซิเจน ณ ความดันที่ 3 และ 7 น่าจะเกิดจากความคลาดเคลื่อนที่อยู่ภายใต้เหตุผลดังกล่าว อธิบายที่ผ่านมา

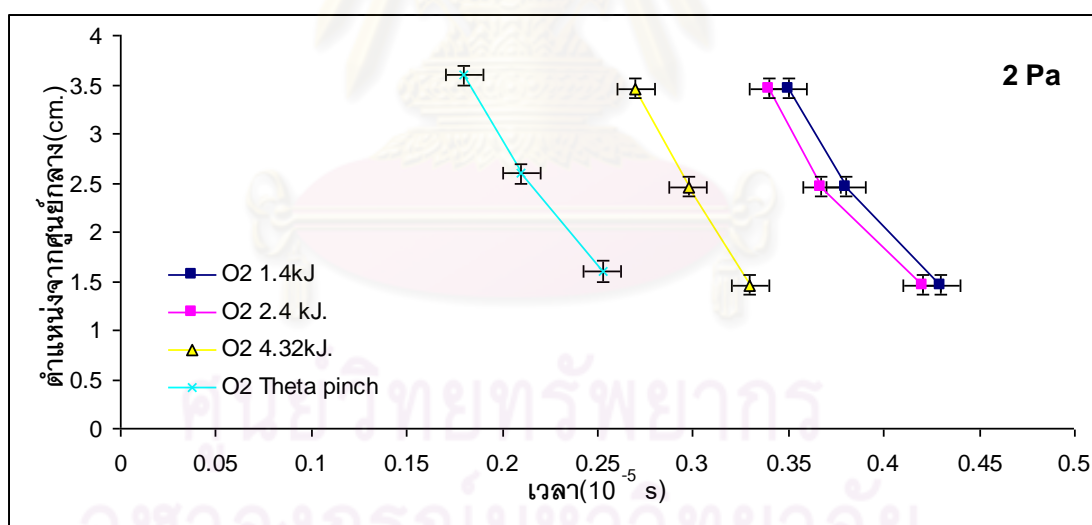


รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงตำแหน่ง 1.4 เซนติเมตรจากจุดศูนย์กลางท่อควอทซ์ของพลาสมาจากก๊าซสามชนิดในเครื่องพีไอซีพีขนาด 1.4 กิโลจูล

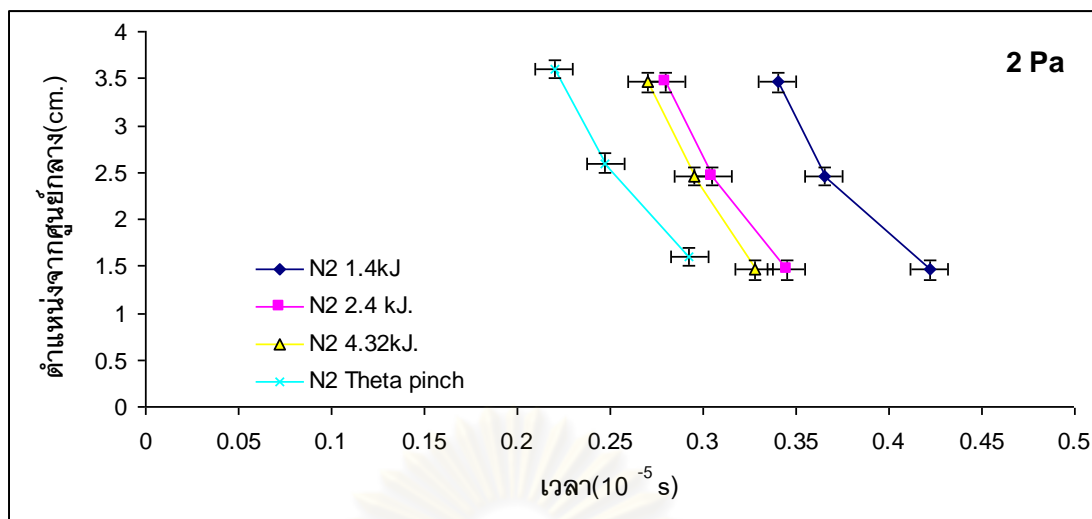
สำหรับเวลาที่ตำแหน่งหัววัดของเครื่องพีไอซีพีที่พลังงานอื่นๆแสดงดังรูปที่ 5.12-5.14



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหัววัดและระยะจากจุดศูนย์กลางท่อควอทซ์ของพลาสมาจากก๊าซอาร์กอนในเครื่องพีไอซีพีพลังงานต่างๆที่ความดัน 2 ปาสคาล



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหัววัดและระยะจากจุดศูนย์กลางท่อควอทซ์ของพลาสมาจากก๊าซออกซิเจนในเครื่องพีไอซีพีพลังงานต่างๆที่ความดัน 2 ปาสคาล



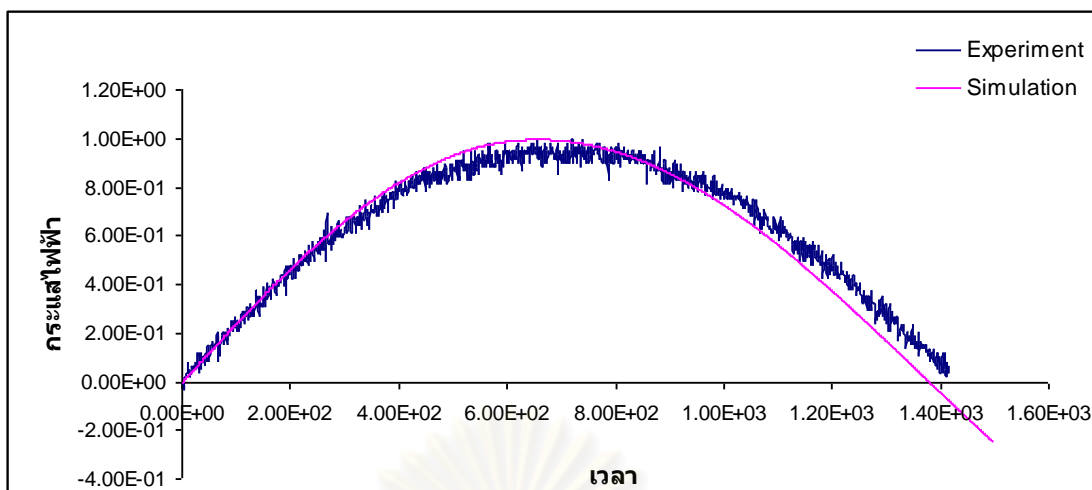
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหัววัดและระยะจากจุดศูนย์กลางต่อควอท์ของพลาสมาจากไนโตรเจนในเครื่องฟิวส์ที่พลังงานต่างๆที่ความดัน 2 ปาสคาล

จากผลการทดลองของเครื่องฟิวส์จะเห็นว่าเมื่อให้พลังงานจากตัวเก็บประจุมากขึ้น ระยะเวลาในการเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งที่วัดนั้นน้อยลงตามลำดับ แต่สำหรับเครื่องที่ตำแหน่งซึ่งให้พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุเท่ากับเครื่องฟิวส์ที่ 2.4 กิโลจูลใช้เวลาในการเคลื่อนที่มาถึงหัววัดน้อยกว่าเวลาของการเคลื่อนที่ของพลาสมาภายในเครื่องฟิวส์ที่พลังงานต่างๆทั้งหมด เกิดจากคาบของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรของเครื่องที่ตำแหน่งซึ่งสั้นกว่าคาบของกระแสไฟฟ้าภายในวงจรของเครื่องฟิวส์ พลาสมาจึงถูกเร่งด้วยแรงลอเรนซ์ก่อนพลาสมาจากเครื่องฟิวส์

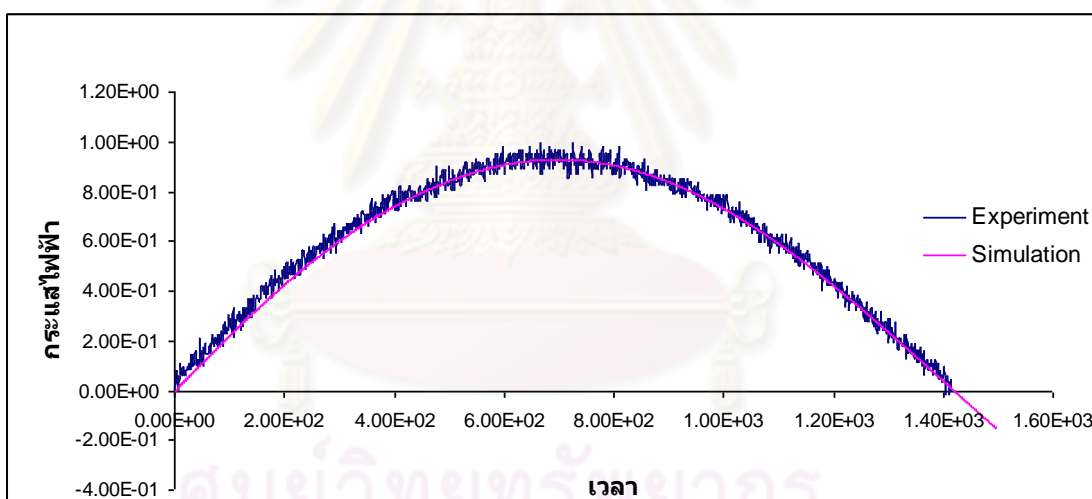
จากการทดลองที่ผ่านมาเราทราบเฉพาะเวลาในการเคลื่อนที่ของพลาสมาถึงตำแหน่งที่จัดวางหัววัดสนามแม่เหล็กเท่านั้น ตำแหน่งของพลาสมาตั้งแต่เริ่มเคลื่อนที่สามารถวิเคราะห์ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎี

จากสมการ 3.21 ทำการกำหนดค่าตัวแปร m และแทนค่าตัวแปรเริ่มต้นในสมการแล้วทำการคำนวณ นำกระแสที่ได้ที่ได้มาเทียบกับผลการทดลองตามรูป 5.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

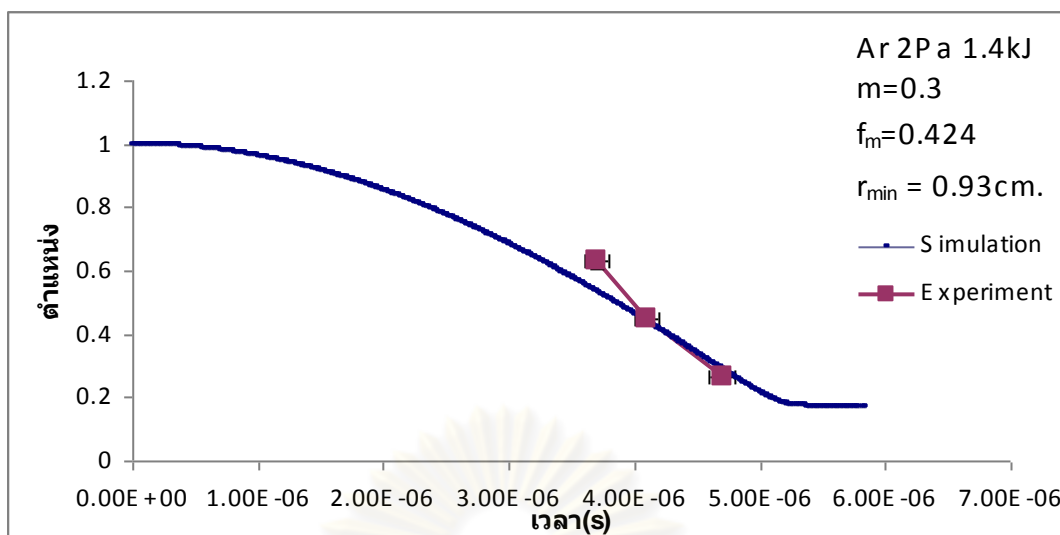


รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าในวงจรและเวลา
ผลจากแบบจำลองทางทฤษฎี และผลการทดลองยังไม่สอดคล้องกัน จากนั้นทำการปรับเปลี่ยน
ค่าตัวแปรเริ่มต้น m ที่กำหนดขึ้นจนผลที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดลองสอดคล้องกันดังรูป
ที่ 5.16

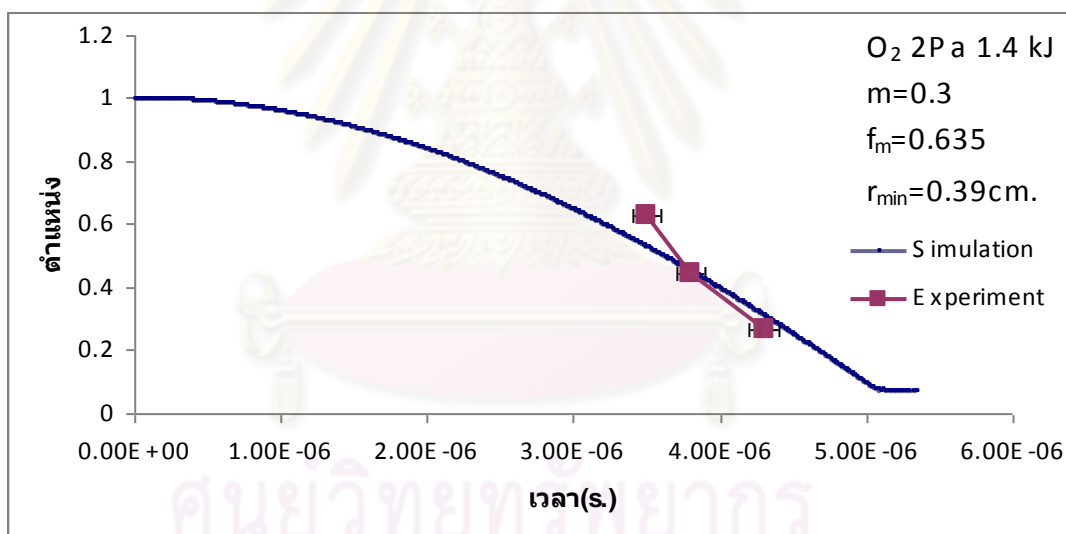


รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าในวงจรและเวลาหลังจากการปรับค่าตัวแปร

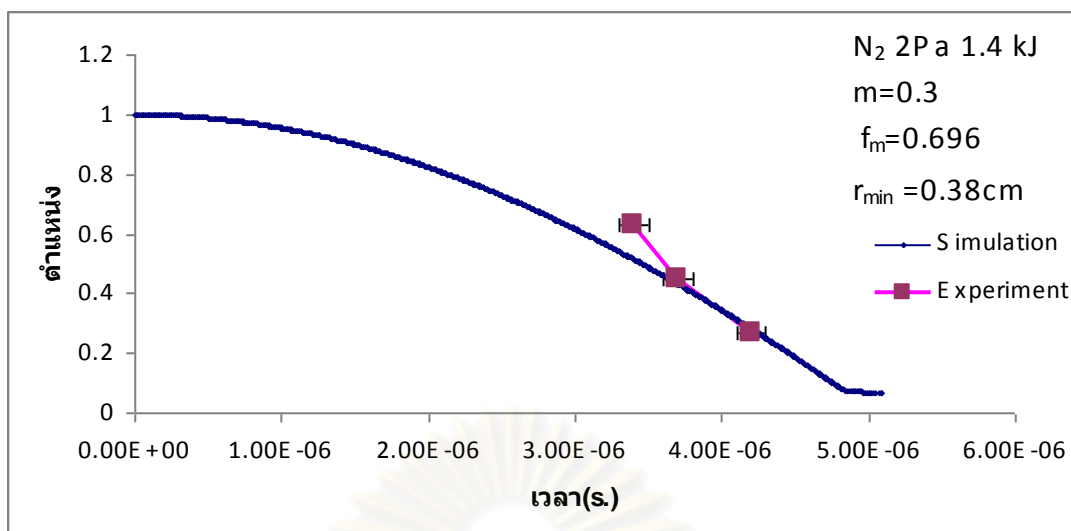
นำค่า m มาใช้ในสมการ 3.38 และแทนค่าตัวแปรต่างๆ แล้วทำการปรับเปลี่ยนค่า f_m จนผลที่ได้
จากแบบจำลองทางทฤษฎีสอดคล้องกับการทดลอง ก็จะได้ตำแหน่งของพลาสมาที่เวลาต่างๆดัง
รูปที่ 5.17 – 5.19



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงตำแหน่งของพลาสมาจากแบบจำลองทางทฤษฎีและจากการทดลองของพลาสมาจากก๊าซอาร์กอนที่ความดัน 2 ปาสคาล จากเครื่องพีไอซีพี ขนาด 1.4 กิโลจูล



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงตำแหน่งของพลาสมาจากแบบจำลองทางทฤษฎีและจากการทดลองของพลาสมาจากก๊าซออกซิเจนที่ความดัน 5 ปาสคาล จากเครื่องพีไอซีพี ขนาด 2.4 กิโลจูล



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงตำแหน่งของพลาสมาจากแบบจำลองทางทฤษฎีและจากการทดลอง ของพลาสมาจากก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 2 ปาสคาล จากเครื่องพีไอซีพี ขนาด 1.4 กิโลจูล

จากแบบจำลองทางทฤษฎีด้วยการปรับค่าตัวแปร m ในสมการวงจรมอบให้สอดคล้องกับกระแสภายในวงจรมอบเกิดพลาสมาในช่วงที่เราทำการวัด และปรับค่า f_m ในแบบจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมา ผลจากแบบจำลองทางทฤษฎีแสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาจากผิวควอทซ์ (ระยะ 1 ในแกนตั้งคือระยะเริ่มต้นการเคลื่อนที่หรือที่ผิวด้านในของท่อควอทซ์) ผลจากแบบจำลองทำให้เห็นว่าพลาสมาไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ถึงศูนย์กลางโดยความเร็วของพลาสมามีแนวโน้มเร็วขึ้นในช่วงแรกและช้าลงเมื่อใกล้ถึงศูนย์กลาง และพบว่าก๊าซไนโตรเจนสามารถเคลื่อนที่เข้าไปได้ลึกสุดตามแนวรัศมีตามด้วยออกซิเจน และอาร์กอน ซึ่งเกิดจากมวลโมเลกุลที่น้อยกว่าตามลำดับ ผลที่ได้จากแบบจำลองทฤษฎีมีแนวโน้มสอดคล้องกับการทดลองที่ได้วัดในช่วงระยะสั้นๆ

ในแบบจำลองทางทฤษฎีได้กำหนดตัวแปรเริ่มต้นให้เป็นไปตามอุดมคติเช่น กำหนดให้ก๊าซทุกโมเลกุลแตกตัวเป็นพลาสมาหมดเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ความจริงก๊าซทุกโมเลกุลอาจไม่แตกตัวหมด จึงทำให้ผลที่ได้จากแบบจำลองทฤษฎีมีโอกาสคลาดเคลื่อนจากความจริงและเป็นสาเหตุของความแตกต่างของระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของพลาสมาช่วงแรกที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎีและจากการทดลอง

ที่ผ่านมาเราได้ทราบเพียงแค่ว่าเวลาของพลาสมาเมื่อเคลื่อนถึงตำแหน่ง 3.46, 2.46 และ 1.46 เซนติเมตร จากผลต่างของเวลาที่ผ่านไปจนถึงตำแหน่งดังกล่าว เราสามารถหาวามเร็วเฉลี่ยของพลาสมาระหว่างสองช่วงนี้ได้ แสดงดังตารางที่ 5.5

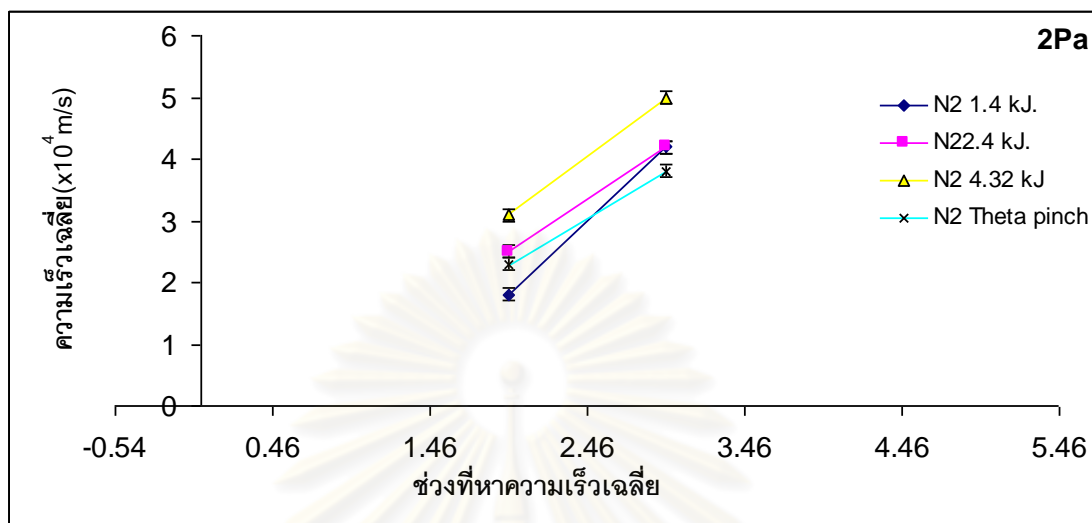
PICP 1.4 kJ.				PICP 2.4 kJ.			
ความดันก๊าซ (Pa)		ความเร็วเฉลี่ย($\times 10^4$ m/s)		ความดันก๊าซ (Pa)		ความเร็วเฉลี่ย($\times 10^4$ m/s)	
		3.46 - 2.46	2.46 - 1.46			3.46 - 2.46	2.46 - 1.46
Ar	2	2.4	1.9	Ar	2	2.5	2.3
	3	2.2	1.1		3	2.3	1.8
	5	1.7	1.3		5	2.3	1.3
	7	1.6	0.8		7	2.1	1.3
	10	1.4	1.2		10	1.6	1.3
O ₂	2	3.5	2.0	O ₂	2	3.8	2.0
	3	3.3	1.6		3	2.7	2.0
	5	2.7	1.7		5	2.3	1.9
	7	2.6	2.0		7	2.5	1.6
	10	1.8	1.5		10	1.8	1.8
N ₂	2	4.2	1.8	N ₂	2	4.2	2.5
	3	3.8	1.7		3	3.8	2.0
	5	2.7	1.8		5	3.3	2.3
	7	2.6	1.5		7	2.9	2.9
	8	2.4	1.9		10	2.6	2.0
PICP 4.32 kJ.				Theta Pinch (2.4kJ)			
ความดันก๊าซ (Pa)		ความเร็วเฉลี่ย($\times 10^4$ m/s)		ความดันก๊าซ (Pa)		ความเร็วเฉลี่ย($\times 10^4$ m/s)	
		3.46 - 2.46	2.46 - 1.46			3.6 - 2.6	2.6 - 1.6
Ar	2	2.9	2.5	Ar	2	2.9	2.4
	3	2.5	1.9		3	2.7	2.3
	5	2.0	1.8		5	2.5	2.1
	7	1.9	1.7		7	1.5	1.2
	10	1.9	1.4		10	1.3	1.2
O ₂	2	3.8	3.1	O ₂	2	3.5	2.4
	3	2.9	2.5		3	3.1	2.1
	5	2.7	2.3		5	2.5	2.0
	7	2.5	2.0		7	2.3	1.7
	10	2.3	1.9		10	2.0	1.6
N ₂	2	5.0	3.1	N ₂	2	3.8	2.3
	3	4.2	2.9		3	3.1	2.3
	5	3.3	2.6		5	2.8	2.1
	7	2.9	2.4		7	2.8	1.7
	10	2.7	2.2		10	2.6	2.1

ตารางที่ 5.5 แสดงผลการหาความเร็วเฉลี่ยของพลาสมาระหว่างตำแหน่ง

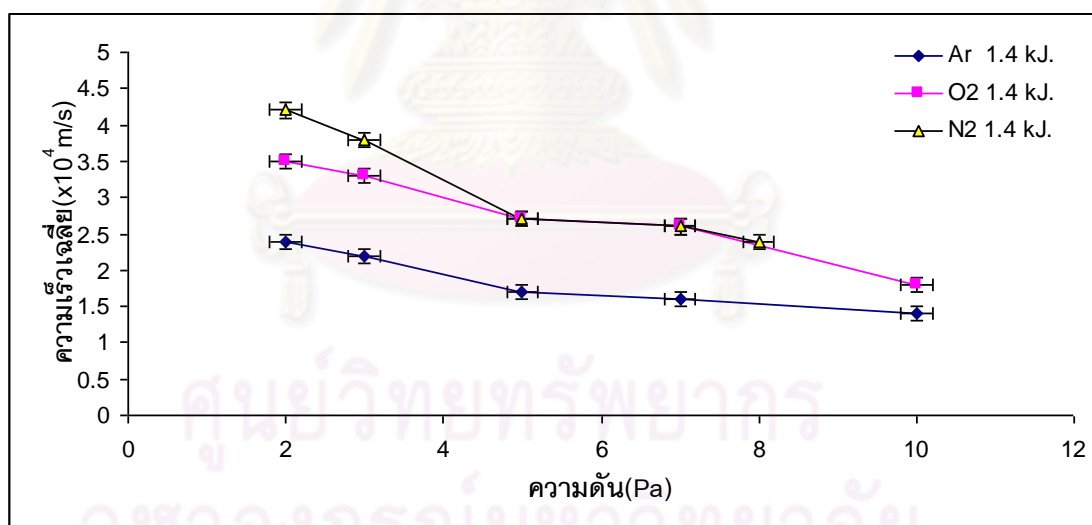
3.46 ถึง 2.46 เซนติเมตร และ 2.46 ถึง 1.46 เซนติเมตร

ข้อมูลในตารางที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าที่การทดลองเดียวกันความเร็วเฉลี่ยในช่วง 3.46 - 2.46 จะมีค่ามากกว่า 2.46-1.46 สอดคล้องกับแนวโน้มในตารางที่ 5.4 และได้จากตัวอย่างความสัมพันธ์ของความเร็วเฉลี่ยที่ทั้งสองตำแหน่งในรูปที่ 5.20 และ ในก๊าซชนิดเดียวกันพลังงานเท่ากันความดันที่มากขึ้นส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยน้อยลงดูได้จากตัวอย่างของความสัมพันธ์ของ

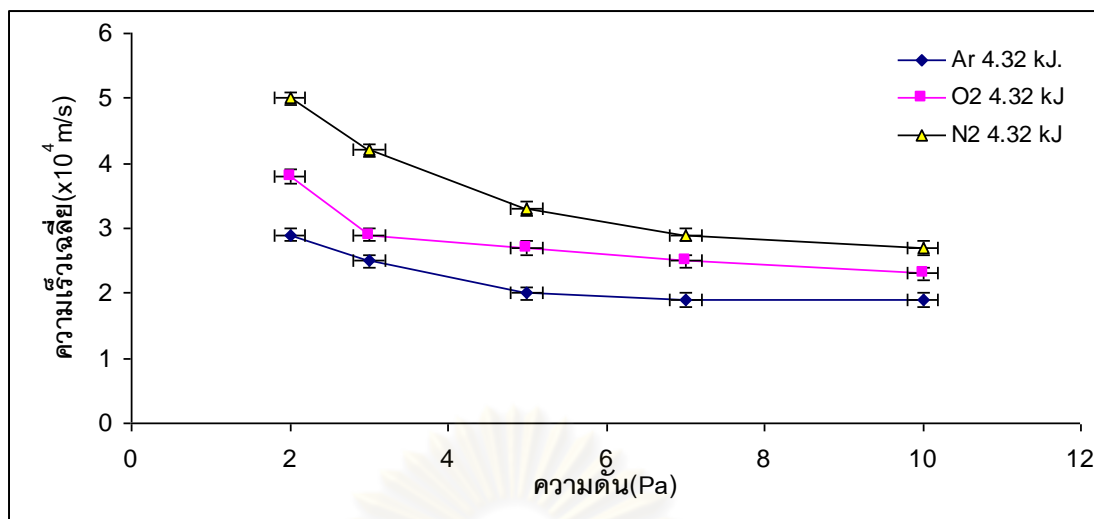
ความเร็วเฉลี่ยและความดันจากเครื่องพลาสมาที่พลังงาน 1.4 และ 4.32 กิโลจูลตามรูปที่ 5.21-5.22 ตามลำดับ



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของพลาสมา ระหว่าง 3.46 - 2.46 เซนติเมตร และระหว่างช่วง 2.46 - 1.46



รูปที่ 5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยของพลาสมา และความดันของก๊าซทั้งสามจากเครื่องพลาสมาที่พลังงาน 1.4 กิโลจูล



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยของพลาสมา และความดันของก๊าซทั้งสามจากเครื่องพีไอซีพีขนาด 4.32 กิโลจูล

จากรูปที่ 5.20 เมื่อพลังงานจากตัวเก็บประจุมีค่ามากขึ้นความเร็วเฉลี่ยของพลาสมา ก็จะมากขึ้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรมีค่ามากขึ้นเหนี่ยวนำให้เกิดแรงกระทำต่อพลาสมาซึ่งมากขึ้นนั่นเอง ข้อมูลในตารางและตัวอย่างความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.21 และ 5.22 พบว่าในการหาความเร็วเฉลี่ยการเคลื่อนที่ของพลาสมาซึ่งมาจากก๊าซไนโตรเจนมีค่ามากที่สุด จากนั้นเป็นออกซิเจน และอาร์กอนตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบมวล โมเลกุลตามชนิดของก๊าซพบว่าการที่มีมวลโมเลกุลน้อยกว่ามีความเร็วสูงสุดมากกว่า [1]

ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของพลาสมาจากเครื่องที่ดำพินซ์ซึ่งมีพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ 2.4 กิโลจูลนั้น พบว่าความเร็วเฉลี่ยของพลาสมาจากก๊าซไนโตรเจนมีค่าน้อยกว่าจากเครื่องพีไอซีพีทุกระดับพลังงาน ส่วนพลาสมาจากก๊าซออกซิเจนมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องพีไอซีพีที่ 1.4 กิโลจูล และสำหรับอาร์กอนใกล้เคียงกับเครื่องพีไอซีพีที่ 4.32 กิโลจูล แม้ว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดจากขดลวดโลโกวสก็จะมีค่าน้อยสุดแต่ความเร็วสูงสุดของพลาสมาซึ่งก็มีค่าไม่ได้น้อยกว่ามาก มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับของเครื่องพีไอซีพีที่แต่ละระดับพลังงาน และไม่สามารถสรุปได้ว่าความเร็วเฉลี่ยของพลาสมาซึ่งมาจากเครื่องที่ดำพินซ์นั้นอยู่ในระดับเดียวกับเครื่องพีไอซีพีที่ 2.4 กิโลจูล ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากคาบของกระแสไฟฟ้าภายในวงจรของเครื่องที่ดำพินซ์ที่สั้นกว่า

ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดในการวัดในงานวิจัยนี้เป็นความเร็วเฉลี่ยของพลาสมาซึ่งมาจากก๊าซไนโตรเจนกำเนิดจากเครื่องพีไอซีพี วัดได้ 5.0×10^4 เมตรต่อวินาที ซึ่งทำการวัดในช่วง 3.46 ถึง 2.46 เซนติเมตรจากแกนกลาง

5.3 การวัดค่าอุณหภูมิเล็กตรอนภายในเครื่องฟิวชั่น

ผลจากการวัดค่าอุณหภูมิเล็กตรอนด้วยวิธีการในบทที่ 4 ของก๊าซอาร์กอน ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซออกซิเจน ด้วยเครื่องฟิวชั่นที่พลังงาน 1.4, 2.4 และ 4.2 กิโลจูล และด้วยเครื่องที่ต่ำพินซ์ แสดงดังตารางที่ 5.6-5.8

ความดัน (Pa)	อุณหภูมิเล็กตรอน(eV)			
	ฟิวชั่น 1.4 kJ.	ฟิวชั่น 2.4 kJ	ฟิวชั่น 4.32 kJ.	ที่ต่ำพินซ์ 2.4 kJ
2	0.89	1.61	3.92	0.38
3	1.69	2.49	3.60	12.7
5	1.49	1.36	2.33	5.29
7	0.75	0.87	0.74	0.83
10	0.87	1.22	0.62	0.06

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการหาค่าอุณหภูมิเล็กตรอนของพลาสมาจากก๊าซอาร์กอน

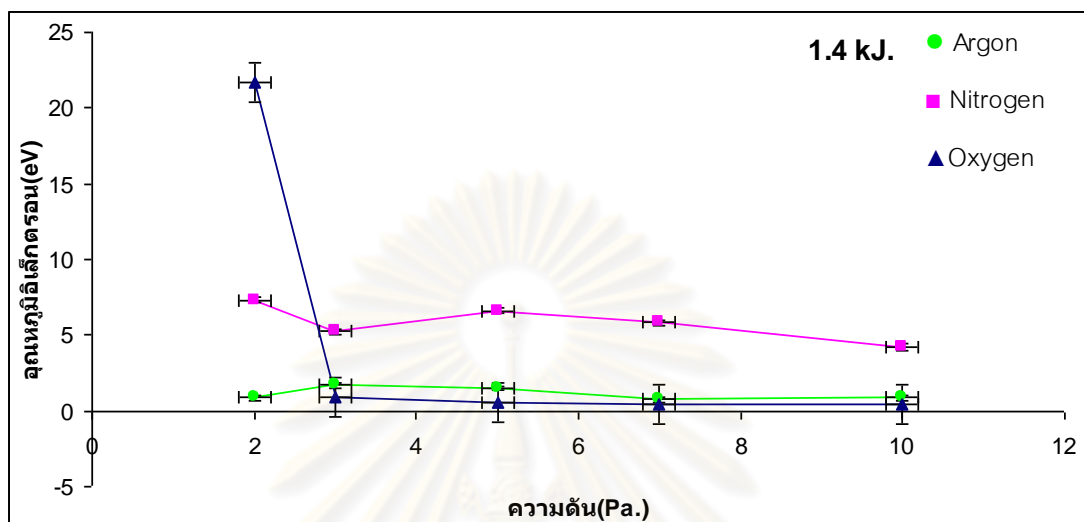
ความดัน (Pa)	อุณหภูมิเล็กตรอน(eV)			
	ฟิวชั่น 1.4 kJ.	ฟิวชั่น 2.4 kJ	ฟิวชั่น 4.32 kJ.	ที่ต่ำพินซ์ 2.4 kJ
2	7.31	11.6	10.2	6.90
3	5.22	16.9	6.91	6.92
5	6.62	6.18	7.59	3.56
7	5.84	6.01	5.44	3.61
10	4.21	3.63	5.39	3.75

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการหาค่าอุณหภูมิเล็กตรอนของพลาสมาจากก๊าซไนโตรเจน

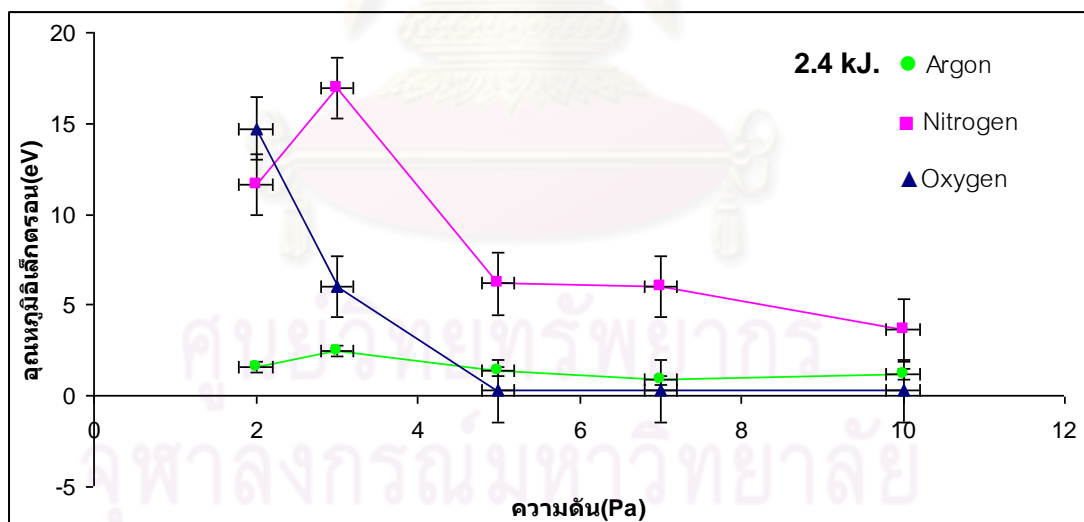
ความดัน (Pa)	อุณหภูมิเล็กตรอน(eV)			
	ฟิวชั่น 1.4 kJ.	ฟิวชั่น 2.4 kJ	ฟิวชั่น 4.32 kJ.	ที่ต่ำพินซ์ 2.4 kJ
2	21.7	14.7	0.86	1.07
3	0.93	6.03	19.7	1.27
5	0.57	0.27	3.43	0.18
7	0.46	0.27	0.39	0.17
10	0.47	0.27	0.41	0.17

ตารางที่ 5.8 แสดงผลการหาค่าอุณหภูมิเล็กตรอนของพลาสมาจากก๊าซออกซิเจน

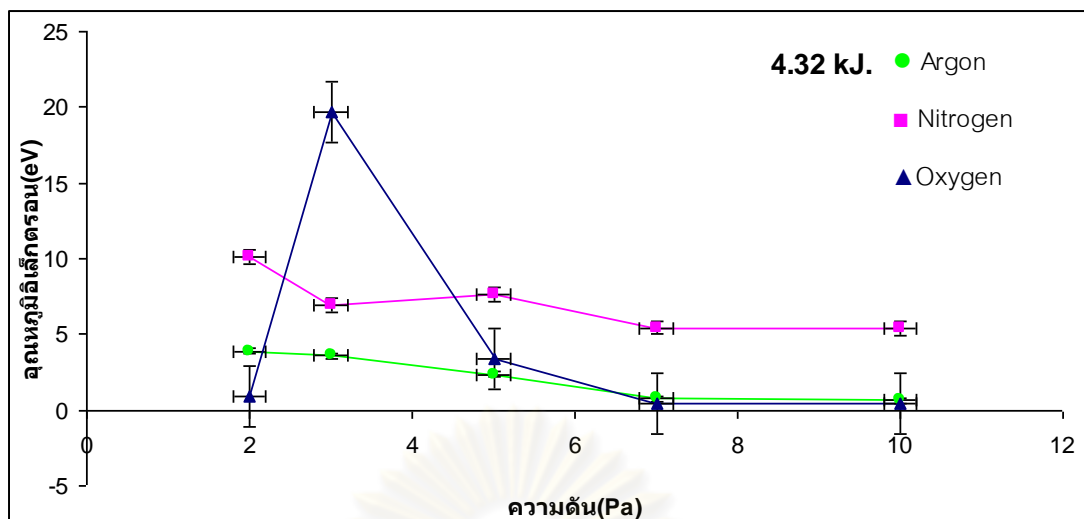
จากข้อมูลอุณหภูมิอิเล็กตรอนในตารางที่ 5.6 – 5.8 สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอน แสดงในรูปที่ 5.23 -5.29



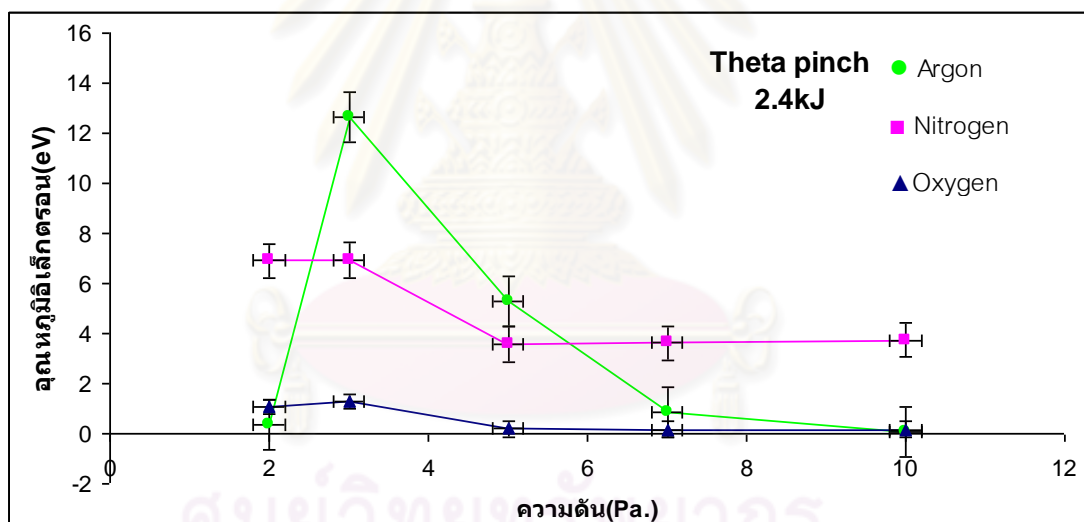
รูปที่ 5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนจากเครื่องพีไอซีพีที่ทำงานโดยใช้พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ 1.4 กิโลจูล



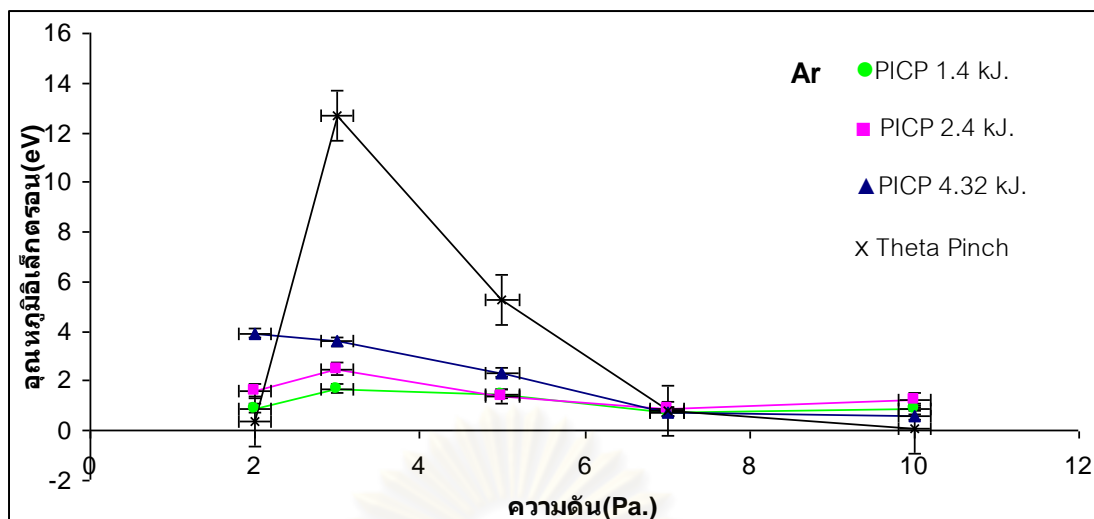
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนจากเครื่องพีไอซีพีที่ทำงานโดยใช้พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ 2.4 กิโลจูล



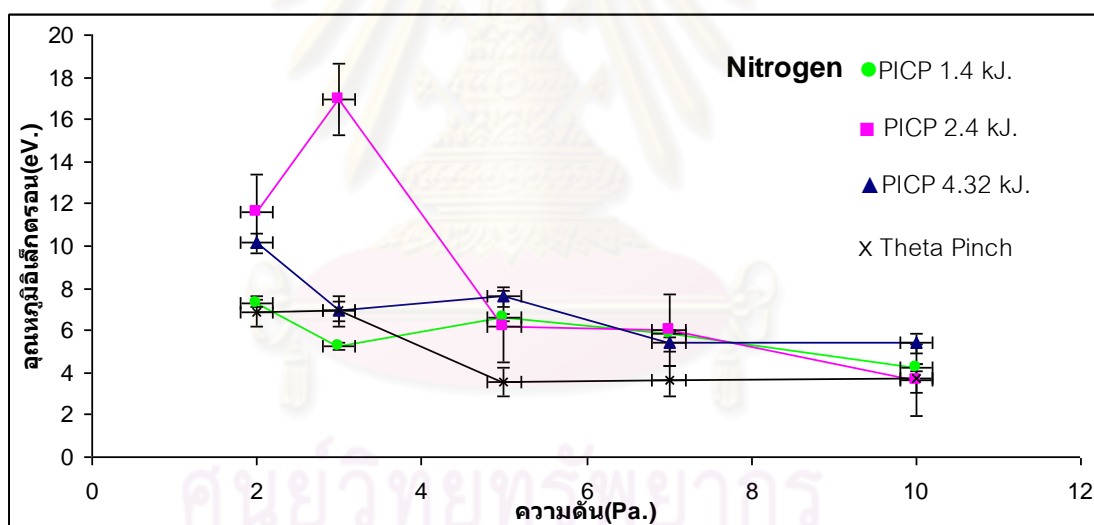
รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนจากเครื่องพีไอซีพีที่ทำงานโดยใช้พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ 4.32 กิโลจูล



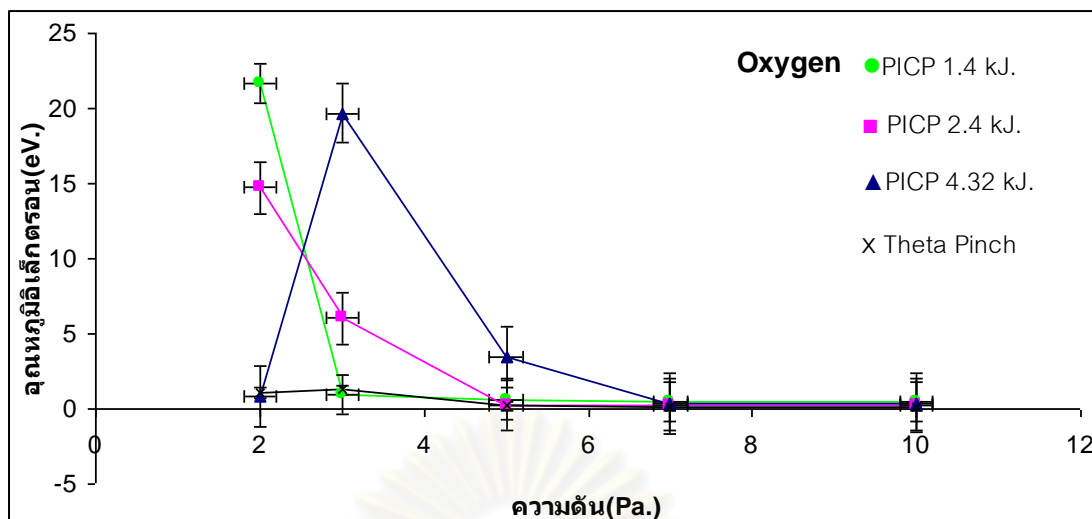
รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนจากเครื่องที่ด้าพินซ์ที่ทำงานโดยใช้พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ 2.4 กิโลจูล



รูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนของพลาสมาจากก๊าซอาร์กอนที่กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพีที และเครื่องที่ด้าพินซ์



รูปที่ 5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนของพลาสมาจากก๊าซไนโตรเจนที่กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพีที และเครื่องที่ด้าพินซ์



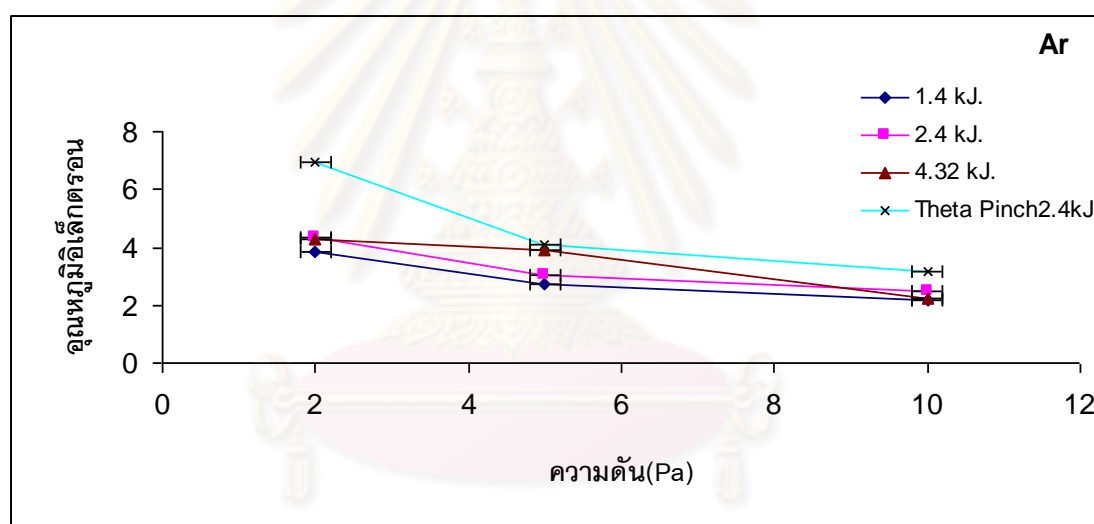
รูปที่ 5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนของพลาสมาจากก๊าซออกซิเจนที่กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพีที่ และเครื่องที่ต่ำพินซ์

จากผลการทดลองวัดค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์นั้น พบว่าที่พลังงานในการกำเนิดพลาสมาเดียวกัน เมื่อความดันเพิ่มขึ้นอุณหภูมิอิเล็กตรอนมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเกิดจากขณะความดันเพิ่มขึ้นจำนวนอนุภาคในพลาสมามีจำนวนมากขึ้นพลังงานเฉลี่ยต่อจำนวนจึงมีค่าน้อยลง ในช่วง 5-10 ปาสคาลอุณหภูมิอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงไม่มาก ในขณะที่ในช่วง 2-5 ปาสคาลเมื่อความดันลดลงอุณหภูมิอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้ในช่วง 5-10 ปาสคาลนั้น พลังงานส่วนใหญ่ที่ให้กับก๊าซใช้ไปกับการทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นพลาสมาและเมื่อความดันลดลงในช่วง 2-5 ปาสคาลนั้นพลังงานที่ให้นอกจากเพียงพอทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นพลาสมาแล้ว ยังไปเร่งพลาสมาอีกด้วย ทำให้อุณหภูมิอิเล็กตรอนมีค่ามากขึ้น ที่ความดันสูงในโตรเจนจะมีอุณหภูมิอิเล็กตรอนสูงสุด เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่ที่ให้ไปถูกใช้ไปในการเร่งให้พลาสมาเคลื่อนที่[1] และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.28-5.29 ช่วงที่อุณหภูมิของพลาสมาเปลี่ยนแปลงไม่มากนักพลาสมาจากเครื่องที่ต่ำพินซ์มีค่าต่ำสุดทั้งนี้ก็จะเกิดจากปริมาณของก๊าซมีมากกว่าเครื่องพีไอซีพีที่ความดันเดียวกันพลังงานส่วนใหญ่จึงไปเฉลี่ยให้กับจำนวนอนุภาคที่มีจำนวนมากกว่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนจึงมีค่าน้อยกว่าเครื่องพีไอซีพี

แต่อย่างไรก็ตามในช่วงความดัน 2-3 ปาสคาลพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอุณหภูมิอิเล็กตรอนกลับเพิ่มขึ้น และที่ความดันเดียวกันกลับพบว่าเมื่อพลังงานที่ให้มีความมากขึ้นอุณหภูมิอิเล็กตรอนกลับมีค่าลดลง ซึ่งคือข้อขัดแย้งสำคัญ และผลที่ได้นี้ขัดแย้งกับคำอธิบายข้างต้น ทั้งนี้เพราะน่าจะเป็นผลมาจาก โฟตอนส่วนใหญ่ที่แผ่ออกมาจากพลาสมาอาจอยู่นอกช่วงที่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่สามารถรับความยาวคลื่นตั้งแต่ 195.21 นาโนเมตรถึง 1128.57 นาโนเมตร

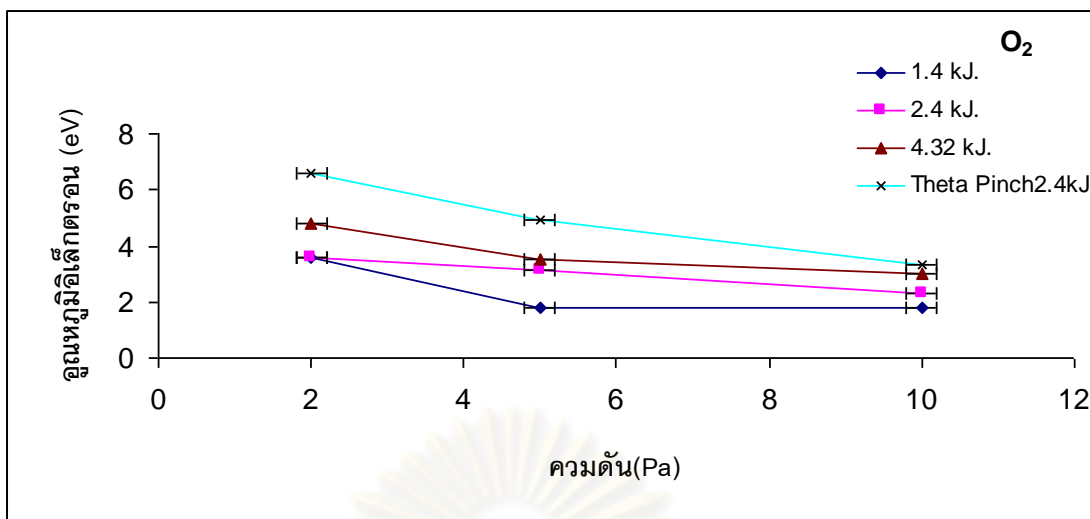
ตรวจรับได้ ความยาวคลื่นที่เลือกมาคำนวณค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนจึงไม่ใช่ตัวแทนของโฟตอนที่แผ่จากพลาสมาส่วนใหญ่ ซึ่งคำอธิบายดังกล่าวค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดลองจริงเนื่องจากเมื่อทำการวัดด้วยเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ที่ความดันต่ำกว่า 1 ปาสคาล ขณะที่สังเกตเห็นพลาสมาได้อย่างชัดเจน และสามารถจับการเคลื่อนที่ของพลาสมาได้จากหัววัดสนามแม่เหล็ก เครื่องสเปคโตรมิเตอร์กลับไม่สามารถจับสัญญาณได้เลย คำตอบที่ถูกต้องยังต้องศึกษาเพิ่มเติมอีกมากต่อไป การวัดอุณหภูมิอิเล็กตรอนด้วยเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ในงานวิจัยครั้งนี้จึงยังไม่เพียงพอที่จะกล่าวได้ว่าค่าที่ได้แทนพลังงานของพลาสมาโดยรวมที่กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพี

และจากแบบจำลองทางทฤษฎีสามารถใช้สมการ 3.39 ใช้เพื่อหาอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่แปรผันตามเวลา โดยทำการเลือกค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนสูงสุดมาแสดงดังรูป 5.30-5.32

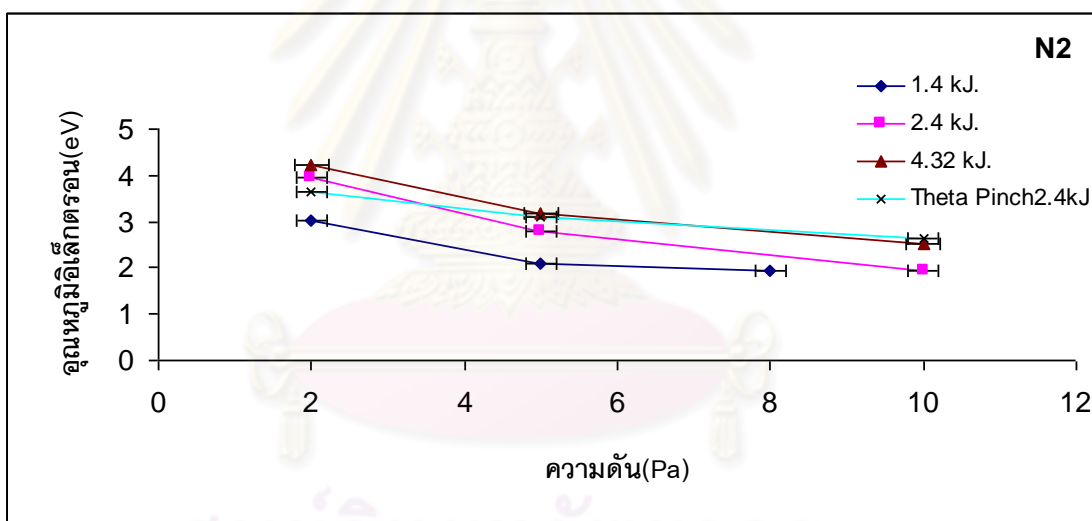


รูปที่ 5.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนของพลาสมาจากก๊าซอาร์กอนของเครื่องพีไอซีพีที่ได้จากแบบจำลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนของพลาสมาจากก๊าซออกซิเจนของเครื่องพีไอซีพีที่ได้จากแบบจำลอง



รูปที่ 5.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนของพลาสมาจากก๊าซไนโตรเจนของเครื่องพีไอซีพีที่ได้จากแบบจำลอง

ผลจากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎีไม่สามารถเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองเนื่องจากการคำนวณค่าโดยเลือกค่าความเข้มและความยาวคลื่นแสงที่บันทึกจากเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ที่ทำการบันทึกสัญญาณรวมตลอดช่วงที่เกิดพลาสมา แต่จากแบบจำลองเป็นอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่ช่วงเวลาใดๆ แล้วทำการเลือกค่าสูงสุดซึ่งเป็นค่าที่เกิดขึ้นเมื่อพลาสมาเคลื่อนที่เข้ามาลึกสุดจนมีความหนาแน่นสูงสุด มาแสดงเป็นกราฟที่

ผ่านมา แต่ขณะเดียวกันแนวโน้มที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ว่าที่ความดันสูงพลังงานที่ให้ไปส่วน
ใหญ่ใช้ไปในการทำให้ก๊าซแตกตัวและที่ความดันต่ำพลังงานที่ให้ยังใช้ไปในการเร่งพลาสมาอีก
ด้วยคุณสมบัติเล็กตรอนจึงมีค่าสูงขึ้น[1]



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างเครื่องพีไอซีพี และทำการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติของเครื่องคือกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรของเครื่อง และทำการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติของพลาสมาที่กำเนิดจากเครื่อง คือความเร็วของพลาสมาและอุณหภูมิอิเล็กตรอน จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากเครื่องดังกล่าวกับผลจากเครื่องที่ดำพินซ์และผลจากแบบจำลองทางทฤษฎีสำหรับกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรเป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กเพื่อทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นพลาสมา และกระแสไฟฟ้ายังใช้เป็นตัวเปรียบเทียบหลักในการพิสูจน์ของแบบจำลองทางทฤษฎี ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้านี้ทำการวัดด้วยขดลวดโรโกวสกี จากการทดลองพบว่า เมื่อพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุของเครื่องพีไอซีพีมีค่ามากขึ้นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรก็มีค่ามากขึ้นและอยู่ในระดับที่สูงกว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดด้วยวิธีการเดียวกันจากเครื่องที่ดำพินซ์ เครื่องพีไอซีพีที่มีตัวเก็บประจุความจุสูงขนาด 60 ไมโครฟารัด ทำการชาร์จประจุให้เครื่องพีไอซีพีทำงานขณะมีพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุเป็น 1.4, 2.4 และ 4.32 กิโลจูล สามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าในการทดลอง ได้เท่ากับ 256, 336, 430 กิโลแอมแปร์ ตามลำดับ และสำหรับเครื่องที่ดำพินซ์ที่มีตัวเก็บประจุความจุสูงขนาด 12 ไมโครฟารัด และชาร์จประจุให้เครื่องทำงานขณะมีพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ เป็น 2.1, 2.4, 3.5 กิโลจูล วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรได้เท่ากับ 89, 126, 144 กิโลแอมแปร์ตามลำดับด้วยขดลวดโรโกวสกีที่อันเดียวกัน ที่มี อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าสูงสุดกับความต่างศักย์สูงสุดค่าแรกที่วัดได้ มีค่าเป็น 607 แอมแปร์ต่อโวลต์ เวลาการคายประจุเฉลี่ยสำหรับเครื่องพีไอซีพีอยู่ที่ 12.6 ถึง 13 ไมโครวินาที และสำหรับเครื่องที่ดำพินซ์อยู่ที่ 5.14 ถึง 5.4 ไมโครวินาที พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการสะสมประจุในตัวเก็บประจุความจุสูงที่มากขึ้น เมื่อถูกปลดปล่อยออกมาจากตัวเก็บประจุในช่วงเวลาใกล้เคียงกันทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นตามมา ค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาการคายประจุของเครื่องพีไอซีพีที่มากกว่าเครื่องที่ดำพินซ์นั้น เป็นผลเนื่องมาจากปริมาณประจุในตัวเก็บประจุที่มากกว่า นอกจากนี้เวลาการคายประจุที่มากกว่ายังส่งผลให้ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรของเครื่องพีไอซีพีมากกว่าเครื่องที่ดำพินซ์ด้วย

สำหรับการศึกษาสมบัติของพลาสมาที่กำเนิดจากเครื่องพีไอซีพี ได้ ทำการทดลองวัดการเคลื่อนที่ของพลาสมาด้วยหัววัดสนามแม่เหล็ก และ หาค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนด้วยเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ จากพลาสมาของก๊าซอาร์กอน ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซออกซิเจน ที่ความดัน 2, 3, 5, 7 และ 10 ปาสคาล โดยทำการวัดขณะเครื่องพีไอซีพีทำงานโดยมีพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุขนาด 1.4, 2.4 และ 4.32 กิโลจูล พบว่าพลังงานในเครื่องพีไอซีพีที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ความเร็วของ

พลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลังงานที่เพิ่มขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้าในวงจรซึ่งเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงลอเรนตซ์ซึ่งเป็นตัวเร่งให้พลาสติกเคลื่อนที่มีค่ามากขึ้นด้วย หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ เมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นนอกจากถูกใช้ไปในการทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นพลาสติกแล้วยังใช้ในการเร่งให้พลาสติกเคลื่อนที่ ดังนั้นเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นจึงมีพลังงานสำหรับการเร่งมากขึ้น

จากการทดลองพบว่าเมื่อความดันมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของพลาสติกลดลง เนื่องจากความดันที่มากขึ้นเกิดจากปริมาณก๊าซที่มากขึ้น พลังงานส่วนใหญ่จึงถูกใช้ในการทำให้ก๊าซแตกตัว จึงเหลือพลังงานสำหรับการเร่งพลาสติกน้อยลง [1] ขณะที่การเคลื่อนที่ของพลาสติกเป็นลักษณะของพลาสติกที่กวาดก๊าซที่ยังไม่แตกตัวเข้ามาตามแนวรัศมี เมื่อมีก๊าซปริมาณมากขึ้นความดันของก๊าซที่ถูกกวาดเข้าก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของพลาสติกช้าลง โดยความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของพลาสติกจากก๊าซไนโตรเจนมีความเร็วมากที่สุด ตามด้วยออกซิเจน และอาร์กอนมีค่าน้อยสุด เนื่องจากมีมวลอะตอมน้อยสุด [1]

จากผลการทดลองที่ทำการวัดการเคลื่อนที่ของพลาสติกในช่วงท้ายของการเคลื่อนที่ และเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางทฤษฎีและจากการวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากหัววัดสนามแม่เหล็ก (ที่บันทึกได้จากการออสซิลโลสโคป ในบทที่ 4) ทำให้ทราบว่าความเร็วของพลาสติกเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงในช่วงท้ายซึ่งสอดคล้องกัน เนื่องจากเมื่อเคลื่อนที่ลึกมากขึ้นก๊าซที่ถูกกวาดก็จะมีความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนพลาสติกมีความเร็วลดลงในที่สุดและก๊าซที่มีมวลอะตอมน้อยกว่าสามารถเคลื่อนที่ได้ใกล้ศูนย์กลางมากกว่า จากแบบจำลองทางทฤษฎีพบว่าพลาสติกไม่สามารถเคลื่อนที่เข้ามาถึงแกนกลางจนเกิดเป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันเนื่องจากพลังงานที่ให้ไม่สูงเพียงพอ ขณะที่เมื่อเทียบกับเครื่องที่ดำพินซ์ที่มีกระแสไฟฟ้าในวงจรระดับที่น้อยกว่ามาก กลับไม่ทำให้ความเร็วของพลาสติกโดยรวมแตกต่างกันมากนัก สาเหตุที่ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของพลาสติกภายในเครื่องที่ดำพินซ์ไม่ได้อยู่ในระดับต่างกับเครื่องพีไอซีพีมากขณะที่กระแสอยู่ในระดับที่น้อยกว่ามากนั้น อาจเกิดจากความถี่ของกระแสภายในเครื่องที่ดำพินซ์ที่มากกว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กต่อเวลาจึงมีค่ามาก การปรับตัวด้านการเปลี่ยนแปลงของพลาสติกจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน การปรับตัวอาจเป็นการหมุนวนของกระแสพลาสติกที่เร็วเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กต้านสนามแม่เหล็กจากภายนอกที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและส่งผลต่อความเร็วในแนวรัศมีที่ทำการวัดในที่สุด

ผลจากแบบจำลองทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอุณหภูมิเฉลี่ยก็ลดลง เนื่องจากที่ความดันสูงพลังงานส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการทำให้ก๊าซแตกตัว ขณะที่ความดันต่ำจำนวนอนุภาคในพลาสติกน้อยลง พลังงานที่ให้ไปใช้ในการแตกตัวและยังใช้ไปกับการเร่งพลาสติกให้เคลื่อนที่ [1] อุณหภูมิเฉลี่ยก็ลดลงในช่วงความดันต่ำจึงสูงกว่าที่ความดันสูง ซึ่ง

สอดคล้องกับการทดลองวัดความเร็วของพลาสมา ซึ่งพบว่าที่ความดันต่ำลงความเร็วของพลาสมาจะสูงขึ้น ขณะที่เมื่อเปรียบเทียบตามชนิดของก๊าซพบว่าอาร์กอนมีอุณหภูมิอิเล็กตรอนสูงสุดตามด้วยออกซิเจนและไนโตรเจนตามลำดับ อุณหภูมิอิเล็กตรอนที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎีไม่สอดคล้องกับการวัดการเคลื่อนที่ของพลาสมาเนื่องจากผลจากแบบจำลองทางทฤษฎีได้กำหนดให้ก๊าซทุกโมเลกุลเกิดการแตกตัวหมด ก๊าซที่มีพลังงานในการสลายพันธะสูงจึงใช้พลังงานมากกว่าและเหลือพลังงานสำหรับการแตกตัวเป็นพลาสมาและการเร่งน้อยกว่า จึงมีอุณหภูมิลดต่ำกว่าตามลำดับ เป็นสาเหตุให้ผลที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎีไม่สอดคล้องกับการทดลอง ขณะที่ผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิอิเล็กตรอนด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ตามชนิดของก๊าซ ความดัน และพลังงานที่ให้ ค่าที่ได้มีแนวโน้มที่ไม่สอดคล้องกัน การวัดอุณหภูมิอิเล็กตรอนด้วยวิธีการและการจัดวางหัววัดตามลักษณะในงานวิจัยครั้งนี้ จึงยังไม่ใช่ตำแหน่งและสภาวะของการวัดที่ให้ผลดีที่สุด ซึ่งอาจเกิดจากความยาวคลื่นของรังสีส่วนใหญ่ที่แผ่ออกมาจากพลาสมาอยู่นอกช่วงที่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์สามารถรับได้[1]

6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต

ควรปรับปรุงออกแบบเครื่องพีไอซีพีให้สามารถคายประจุได้รวดเร็วขึ้นเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉลี่ยของพลาสมาว่ามีแนวโน้มเป็นอย่างไร และเพื่อเป็นการพิสูจน์สมมุติฐานที่ว่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าในวงจรของเครื่องนั้นมีผลต่อความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ตามแนวรัศมีของพลาสมา

งานวิจัยครั้งนี้ พลังงานจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรของเครื่องนั้นส่วนหนึ่งจะต้องถูกใช้ไปในการทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นพลาสมา ส่วนที่เหลือใช้ในการเร่งให้พลาสมาเคลื่อนที่ งานในอนาคตจึงควรหาวิธีการทำให้ภายในภาชนะสุญญากาศมีพลาสมาอยู่ก่อนแล้วจึงทำการปล่อยประจุจากตัวเก็บประจุ ให้พลังงานจากกระแสไฟฟ้านั้นใช้ไปสำหรับการเร่งพลาสมาแต่เพียงอย่างเดียว อาจสามารถพบเห็นปรากฏการณ์ที่น่าสนใจแตกต่างออกไป

รายการอ้างอิง

- [1] Kamsing, P. Measurement of Plasma Properties from a Theta Pinch Device.
Master's Thesis, Department of Physics Faculty of science Chulalongkorn
University, 2006.
- [2] Pimpan, V., Chuenchon, S., Kamsing, P. and Mongkolnavin, R. Properties and
Morphology of Surface-Modified Polypropylene Fibers Using Theta-pinch
Device, Abstracts to International Meeting on Frontiers of Physics 2005, 25 -29,
Kuala Lumpur, Malaysia. 2005.
- [3] Eissa, M. A. Plasma Parameter in The Thetatron. Laser and Plasma Technology. 403-
411. Singapore : World Scientific Publishing, 1988.
- [4] Shang, B. Comparative Study of Dynamics and X-Ray Emission of Several Plasma
Focus Device, Doctoral dissertation, Physics Division, School of Science,
Nanyang Technology University, 2000.
- [5] Fridman, A. and Kennedy, L. A. Plasma Physics and Engineering. United state:
Taylor & Francis Group Press, 2004.
- [6] GRIEM, H. R. Principles of Plasma Spectroscopy. 2. United Kingdom. Cambridge
University Press, 1997.
- [7] Wong, C. S. Elements of Plasma Technology Physics Department, Malaysia,
University of Malaya, 2002
- [8] Lee, S., Tan, B. C., Wong, C.S. and Chew, A.C. Laser and plasma Technology.
Proc. Second Tropical College on Applied Physics: World Scientific, 1986.
- [9] AAAPT. Twelve Years of UNU/ICTP PFF-A Review, The United Nation
University, 1963.

- [10] Lee, S. Laser and Plasma Technology, Proceedings of the First Tropical College on Applied Physics, Malaysia (1983).
- [11] Ong, C. X., Wong, C. S. and Chew, A. C. Characteristics of A Toroidal Helium Plasma. Second Tropical Collage on Applied Physics Laser and Plasma Technology. (17 March – 5 April 1987) : 441-448.
- [12] Mao-fu, Y. Discharge Current Measurement By Rogowski Coil. Proceedings of Plasma Physics: Diagnostics. (30 October-9 November 1989): 46-50.
- [13] Kieft, E.R., Mullen, V. D. and Banine, V.Y. Sub-ns Thomson scattering applied to an EUV emitting vacuum arc discharge in tin vapor, XXVIIth ICPIG (2005): 8-13.
- [14] Tangjitsomboon, P. Plasma Focus Device Modification for Generating of Extreme Ultraviolet Radiation. Master's Thesis, Department of Physics Faculty of science Chulalongkorn University, 2009.
- [15] Khaymapanya, P., Kamsing, P., Mongkolnavin, R. and Pimpan, V. Surface Modification of Polyester Fabric Using Plasma Generated from Theta-Pinch Device. Proceedings to The 14th Academic Symposium of Faculty of Science, Chulalongkorn University. Bangkok, Thailand. (16-17 March 2006).
- [16]. Alani, R., Azodi, H., Naraghi, M., Safaii, B. and Torabi-Fard, A. Material testing in a linear theta pinch. J. of Nuc. Material. 13, (1983) : 25-32
- [17] Pedrow, P. D. and Nasiruddin, A. M. Experimental Study of CF_4 Conical Theta Pinch Plasma Expanding into Vacuum. IEEE Transaction on Plasma Science. 17, 1, (February 1989) : 17-23.

- [18] Trigueiros, A., Pettersson, S. G. and Almandos, J. G. R. Transitions within the $n=4$ complex of Kr VII obtained from a Theta-Pinch Light Source. Physics Scripta, 34, (1986) : 164-166.
- [19] Pedrow, P. D., Goyal, K. O., Mahalingam, R., and Osman, M. A. Explosion model applied to an intense pulsed plasma source for thin film deposition. IEEE Transactions on plasma science, 25, 1, (February 1977) : 89-96
- [20] Luna, F. R. T., Cavalcanti G.H. and Trigueiros, A. G. A theta-pinch as a spectroscopic light source. J. Phys. D: Appl. Phys. 31, (1998) : 866-872



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

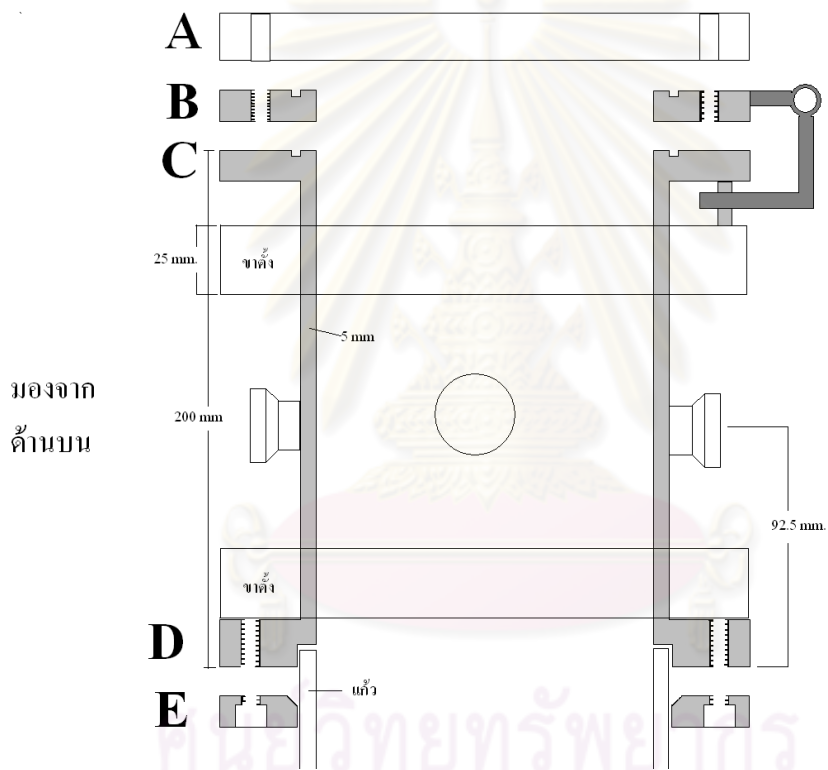


ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

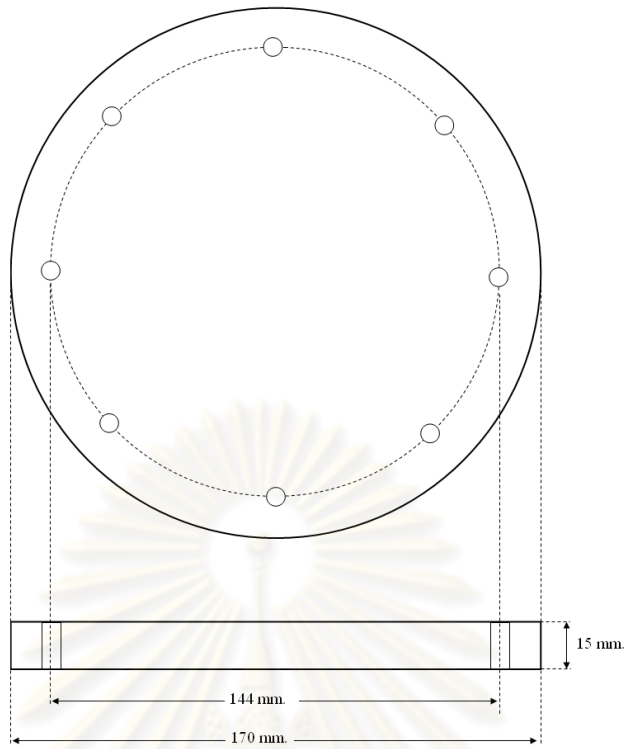
ภาคผนวก ก
แบบงานส่วนประกอบของเครื่องพีไอซีพี

1 ฝาปิดภาชนะสุญญากาศ

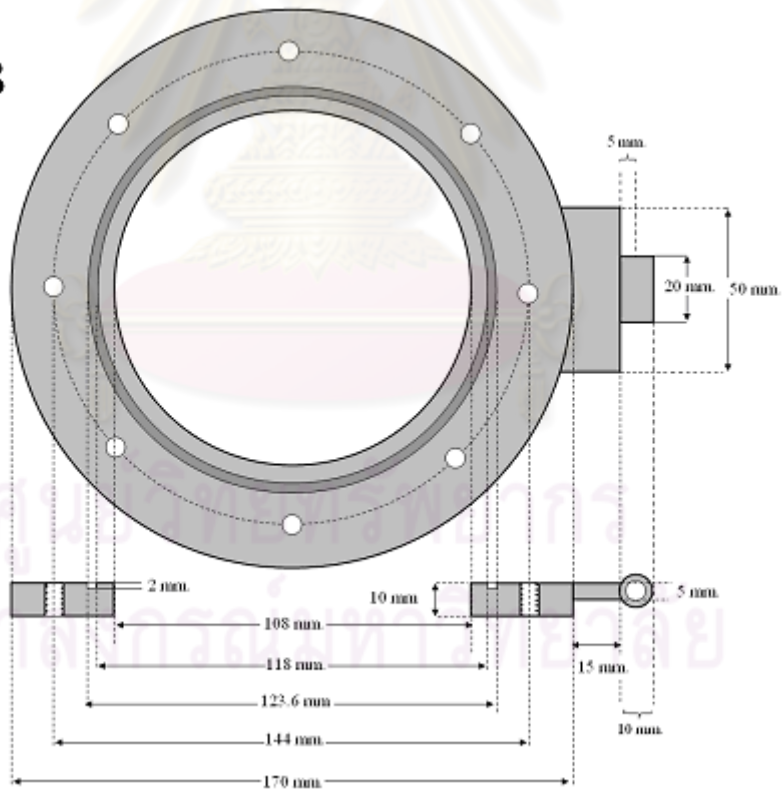


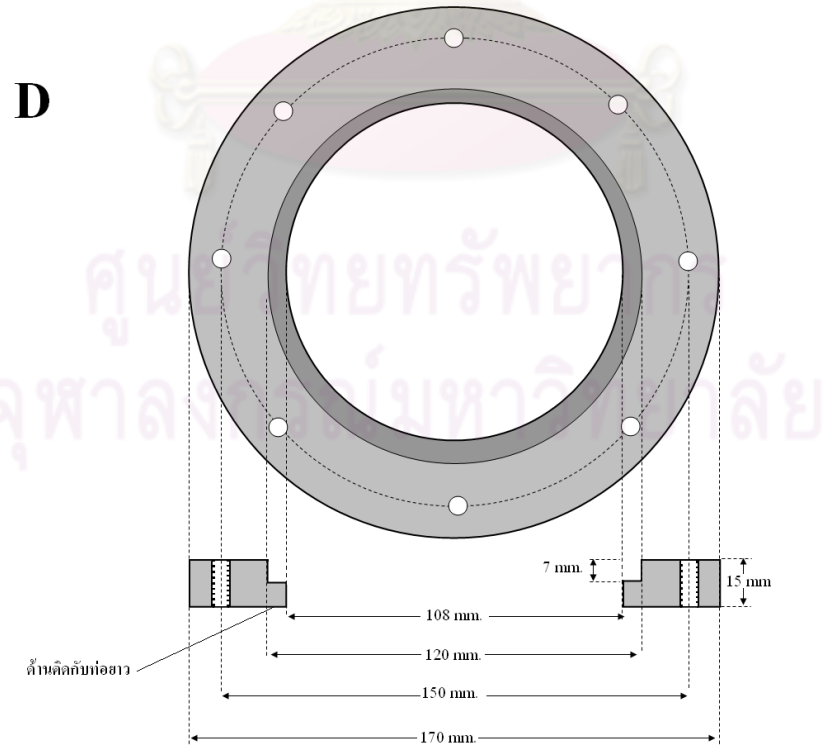
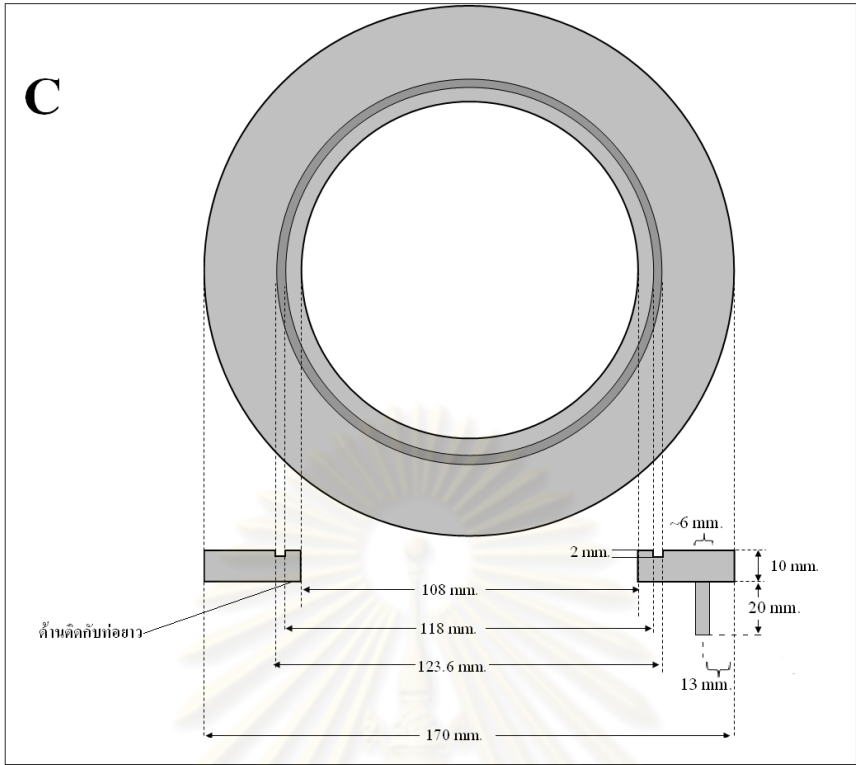
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A

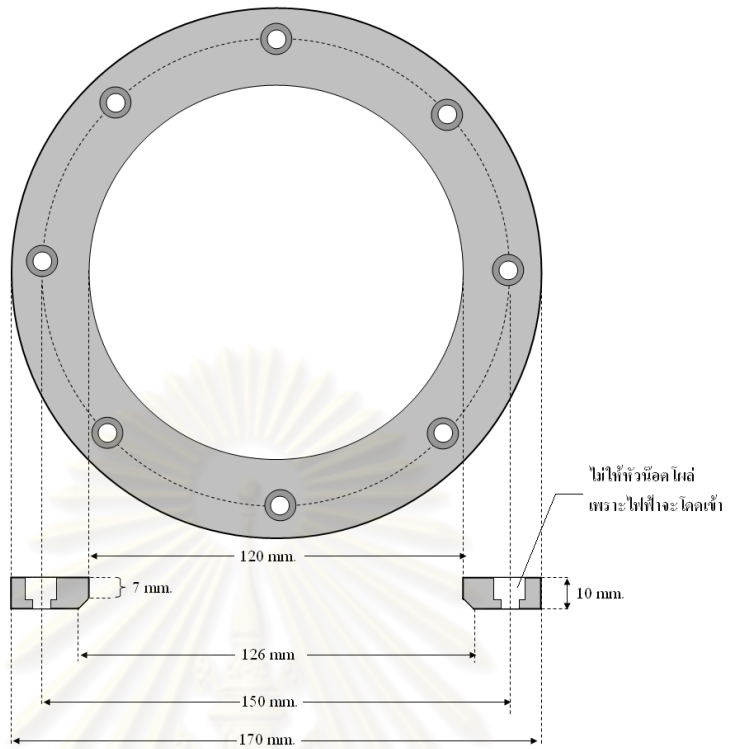


B

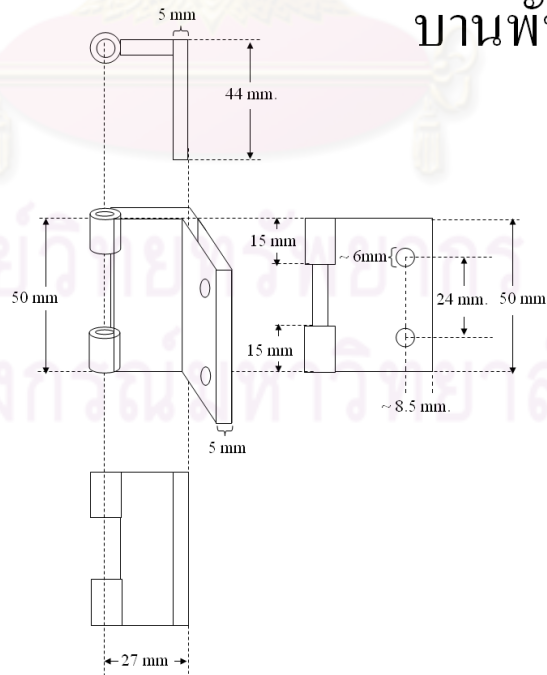




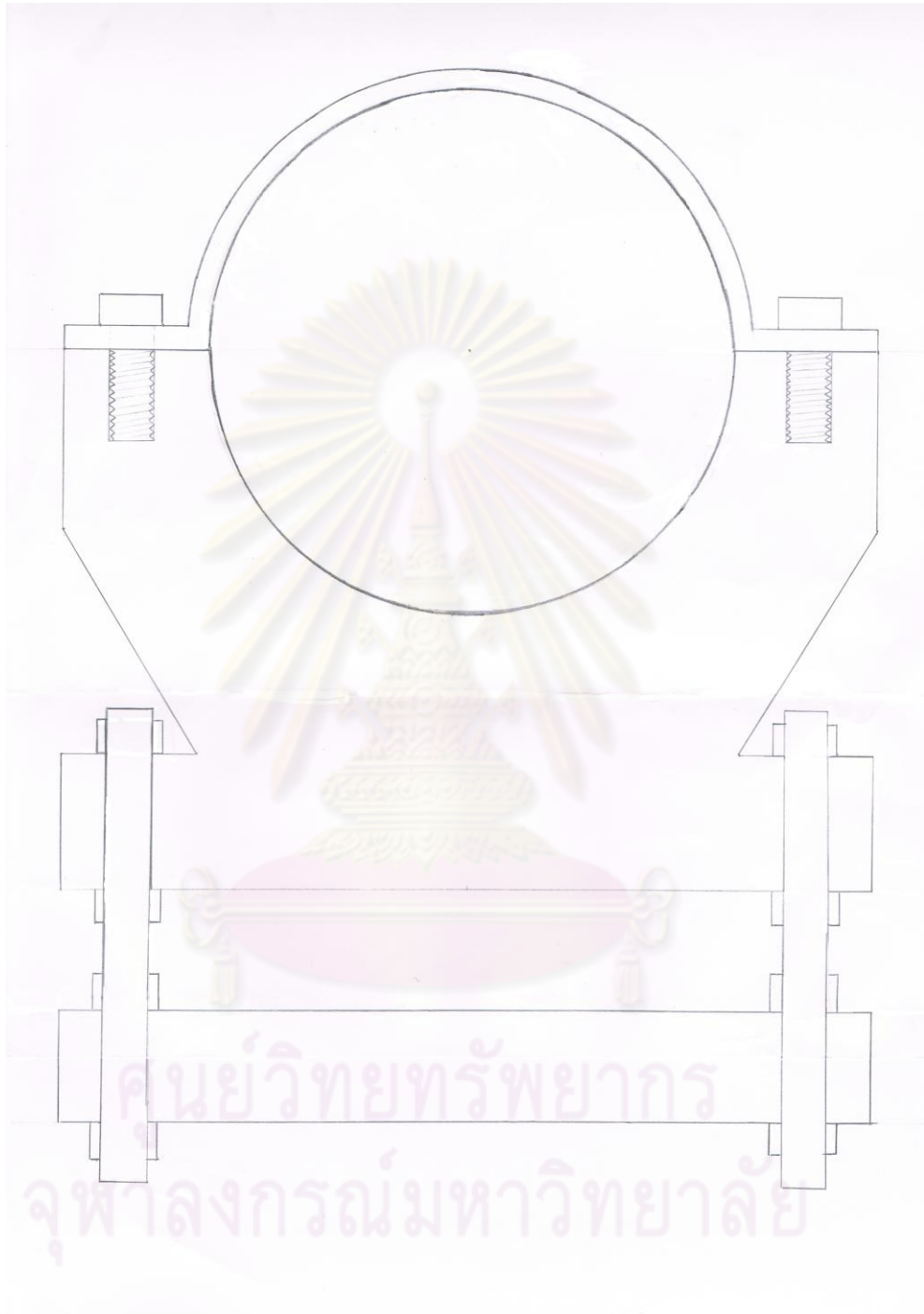
E

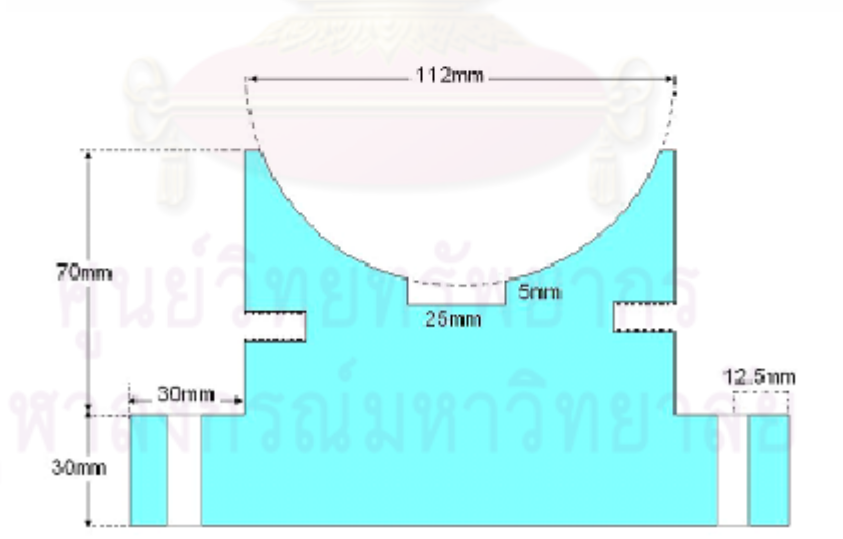
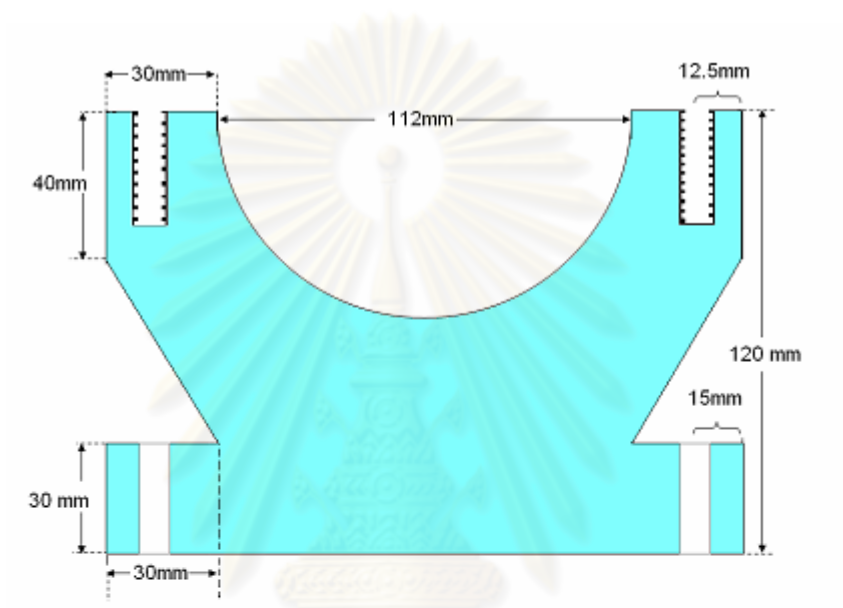


บานพับ



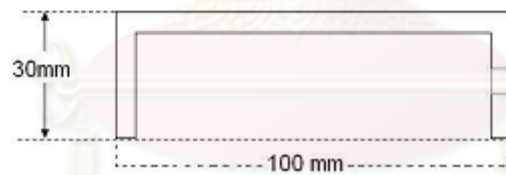
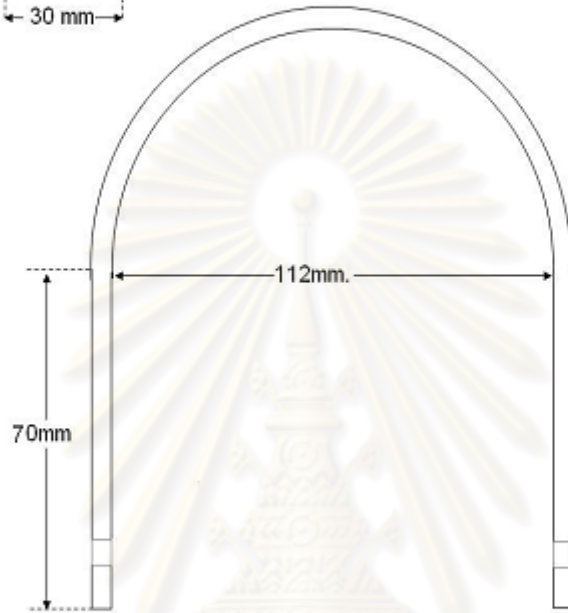
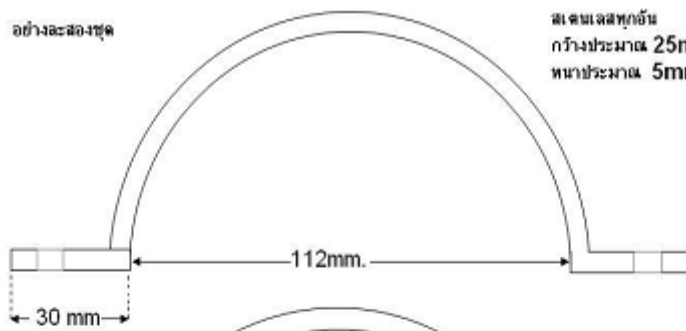
2 ชุดแท่นวางภาชนะสุญญากาศ





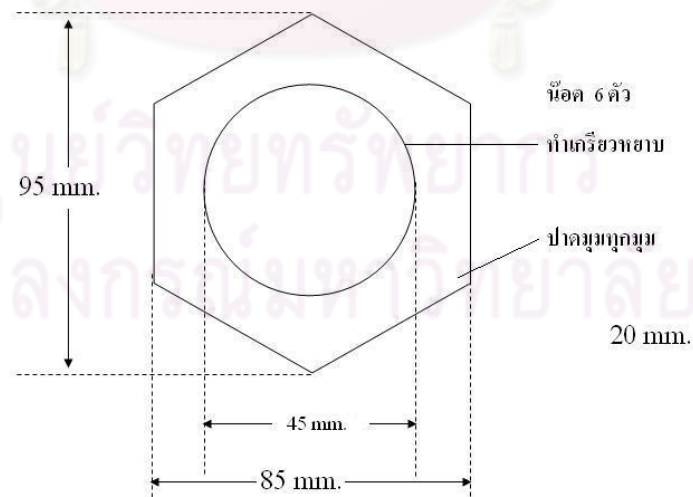
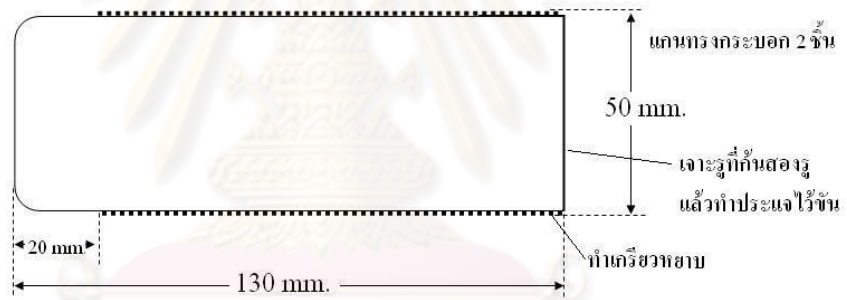
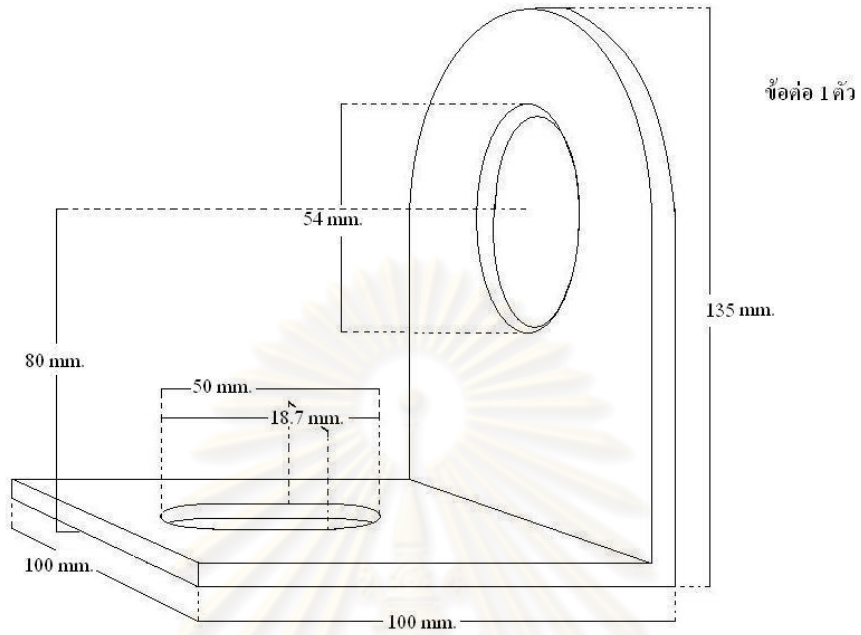
ตัวอย่างกล่องชุด

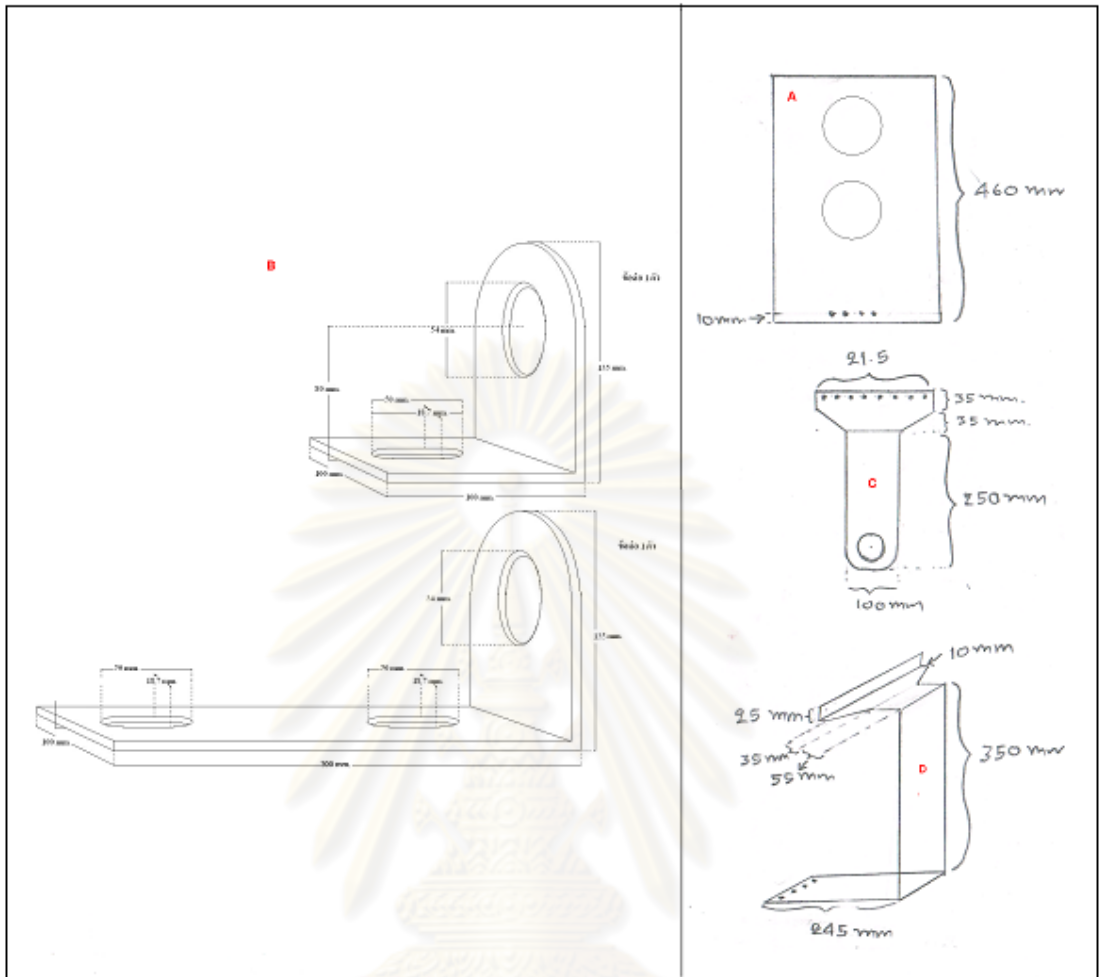
สแตนเลสทุกอัน
กว้างประมาณ 25mm
หนาประมาณ 5mm



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3 ขั้วและข้อต่อสปาร์คกับสวิตช์





ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล นายสิทธิศักดิ์ ไชยสมบัติ

เกิด วันที่ 2 ธันวาคม 2526

การศึกษา ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2549, จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ จ.นครศรีธรรมราช ในปี พ.ศ. 2545, จบการศึกษาระดับมัธยมต้นจากโรงเรียนปากพ่อง จ.นครศรีธรรมราช ในปี พ.ศ. 2543

ผลงานที่ผ่านมา

[1] S. Chaisombat¹, D. Ngamrunroj, P. Tangjitsomboon and R. Mongkolnavin. Plasma Dynamics Simulation in Small Theta Pinch Device, 5th Siam Physics Congress(SPC2010), Kanchanaburi, Thailand(Oral)

ประวัติการทำงาน

- Research Assistance in Influence of Plasma Treatment on Activated Carbon Project 2008-2009
- Research Assistance in Corona treatment of expanded PTFE Project 2009-2010
- อาจารย์พิเศษโรงเรียนไทยคริสเตียนศึกษาปีการศึกษา 2553 จนถึงปัจจุบัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย