

การวัดสมบัติของพลาสติกที่เกิดภายในเครื่องที่ตาพินซ์



นายไพรัช คำสิงห์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

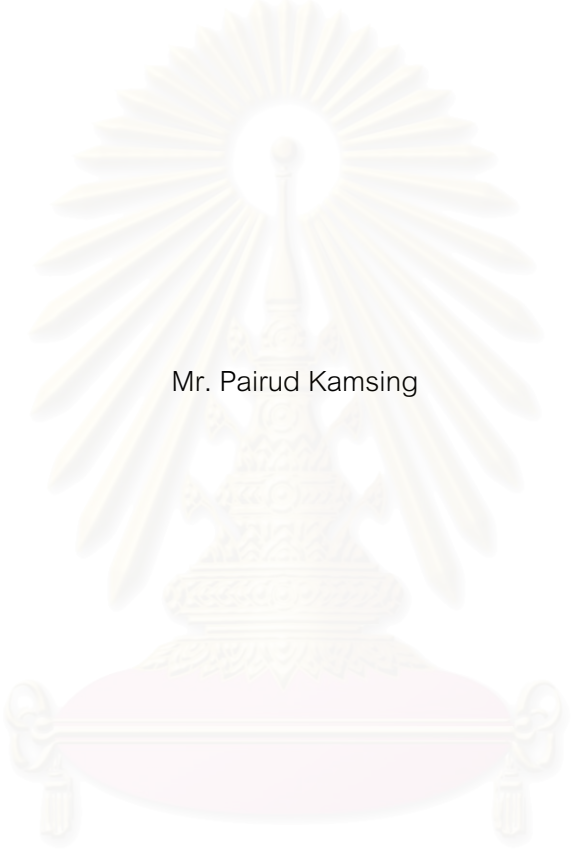
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-2883-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MEASUREMENT OF PLASMA PROPERTIES FROM A THETA PINCH DEVICE



Mr. Pairud Kamsing

สถาบันวิทยบริการ
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 2005

ISBN 974-14-2883-9

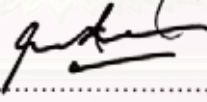
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวัดสมบัติของพลาสติกที่เกิดภายในเครื่องที่ตาพินซ์
โดย นายไพรัช คำสิงห์
สาขาวิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมณะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. อภิสิทธิ์ อังกิจจานุกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ธิติ บวรรัตนารักษ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุกตธรรม เสนาะพิมพ์)

นายไพรัช คำสิงห์ : การวัดสมบัติของพลาสมาที่เกิดภายในเครื่องที่ตาพินช์.

(MEASUREMENT OF PLASMA PROPERTIES FROM A THETA PINCH DEVICE)

อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. รัฐชาติ มงคลนาวัน, 80 หน้า. ISBN 974-14-2883-9.

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาสมบัติของเครื่องที่ตาพินช์ กระบวนการเกิดพลาสมา และสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องที่ตาพินช์ ซึ่งเป็นตัวแปรพื้นฐานที่มีประโยชน์ในการพัฒนา และศึกษาเครื่องกำเนิดปฏิกิริยาฟิวชันในอนาคต โดยในการศึกษาได้ใช้ขดลวดโรโกวสกีสำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้า หัววัดทางไฟฟ้าและสเปกโตรมิเตอร์เพื่อใช้ในการหาค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอน โดยผลที่ได้จากการทดลองได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองทางทฤษฎี เพื่อให้เข้าใจกระบวนการเกิดพลาสมา และการเปลี่ยนแปลงของพลาสมา จากการทดลองพบว่าเมื่อให้ความต่างศักย์ 20 กิโลโวลต์กับตัวเก็บประจุความจุสูง วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในเครื่องได้ 128 กิโลแอมป์ อุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมา ออกซิเจนพลาสมา และไนโตรเจนพลาสมามีค่าประมาณ 2.67-2.80 อิเล็กตรอนโวลต์ 12.77-17.14 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 14.21-20.02 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับที่ความดัน 1-5 ปาสคาล ผลจากแบบจำลองทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่าเมื่อมวลโมเลกุลของก๊าซหรือความดันมีค่ามาก ระยะทางการบีบตัวของพลาสมาและความเร็วของพลาสมาลดลง ตามที่คาดไว้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาฟิสิกส์
สาขาวิชาฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4572428423 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: THETA PINCH / PLASMA / PLASMA DIAGNOSTIC / PLASMA PROPERTIES

PAIRUD KAMSING : MERSUREMENT OF PLASMA PROPERTIES FROM A THETA PINCH DEVICE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. RATTACHAT MONGKOLNAVIN, Ph.D., 80 pp. ISBN 974-14-2883-9.

In this research, the properties of a theta-pinch device, plasma dynamics and plasma properties were studied. These basic parameters are useful for future development and study of small fusion devices. Rogowski coil was used in measuring the discharge current. Electric probes and a spectrometer were used to measure plasma electron temperature. Results from experiment were compared with results from simulation models in order to understand the dynamics. The results from the experiment show that, when 20 kV charging voltage was applied to the capacitor bank, the discharge current is 128 kA. With this current, electron temperature of Argon, Oxygen, and Nitrogen plasma measured were 2.67-2.80 eV, 12.77-17.14 eV and 14.21-20.02 eV respectively when the device was operated at various pressure ranges from 1-5 Pa. The simulation shows that, when molecular mass or pressure increases, the compression distance and velocity also decrease as expected.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Physics
Field of study Physics
Academic year 2005

Student's signature..... *Pairud Kamsing*
Advisor's signature..... *R. Mongkolnavin*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบคุณทุกคนที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดเวลาที่ได้ทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งข้าพเจ้าต้องขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ รัชชาติ มงคลนาวิน อาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้าที่คอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาที่ดีตลอดเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บิดา และมารดา ของข้าพเจ้าที่คอยให้กำลังใจกับข้าพเจ้าตลอดเวลาที่ได้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ Prof. Sing Lee, Prof. Chiow San Wong และนายดุสิต งามรุ่งโรจน์ ที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาฟิสิกส์ เจ้าหน้าที่งานพัฒนาฯ ของคณะวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ของศูนย์เครื่องมือฯ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในงานด้านเอกสาร และอุปกรณ์สำหรับทำวิทยานิพนธ์

และขอขอบคุณ นายวิริน สนเศรษฐี นางสาวชนิตฐา หงส์เลิศสกุล เพื่อนๆที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อนๆที่ University of Malaysia และบุคคลที่ให้ความช่วยเหลือในวิทยานิพนธ์ แต่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 แนวเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.5 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิจัย.....	5
บทที่ 2 เครื่องที่ตาพินซ์	7
2.1 ส่วนประกอบของเครื่องที่ตาพินซ์.....	8
2.1.1 ตัวเก็บประจุความจุสูงและตัวซาร์จประจุความต่างศักย์สูง.....	9
2.1.2 สปาร์คแก๊ปสวิตช์และอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์.....	11
2.1.3 ขดลวดแบบรอบเดียว	13
2.1.4 ท่อควอทซ์และปั๊มสุญญากาศ	13
2.2 กระบวนการเกิดพลาสมา.....	14

2.3	วิธีการใช้เครื่องที่ตาพินซ์	16
บทที่ 3	แบบจำลองทางทฤษฎี	18
3.1	แบบจำลองทางทฤษฎีของวงจรเครื่องที่ตาพินซ์.....	19
3.1.1	แบบจำลองทางทฤษฎีแบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก	19
3.1.2	แบบจำลองทางทฤษฎีแบบมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก	20
3.2	แบบจำลองทางทฤษฎีการเคลื่อนที่ของกระแสพลาสมา	24
3.2.1	แบบจำลองทางทฤษฎีในกรณีไม่มีคลื่นกระแทก.....	24
3.2.2	แบบจำลองทางทฤษฎีในกรณีมีคลื่นกระแทก	26
3.2.2.1	การคำนวณการเคลื่อนที่ของพลาสมา.....	26
3.2.2.2	การคำนวณการเคลื่อนที่ของคลื่นกระแทก.....	28
บทที่ 4	เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง	30
4.1	ขดลวดโรโกวสกี	30
4.2	หัววัดทางไฟฟ้า.....	34
4.3	เครื่องสเปคโตรมิเตอร์.....	37
บทที่ 5	การทดลองและผลการทดลอง	39
5.1	การวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรเครื่องที่ตาพินซ์	40
5.2	การวัดค่าอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์.....	43
5.2.1	การวัดโดยใช้หัววัดทางไฟฟ้า	43
5.2.2	การวัดโดยใช้เครื่องสเปคโตรมิเตอร์.....	48

5.3 ผลจากแบบจำลองทางทฤษฎี.....	59
บทที่ 6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	66
6.1 วิเคราะห์และสรุปสมบัติของเครื่องที่ตาพินซ์.....	66
6.2 วิเคราะห์และสรุปสมบัติของพลาสมาที่เกิดภายในเครื่องที่ตาพินซ์	66
6.3 ค่าจากแบบจำลองทางทฤษฎี.....	68
6.4 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต และการประยุกต์ใช้งาน.....	69
รายการอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก. ตารางแสดงค่าของสเปคตัมของพลาสมาแต่ละชนิด.....	75
ภาคผนวก ข. วงจรควบคุมเครื่องซาร์จประจุความต่างศักย์สูง.	76
ภาคผนวก ค. วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์.....	77
ภาคผนวก ง. ขั้นตอนการเปิดเครื่องควบคุมของเครื่องที่ตาพินซ์.....	78
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	80

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าในวงจร กระแสพลาสมา และสนามแม่เหล็ก	7
รูปที่ 2.2 แสดงภาพของเครื่องที่ตาพินซ์	8
รูปที่ 2.3 แสดงการประกอบอุปกรณ์ของเครื่องที่ตาพินซ์	9
รูปที่ 2.4 แสดงภาพวงจรการต่อตัวเก็บประจุ	10
รูปที่ 2.5 แสดงภาพของตัวเก็บประจุความจุสูงของเครื่องที่ตาพินซ์	10
รูปที่ 2.6 แสดงวงจรของเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง	11
รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของสปาร์คแก๊ป	12
รูปที่ 2.8 แสดงการต่ออิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์และสปาร์คแก๊ปสวิตช์ กับวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์	12
รูปที่ 2.9 แสดงขนาดของขดลวดรอบเดี่ยว	13
รูปที่ 2.10 แสดงขนาดของท่อควอทซ์	14
รูปที่ 2.11 แสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมา	16
รูปที่ 3.1 แสดงวงจรเสมือนของเครื่องที่ตาพินซ์	20
รูปที่ 3.2 แสดงวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์	21
รูปที่ 3.3 แสดงสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าในขดลวด I_c	22
รูปที่ 3.4 แสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาภายในท่อควอทซ์	24
รูปที่ 4.1 แสดงวงจรของขดลวดโรโกวสกี	31
รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งที่วางขดลวดโรโกวสกี	32
รูปที่ 4.3 แสดงวงจรเสมือนของเครื่องที่ตาพินซ์	32

รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณที่วัดได้จากขดลวดโรโกวสกี	33
รูปที่ 4.5 แสดงวงจรของหัววัดทางไฟฟ้าแบบหัววัดเดี่ยวและหัววัดคู่	34
รูปที่ 4.6 แสดงกราฟลักษณะของกระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์	35
รูปที่ 5.1 แสดงลำดับขั้นตอนของการทดลอง	39
รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ขดลวดโรโกวสกี	41
รูปที่ 5.3 แสดงกราฟระหว่างความต่างศักย์ที่ให้ตัวเก็บประจุความจุสูง กับกระแสไฟฟ้า และค่า K	42
รูปที่ 5.4 แสดงรูปของหัววัดทางไฟฟ้า	44
รูปที่ 5.5 แสดงวงจรของหัววัดทางไฟฟ้า	44
รูปที่ 5.6 กราฟลักษณะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของก๊าซอาร์กอน 1 ปาสคาล	45
รูปที่ 5.7 แสดงเส้นกราฟกระแสไฟฟ้าอิมิตซ์ของไอออน	46
รูปที่ 5.8 แสดงกราฟระหว่างความต่างศักย์ที่ให้กับหัววัด กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ หลังจากลบออกด้วยค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตซ์ของไอออน	46
รูปที่ 5.9 แสดงเส้นกราฟที่ใช้ในการหาค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอน	47
รูปที่ 5.10 แสดงการหาค่าศักย์พลาสมาจากกราฟ	47
รูปที่ 5.11 แสดงการต่อเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ในการทดลอง	48
รูปที่ 5.12 แสดงผลที่ได้จากเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ของก๊าซอาร์กอนที่ความดัน 1 ปาสคาล	49
รูปที่ 5.13 แสดงความยาวคลื่นที่เลือกใช้ของก๊าซอาร์กอน	50
รูปที่ 5.14 แสดงช่วงการใช้งานของอาร์กอนพลาสมา	51

รูปที่ 5.15 แสดงความยาวคลื่นที่เลือกใช้ของก๊าซออกซิเจน	50
รูปที่ 5.16 แสดงช่วงการใช้งานของออกซิเจนพลาสมา	53
รูปที่ 5.17 แสดงความยาวคลื่นที่เลือกใช้ของก๊าซไนโตรเจน	50
รูปที่ 5.18 แสดงช่วงการใช้งานของไนโตรเจนพลาสมา	52
รูปที่ 5.19 กราฟระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมา	55
รูปที่ 5.20 กราฟระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนของออกซิเจนพลาสมา	56
รูปที่ 5.21 กราฟระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนของไนโตรเจนพลาสมา	57
รูปที่ 5.22 แสดงกราฟระหว่างความดันกับอุณหภูมิอิเล็กตรอนของก๊าซชนิดต่างๆ	58
รูปที่ 5.23 แสดงกราฟของกระแสไฟฟ้าจากการทดลอง และแบบจำลองทางทฤษฎี	59
รูปที่ 5.24 แสดงกราฟของกระแสไฟฟ้าจากการทดลอง และแบบจำลองทางทฤษฎี	
หลังปรับค่า	60
รูปที่ 5.25 แสดงกราฟแบบจำลองทางทฤษฎีของกระแสไฟฟ้าและการเคลื่อนที่ของ	
พลาสมาที่ $\alpha = 0.001$	61
รูปที่ 5.26 แสดงกราฟแบบจำลองทางทฤษฎีของกระแสไฟฟ้า, การเคลื่อนที่ของคลื่น	
กระแทก และการเคลื่อนที่ของพลาสมาที่ค่า $f_m=0.08, m=0.0001$	62
รูปที่ 5.27 แสดงกราฟระหว่างความดันกับระยะทางที่เคลื่อนที่ และความเร็วของอาร์กอน	
พลาสมา	63
รูปที่ 5.28 แสดงกราฟระหว่างความดันกับระยะทางที่เคลื่อนที่พลาสมาเคลื่อนที่ได้	64
รูปที่ 5.29 แสดงกราฟระหว่างความดันกับความเร็วของพลาสมา	64

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าของกระแสไฟฟ้า และค่าอัตราส่วนที่ความต่างศักย์ 15-20 kA	42
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าในการคำนวณของอาร์กอนพลาสมา	50
ตารางที่ 5.3 แสดงผลของอุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมาที่ความดัน 1 ปาสคาล.....	51
ตารางที่ 5.4 แสดงค่าในการคำนวณของออกซิเจนพลาสมา	52
ตารางที่ 5.5 แสดงค่าในการคำนวณของไนโตรเจนพลาสมา	54
ตารางที่ 5.6 แสดงค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมาที่ความดัน	55
ตารางที่ 5.7 แสดงค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนของออกซิเจนพลาสมาที่ความดัน.....	56
ตารางที่ 5.8 แสดงค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนของไนโตรเจนพลาสมาที่ความดัน	57
ตารางที่ 5.9 แสดงผลของความดันกับระยะทางที่พลาสมาเคลื่อนที่ได้และความเร็วของ อาร์กอนพลาสมาที่ตำแหน่งสุดท้าย	63
ตารางที่ 6.1 แสดงอุณหภูมิอิเล็กตรอนของก๊าซที่ความดัน 1-5 ปาสคาล	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวเหตุผล

โดยทั่วไปสสารมีสถานะที่อุณหภูมิห้องแบ่งออกได้เป็น สถานะของแข็ง สถานะของเหลว และสถานะก๊าซ เมื่อสสารได้รับพลังงานทำให้สสารมีการเปลี่ยนสถานะ ตัวอย่างเช่น น้ำแข็งซึ่งเป็นน้ำที่อยู่ในสถานะของแข็ง เมื่อให้ความร้อนแก่น้ำแข็งในปริมาณที่มากเพียงพอ น้ำแข็งมีการละลายกลายเป็นน้ำ ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลว และเมื่อให้ความร้อนแก่น้ำ ทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งไอน้ำคือน้ำที่อยู่ในสถานะก๊าซ โดยทั่วไปสถานะก๊าซคือเป็นสถานะสุดท้ายที่รู้จักกันทั่วไป แต่เมื่อให้พลังงานกับก๊าซ พบว่าก๊าซมีการแตกตัวกลายเป็นประจุ การเปลี่ยนสถานะของก๊าซเป็นประจุไฟฟ้านี้คือสถานะที่เรียกว่า พลาสมา

พลาสมาคือก๊าซที่ได้รับพลังงานและแตกตัวเป็นประจุ ประกอบด้วยประจุลบหรืออิเล็กตรอน และประจุบวกหรือไอออน โดยมีเงื่อนไขที่ต้องพิจารณาดังนี้

เงื่อนไขแรกที่ต้องพิจารณาก็คือ ต้องให้ขนาดของพลาสมาใหญ่กว่าระยะเดอบายมาก ๆ เพื่อให้การรบกวนใดๆ ที่เกิดขึ้น เช่นจากการใส่หัววัดเข้าไปในพลาสมา ไม่เป็นการรบกวนระบบพลาสมาโดยรวมที่ต้องการศึกษา ซึ่งเขียนเป็น

$$L \gg \lambda_D$$

1.1

โดย L = ขนาดของพลาสมา, λ_D = ระยะความยาวคลื่นเดอบาย

เงื่อนไขที่สองคือจำนวนอนุภาคประจุ หรือความหนาแน่นประจุภายในทรงกลมเดอบาย

(N_D) ต้องมีค่าสูง

$$N_D \gg 1 \quad 1.2$$

กล่าวคือพลาสมาที่มีความหนาแน่นเพียงพอที่ทำให้ $L \gg \lambda_D$ เป็นจริงตามเงื่อนไขข้อแรก

เงื่อนไขสุดท้ายของการเป็นพลาสมาคือความถี่การสั่นของพลาสมา (Plasma frequency)

ต้องมีค่ามากเมื่อเทียบกับความถี่ของแหล่งรบกวน (ω)

$$\omega_p > \omega \quad 1.3$$

$$\omega_p \tau > 1 \quad 1.4$$

โดยที่ ω_p คือความถี่พลาสมา และ τ คือเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกันของอนุภาคประจุกับอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ซึ่งการที่พลาสมาประกอบด้วยประจุไฟฟ้าจำนวนมากทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดี และประจุไฟฟ้าในพลาสมายังมีปฏิริยากับสนามแม่เหล็ก การที่ประจุไฟฟ้าในพลาสมามีปฏิริยากับสนามแม่เหล็กทำให้สามารถกักเก็บพลาสมาไว้เพื่อใช้ในปฏิริยานิวเคลียร์แบบหลอมรวม^[1, 2]

การกักเก็บพลาสมาโดยใช้สนามแม่เหล็ก หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า การกักเก็บด้วยสนามแม่เหล็ก (Magnetic Confinement) โดยอาศัยการที่ประจุไฟฟ้าในพลาสมามีปฏิริยากับสนามแม่เหล็ก ซึ่งประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่เป็นวงกลมเมื่ออยู่ภายในสนามแม่เหล็ก จากหลักการนี้ทำให้เกิดเครื่องมือในการใช้ควบคุมพลาสมาโดยใช้สนามแม่เหล็กขึ้นซึ่งได้แก่ เครื่องโทคาแมค (Tokamak), เครื่องสเตลลาเรเตอร์ (Stellarator), Reversible Field Configuration (RFC), ฯลฯ เครื่องควบคุมพลาสมาที่ได้กล่าวไปแล้วนั้นเป็นเครื่องควบคุมพลาสมาโดยใช้สนามแม่เหล็ก ซึ่ง

ได้รับการพัฒนาประสิทธิภาพให้สูงมากยิ่งขึ้น เพื่อใช้ในการสร้างปฏิกริยานิวเคลียร์แบบหลอมรวม เครื่องความคุมเหล่านี้ได้รับการพัฒนาจากเครื่องต้นแบบที่เรียกว่า Linear Pinch Device^[1,3]

เครื่อง Linear Pinch Device แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ Z-Pinch และ Theta-Pinch ซึ่งชื่อเรียกของเครื่องทั้งสองนี้เรียกตามกระแสของพลาสมาที่เกิดขึ้นในเครื่อง โดยที่เครื่อง Z-Pinch สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นในทิศ θ และกระแสของพลาสมาเกิดขึ้นในทิศ Z ส่วนเครื่อง Theta-Pinch นั้นสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นในทิศ Z และกระแสของพลาสมาเกิดขึ้นในทิศ θ ตามพิภพทรงกระบอก^[1, 2, 3] ดังรูปที่ 2.1 ในบทที่ 2

ในวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาการทำงานของเครื่องที่ตาพินซ์ และสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องที่ตาพินซ์ โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างอุปกรณ์ในการวัดเพื่อใช้ในการศึกษาการเกิดพลาสมาของเครื่องที่ตาพินซ์ และสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องที่ตาพินซ์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา การทำงานของเครื่องที่ตาพินซ์ และพลาสมาที่เกิดขึ้น ในวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย ขดลวดโรโกวสกี (Rogowski Coil), หัววัดไอออน (Ion Probe) และสเปคโตรมิเตอร์ ผลที่ได้จากการวัดสมบัติของเครื่องที่ตาพินซ์ สมบัติของพลาสมา และการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในเครื่องที่ตาพินซ์ ผลทั้งหมดนี้ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการเชิงตัวเลขตามแบบจำลองทางทฤษฎี

จากการศึกษาโดยใช้เครื่องมือวัดแบบต่างๆ และจากการคำนวณโดยวิธีการเชิงตัวเลขตามแบบจำลองทางทฤษฎี ผลที่ได้สามารถนำมาเป็นพื้นฐานเพื่อใช้ในการปรับปรุง และพัฒนาเครื่องที่ตาพินซ์ให้เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำวิจัยด้านอื่นๆ ต่อไปในอนาคต เพราะนอกจากการนำเครื่องที่ตาพินซ์ไปใช้เพื่อสร้างปฏิกริยานิวเคลียร์แบบหลอมรวม ปัจจุบันยังมีการนำเครื่องที่ตาพินซ์มาปรับปรุงเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาวิจัยหลายด้าน เช่น ใช้เป็นแหล่งกำเนิดเลเซอร์^[16, 17] ใช้ในการทำฟิล์มบาง^[18] เคลือบผิวหน้าวัสดุ^[19] ฯลฯ จากตัวอย่างที่ได้กล่าวถึงมาแล้วนั้น เห็นได้ว่า

เครื่องที่ตาพินซ์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้ในหลายด้าน ดังนั้นการศึกษาการทำงาน
ของเครื่องที่ตาพินซ์ กระบวนการเกิดพลาสมา และคุณสมบัติของพลาสมาที่ได้จากเครื่องที่
ตาพินซ์ จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อใช้ในการประยุกต์เครื่องที่ตาพินซ์ สำหรับนำไปใช้ในการศึกษางาน
ด้านอื่นต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาระบบการทำงานของเครื่องที่ตาพินซ์ กระบวนการเกิดพลาสมา สมบัติของเครื่องที่
ตาพินซ์ และสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นจากเครื่องที่ตาพินซ์ เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการสร้าง
แบบจำลองทางทฤษฎี สำหรับใช้เป็นพื้นฐานในการปรับปรุง แก้ไข และพัฒนาเครื่องที่ตาพินซ์
เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้กับการทำวิจัยในด้านอื่นต่อไป

1.3 วิธีดำเนินการวิจัย

ศึกษากระบวนการทำงานและสมบัติของเครื่องที่ตาพินซ์โดยทำการสร้าง ขดลวดโรโกวสกี
เพื่อใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในเครื่อง ศึกษากระบวนการเกิดพลาสมา และสมบัติของ
พลาสมาภายในเครื่องที่ตาพินซ์ โดยใช้หัววัดไอออน และสเปคโตรมิเตอร์ เพื่อหาค่าอุณหภูมิ
อิเล็กตรอน และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นสมบัติของพลาสมา ศึกษาแบบจำลองทาง
ทฤษฎีของเครื่องที่ตาพินซ์ ผลที่ได้จากการทดลอง และผลที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎีนำมา
เปรียบเทียบกัน เพื่อพิสูจน์แบบจำลองทางทฤษฎี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้ ความเข้าใจ ในระบบการทำงานของเครื่องที่ตาพินซ์ รวมถึงพลาสมา และกระบวนการเกิดพลาสมาของเครื่องที่ตาพินซ์ เพื่อนำไปใช้ในการสร้าง และประยุกต์เครื่องที่ตาพินซ์สำหรับการวิจัยด้านอื่นๆ ต่อไป
2. ได้รับความรู้เกี่ยวกับแบบจำลองทางทฤษฎีของเครื่องที่ตาพินซ์ และแบบจำลองทางทฤษฎีการเคลื่อนที่ของพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องที่ตาพินซ์ เพื่อเป็นพื้นฐานในการนำเครื่องที่ตาพินซ์ไปประยุกต์ใช้งาน
3. ได้รับความรู้เกี่ยวกับเครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับวัดสมบัติของเครื่องที่ตาพินซ์ และสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องที่ตาพินซ์
4. ได้รับทราบถึงตัวอย่างการนำเครื่องที่ตาพินซ์ไปประยุกต์ใช้กับงานด้านวัสดุศาสตร์

1.5 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท โดยในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงแนวเหตุผล วัตถุประสงค์ วิธีดำเนินการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงเครื่องที่ตาพินซ์ ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึง ส่วนประกอบของเครื่องที่ตาพินซ์ กระบวนการเกิดพลาสมา และการทำงานของเครื่องที่ตาพินซ์ บทที่ 3 คือส่วนของแบบจำลองทางทฤษฎีซึ่งแบ่งเป็นแบบจำลองทางทฤษฎีของวงจรถ่ายเครื่องที่ตาพินซ์ และแบบจำลองทางทฤษฎีการเคลื่อนที่ของกระแสพลาสมา บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงเครื่องมือวัด ได้แก่ ขดลวดโรโกวสกี หัววัดทางไฟฟ้า และสเปคโตรมิเตอร์ บทที่ 5 เป็นส่วนของการทดลองและผลการทดลอง ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์ การวัดค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน และผลจากแบบจำลองทางทฤษฎี ซึ่งเป็นการนำผลจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณเชิง

ตัวเลข และบทที่ 6 เป็นการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง และตัวอย่างของการวิจัยที่ได้นำ
เครื่องที่ตาพินซ์ไปประยุกต์ใช้งาน

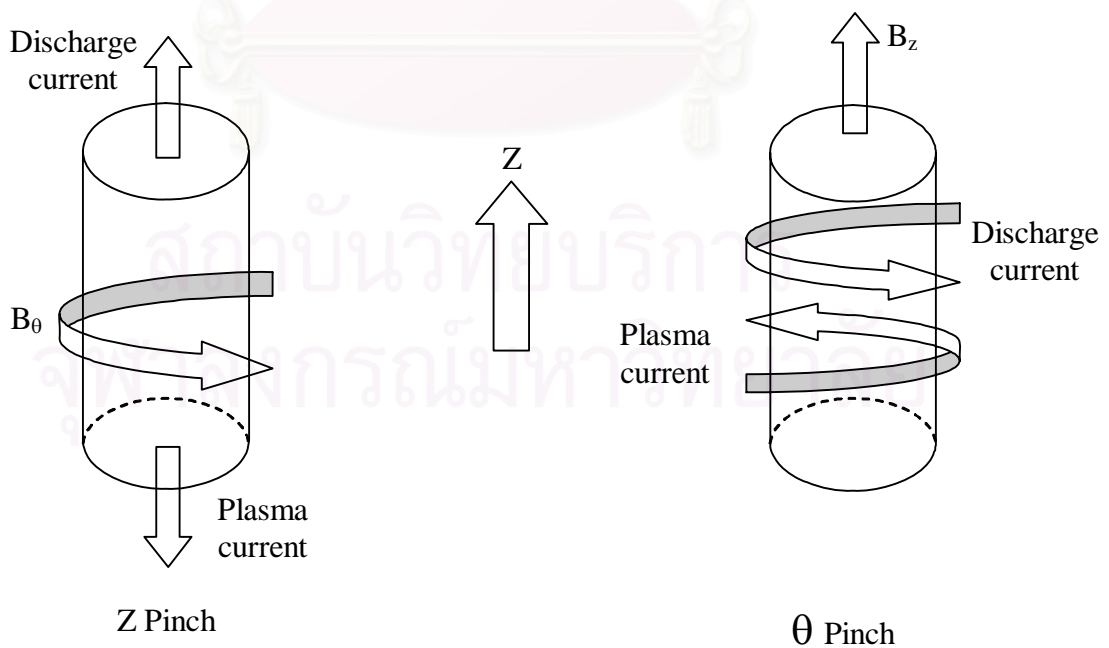


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

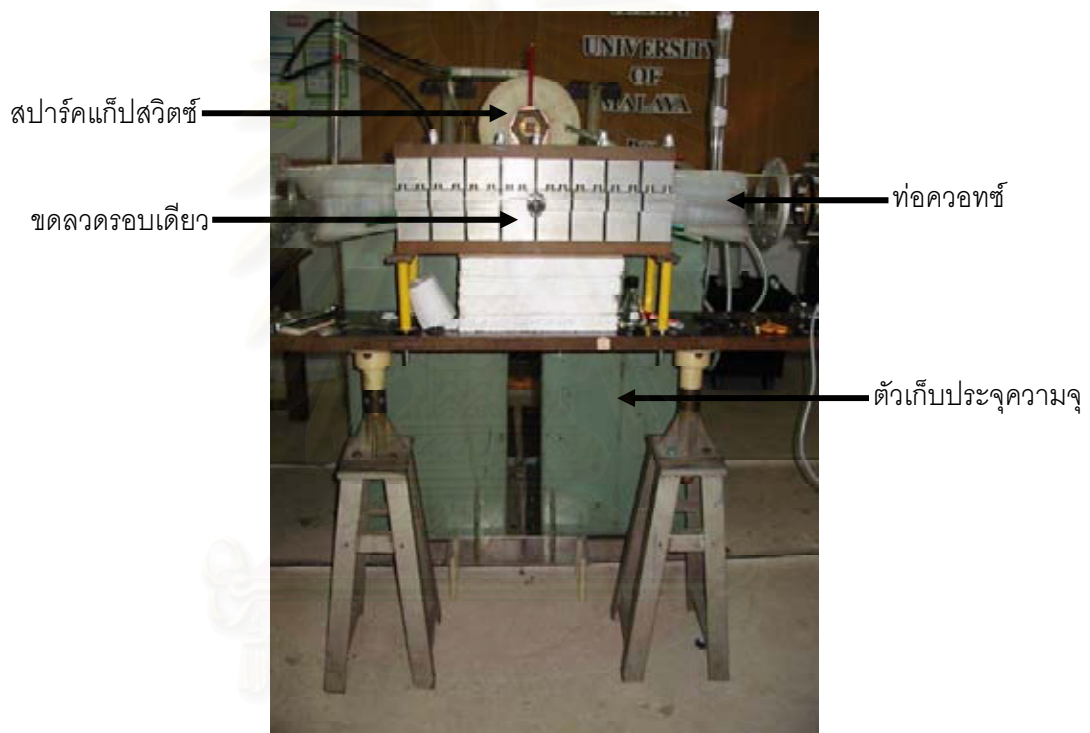
เครื่องที่ตาพินช์

จากบทที่ 1 ได้กล่าวถึงเครื่อง Linear Pinch Device สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบ Z-Pinch และแบบ Theta-Pinch เครื่องทั้งสองแบบอาศัยหลักการในการสร้างและบีบอัดพลาสมาที่เหมือนกัน คือใช้สนามแม่เหล็กเป็นตัวสร้างและบีบอัดพลาสมา สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมาจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรรวมของเครื่อง ซึ่งชื่อเรียกของเครื่องทั้งสองแบบนี้เรียกตามทิศทางการไหลของกระแสพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในเครื่อง โดยเครื่อง Z-Pinch สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นในทิศ θ และกระแสพลาสมาเกิดขึ้นในทิศ Z สำหรับเครื่อง Theta-Pinch สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นในทิศ Z และกระแสของพลาสมาเกิดขึ้นในทิศ θ ตามพิภดทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าในวงจรรวม กระแสพลาสมา และสนามแม่เหล็ก

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาการทำงานของเครื่องที่ตาพินซ์ ดังนั้นในบทนี้จึงขอก
กล่าวถึงส่วนประกอบ และการทำงานของเครื่องที่ตาพินซ์ โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อหลักคือ
ส่วนประกอบของเครื่องที่ตาพินซ์ กระบวนการเกิดพลาสมาภายในเครื่องที่ตาพินซ์ และวิธีการใช้
งานเครื่องที่ตาพินซ์ เครื่องที่ตาพินซ์ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์แสดงในรูปที่ 2.2

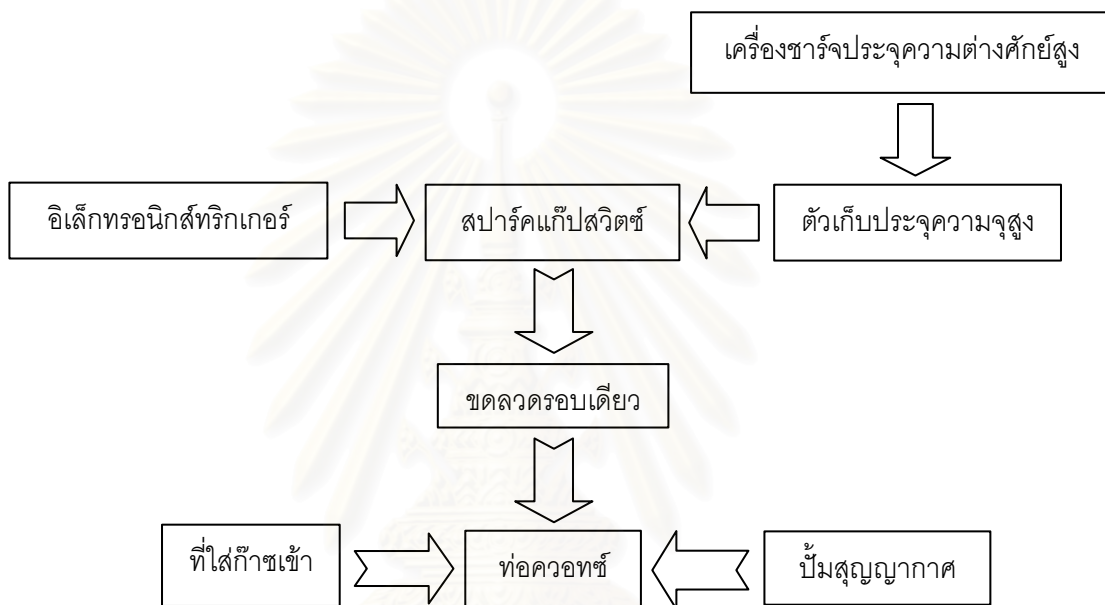


รูปที่ 2.2 แสดงภาพของเครื่องที่ตาพินซ์

2.1 ส่วนประกอบของเครื่องที่ตาพินซ์

เครื่องที่ตาพินซ์สามารถแบ่งส่วนประกอบตามการทำงานออกได้เป็น 4 ส่วนได้แก่ ส่วน
เก็บประจุประกอบด้วยตัวเก็บประจุความจุสูง (Capacitor Bank) และเครื่องชาร์จประจุความต่าง
ศักย์สูง (High Voltage Charger) ส่วนควบคุมการทำงานประกอบด้วยสปาร์คแก๊ปสวิตช์ (Spark

Gap Switch) และอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์ (Electronic Trigger) ส่วนที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กคือ ขดลวดรอบเดี่ยว (Single Turn Coil) และส่วนของระบบสุญญากาศประกอบด้วย ท่อควอทซ์ (Quartz Tube) และปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) ซึ่งอุปกรณ์แต่ละส่วนประกอบกันตามแผนผังดังรูปที่ 2.3

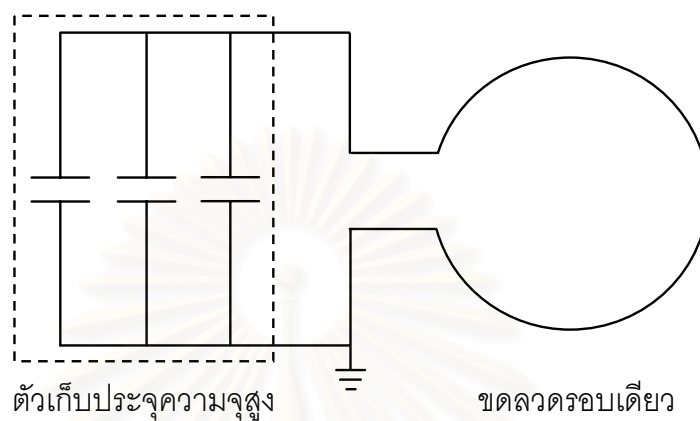


รูปที่ 2.3 แสดงการประกอบอุปกรณ์ของเครื่องที่ตาพินซ์

2.1.1 ตัวเก็บประจุความจุสูงและเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง

ตัวเก็บประจุความจุสูงคือส่วนเก็บประจุของเครื่องที่ตาพินซ์ ส่วนเก็บประจุเป็นส่วนที่เก็บสะสมประจุไว้เพื่อสร้างกระแสไฟฟ้า สำหรับการเกิดสนามแม่เหล็กภายในวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์ ตัวเก็บประจุความจุสูงที่ใช้กับเครื่องที่ตาพินซ์แต่ละตัวมีค่าความจุ 4 ไมโครฟารัด สามารถรับความต่างศักย์ในการชาร์จประจุได้สูงสุดถึง 40 กิโลโวลต์ จำนวน 3 ตัวต่อกันแบบขนานดังรูปที่

2.4 รวมเป็นความจุประจุเท่ากับ 12 ไมโครฟารัด ตัวเก็บประจุความจุสูงที่ใช้กับเครื่องที่ตาพินซ์
แสดงดังรูปที่ 2.5

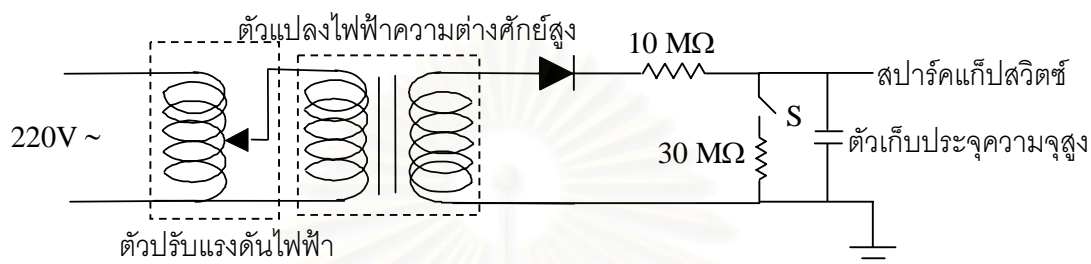


รูปที่ 2.4 แสดงวงจรการต่อตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.5 แสดงภาพของตัวเก็บประจุความจุสูงของเครื่องที่ตาพินซ์

เครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูงเป็นอุปกรณ์ในส่วนเก็บประจุ ใช้สำหรับการชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุความจุสูง ในวิทยานิพนธ์นี้ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการชาร์จตัวเก็บประจุความจุสูงคือ 20 กิโลโวลต์ วงจรของเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูงแสดงดังรูปที่ 2.6

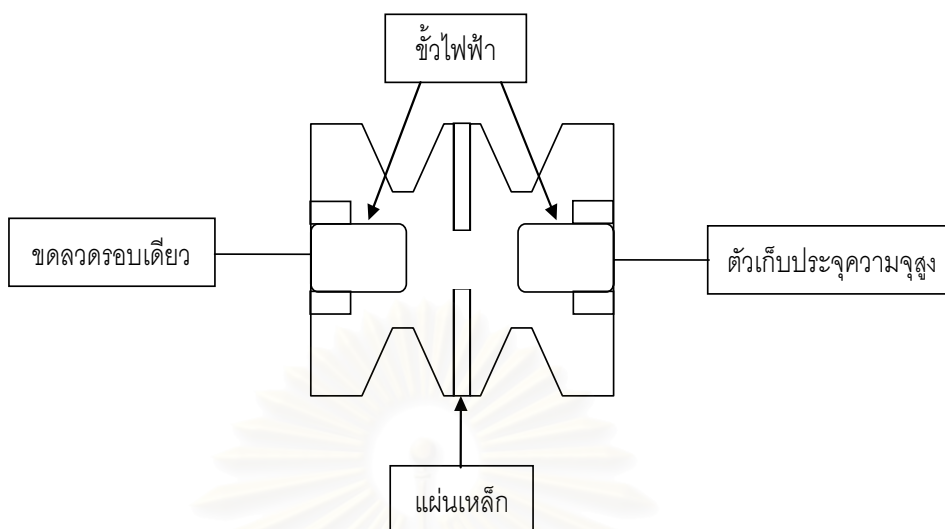


รูปที่ 2.6 แสดงวงจรของเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง

เครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูงประกอบด้วย ตัวปรับแรงดันไฟฟ้า (Variac) ใช้ในการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับตัวแปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (High Voltage Transformer) โดยกระแสไฟฟ้าผ่านไดโอด และตัวต้านทานขนาด 10 เมกะโอมห์ เข้าสู่ตัวเก็บประจุความจุสูง หากมีเหตุฉุกเฉินเกิดขึ้นให้ทำการกดสวิทช์ฉุกเฉิน หรือดัมป์สวิทช์ (S) ตัวเก็บประจุความจุสูงสามารถคายประจุผ่านตัวต้านทาน 30 เมกะโอมห์ ลงพื้นดินได้ วงจรโดยละเอียดของเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูงแสดงในภาคผนวก ข

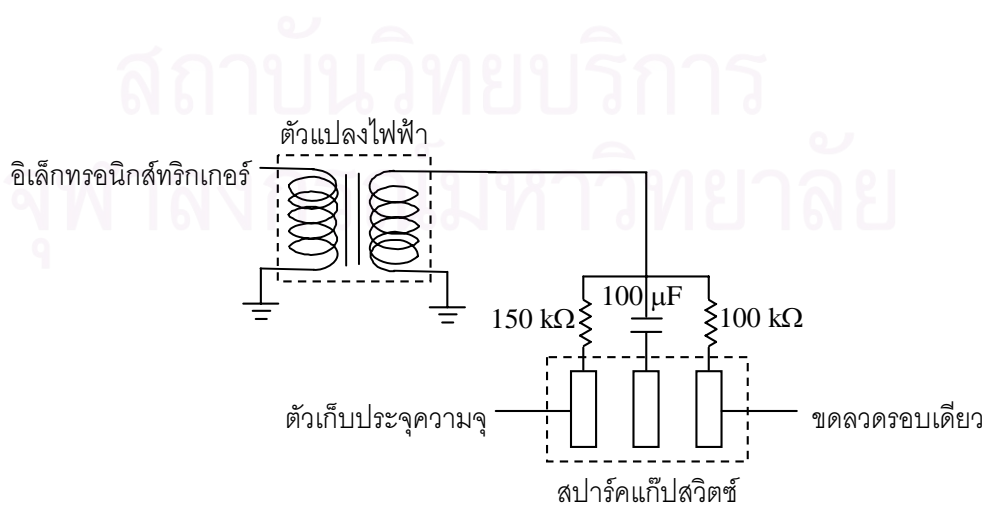
2.1.2 สปาร์กแก๊ปสวิทช์และอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์

สปาร์กแก๊ปสวิทช์ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้ว และแผ่นเหล็กระหว่างขั้วทั้งสอง ซึ่งขั้วทั้งสองด้านติดอยู่กับขดลวดรอบเดียว และตัวเก็บประจุความจุสูง ส่วนแผ่นเหล็กที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองนั้นต่ออยู่กับส่วนอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของสปาร์คแก๊ป

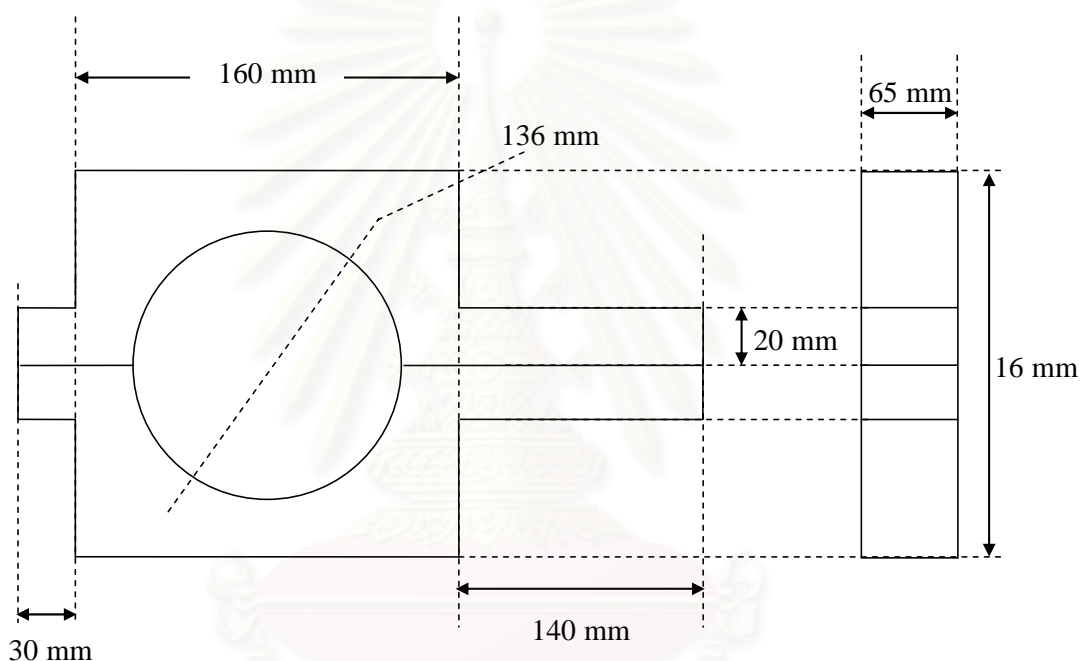
อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ (ภาคผนวก ค) เป็นส่วนที่ให้สัญญาณไฟฟ้าที่เป็นลบมาที่แผ่นเหล็ก ซึ่งอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าของสปาร์คแก๊ปสวิตช์ ทำให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ติดกับตัวเก็บประจุความจุสูงและแผ่นเหล็กมีค่าสูงขึ้น เพื่อให้ตัวเก็บประจุความจุสูงสามารถปล่อยประจุที่สะสมไว้ออกมา เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลภายในวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์ อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ และสปาร์คแก๊ปสวิตช์ ต่อกับวงจรเครื่องที่ตาพินซ์ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการต่ออิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์และสปาร์คแก๊ปสวิตช์ กับวงจรเครื่องที่ตาพินซ์

2.1.3 ขดลวดรอบเดี่ยว

ขดลวดรอบเดี่ยวเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งสนามแม่เหล็กจากขดลวดรอบเดี่ยวเหนี่ยวนำให้ก๊าซที่อยู่ภายในท่อควอทซ์แตกตัวกลายเป็นพลาสมา และสนามแม่เหล็กนี้ยังเป็นตัวเร่งพลาสมาให้เคลื่อนที่เข้ามารวมกันอีกด้วย ขดลวดรอบเดี่ยวของเครื่องที่ตาพินซ์ทำขึ้นจากโลหะผสมให้มีลักษณะดังรูปที่ 2.9 จำนวน 10 ชั้นต่อกันเป็นขดลวดรอบเดี่ยว

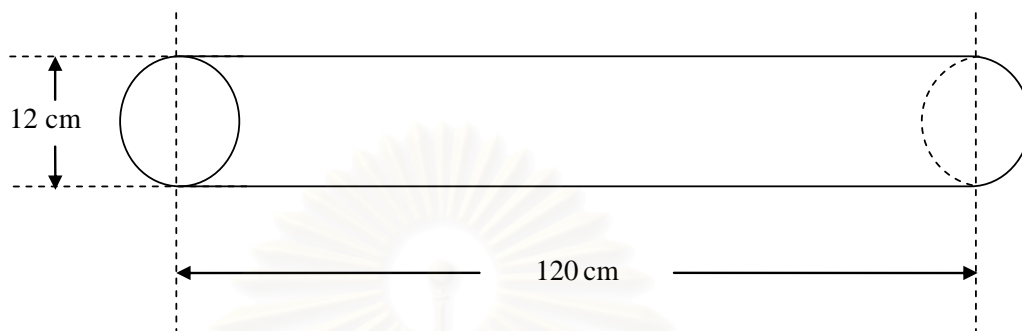


รูปที่ 2.9 แสดงขนาดของขดลวดรอบเดี่ยว

2.1.4 ท่อควอทซ์และปั๊มสุญญากาศ

ท่อควอทซ์เป็นส่วนที่ใช้บรรจุก๊าซเพื่อสร้างพลาสมา ซึ่งอยู่ภายในขดลวดรอบเดี่ยว ท่อควอทซ์ที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร และมีความยาว 120 เซนติเมตรดังแสดงในรูปที่ 2.10 ปลายทั้งสองด้านของท่อควอทซ์ต่อกับตัวสวมที่ทำมาปิด โดยปลายของท่อควอทซ์ต่อกับดิฟฟิวชันปั๊ม และปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีตามลำดับ ซึ่งปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีทำหน้าที่ดูด

อากาศซึ่งอยู่ภายในท่อควอทซ์ เริ่มตั้งแต่ที่ความดันบรรยากาศจนถึง 1 ปาสคาล และหลังจาก 1 ปาสคาล ดิฟฟิวชันปั๊มเริ่มทำหน้าที่ดูดอากาศต่อจากปั๊มสุญญากาศแบบโรตารี



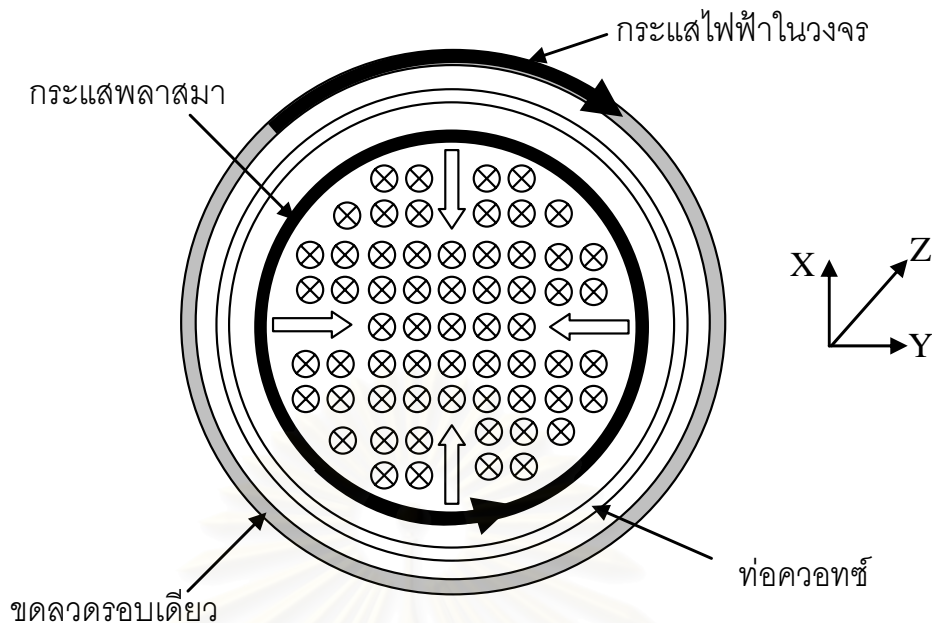
รูปที่ 2.10 แสดงขนาดของท่อควอทซ์

2.2 กระบวนการสร้างพลาสติกของเครื่องที่ตาพินซ์

เครื่องที่ตาพินซ์สร้างพลาสติกโดยอาศัยการเหนียวนำของสนามแม่เหล็กทำให้ก๊าซที่อยู่ภายในภาชนะสุญญากาศแตกตัวกลายเป็นพลาสติก และทำการบีบอัดพลาสติกที่เกิดขึ้นโดยใช้สนามแม่เหล็ก ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานของเครื่องที่ตาพินซ์มาจากการที่กระแสไหลผ่านขดลวดรอบเดียว และเหนียวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก โดยค่าของสนามแม่เหล็กมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดรอบเดียว เมื่อก๊าซที่อยู่ภายในภาชนะสุญญากาศได้รับพลังงานจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศแตกตัวและรวมกันกลายเป็นกระแสพลาสติก ซึ่งกระแสพลาสติกถูกบีบอัดด้วยสนามแม่เหล็กทำให้พลาสติกมีความหนาแน่นสูงขึ้น พลาสติกที่ได้จากเครื่องที่ตาพินซ์เป็นพลาสติกที่มีอุณหภูมิและความหนาแน่นสูง ซึ่งพลาสติกที่มีอุณหภูมิและความหนาแน่นสูงหมายถึงพลาสติกที่มีอุณหภูมิประมาณ 10^6 K และมีความหนาแน่นประมาณ 10^{16} อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร^[4]

ลำดับขั้นในการสร้างพลาสมาของเครื่องที่ตาพินซ์ เริ่มจากตัวเก็บประจุความจุได้รับการ
ชาร์จประจุ โดยประจุถูกชาร์จเข้าไปในตัวตัวเก็บประจุความจุสูงโดยเครื่องชาร์จประจุความต่าง
ศักย์สูง และมีสปาร์คแก๊ปสวิตช์เป็นตัวควบคุมการปล่อยกระแสไฟฟ้าฟ้าจากตัวเก็บประจุความจุ
ซึ่งมีอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์เป็นตัวสร้างสัญญาณไฟฟ้าให้กับสปาร์คแก๊ปสวิตช์เพื่อเริ่มทำงาน เมื่อ
ทำการกดสวิตช์ส่งสัญญาณจากอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์ มาที่สปาร์คแก๊ปสวิตช์ ประจุจากตัวเก็บ
ประจุความจุสูงถูกปล่อยออกมาเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรรีโอดที่ตาพินซ์ กระแสไฟฟ้าที่
ตัวเก็บประจุความจุสูงปล่อยออกมาผ่านสปาร์คแก๊ปสวิตช์ และไหลไปสู่ขดลวดรอบเดียว เหนี่ยว
นำให้ก๊าซที่อยู่ภายในท่อควอทซ์แตกตัว กลายเป็นพลาสมาขึ้นภายในท่อควอทซ์ ซึ่งตามกฎของ
เลนส์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นในระบบ ทำให้ระบบมีการปรับตัวสร้าง
สนามแม่เหล็กด้านการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น
จากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดรอบเดียว เหนี่ยวนำให้พลาสมาที่เกิดขึ้นภายในท่อควอทซ์
รวมตัวกันเกิดเป็นกระแสพลาสมา โดยกระแสพลาสมานี้เคลื่อนที่ในทิศทางที่สร้างสนามแม่เหล็ก
เพื่อด้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น พลาสมาที่เกิดขึ้นจึงมีทิศทางการเคลื่อนที่
สวนทางกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามาในขดลวดรอบเดียว และกระแสของพลาสมาที่เกิดขึ้นนี้ถูก
สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามาที่ขดลวดแบบรอบเดียวบีบให้เข้ามารวมกัน
ดังแสดงในรูปที่ 2.11

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของพลาสมา

2.3 วิธีการใช้งานเครื่องที่ตาพินซ์

ก่อนการใช้งานเครื่องที่ตาพินซ์ในการทำการทดลอง ต้องมีการเตรียมเครื่องที่ตาพินซ์เพื่อใช้งาน โดยเริ่มจากการเปิดปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีเพื่อปั๊มอากาศออกจากดิฟฟิวชันปั๊มและท่อควอทซ์ ซึ่งในการปั๊มอากาศออกจากระบบนั้น ปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีทำการดูดอากาศออกจากท่อควอทซ์ผ่านทางดิฟฟิวชันปั๊ม เมื่อปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีดูดอากาศออกจนภายในท่อควอทซ์และดิฟฟิวชันปั๊มมีความดันประมาณ 1-2 ปาสคาล ทำการปิดวาล์วที่กั้นระหว่างท่อควอทซ์และดิฟฟิวชันปั๊ม แล้วทำการเปิดดิฟฟิวชันปั๊มให้ทำงาน โดยดิฟฟิวชันปั๊มใช้เวลาประมาณ 20 นาทีจึงเริ่มทำงาน ซึ่งดิฟฟิวชันปั๊มทำการดูดอากาศต่อกับปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีที่ความดันประมาณ 1-2 ปาสคาล หลังจากเปิดปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีให้เริ่มทำงานเป็นเวลา 20 นาที ทำการเปิดวาล์วที่กั้นระหว่างท่อควอทซ์และดิฟฟิวชันปั๊ม เพื่อให้ดิฟฟิวชันปั๊มทำการดูดอากาศภายในท่อควอทซ์ต่อจนถึงระดับความดันที่ต่ำสุด ดิฟฟิวชันปั๊มที่ใช้ในการทดลองใช้เวลาประมาณ

30 นาที ในการดูดอากาศจนถึงความดัน 5.5×10^{-3} ปาสคาล ซึ่งเป็นความดันต่ำสุดที่ตีฟิวชันนี้
สามารถทำได้ หลังจากนั้นทำการใส่ก๊าซที่ต้องการใช้ในการทดลองเข้าไปและปรับความดันให้อยู่
ในระดับที่ต้องการเพื่อทำการทดลอง

เมื่อใส่ก๊าซที่ต้องการใช้ทดลอง และปรับความดันของก๊าซให้อยู่ในระดับที่ต้องการ จากนั้น
ทำการเปิดเครื่องควบคุม ซึ่งประกอบด้วยเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง และตัว
อิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์ เมื่อเปิดส่วนควบคุมเรียบร้อยแล้ว ทำการทดสอบระบบดัมป์สวิตช์ และ
ระบบอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์ โดยขั้นตอนการเปิดเครื่องควบคุมต่างๆ และการทดสอบระบบดัมป์
สวิตช์ ได้กล่าวไว้ในภาคผนวก

หลังจากที่ทำการเปิดและทดสอบระบบควบคุมของเครื่องที่ตาพินซ์เรียบร้อยแล้ว จึง
เริ่มทำการใช้งานเครื่องที่ตาพินซ์ โดยในการใช้งานเริ่มจากการตั้งค่าความต่างศักย์ของเครื่องชาร์จ
ประจุความต่างศักย์สูง เพื่อใช้ในการชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุความจุสูง ทำการกดสวิตช์เปิด
ให้เครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง และกดสวิตช์หยุดเมื่อความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ
ความจุสูงอยู่ในระดับที่ต้องการ กดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์ส่งสัญญาณไฟฟ้าไปที่สปาร์ค
แก๊ปสวิตช์ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุความจุสูงไหลเข้ามาที่ขดลวดรอบเดียว เพื่อให้
ก๊าซที่อยู่ภายในท่อควอทซ์แตกตัวเป็นพลาสมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองทางทฤษฎี

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์และการเกิดพลาสมาภายในเครื่องที่ตาพินซ์ การทำงานของเครื่องที่ตาพินซ์เริ่มจากการชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุความจุสูง และคายประจุทั้งหมดออกมาในครั้งเดียว เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าในปริมาณสูง เมื่อตัวเก็บประจุความจุสูงคายประจุสร้างเป็นกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดแบบรอบเดียวทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นทำการเหนี่ยวนำก๊าซที่อยู่ภายในท่อควอทซ์ให้แตกตัวเกิดเป็นกระแสพลาสมาที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดแบบรอบเดียว สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์และกระแสพลาสมาที่เกิดขึ้นทำให้เกิดแรงลอเรนซ์บีบกระแสพลาสมาเข้ามาตามแนวรัศมี

ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเครื่องที่ตาพินซ์ ค่าของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดแบบรอบเดียว และค่าของกระแสพลาสมามีความสัมพันธ์กัน ซึ่งค่าใดมีการเปลี่ยนแปลงค่าที่เหลือก็จะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของกระแสพลาสมาเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องการทราบ การเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเครื่องที่ตาพินซ์และค่าของกระแสพลาสมาที่เกิดขึ้นจึงเป็นสิ่งที่ควรให้ความสนใจ เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์และการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟฟ้าในวงจรเครื่องที่ตาพินซ์ และการเปลี่ยนแปลงของค่าของกระแสพลาสมาที่เกิดขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอแบบจำลองทางทฤษฎีสำหรับใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยแบ่งแบบจำลองออกเป็น 2 แบบคือ แบบจำลองทางทฤษฎีของวงจรเครื่องที่ตาพินซ์ และ

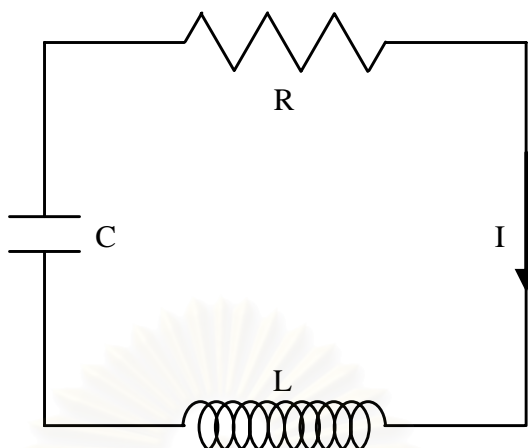
แบบจำลองทางทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของกระแสพลาสมา และนำผลที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎีทั้งสองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

แบบจำลองทางทฤษฎีของวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์ พิจารณาจากส่วนประกอบของเครื่องที่ตาพินซ์ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุ ขดลวด และตัวต้านทาน โดยอาศัยวงจรเสมือน LRC ของเครื่องที่ตาพินซ์สามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์ โดยแบ่งแบบจำลองทางทฤษฎีของวงจรเครื่องที่ตาพินซ์เป็น 2 แบบคือ แบบที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก และแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กเนื่องจากพลาสมา สำหรับแบบจำลองทางทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของกระแสพลาสมา ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แยกเป็น 2 แบบคือ แบบที่มีการเคลื่อนที่ของคลื่นกระแทก (Shock wave) และไม่มีคลื่นกระแทก แบบจำลองทางทฤษฎีทั้งสองแบบอาศัยแบบจำลองสโนว์พลาจ (Snowplough) เป็นพื้นฐานในการอธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของกระแสพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องที่ตาพินซ์ ซึ่งในงานนี้ใช้ แบบจำลองทางทฤษฎีของวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กกับแบบจำลองทางทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของกระแสพลาสมาแบบไม่มีการเคลื่อนที่ของคลื่นกระแทก และแบบจำลองทางทฤษฎีของวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กกับแบบจำลองทางทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของกระแสพลาสมาแบบมีการเคลื่อนที่ของคลื่นกระแทก

3.1 แบบจำลองทางทฤษฎีของวงจรเครื่องที่ตาพินซ์

3.1.1 แบบจำลองทางทฤษฎีแบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก

เครื่องที่ตาพินซ์ประกอบด้วยตัวเก็บประจุความจุสูง ขดลวดแบบรอบเดียว และตัวต้านทานที่ต่อกันแบบอนุกรม ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ใช้วงจรเสมือน LRC แทนวงจรถ่ายของเครื่องที่ตาพินซ์ดังแสดงในรูปที่ 3.1^[4]



รูปที่ 3.1 แสดงวงจรเสมือนของเครื่องที่ตาพินซ์

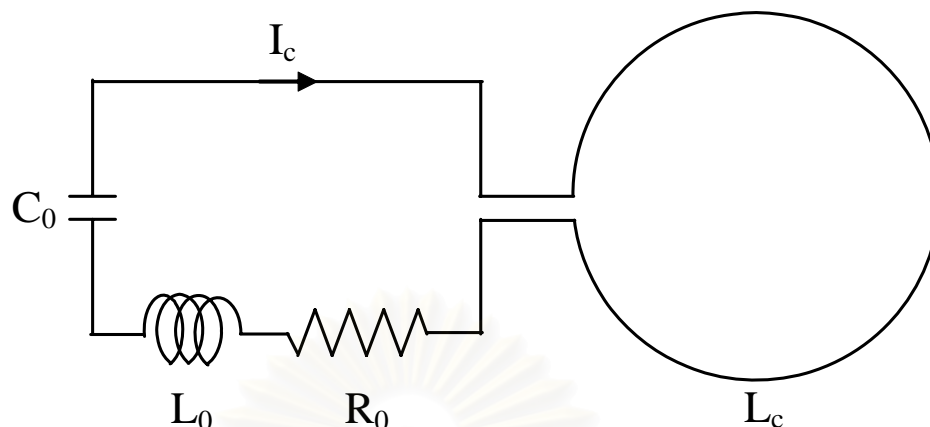
โดยที่ I แทนค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจร R , L , C แทนค่าความต้านทาน, ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุประจุรวมภายในวงจร ซึ่งค่าทั้งหมดเกิดจากอุปกรณ์ภายในวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์ หลังจากทำการชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุความจุสูง การเปลี่ยนแปลงภายในวงจรสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 3.1^[10]

$$L \frac{dI}{dt} + IR + \frac{\int Idt}{C} = 0 \quad 3.1$$

ค่าเริ่มต้นในการทดลองคือ $I=0$ และ $L \frac{dI}{dt} = V_0$ ที่เวลา $t=0$

3.1.2 แบบจำลองทางทฤษฎีแบบมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก

สำหรับแบบจำลองทางทฤษฎีที่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กใช้วงจรเสมือน RLC ในลักษณะเดียวกับแบบจำลองทางทฤษฎีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก แต่ทำการแยกค่าความเหนี่ยวนำออกเป็นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแบบรอบเดียว (L_C) และค่าความเหนี่ยวนำของอุปกรณ์ภายในวงจร (L_0) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์

โดยที่ C_0 คือค่าความจุประจุรวมของค่าความจุประจุตัวเก็บประจุความจุสูงและค่าความจุประจุของอุปกรณ์ภายในวงจร R_0 คือความต้านทานรวมของอุปกรณ์ภายในวงจร และ I_c คือค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจร โดยค่าความต่างศักย์ที่ให้กับตัวเก็บประจุคือ V_0 ความสัมพันธ์ที่ได้จากวงจรคือความต่างศักย์ที่ให้กับวงจรมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมอุปกรณ์ต่างๆรวมกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ 3.2^[11]

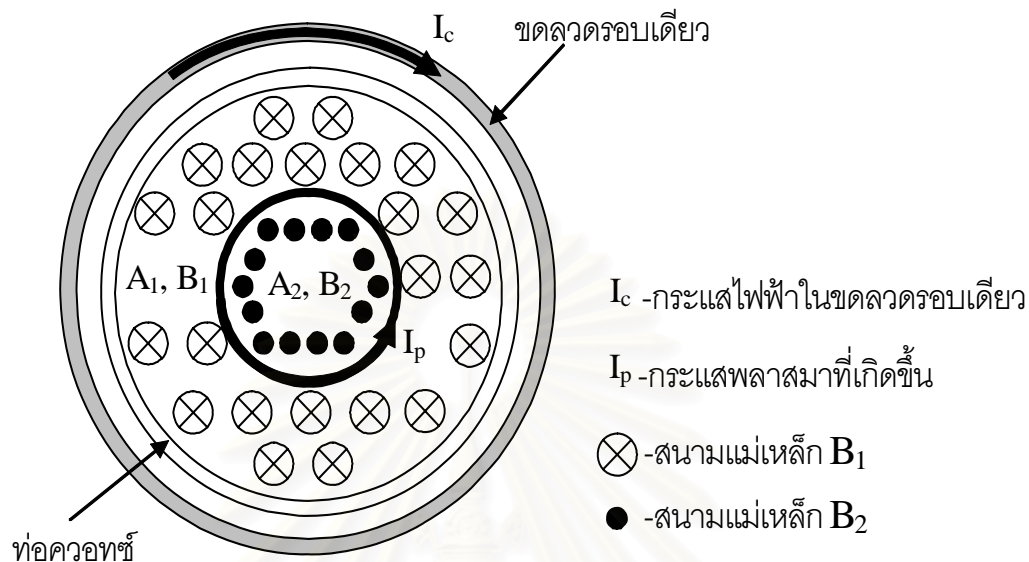
$$V_0 = R_0 I_c + \frac{\int I_c dt}{C_0} + \frac{d}{dt} \{L_0 I_c + L_c I_c\} \quad 3.2$$

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจากสมการ 3.2 จัดรูปสมการใหม่เป็น

$$\frac{d}{dt} \{L_0 I_c + L_c I_c\} = V_0 - R_0 I_c - \frac{\int I_c dt}{C_0} \quad 3.3$$

จากสมการ 3.3 I_c , L_c เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในสมการ ซึ่งต้องหาค่ามาแทนในสมการเพื่อทำการคำนวณซึ่งค่าของ I_c สามารถหาได้จากการทดลอง แต่ค่าของ L_c สามารถหาจากการคำนวณโดยพิจารณาการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจร จากกฎของเลนส์

(Lentz's Law) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ทำให้ระบบสร้างกระแสไฟฟ้าในทิศทางที่สร้างสนามแม่เหล็กต้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าในขดลวด I_c

ให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดแบบรอบเดียว I_c เรียกว่า B_1 และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ระบบสร้างขึ้นเรียกว่า B_2 จาก $\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu I$ สนามแม่เหล็กมีค่าเป็น

$$B_1 = \frac{\mu I_c}{l} \quad 3.4$$

$$B_2 = \frac{\mu}{l} (I_c - I_p) \quad 3.5$$

และจาก $L = \Phi / I$ โดยที่ $\Phi = BA$ โดยที่ A_1 คือพื้นที่ระหว่างขดลวดรอบเดียวกับพลาสมา A_2 พื้นที่ภายในพลาสมา ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแบบรอบเดียว (L_c) เป็นดังสมการ 3.6

$$L_c = \frac{B_1 A_1 - B_2 A_2}{I_c} \quad 3.6$$

$$L_c = \frac{\frac{\mu I_c \pi}{1} (r_c^2 - r_p^2) - \frac{\mu \pi r_p^2}{1} (I_p - I_c)}{I_c} \quad 3.7$$

โดยที่ r_c, r_p คือรัศมีของขดลวดรอบเดี่ยวและรัศมีของพลาสมาตามลำดับ จัดรูปสมการ

$$L_c = \frac{\mu \pi}{1} (r_c^2 - r_p^2) - \frac{\mu \pi r_p^2}{1} (m-1) \quad 3.8$$

โดยที่ $m=I_p/I_c$

$$L_c = \frac{\mu \pi}{1} \{ (r_c^2 - r_p^2) - r_p^2 (m-1) \} \quad 3.9$$

$$L_c = \frac{\mu \pi}{1} (r_c^2 - r_p^2 m) \quad 3.10$$

แทนค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแบบรอบเดี่ยวลงในสมการ 3.3

$$\frac{d}{dt} \left\{ L_0 I_c + \frac{\mu \pi}{1} (r_c^2 - r_p^2 m) I_c \right\} = V_0 - R_0 I_c - \frac{\int I_c dt}{C_0} \quad 3.11$$

ทำการ Differentiate และจัดรูปสมการได้

$$\frac{dI_c}{dt} = \frac{V_0 - R_0 I_c - \frac{\int I_c dt}{C_0} + \frac{2\mu \pi}{1} m r_p I_c \frac{dr_p}{dt}}{L_0 + \frac{\pi \mu}{1} r_c^2 - \frac{\pi \mu}{1} m r_p^2} \quad 3.12$$

จากสมการ 3.12 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าที่กับเวลา เพื่อให้การ

คำนวณสามารถทำได้ง่ายมากขึ้น จึงทำการกำหนดตัวแปรใหม่เพื่อมาใช้ในการปรับสมการโดย

กำหนดให้ $i_c = I_c/I_0$, $\tau = t/t_0$, $K_p = r_p/r_c$, $K_s = r_s/r_c$ แทนค่าของตัวแปรลงในสมการและทำการจัดรูปของสมการได้ดังนี้

$$\frac{I_0}{t_0} \frac{di_c}{d\tau} = \frac{V_0 - R_0 I_0 i_c - \frac{t_0 I_0}{C_0} \int i_c d\tau + \frac{2\mu \pi}{1} m r_c^2 i_c K_p \frac{I_0}{t_0} \frac{dK_p}{d\tau}}{L_0 + \frac{\pi \mu}{1} r_c^2 - \frac{\pi \mu}{1} m r_c^2 K_p^2} \quad 3.13$$

$$\frac{di_c}{d\tau} = \frac{1 - \delta i_c - \int i_c d\tau + 2\beta m i_c \kappa_p \frac{d\kappa_p}{d\tau}}{1 + \beta - \beta m \kappa_p^2} \quad 3.14$$

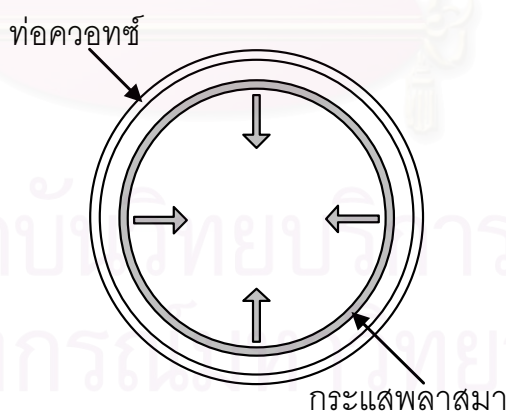
โดยที่ I_0 = กระแสไฟฟ้าสูงสุดในวงจรถ, $t_0 = T/2\pi$, T คือคาบเวลาของกระแสไฟฟ้า

$\delta = r_0 / \sqrt{L_0 / C_0}$ และ $\beta = \frac{\pi \mu r_c^2 / l}{L_0}$ และเรียกสมการ 3.14 ว่า สมการวงจรถ (Circuit Equation)

3.2 แบบจำลองทางทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของกระแสพลาสมา

3.2.1 ในกรณีที่ไม่นับการเคลื่อนที่ของกระแสพลาสมา

หลังจากที่กระแสไฟฟ้าไหลจากตัวเก็บประจุความจุสูงผ่านขดลวดแบบรอบเดียวทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสพลาสมาขึ้นภายในท่อควอท์ เพื่อให้สอดคล้องกับการคำนวณจึงกำหนดให้ก๊าซที่อยู่ภายในท่อควอท์แตกตัวเป็นพลาสมาทั้งหมด และพลาสมาที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีความหนาแน่นน้อยมากดังรูปที่ 3.4^[4]



รูปที่ 3.4 แสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาภายในท่อควอท์

การเคลื่อนที่ของกระแสพลาสมาในเครื่องที่ตาพินซ์สามารถอธิบายด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม กับผลต่างของแรงที่เกิดจากความดันของ

สนามแม่เหล็กและความดันของพลาสมา โดยที่ m_λ คือมวลต่อหน่วยความยาวของพลาสมา และ P คือความดันของพลาสมา เป็นดังสมการ 3.15^[11]

$$\frac{d}{dt} \left(m_\lambda \frac{dr}{dt} \right) = - \left(\frac{B^2}{2\mu_0} - P \right) \cdot 2\pi r \quad 3.15$$

พิจารณามวลของพลาสมาโดยคิดว่าก๊าซที่อยู่ภายในท่อควอทซ์แตกตัวเป็นพลาสมาอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นมวลของพลาสมาคือ

$$m_\lambda = \pi(a^2 - r^2) \cdot \rho_0 \quad 3.16$$

โดยที่ a คือรัศมีเริ่มต้นของพลาสมา

ρ_0 คือความหนาแน่นของก๊าซที่เป็นกลาง

และการเปลี่ยนแปลงของความดันพลาสมาเป็นไปตาม Adiabatic compression relationship คือ

$$P(\pi r^2)^{5/3} = P_0(\pi a^2)^{5/3} \quad 3.17$$

โดยที่ค่ายกกำลัง 5/3 คือค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซ และกำหนดให้สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังสมการ

$$B = \dot{B} t \quad 3.18$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ 3.15 ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของกระแสพลาสมาคือ

$$\frac{d}{dt} \left((a^2 - r^2) \frac{dr}{dt} \right) = - \frac{(\dot{B})^2}{\mu_0 \rho_0} r t^2 + \frac{2P_0}{\rho_0} \left(\frac{a}{r} \right)^{10/3} r \quad 3.19$$

เพื่อให้สมการมีความง่ายในการคำนวณ กำหนดให้

$$x = \frac{r}{a} \quad 3.20$$

$$t_1^4 = \frac{\mu_0 \rho_0 a^2}{(\dot{B})^2} \quad 3.21$$

$$t = t_1 \tau \quad 3.22$$

$$\alpha = \frac{2P_0 t_1^2}{\rho_0 a^2} \quad 3.23$$

แทนค่าและทำการจัดรูปสมการได้เป็น^[12]

$$\frac{d}{d\tau} \left((1-x^2) \frac{dx}{d\tau} \right) = -x\tau^2 + \alpha x^{-7/3} \quad 3.24$$

3.2.2 ในกรณีที่คิดคลื่นกระแทก

3.2.2.1 การคำนวณการเคลื่อนที่ของพลาสมา

การเคลื่อนที่ของพลาสมาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจากตัวเก็บประจุเข้าสู่ขดลวดแบบรอบเดียนั้น สมการการเคลื่อนที่ที่สามารถที่จะหาได้โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตรในแบบจำลองสลัก (Slug Model) เริ่มจากความสัมพันธ์อาเดียบาติก (Adiabatic Relationship) โดยที่กำหนดให้มวลของก๊าซภายในมีมวลคงที่ ในที่มีการเพิ่มของรัศมี dr_s ซึ่งจะได้ว่า^[11]

$$PV^\gamma = \text{constant} \quad 3.33$$

หรือ

$$\frac{\gamma dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0 \quad 3.34$$

และจากความดันสลัก $P \sim v_s^2$ แทนค่าได้เป็น

$$\frac{dP}{P} = \frac{2dv_s}{v_s} \quad 3.35$$

และจากความสัมพันธ์ $v_s \sim \frac{I_c}{r_p}$ ดังนั้นจะได้ค่าเป็น^[13]

$$\frac{dP}{P} = 2 \left(\frac{dI_c}{I_c} - \frac{dr_p}{r_p} \right) \quad 3.36$$

ต่อมาพิจารณาค่าของปริมาตร $V = \pi (r_p^2 - r_s^2) z$ หรือ $dV = 2\pi(r_p dr_p - r_s dr_s)z$ (ให้มีเฉพาะการเปลี่ยนในแนวรัศมีเท่านั้น) ซึ่งค่าที่ได้นี้ไม่ถูกต้องเนื่องจากเราได้กำหนดไว้ในตอนต้นแล้วว่า การเคลื่อนที่ของพลาสมานั้นจะไม่ทำให้มวลมีการเปลี่ยนแปลง ส่วนการเคลื่อนที่ของคลื่นกระแทกนั้นจะกวาดก๊าซโดยรอบ จำนวนก๊าซที่ถูกกวาดไปนั้นเท่ากับจำนวนของก๊าซที่ถูกกวาดไปกับการเคลื่อนที่ของหน้าคลื่นกระแทก (Shock Front) เป็นระยะ dr_s ซึ่งก๊าซที่ถูกกวาดไปนี้ถูกบีบด้วยอัตราส่วน $(\gamma+1)/(\gamma-1)$ และอยู่ในส่วนของปริมาตรที่เพิ่มขึ้นด้วย

ดังนั้นค่าที่ควรใช้ในการเพิ่มของปริมาตรนั้นไม่ใช่เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้น dr_s แต่ต้องเป็นควรจะเป็นผลมาจาก $dr_s (2/(\gamma+1))$ ดังนั้นผลที่ถูกต้องควรเป็น

$$dV = 2\pi \left(r_p dr_p - \frac{2}{\gamma+1} r_s dr_s \right) z \quad 3.37$$

หรือ

$$\frac{\gamma dV}{V} = \frac{2\gamma \left(r_p dr_p - \frac{2}{\gamma+1} r_s dr_s \right)}{(r_p^2 - r_s^2)} \quad 3.38$$

เมื่อแทนค่าทั้งหมดในสมการ 3.34 ได้สมการใหม่คือ

$$\frac{2\gamma \left(r_p dr_p - \frac{2}{\gamma+1} r_s dr_s \right)}{(r_p^2 - r_s^2)} + 2 \frac{dI_c}{I_c} - \frac{2dr_p}{r_p} = 0 \quad 3.39$$

จัดรูปสมการใหม่เพื่อหาการเคลื่อนที่ของพลาสมาได้เป็น

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{\frac{2\gamma}{\gamma+1} \frac{r_s r_p}{(r_p^2 - r_s^2)} \frac{dr_s}{dt} - \frac{r_p}{I_c} \frac{dI_c}{dt}}{\frac{\gamma r_p^2}{(r_p^2 - r_s^2)} - 1} \quad 3.40$$

และจากค่าตัวแปรที่ได้กำหนดไว้ในตอนต้น เมื่อแทนในสมการได้สมการใหม่คือ^[14]

$$\frac{dk_p}{d\tau} = \frac{\frac{2}{\gamma+1} \frac{\kappa_s}{\kappa_p} \frac{d\kappa_s}{d\tau} - \frac{\kappa_p}{\gamma i_c} \left(1 - \frac{\kappa_s^2}{\kappa_p^2}\right) \frac{di_c}{d\tau}}{\frac{\gamma-1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma} \frac{\kappa_s^2}{\kappa_p^2}} \quad 3.41$$

3.2.2.2 การคำนวณการเคลื่อนที่ของคลื่นกระแทก

จากที่ได้ทำมาในข้างต้นนั้นเป็นการคำนวณในส่วนของวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์ ซึ่งจะยังไม่ได้กล่าวถึงการเคลื่อนที่ของพลาสมา ในส่วนที่จะได้กล่าวถึงต่อไปนี้จะเป็นการกล่าวถึงการเคลื่อนที่ของพลาสมาภายใต้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลในขดลวด โดยเราจะพิจารณาจากความดันของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Pressure: P_m) ซึ่งมีค่าตามสมการ

$$P_m = B^2 / 2\mu \quad 3.42$$

โดยที่ความดันของสนามแม่เหล็กที่เป็นตัวขับเคลื่อนพลาสมามีค่าเท่ากับผลต่างของความดันของสนามแม่เหล็กในสองบริเวณตามสมการ

$$P_{m12} = P_{m1} - P_{m2} \quad 3.43$$

แทนค่าความดันของสนามแม่เหล็กในแต่ละบริเวณลงไปในสมการได้^[11]

$$P_{m12} = \frac{m\mu I_c^2}{2l^2} (2 - m) \quad 3.44$$

ความดันขับเคลื่อนของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากผลต่างของความดันสนามแม่เหล็กในสองบริเวณนี้ เท่ากับความดันของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\frac{m\mu I_c^2}{2l^2} (2 - m) = \frac{2}{\gamma+1} f_m \rho_0 v_s^2 \quad 3.45$$

โดยที่ f_m = อัตราส่วนมวล, ρ_0 = ความหนาแน่นของก๊าซ และ v_s^2 คือความเร็วของคลื่นกระแทก^[13]

ทำการย้ายข้างของสมการเพื่อหาความเร็วของคลื่นกระแทก

$$v_s = \frac{dr_s}{dt} = \left[\frac{m\mu I_c^2}{2I^2} (2-m) \left(\frac{\gamma+1}{2f_m \rho_0} \right) \right]^{1/2} \quad 3.46$$

จาก $i_c = I_c/I_0$, $\tau = t/t_0$, $\kappa_s = r_s/r_c$ แทนค่าตัวแปรลงในสมการ 3.29 และทำการจัดสมการใหม่ได้

$$\frac{d\kappa_s}{d\tau} = \left[\frac{m\mu(2-m)(\gamma+1)}{4f_m \rho_0} \right]^{1/2} \frac{I_0}{l} \frac{t_0}{r_c} i_c \quad 3.47$$

กำหนดให้ $t_p = \frac{r_c l}{I_0} \left[\frac{4f_m \rho_0}{m\mu(2-m)(\gamma+1)} \right]^{1/2}$ ดังนั้นสมการที่ 3.30 สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{d\kappa_s}{d\tau} = \frac{t_0}{t_p} i_c \quad 3.48$$

หรือ

$$\frac{d\kappa_s}{d\tau} = -\alpha_s i_c \quad 3.49$$

โดยที่ $-\alpha_s = t_0/t_p$ ที่กำหนดให้ความเร็วของคลื่นกระแทกมีค่าเป็นลบเนื่องมาจากคลื่นกระแทกเคลื่อนที่เข้าหาจุดศูนย์กลาง ทำให้ค่ารัศมีของคลื่นกระแทกมีค่าลดลง ดังนั้นจึงกำหนดให้ α มีค่าเป็นลบ จากที่ได้ทำมานี้สมการ 3.32 คือสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นภายใน ซึ่งคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นนี้อยู่ภายในของพลาสมาที่กำลังบีบตัวเข้ามาตามแนวรัศมี^[14]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์นี้จุดประสงค์หลักของการศึกษาคือสมบัติของพลาสมาและสมบัติของเครื่องที่ตาพินซ์ โดยในการศึกษานั้นจะแยกออกเป็นการศึกษาสมบัติของเครื่องที่ตาพินซ์ และสมบัติของพลาสมาที่เกิดภายในเครื่องที่ตาพินซ์ แล้วจึงนำสมบัติของเครื่องที่ตาพินซ์และสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องที่ตาพินซ์มาเปรียบเทียบกันเพื่อหาความสัมพันธ์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของเครื่องที่ตาพินซ์ก่อน โดยสมบัติของเครื่องที่ตาพินซ์ที่สำคัญคือกระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ภายในวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์

ในการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเครื่องที่ตาพินซ์นั้น หากว่าทำการวัดโดยตรงอาจทำให้เครื่องมือวัดได้รับความเสียหายได้ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลมีค่าสูง ดังนั้นในการวัดกระแสไฟฟ้าจึงต้องใช้ผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้ามาเป็นตัวช่วยในการวัด ซึ่งเครื่องมือวัดนี้คือ ขดลวดโรโกวสกี

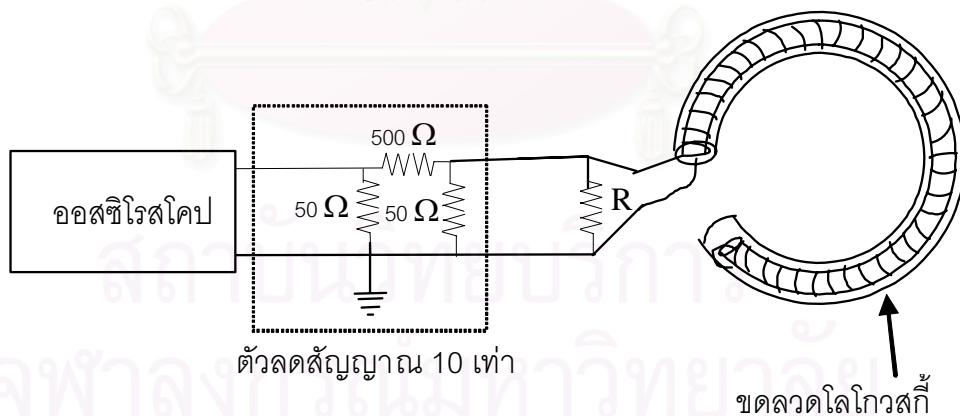
สำหรับการวัดสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องที่ตาพินซ์นั้น สิ่งที่ต้องการก็คือ อุณหภูมิอิเล็กตรอน (Electron Temperature) และความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Electron Density) ซึ่งถ้าสามารถหาค่าใดค่าหนึ่งได้ก็สามารถนำมาคำนวณหาอีกค่าได้ ซึ่งเครื่องมือวัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบ หัววัดทางไฟฟ้า และสเปคโตรมิเตอร์^[15]

4.1 ขดลวดโรโกวสกี

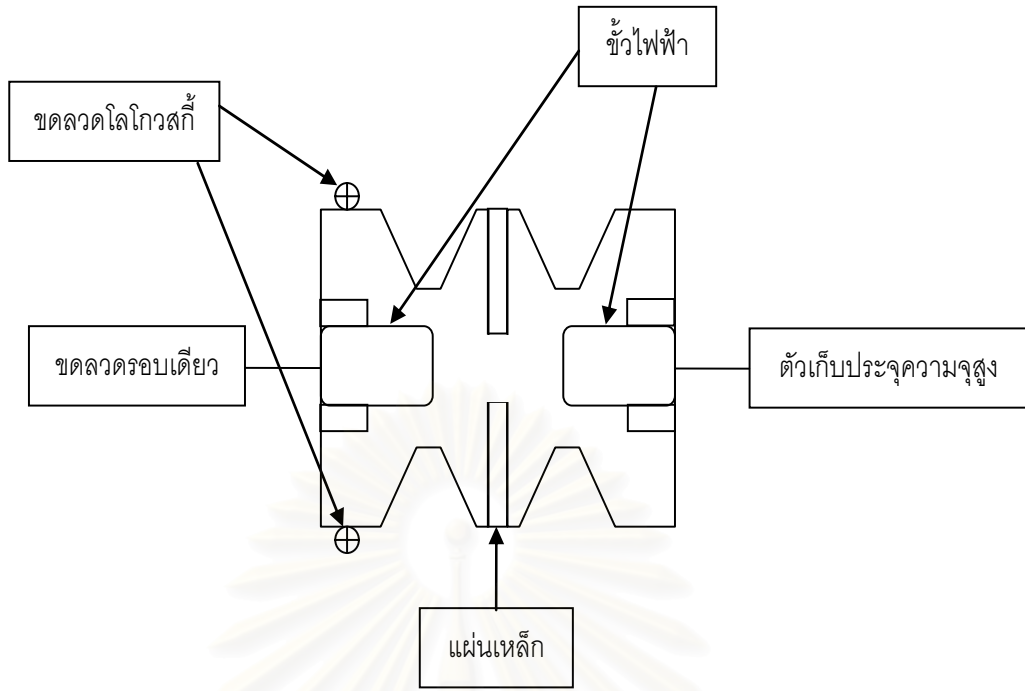
หลังจากตัวชาร์จประจุความต่างศักย์สูงชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุความจุสูงของเครื่องที่ตาพินซ์จนถึงความต่างศักย์ที่ต้องการจึงหยุดทำการชาร์จ และเริ่มทำการเดินเครื่องโดยให้

อิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์ส่งสัญญาณไฟฟ้าให้กับสปาร์คแก๊ปสวิทช์ เพื่อทำการคลายประจุจากตัวเก็บประจุความจุสูง สัญญาณไฟฟ้าจากอิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์ทำให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าภายในสปาร์คแก๊ปสวิทช์มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นประจุจากตัวเก็บประจุความจุสูงสามารถเดินทางข้ามขั้วไฟฟ้าภายในสปาร์คแก๊ปสวิทช์ได้ ทำให้เกิดกระแสไหลภายในวงจรของเครื่องที่ตาพินซ์

ขดลวดโรโกวสกีมีลักษณะดังรูปที่ 4.1 การวัดกระแสไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดโรโกวสกีอาศัยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจร ขดลวดโรโกวสกีสามารถวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น แล้วนำผลของสนามแม่เหล็กที่วัดได้มาทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจร โดยขดลวดโรโกวสกีถูกนำไปวางไว้ที่รอบขั้วไฟฟ้า ซึ่งต่ออยู่กับขดลวดแบบรอบเดียวดังรูปที่ 4.2 เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าก็สามารถวัดค่าของสนามแม่เหล็กได้

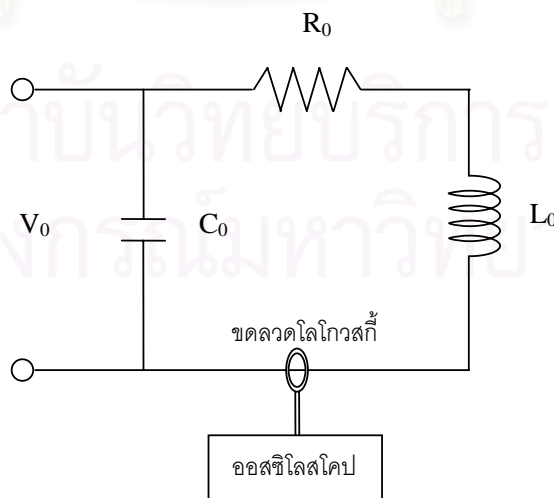


รูปที่ 4.1 แสดงวงจรของขดลวดโรโกวสกี

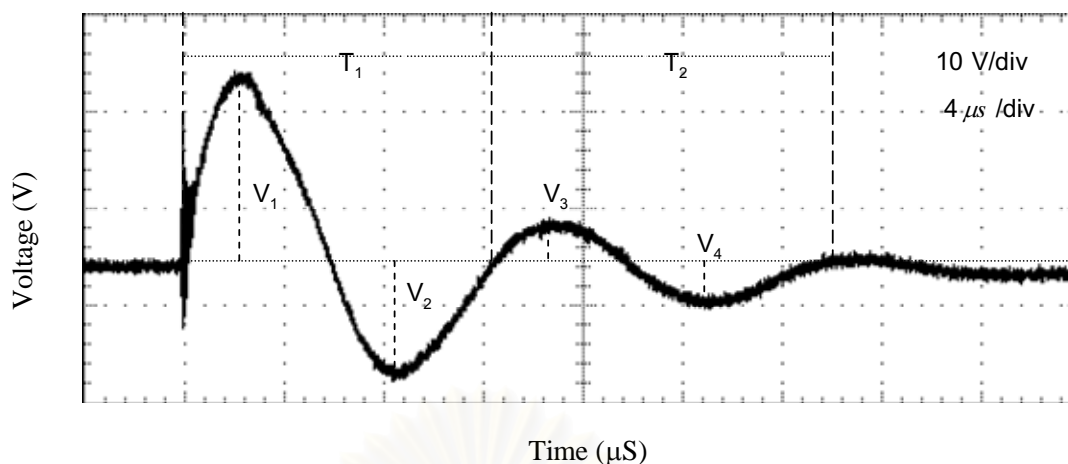


รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งที่วางขดลวดโรโกวสกี

การคำนวณค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจร ทำได้โดยเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรไฟฟ้าซึ่งสามารถคำนวณได้จากวงจรเสมือนของวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้างดรูปที่ 4.3 กับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดโรโกวสกีสามารถวัดได้ดังรูปที่ 4.4^[3]



รูปที่ 4.3 แสดงวงจรเสมือนของเครื่องที่ตาพินซ์



รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณที่วัดได้จากขดลวดโรโกวสกี

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรถ (I_o) เป็นไปตามสมการ 4.1^[5]

$$I_o = \frac{\pi C_o V_o (1 + f)}{T} \quad 4.1$$

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_o = ค่าความจุของตัวเก็บประจุ

V_o = ค่าความต่างศักย์ที่ให้กับตัวเก็บประจุในตอนเริ่มต้น

T = คาบเวลาที่วัดได้จากสัญญาณ

ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรถที่ได้จากการคำนวณ และค่าของความต่างศักย์ที่วัดได้จาก ออสซิลโลสโคป สามารถนำมาหาเป็นค่าตัวแปรเพื่อใช้ในการเปลี่ยนเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าได้

ซึ่งตัวแปรที่ได้เป็นไปตามสมการ

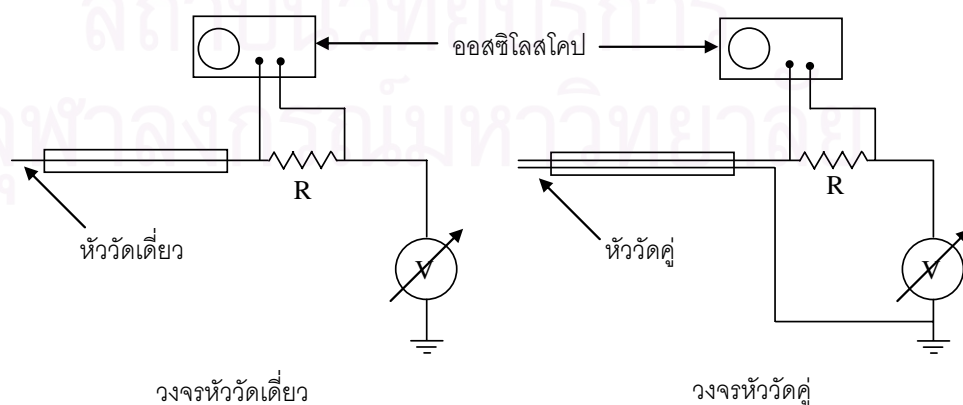
$$K = \frac{I_o}{V_1} \quad 4.3$$

ซึ่งเมื่อวัดค่าความต่างศักย์จากออสซิลโลสโคปนำมาคูณกับตัวแปร K สามารถทราบค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ไหลในวงจรสำหรับการทดลองครั้งนั้นๆได้

4.2 หัววัดทางไฟฟ้า

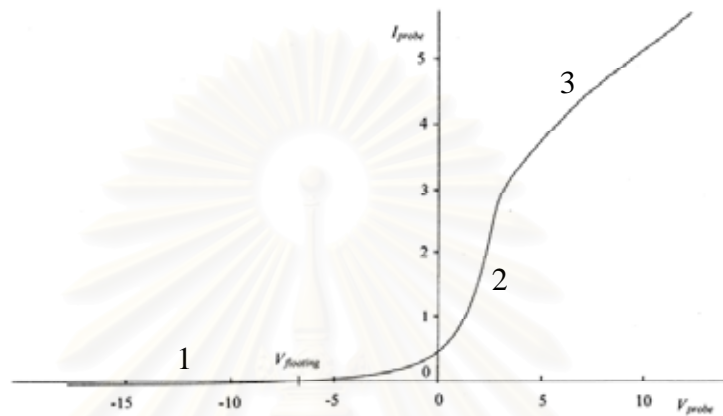
การวัดอุณหภูมิอิเล็กตรอนซึ่งเป็นสมบัติของพลาสมา วิธีการที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือการวัดโดยใช้หัววัดทางไฟฟ้า (Electrostatic Probe) การวัดอุณหภูมิอิเล็กตรอนของพลาสมาโดยใช้หัววัดทางไฟฟ้าถูกพัฒนาขึ้นในปีคริสต์ศักราช 1924 โดย Irving Langmuir ซึ่งวิธีการวัดโดยใช้หัววัดทางไฟฟ้าเป็นที่รู้จักโดยทั่วไปในชื่อ Langmuir Probe

โดยทั่วไปสมบัติของพลาสมาสามารถบอกได้ด้วยค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอน และความหนาแน่นอิเล็กตรอน ซึ่งค่าตัวแปรทั้งสองสามารถหาได้จากการวัดพลาสมาโดยใช้หัววัดทางไฟฟ้า การหาค่าของตัวแปรสามารถหาได้จากการวัดค่ากระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงในวงจรถองหัววัด โดยในการทดลองปลายของหัววัดถูกใส่ให้อยู่ภายในพลาสมา เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ที่ให้กับหัววัด ส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ภายในวงจรถองหัววัดมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าของความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไป วงจรถองหัววัดทางไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.5^[7]



รูปที่ 4.5 แสดงวงจรถองหัววัดทางไฟฟ้าแบบหัววัดเดี่ยวและหัววัดคู่

ผลจากการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของหัววัดทางไฟฟ้า กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรของหัววัดทางไฟฟ้า เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟสิ่งที่ได้คือกราฟแสดงลักษณะของกระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ (Current-Voltage Characteristic หรือ I-V Curve) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟลักษณะของกระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์

เมื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้ากับหัววัดมีค่าเป็นลบสูง กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในช่วงนี้มาจากประจุบวก ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าของไอออนหรือกระแสไฟฟ้าบวก เรียกกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในช่วงนี้เรียกว่า กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวของไอออน (Ion Saturation Current) I_{is} ดังแสดงในช่วงที่ 1 ของรูปที่ 4.6 เมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าของหัววัดให้มีความเป็นบวกมากขึ้น ทำให้กระแสไฟฟ้าลบ (Negative Current) ในวงจรมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวของไอออนมีค่าลดลง เมื่อกระแสไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าของไอออน ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งนี้เรียกว่า ศักย์ลอย (Floating Potential) V_f หลังจากตำแหน่งของศักย์ลอย ศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในส่วนที่ 2 ของรูปที่ 4.6 และเมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าให้กับหัววัดจนมีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าของพลาสมา เรียกตำแหน่งที่นี้ว่า ศักย์พลาสมา (Plasma

Potential) V_p เมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าให้มีค่ามากกว่าศักย์ไฟฟ้าของพลาสมา กระแสไฟฟ้าที่วัดได้คือกระแสไฟฟ้าของอิเล็กตรอน ซึ่งเรียกกระแสไฟฟ้าในช่วงนี้ว่า กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวของอิเล็กตรอน (Electron Saturation Current) I_{es} ดังแสดงในส่วนที่ 3 ของรูปที่ 4.6

จากกราฟแสดงลักษณะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ พิจารณาในส่วนที่เป็น Exponential ของกราฟ เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์โดยใช้ Semi-Logarithm กราฟที่ได้เป็นเส้นตรง และถ้าการกระจายตัวของอิเล็กตรอนเป็นแบบ Maxwellian แล้วความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ

$$I_e = I_{es} \exp[e(V_p - V)/kT_e] \quad 4.6$$

โดยที่

$$I_{es} = eAn_e \bar{v}/4 = eAn_e (kT_e/2\pi m_e)^{1/2} \quad 4.7$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าลอการิทึมของกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ที่ให้กับหัววัด ค่าของความชันที่ได้คือ e/kT_e พิจารณาที่ศักย์ที่ให้กับหัววัดมีค่าเท่ากับศักย์พลาสมา จากสมการที่ 4.7 ได้

$$I_{es} = eAn_e (kT_e/2\pi m_e)^{1/2} = 2.67 \times 10^{-14} n_e A T_e^{1/2} \quad 4.8$$

โดยที่ I_{es} คือค่าของกระแสในหน่วย แอมป์, n_e คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในหน่วย จำนวนต่อลูกบาศก์เมตร, A คือพื้นที่ผิวของหัววัดในหน่วย ตารางมิลลิเมตร และ kT_e ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์^[8]

ค่าของกระแสไฟฟ้าของอิเล็กตรอนอิ่มตัวสามารถอ่านได้จากกราฟแสดงลักษณะของกระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ตามรูปที่ 4.6 และจากสมการที่ 4.8 ดังนั้นสามารถหาค่าของความหนาแน่นอิเล็กตรอนได้

4.3 เครื่องสเปคโตรมิเตอร์

การวิเคราะห์พลาสมาโดยสเปคโตรมิเตอร์เป็นการวัดพลาสมา โดยอาศัยพื้นฐานจากการแผ่รังสีของอะตอมหรือไอออนของก๊าซที่แตกตัวและสิ่งเจือปนด้วยเมื่อถูกกระตุ้นให้กลายเป็นพลาสมา ซึ่งการศึกษาพลาสมาด้วยวิธีนี้เป็นวิธีการวัดโดยไม่มีกระบวนการพลาสมาที่ทำการศึกษา

สำหรับการวิเคราะห์พลาสมาด้วยสเปคโตรมิเตอร์สิ่งที่ได้คือค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอน โดยค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนสัมพันธ์กับความเข้มของความยาวคลื่นรังสีที่แผ่ออกมา ซึ่งขึ้นอยู่กับอนุภาคที่อยู่ในพลาสมา โดยสมมุติให้พลาสมาอยู่ในสภาวะ Local Thermal Equilibrium (LTE) พลังงานของพลาสมาสามารถอธิบายได้ด้วย การกระจายตัวแบบแมคเวลเลียน (Maxwellian Distribution) การสมมุติในลักษณะนี้สามารถใช้ได้กับพลาสมาที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าสูงเพียงพอคือประมาณได้ด้วยสมการ

$$n_e \geq 1.6 \times 10^{12} T_e (\Delta E)^3 \quad 4.9$$

โดยที่ n_e คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอน, T_e คืออุณหภูมิอิเล็กตรอน และ ΔE คือช่วงที่กว้างที่สุดของระดับชั้นพลังงานของอะตอม ภายใต้การสมมุติแบบ LTE โอกาสของระดับพลังงานที่ถูกกระตุ้น (Population of excited level) สามารถหาได้จาก Boltzmann Equation

$$N_m = \frac{N}{Z} g_m \cdot \exp\left(\frac{-E_m}{kT_e}\right) \quad 4.10$$

โดยที่ N_m คือความหนาแน่นโอกาสของสถานะที่ m (The Population density of State m), Z คือ Partition Function, g_m คือตัวถ่วงน้ำหนักทางสถิติ (The Statistical Weight), E_m คือพลังงานในการกระตุ้น, k คือค่าคงที่ของ Boltzmann (The Boltzmann Constant)

ความเข้มของสเปกตรัม I_{mn} ที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากระดับชั้นที่ m ไปสู่ระดับชั้นที่ n สัมพันธ์กับความหนาแน่นโอกาส N_m ดังสมการ

$$I_{mn} = N_m A_{mn} h\nu_{mn} \quad 4.11$$

A_{mn} คือโอกาสที่เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นที่ m ไปสู่ระดับชั้นที่ n , $h\nu_{mn}$ คือพลังงานในการเปลี่ยนระดับ^[9]

จากสมการที่ 4.10 และ 4.11 เมื่อจับคู่ความเข้มของความยาวคลื่นสเปกตรัมที่แผ่ออกมา (ให้เป็น I_1 และ I_2) ของสารชนิดเดียวกันโดยให้

$$E_{m1} - E_{m2} > kT_e \quad 4.12$$

เพื่อป้องกันการเลือกเส้นสเปกตรัมที่มีระดับพลังงานที่สูงกว่าเหมือนกัน พิจารณาพลาสมาว่าเป็นออปติกที่บางมาก (Optically Thin) และเส้นสเปกตรัมไม่มีการดูดกลืนตัวเอง (Self Absorption) อัตราส่วนของความเข้มอธิบายตามสมการ

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1} \cdot \exp\left(\frac{E_{m2} - E_{m1}}{kT_e}\right) \quad 4.13$$

โดย λ_1 และ λ_2 คือความยาวคลื่นของสเปกตรัมความเข้ม I_1 และ I_2 ซึ่งสามารถหาค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนได้เป็น^[10]

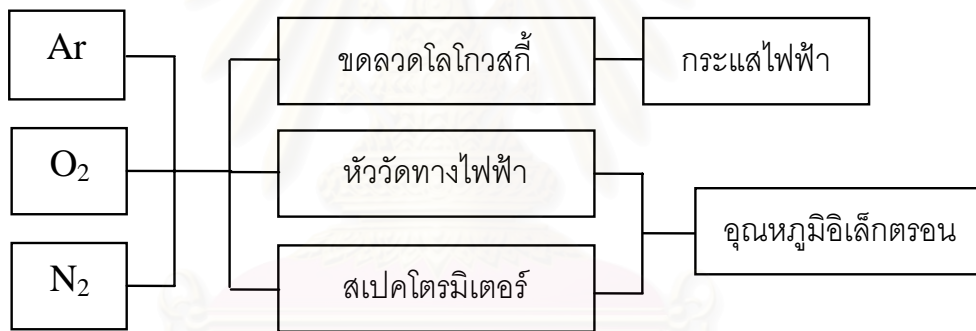
$$T_e = \frac{E_{m2} - E_{m1}}{k \ln\left(\frac{I_1 A_2 g_2 \lambda_1}{I_2 A_1 g_1 \lambda_2}\right)} \quad 4.14$$

จากการทดลองสามารถหาอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่รังสีได้ เมื่อนำมาแทนค่าในสมการสามารถทราบค่าของอุณหภูมิอิเล็กตรอนได้ โดยค่าคงที่ต่างๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำมาจากเว็บไซต์ของ National Institute of Standards and Technology. (NIST)

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

บทนี้กล่าวถึงการทดลอง และผลการทดลองของการหาค่าสมบัติของเครื่องที่ต้าพินซ์ และสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องที่ต้าพินซ์ที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 ในการทำการทดลองทุกครั้งใช้ตัวเก็บประจุความจุสูง 12 ไมโครฟารัด ความต่างศักย์ที่ให้กับตัวเก็บประจุความจุสูงคือ 20 กิโลโวลต์ โดยการทดลองแบ่งตามชนิดของก๊าซคือ ก๊าซอาร์กอน, ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% ซึ่งก๊าซแต่ละชนิดทำการเปลี่ยนความดันในช่วง 1-5 ปาสคาล รายละเอียดของการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงลำดับขั้นตอนของการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการสร้างหัววัดและอุปกรณ์เสริมสำหรับทำการวัดขึ้นใหม่ เพื่อใช้ในการวัดหาค่าสมบัติของเครื่องที่ต้าพินซ์ และสมบัติของพลาสมา โดยรายละเอียดและวิธีการวัดของหัววัดได้กล่าวถึงแล้วในบทที่ 4

สมบัติของเครื่องที่ต้าพินซ์ที่สนใจในการทดลองนี้คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรของเครื่องที่ต้าพินซ์ และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้า โดยในการทดลองวัด

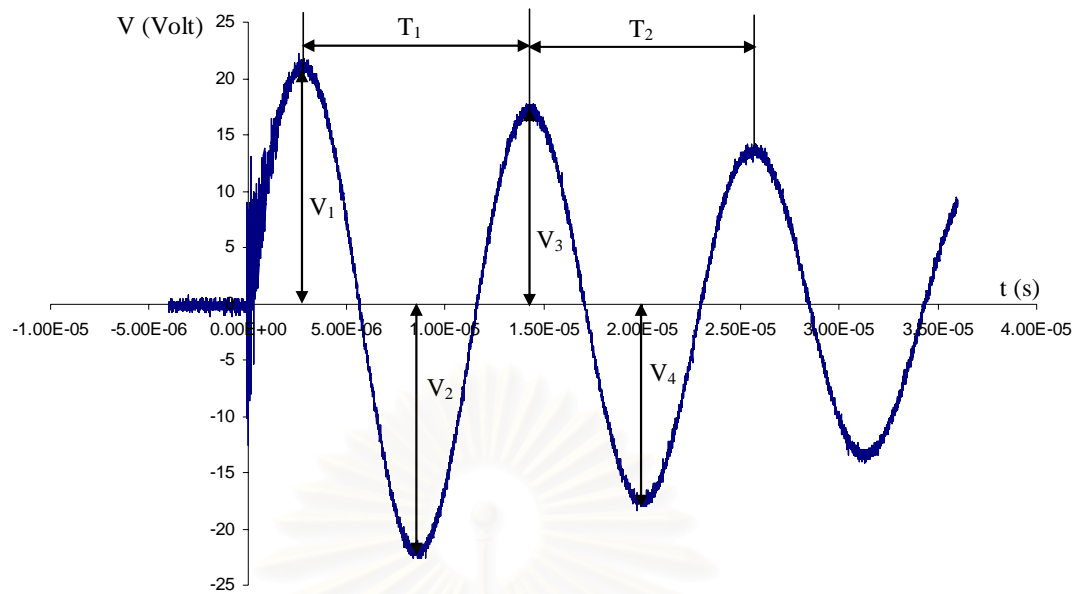
กระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรของเครื่องที่ดำพินซ์ใช้ขดลวดโรโกวสกีในการวัด และนำค่าที่วัดได้จากขดลวดโรโกวสกีมาคำนวณเป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองนี้สามารถนำไปใช้หาค่าของตัวแปรสำหรับใช้ในการคำนวณหากระแสไฟฟ้าสำหรับการทดลองอื่นต่อไปได้

สำหรับสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องที่ดำพินซ์ที่ต้องการทราบคือ อุณหภูมิ อิเล็กตรอน, ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า (ความหนาแน่นอิเล็กตรอนหรือไอออน) และศักย์พลาสมา โดยในการทดลองหาค่าต่างๆ นั้นได้ใช้ หัววัดทางไฟฟ้า และสเปคโตรมิเตอร์ค่าที่ได้จากเครื่องมือทั้งสองนั้นได้นำมาเปรียบเทียบกันเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้อง

ในส่วนของการเก็บผลการทดลองของขดลวดโรโกวสกี และหัววัดทางไฟฟ้านั้นเก็บโดยใช้ ออสซิลโลสโคปแบบ 4 ช่องสัญญาณของ Tektronix TDS 3034 ซึ่งใช้สัญญาณจากขดลวดโรโกวสกีเป็นสัญญาณในการทริกให้ออสซิลโลสโคปทำการเก็บข้อมูล และสเปคโตรสโคปใช้ Ocean Optics รุ่น USB 2000 ในการเก็บผลของสเปคตัม ผลของสเปคตัมนั้นได้ทำการเก็บข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์ แล้วจึงนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ต่อไป

5.1 การวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรของเครื่องที่ดำพินซ์

เมื่อทำการกดสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ทริกเกอร์ให้เครื่องที่ดำพินซ์ทำงาน ประจุที่ถูกเก็บไว้ในตัวเก็บประจุความจุสูงไหลออกมาผ่านสปาร์คแก๊ปสวิตช์ ซึ่งมีขดลวดโรโกวสกีพันรอบอยู่ให้เกิดสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดสร้างให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลภายในวงจรของขดลวดโรโกวสกี สัญญาณที่วัดได้จากขดลวดโรโกวสกีแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ขดลวดโรโกวสกี

จากสมการที่ 4.1 ในบทที่ 3

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

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

และ

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

โดยที่ $T_1 = 11.5 \mu\text{s}$ และ $T_2 = 11.3 \mu\text{s}$ ดังรูปที่ 5.2

$$C_0 = 12 \mu\text{F}$$

$$V_0 = 20 \text{ kV}$$

$$V_1 = 21.8 \text{ V}, V_2 = 22.2 \text{ V}, V_3 = 17.6 \text{ V}, V_4 = 17.8 \text{ V}$$

$$T = \frac{11.5 + 11.3}{2} = 11.4 \mu\text{s}$$

$$f = \frac{1}{3} \left(\frac{22.2}{21.8} + \frac{17.6}{22.2} + \frac{17.8}{17.6} \right) = 0.941$$

$$I_o = \frac{\pi \times 12 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^3 \times (1 + 0.941)}{11.4 \times 10^{-6}}$$

$$= 128.365 \text{ kA}$$

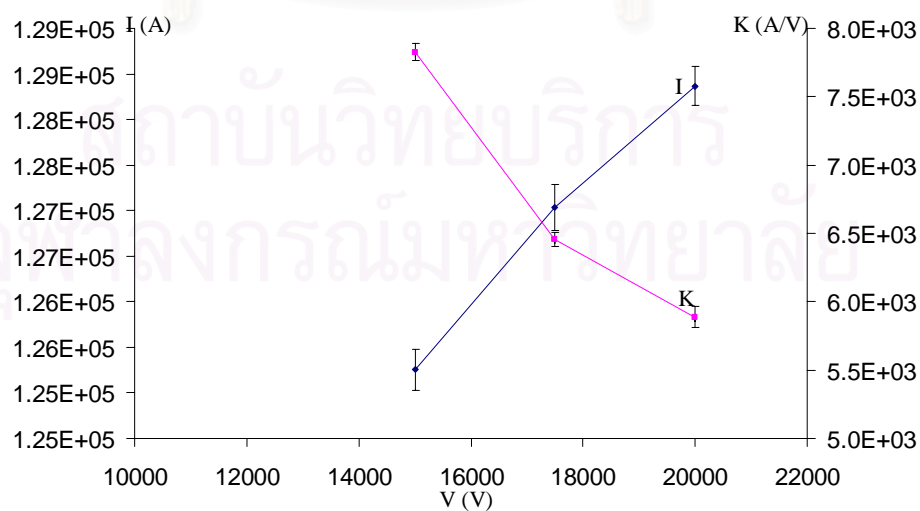
$$K = \frac{128.365 \times 10^3}{21.8}$$

$$= 5.888 \text{ kA/V}$$

จากการทดลองวัดค่ากระแสไฟฟ้าด้วยขดลวดโรโกวสกี เมื่อทำการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ให้กับตัวเก็บประจุความจุสูงเป็นดังตารางที่ 5.1 โดย $K_{\text{average}} = I_{\text{average}} / V_{1 \text{ average}}$

V (kV)	I_{average} (kA)	K_{average} (kA/V)
15	125.254	7.828
17.5	127.032	6.455
20	128.365	5.888

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าของกระแสไฟฟ้า และค่าอัตราส่วนที่ความต่างศักย์ 15-20 kA



รูปที่ 5.3 แสดงกราฟระหว่างความต่างศักย์ที่ให้ตัวเก็บประจุความจุสูง กับกระแสไฟฟ้า และค่า K

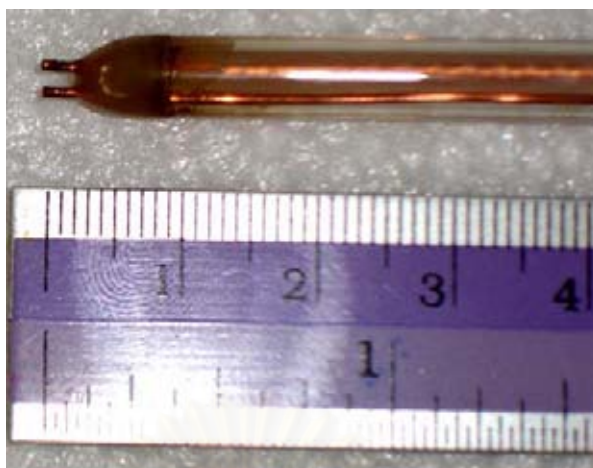
จากผลการทดลองเห็นได้ว่าเมื่อค่าความต่างศักย์ที่ให้กับตัวเก็บประจุความจุสูงมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรเครื่องที่ตาพินซ์ที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่า K มีค่าลดลง แสดงว่าค่า K ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกระแสไฟฟ้าภายในวงจรเครื่องที่ตาพินซ์กับค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากขดลวดโลโกวสก็ไม่ได้เป็นอัตราส่วนโดยตรง ทั้งนี้อาจมาจากการที่เมื่อให้ค่าความต่างศักย์กับตัวเก็บประจุความจุสูงเพิ่มขึ้น ประจุภายในตัวเก็บประจุความจุสูงมีมากขึ้น แต่เมื่อตัวเก็บประจุความจุสูงคายประจุออกมา กระแสไฟฟ้าภายในวงจรเครื่องที่ตาพินซ์ไม่ได้เพิ่มขึ้นมากนัก เมื่อเทียบกับค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากขดลวดโลโกวสก็ ซึ่งวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าในวงจร

5.2 การวัดค่าอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์

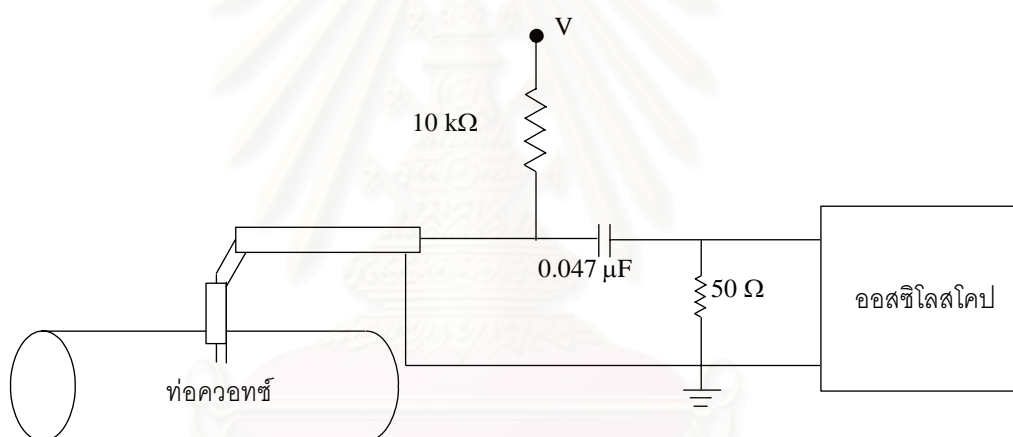
สำหรับการหาค่าของอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์ใช้วิธีการหา 2 ทางคือ จากหัววัดทางไฟฟ้า และจากสเปคโตรมิเตอร์ โดยทำการวัดค่าอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์ของอาร์กอนพลาสติกที่ความดัน 1 ปาสคาล แล้วนำผลที่ได้จากการใช้เครื่องมือและวิธีการคำนวณของทั้งสองวิธีนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อดูความเหมาะสมในการหาค่าอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์

5.2.1 การวัดโดยใช้หัววัดทางไฟฟ้า

สำหรับการหาค่าของอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์จากการทดลองวัดโดยใช้หัววัดทางไฟฟ้า หัววัดที่ใช้ในการทดลองทำการสร้างหัววัดขึ้นโดยใช้ลวดทองแดงใส่ในหลอดแก้ว แล้วทำการอุดปลายหลอดแก้ว และปลายอีกด้านของลวดทองแดงต่อเข้ากับหัวบีเอ็นซีเพื่อใช้ต่อกับสายสัญญาณ ดังแสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงรูปของหัววัดทางไฟฟ้า



รูปที่ 5.5 แสดงวงจรของหัววัดทางไฟฟ้า

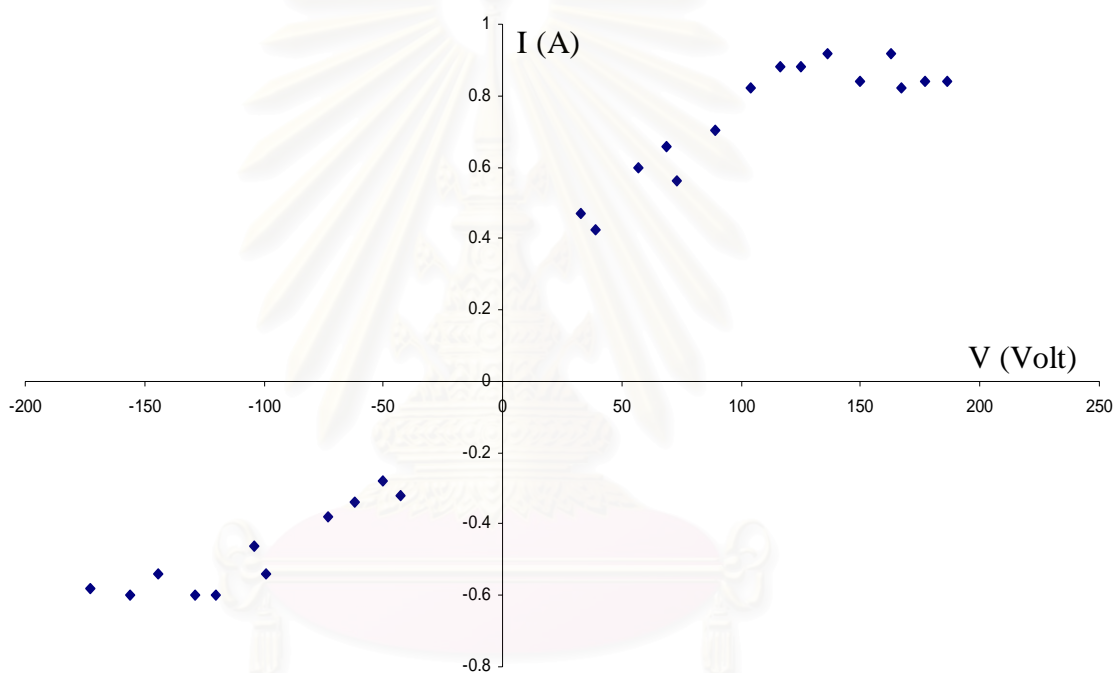
โดยวงจรของหัววัดทางไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.5 ซึ่งในการทดลองได้ใช้แบตเตอรี่ขนาด 9 โวลต์ เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับหัววัด ทำการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ให้กับหัววัดในช่วง -189 โวลต์ ถึง +189 โวลต์ โดยทำการปรับค่าครั้งละ 9 โวลต์ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าของหัววัด (I_{Probe}) และค่าความต่างศักย์ของหัววัด (V_{Probe}) นำมาวิเคราะห์โดย^[15]

$$I_{\text{Probe}} = V_{\text{Scope}} / 50$$

$$V_{\text{Probe}} = V_{\text{Bias}} - V_{\text{Scope}}$$

แทนค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป และค่าความต่างศักย์ที่ให้กับหัววัดในสมการ แล้วนำค่าของกระแสไฟฟ้าของหัววัด และค่าความต่างศักย์ของหัววัดที่ได้ นำมาเขียนกราฟ ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์

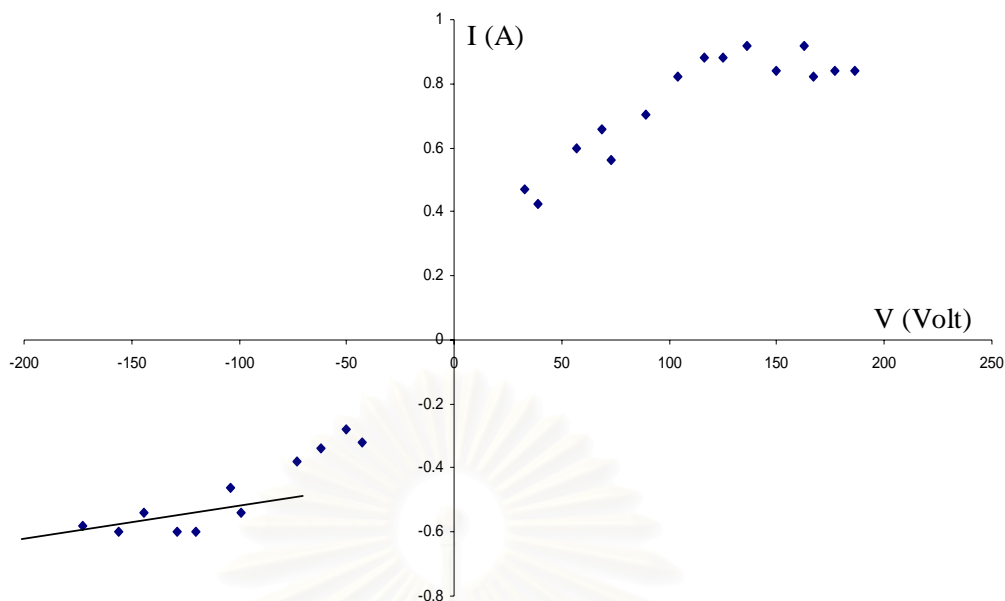
ผลจากการทดลองวัดค่าของอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1 ปาสคาล หลังจากนำค่าที่ได้ แทนในสมการ และนำมาเขียนกราฟได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 กราฟลักษณะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของก๊าซอาร์กอน 1 ปาสคาล

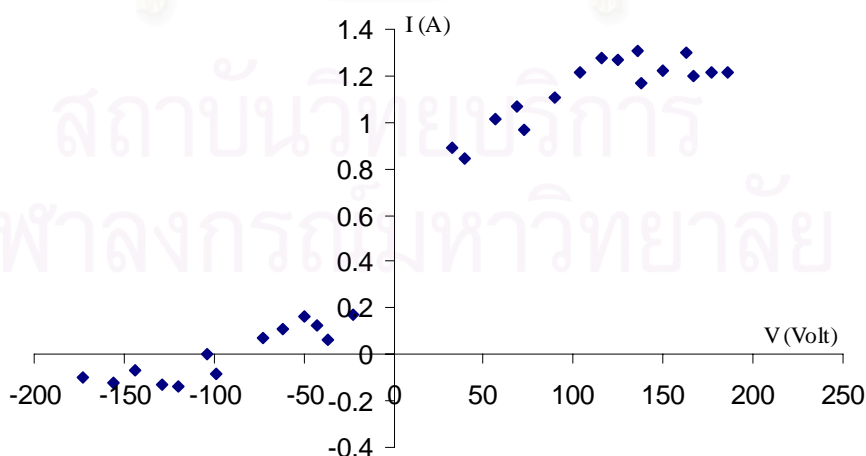
หาความสัมพันธ์ในช่วงของกระแสไฟฟ้าอิ่มตัวของไอออน เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวของ

ไอออน จากกราฟในรูปที่ 5.7 หาสมการของกระแสไฟฟ้าอิ่มของไอออนได้เป็น $I = 0.0003V - 0.4287$



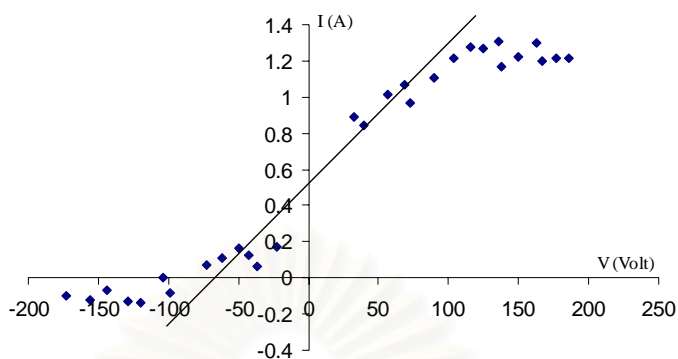
รูปที่ 5.7 แสดงเส้นกราฟกระแสไฟฟ้าอิมิตัวของไดโอด

แทนค่าความต่างศักย์ที่ให้กับหัววัดในสมการกระแสไฟฟ้าอิมิตัวของไดโอด แล้วนำค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวของไดโอดที่ได้ไปลบกับค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลอง เขียนกราฟระหว่างความต่างศักย์ที่ให้กับหัววัด กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้หลังจากลบออกด้วยค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวของไดโอด กราฟที่ได้แสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงกราฟระหว่างความต่างศักย์ที่ให้กับหัววัด กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้หลังจากลบออกด้วยค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวของไดโอด

จากนั้นหาเส้นกราฟในช่วงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ของหัววัด และทำการหาค่าความชัน เส้นกราฟที่ได้แสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แสดงเส้นกราฟที่ใช้ในการหาค่าอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์ตรอน

สมการความชันที่ได้คือ $I = 0.0072V + 0.4962$ จากสมการ 3.6 ค่าอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์ตรอนที่ได้คือ

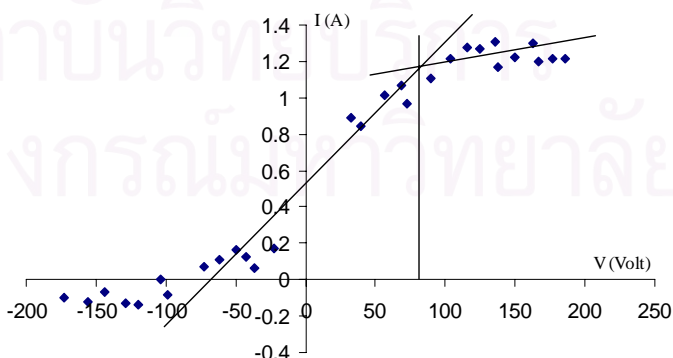
$$\text{ความชัน} = \frac{1}{kT_c}$$

$$kT_c = 138.889 \text{ eV}$$

จุดตัดแกนความต่างศักย์ที่ได้จากกราฟในรูปที่ 5.9 ได้ค่าของศักย์ลอย มีค่าเท่ากับ -68.92 โวลต์

จากกราฟในรูปที่ 5.9 ทำการหาเส้นกราฟในช่วงของกระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ของอิเล็กทรอนิกส์ตรอน

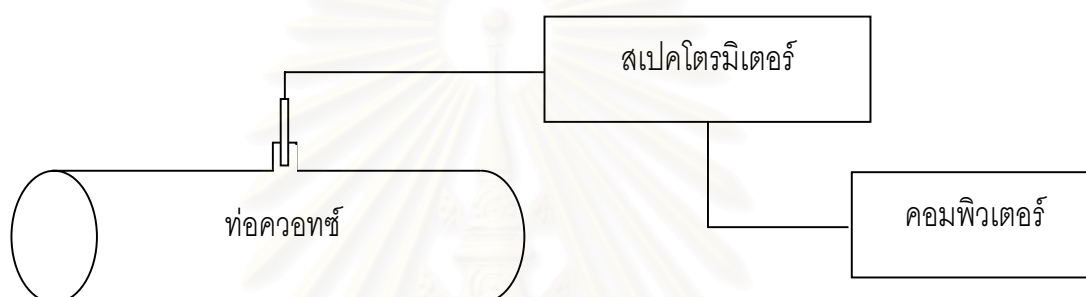
จุดตัดระหว่างเส้นกราฟทั้ง 2 เส้นลากมาตัดแกนของความต่างศักย์ ค่าที่ได้คือ ศักย์พลาสมา ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ค่าของศักย์พลาสมาคือ 86.87 โวลต์



รูปที่ 5.10 แสดงการหาค่าศักย์พลาสมาจากกราฟ

5.2.2 การทดลองโดยใช้สเปคโตรมิเตอร์

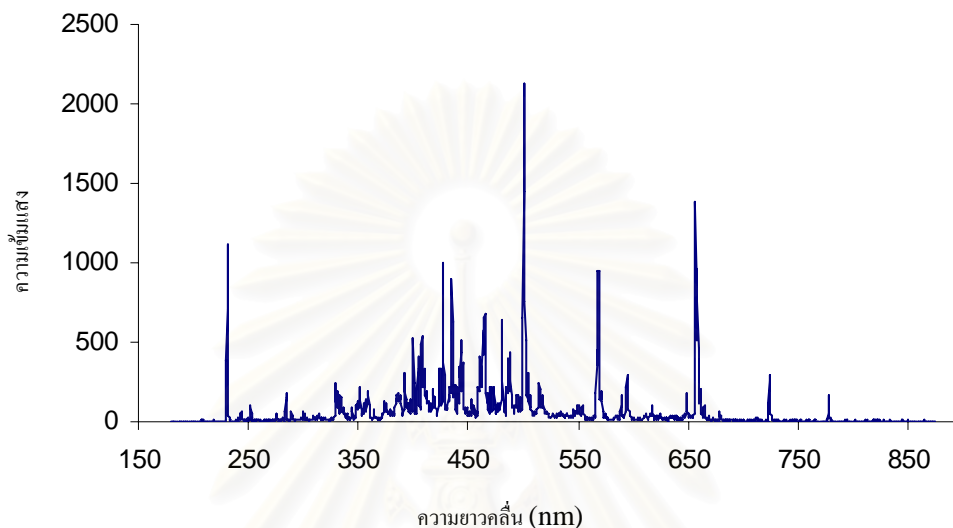
การทดลองวัดพลาสมาโดยใช้สเปคโตรมิเตอร์ในการวัด ได้ใช้สเปคโตรมิเตอร์ Ocean Optics รุ่น USB 2000 ในการทำการวัด โดยการวัดได้ใส่หัววัดสเปคตัมซึ่งทำจากไฟเบอร์ออปติกต่อกับท่อทองเหลืองที่ได้ทำขึ้น ใส่เข้าไปทางด้านบนของท่อควอทซ์ ซึ่งหัววัดสเปคโตรมิเตอร์อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของท่อควอทซ์ เพื่อเก็บค่าสเปคตัมของรังสีที่แผ่ออกมาจากพลาสมาดังรูป 5.11



รูปที่ 5.11 แสดงการต่อเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ในการทดลอง

โดยในการเก็บสัญญาณสเปคตัมเริ่มจากการเก็บสัญญาณของแสงปกติก่อนทำการทดลองเพื่อให้เครื่องสเปคโตรมิเตอร์เก็บไว้เป็นสัญญาณเบื้องหลังแล้วจึงทำการเก็บค่าสเปคตัม ซึ่งในการเก็บสัญญาณสเปคตัมนั้นค่าความเข้มของรังสีที่แผ่ออกมาจากพลาสมาที่หัววัดสามารถวัดได้นำมาลบออกด้วยค่าความเข้มของแสงปกติที่ได้ทำการวัดไว้ก่อนทำการทดลองเพื่อให้ค่าที่ได้เป็นค่าของรังสีที่แผ่ออกมาจากพลาสมาเท่านั้น ดังนั้นค่าที่ได้จึงเป็นความเข้มจากการแผ่รังสีของพลาสมาเพียงอย่างเดียว การเก็บค่าสัญญาณสเปคตัมทำการเก็บสัญญาณเป็นเวลา 1 วินาที โดยช่วงเวลาดังกล่าวนี้ครอบคลุมช่วงเวลาที่เกิดพลาสมาทั้งหมด ซึ่งในการทำการทดลองได้เริ่มให้สเปคโตรมิเตอร์ทำงานก่อนการกดสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสทริกเกอร์ให้เครื่องที่ดำเนินทำงาน และเครื่องสเปค

โตรมิเตอร์หยุดเก็บข้อมูลหลังจากเวลาผ่านไป 1 วินาที ซึ่งพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในได้สลายตัวไปแล้ว ผลของสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องสเปคโตรมิเตอร์แสดงดังกราฟในรูปที่ 5.12

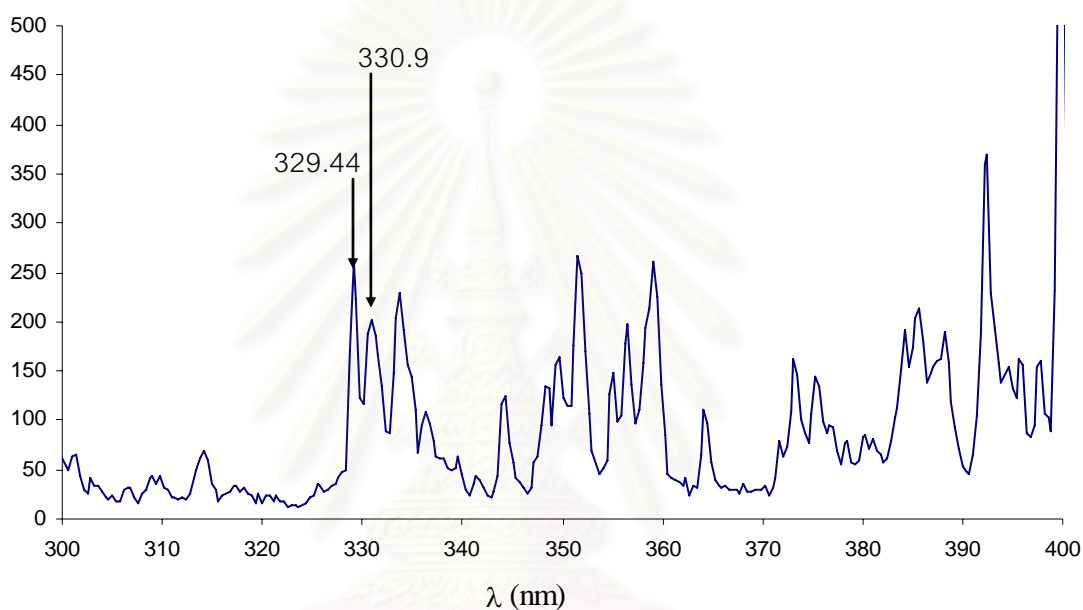


รูปที่ 5.12 แสดงผลที่ได้จากเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ของก๊าซอาร์กอนที่ความดัน 1 ปาสคาล

สำหรับการเลือกความยาวคลื่นที่ได้นำมาใช้ในการคำนวณหาค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอน ทำโดยการนำความยาวคลื่นของรังสีจากพลาสมาที่ต้องการหาค่า มาเทียบกับความยาวคลื่นของรังสีที่แผ่ออกมาจากพลาสมาของก๊าซที่คาดว่าเป็นสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในท่อควอทซ์ ซึ่งความยาวคลื่นของรังสีที่แผ่ออกมาจากพลาสมาที่เทียบกันแล้วตรงกับความยาวคลื่นของรังสีที่แผ่ออกมาจากพลาสมาของสิ่งที่คาดว่าเป็นสิ่งเจือปน ความยาวคลื่นเหล่านั้นไม่นำมาใช้ในการพิจารณาหาอัตราส่วนสำหรับการหาค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอน ตัวอย่างในการคัดความยาวคลื่นของรังสีที่แผ่ออกมาจากพลาสมาเช่น ความยาวคลื่นของรังสีที่แผ่ออกมาจากพลาสมาอาร์กอน ได้นำความยาวคลื่นของพลาสมาก๊าซไนโตรเจน และออกซิเจนมาเทียบโดยคาดว่าไนโตรเจน และออกซิเจนเป็น สิ่งเจือปน ความยาวคลื่นใดของพลาสมาอาร์กอนที่ตรงกับความยาวคลื่นของพลาสมาไนโตรเจน

และออกซิเจนได้ทำการคัดออก แล้วนำความยาวคลื่นที่เหลือมาใช้ในการคำนวณหาค่าอนุกรมมิ
ของอิเล็กตรอน

จากผลของสเปกตรัมที่ได้สำหรับก๊าซอาร์กอนที่ 1 ปาสคาล ได้ความเข้มจากการแผ่รังสีที่
ความยาวคลื่น 329.36 นาโนเมตร และ 330.19 นาโนเมตร ดังรูปที่ 5.13

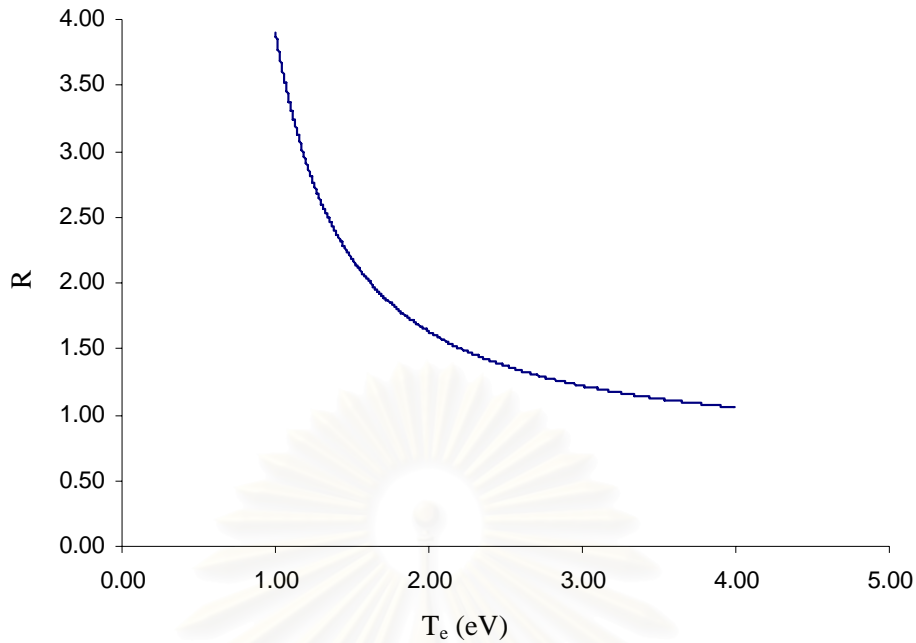


รูปที่ 5.13 แสดงความยาวคลื่นที่เลือกใช้ของก๊าซอาร์กอน

ทำการแทนค่าในสมการ 4.13 เพื่อหาช่วงการใช้งานของอาร์กอนพลาสมาโดยค่าต่างๆแสดงใน
ตารางที่ 5.2 และช่วงการใช้งานแสดงในรูปที่ 5.14

λ (nm)	A	E (1/cm)	g
329.44	1.7×10^8	190592.2305	5
330.90	2.0×10^8	204655.7880	4

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าในการคำนวณของอาร์กอนพลาสมา



รูปที่ 5.14 แสดงช่วงการใช้งานของอาร์กอนพลาสมา

ผลการวัดค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอนเป็นดังตารางที่ 5.3

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
2.71 eV	2.81 eV	2.65 eV	2.76 eV	2.75 eV	2.74 eV

ตารางที่ 5.3 แสดงผลของอุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมาที่ความดัน 1 ปาสคาล

การหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนโดยใช้หัววัดทางไฟฟ้าของอาร์กอนพลาสมาที่ความดัน 1

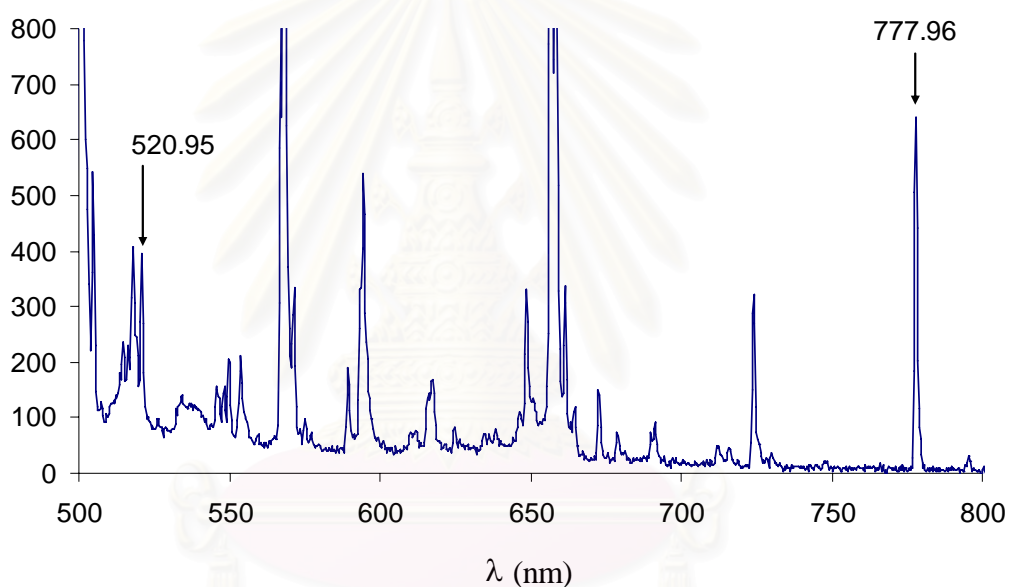
ปาสคาล ได้เท่ากับ 138.889 eV และวัดด้วยสเปคโตรมิเตอร์ได้เท่ากับ 2.737 eV

เห็นได้ว่าค่าทั้งสองมีความแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างพลาสมาของเครื่องที่

ตาพินซ์มีการสร้างสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูง ผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้อาจทำให้ค่าอุณหภูมิที่

ได้จากการใช้ห้วงวัดทางไฟฟ้ามีค่าสูงเกินกว่าค่าจริงที่ควรวัดได้ เพราะในการใช้ห้วงวัดทางไฟฟ้านั้น ต้องไม่มีสนามไฟฟ้าในระบบที่ทำการวัด^[8]

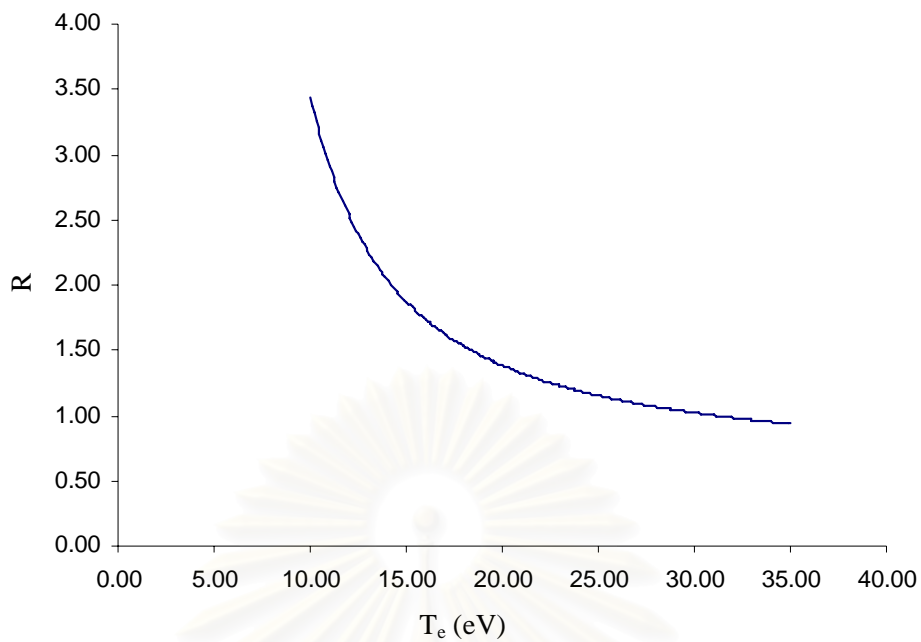
ดังนั้นต่อไปการหาค่าอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์ หาโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์ สำหรับออกซิเจนได้ ความยาวคลื่น 777.54 นาโนเมตร และ 520.67 นาโนเมตร (รูปที่ 5.15) และสำหรับไนโตรเจน 648.48 นาโนเมตร และ 661.36 นาโนเมตร (รูปที่ 5.17) แทนค่าตัวแปรในสมการที่ 4.14 เพื่อหา ช่วงการใช้งาน และค่าอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์



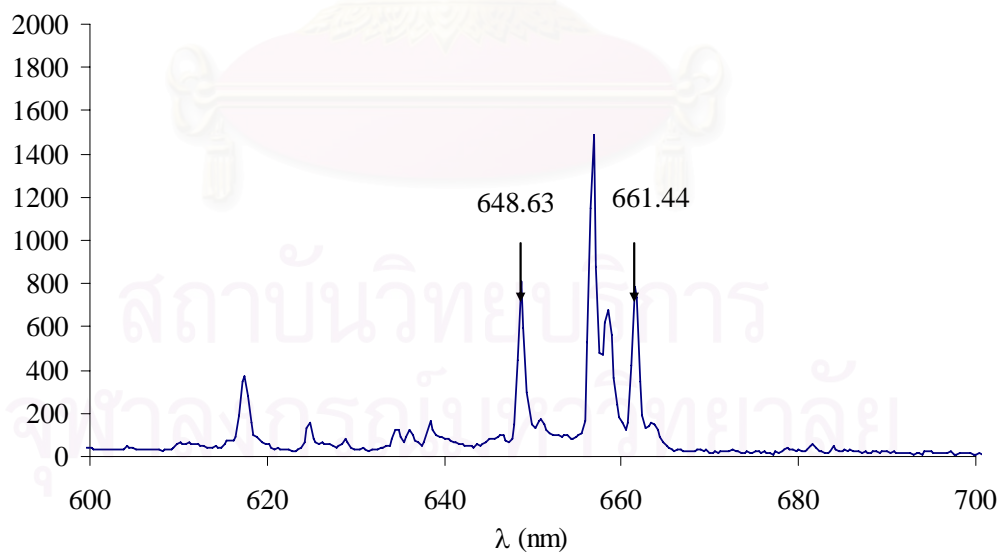
รูปที่ 5.15 แสดงความยาวคลื่นที่เลือกใช้ของก๊าซออกซิเจน

λ (nm)	A	E (1/cm)	g
329.44	1.7×10^8	190592.2305	5
330.90	2.0×10^8	204655.7880	4

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าในการคำนวณของออกซิเจนพลาสมา



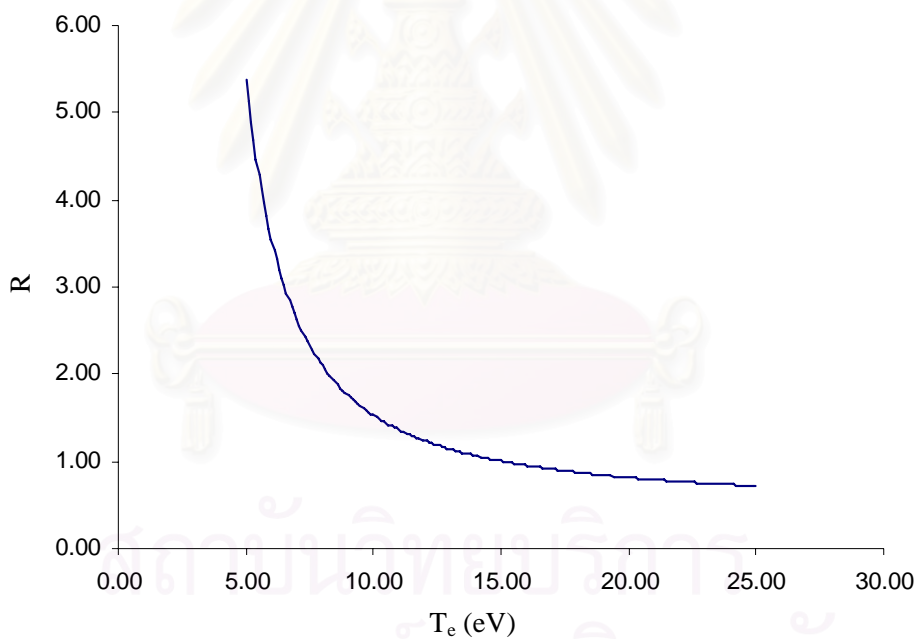
รูปที่ 5.16 แสดงช่วงการใช้งานของออกซิเจนพลาสมา



รูปที่ 5.17 แสดงความยาวคลื่นที่เลือกใช้ของก๊าซไนโตรเจน

λ (nm)	A	E (1/cm)	g
329.44	1.7×10^8	190592.2305	5
330.90	2.0×10^8	204655.7880	4

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าในการคำนวณของไนโตรเจนพลาสมา



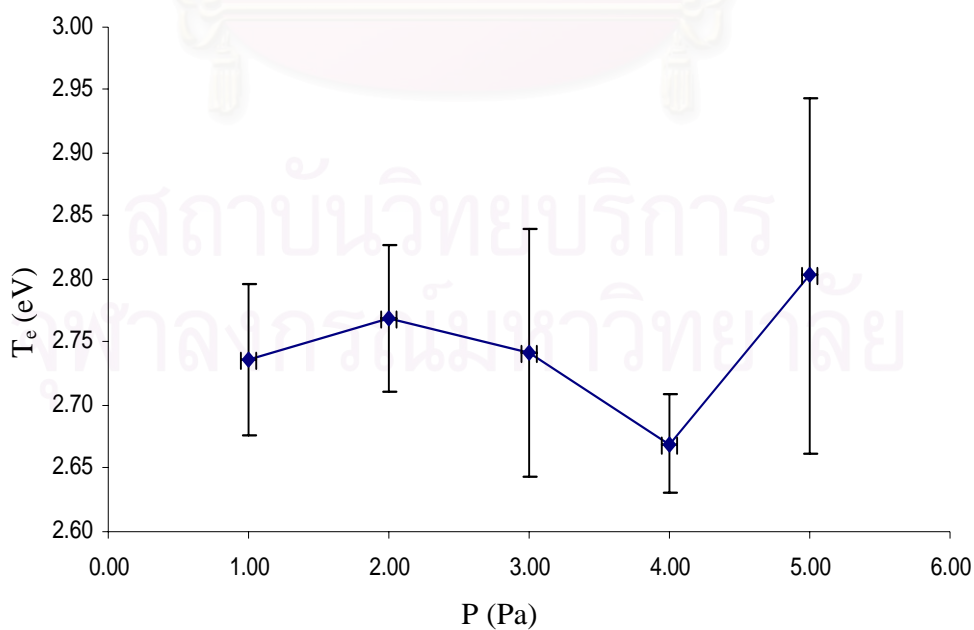
รูปที่ 5.18 แสดงช่วงการใช้งานของไนโตรเจนพลาสมา

ค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนของก๊าซอาร์กอน, ไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ความดัน 1-5

ปาสคาล เป็นดังตาราง 5.6 – 5.8 และกราฟในรูปที่ 5.19-5.21

P (Pa)	T _e of Argon (eV)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
1	2.707	2.812	2.653	2.757	2.753	2.737
2	2.668	2.816	2.787	2.800	2.776	2.770
3	2.821	2.805	2.810	2.646	2.622	2.741
4	2.706	2.614	2.647	2.699	2.683	2.670
5	2.710	2.751	2.709	2.799	3.046	2.803

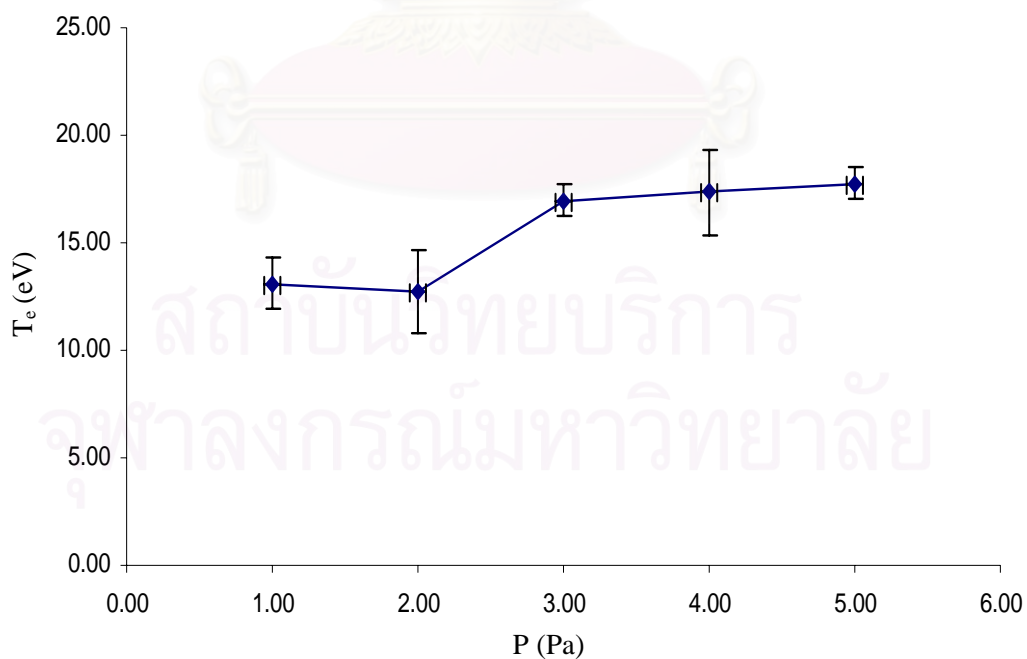
ตารางที่ 5.6 แสดงค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมากับความดัน



รูปที่ 5.19 กราฟระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมา

P (Pa)	T _c of Oxygen (eV)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
1	14.360	12.817	12.205	14.309	11.772	13.093
2	15.876	12.483	13.030	11.602	10.863	12.771
3	17.057	16.627	16.187	18.197	16.723	16.958
4	14.820	15.886	18.681	19.619	17.768	17.355
5	18.319	16.832	18.656	17.502	17.394	17.741

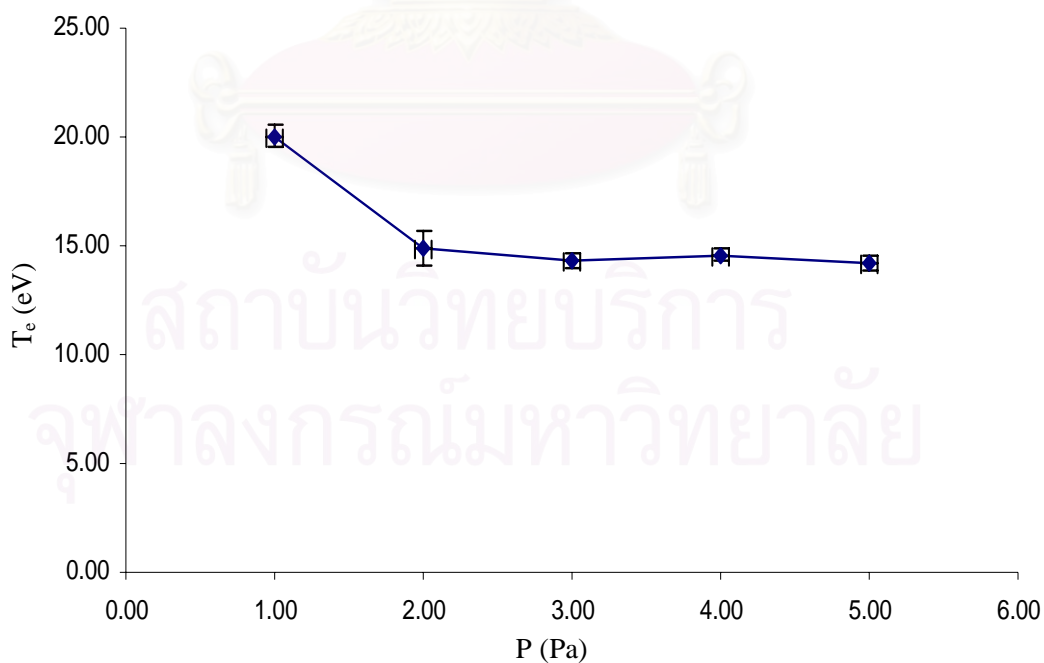
ตารางที่ 5.7 แสดงค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนของออกซิเจนพลาสมากับความดัน



รูปที่ 5.20 กราฟระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนของออกซิเจนพลาสมา

P (Pa)	T_e of Nitrogen (eV)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
1	19.953	19.773	19.331	20.378	20.693	20.026
2	15.087	15.228	15.743	13.597	14.928	14.917
3	14.648	14.0656	13.792	14.376	14.597	14.296
4	14.420	14.940	14.404	14.810	14.329	14.580
5	13.859	14.051	14.052	14.537	14.558	14.211

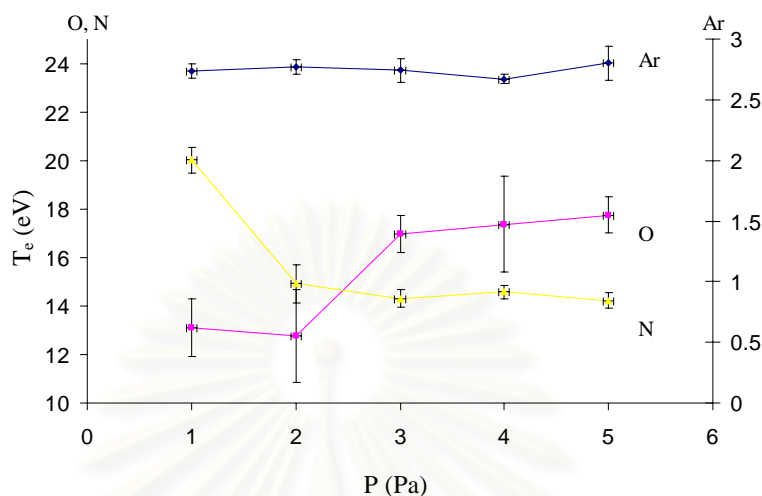
ตารางที่ 5.8 แสดงค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนของไนโตรเจนพลาสมากับความดัน



รูปที่ 5.21 กราฟระหว่างความดันและอุณหภูมิอิเล็กตรอนของไนโตรเจนพลาสมา

ผลการวัดพลาสมาของก๊าซอาร์กอน ออกซิเจน ไนโตรเจน ที่ความดัน 1-5 ปาสคาล แสดง

ดังกราฟในรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 แสดงกราฟระหว่างความดันกับอุณหภูมิอิเล็กตรอนของก๊าซชนิดต่างๆ

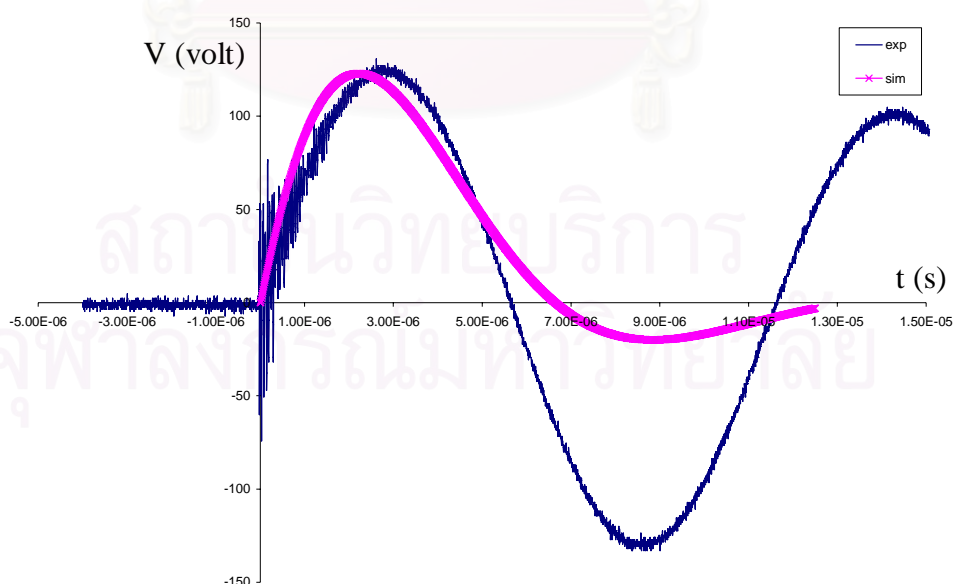
จากผลการทดลองค่าของอุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมา และไนโตรเจนพลาสมาจาก
 แนวโน้มที่วัดได้จากสเปกโตรมิเตอร์นั้น เห็นได้ว่าในช่วงที่เครื่องมือวัดสามารถวัดได้ สำหรับ
 อาร์กอนพลาสมานั้นเมื่อความดันมีค่าเปลี่ยนไป แต่ค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนยังคงมีค่าที่ใกล้เคียง
 กัน แสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ให้ไปกับก๊าซอาร์กอนนั้นส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการทำให้ก๊าซแตกตัว
 เป็นพลาสมา และเมื่อเปรียบเทียบกับไนโตรเจน และออกซิเจนแล้วอุณหภูมิอิเล็กตรอนของ
 อาร์กอนมีค่าน้อยกว่ามาก ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลมาจากขนาดของอาร์กอนที่มีขนาดใหญ่กว่า และ
 มวลมากกว่าทำให้ต้องใช้พลังงานในการแตกตัวที่มากกว่าไนโตรเจน และออกซิเจน ส่วน
 ไนโตรเจนพลาสมานั้นค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่ความดัน 2-5 ปาสคาลนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อ
 ความดันลดลงเป็น 1 ปาสคาล ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่า
 ในช่วง 2-5 ปาสคาล พลังงานที่ให้ก๊าซไนโตรเจนส่วนมากเป็นการทำให้ก๊าซแตกตัว แต่เมื่อความ

ดันลดลงเป็น 1 ปาสคาล พลังงานที่ให้เข้าไปนอกจากทำให้ก๊าซแตกตัวแล้ว ยังสามารถเร่งพลาสมาได้อีกด้วย ทำให้ค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนมีค่ามากขึ้น

สำหรับออกซิเจนพลาสมาเห็นได้ว่าเมื่อความดันลดลงค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนนั้นลดลงด้วย การที่ค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนของพลาสมาออกซิเจนมีแนวโน้มแบบนี้ คาดว่าเป็นผลมาจากค่าของความยาวคลื่นที่เลือกใช้ ซึ่งค่าที่เลือกใช้นั้นไม่ได้อยู่ในช่วงที่ให้ค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่ถูกต้องที่ไม่ถูกต้องสำหรับออกซิเจนพลาสมา เนื่องจากสเปคโตรมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 180 - 880 นาโนเมตร ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าอุณหภูมิที่ถูกต้องนั้นอาจอยู่ในช่วงที่นอกเหนือจากค่าที่สเปคโตรมิเตอร์สามารถวัดได้

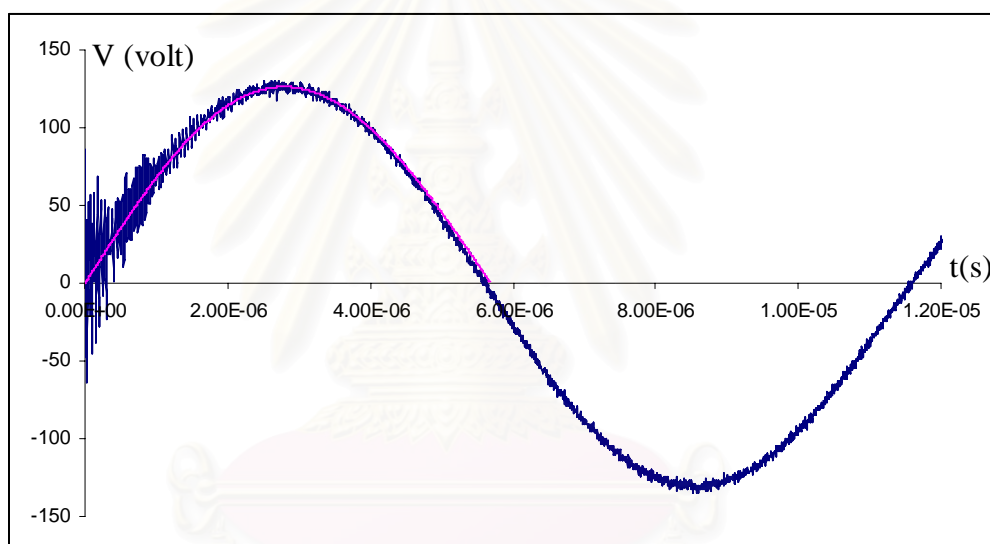
5.3 ผลจากแบบจำลองทางทฤษฎี

จากสมการ 3.1 ทำการแทนค่าตัวแปรเริ่มต้นในสมการเช่น ค่าความดัน ค่าความจุของตัวเก็บประจุ ฯลฯ และทำการคำนวณ นำผลที่ได้มาเทียบกับผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 แสดงกราฟของกระแสไฟฟ้าจากการทดลอง และแบบจำลองทางทฤษฎี

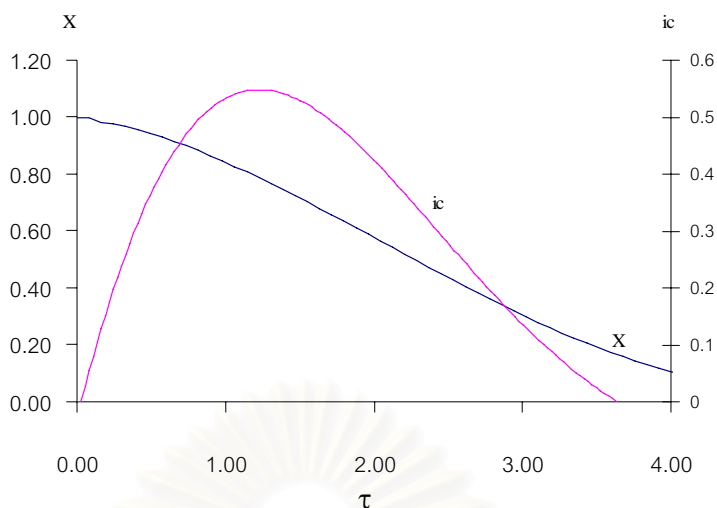
ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง และจากแบบจำลองทางทฤษฎีจากการเทียบกัน แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้แบบจำลองทางทฤษฎีสามารถนำมาเปรียบเทียบได้เพียงช่วงแรกของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง จากรูปที่ 5.23 แสดงให้เห็นคาบของแบบจำลองและคาบของผลจากการทดลองไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำการปรับค่าคาบของแบบจำลองทางทฤษฎี ผลที่ได้จากการปรับค่าในแบบจำลองทางทฤษฎีเทียบกับค่าจากผลการทดลองแสดงดังรูป 5.24



รูปที่ 5.24 แสดงกราฟของกระแสไฟฟ้าจากการทดลอง และแบบจำลองทางทฤษฎีหลังปรับค่า

เมื่อทำการปรับค่าคาบของกระแสไฟฟ้าจากแบบจำลองทางทฤษฎีให้พอดีกับค่าจากการทดลองได้ ต่อไปค่าจากแบบจำลองทางทฤษฎีนั้นให้ดูค่าของกระแสไฟฟ้าเป็นตัวกำหนด

จากสมการที่ 3.24 กำหนดค่า α ในสมการเพื่อดูการเคลื่อนที่ของพลาสมา ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.25 และนำผลที่ได้เทียบกับค่าของกระแสไฟฟ้าจากสมการที่ 3.1



รูปที่ 5.25 แสดงกราฟแบบจำลองทางทฤษฎีของกระแสไฟฟ้าและการเคลื่อนที่ของพลาสมาที่

$$\alpha=0.001$$

จากตัวอย่างผลที่ได้เห็นว่าการเคลื่อนพลาสมาอยู่นอกช่วงที่สามารถใช้ได้ของแบบจำลอง เพราะแบบจำลองในช่วงที่ใช้ได้นั้นเพียงช่วงคาบแรกของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นต่อไปเราพิจารณาแบบจำลองทางทฤษฎีแบบถัดมา

โดยเริ่มจากสมการที่ 3.14, 3.41 และ 3.49 ทำการแทนค่าตัวแปรในสมการ และทำการหาค่าของ t_0 และ L_0 ผลจากการทดลองได้ค่ามีค่า 11.4 ไมโครวินาที

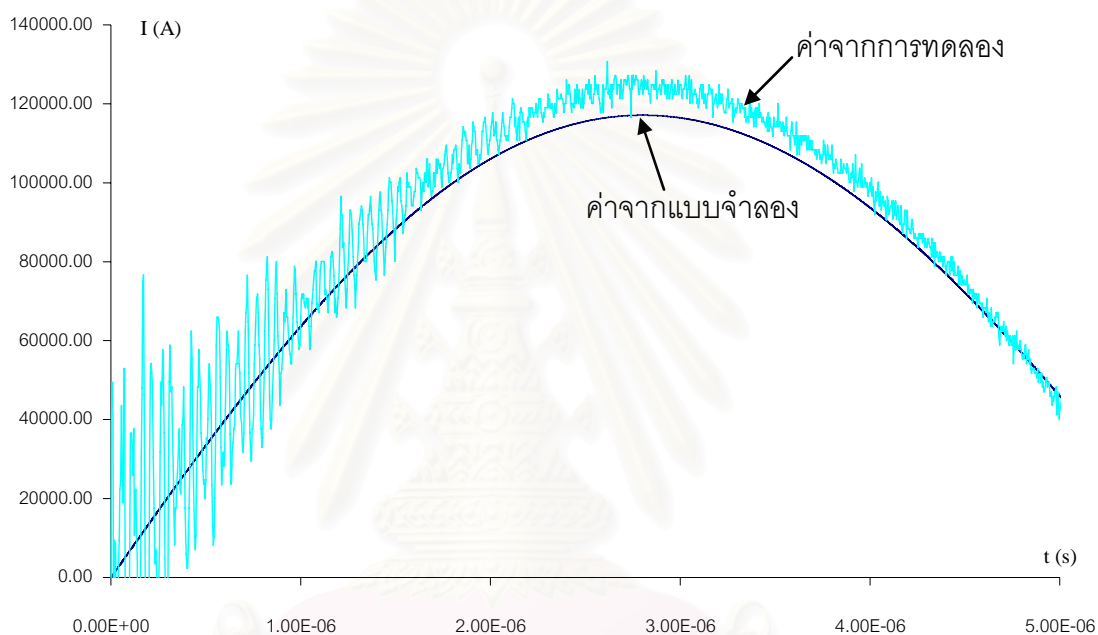
$$\text{จาก } t_0 = \frac{T}{2\pi} = 1.81 \times 10^{-6} \text{ และ } t_0 = \sqrt{(L_0 C_0)}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{t_0^2}{C_0} = \frac{T^2}{4\pi^2 C_0} \\ &= \frac{(11.4 \cdot 10^{-6})^2}{4\pi^2 \cdot 12 \cdot 10^{-6}} \\ &= 861.85 \text{ nH} \end{aligned}$$

จากนั้นกำหนดค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสพลาสมา กับกระแสไฟฟ้าในวงจร (m), อัตราส่วนมวล (f_m) เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในวงจร การเคลื่อนที่ของพลาสมา

ซึ่งในที่นี้ใช้เป็นอาร์กอนพลาสมา และการเคลื่อนที่ของคลื่นกระแทก โดยเริ่มจากการดูผลของกระแสไฟฟ้า เมื่อค่าของผลจากแบบจำลองทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองแล้วจึงดูผลของการเคลื่อนที่ของพลาสมา และการเคลื่อนที่ของคลื่นกระแทก ผลที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎีของกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูป 5.26 ซึ่งค่าที่ได้คือ $f_m=0.08$, $m=0.0001$



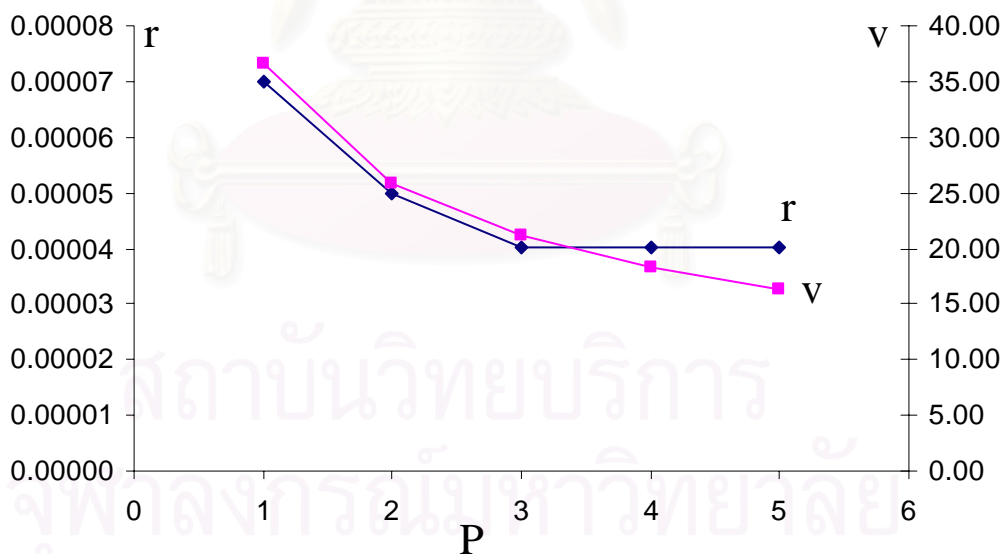
รูปที่ 5.26 แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าจากการทดลองและแบบจำลองทางทฤษฎีที่ค่า $f_m=0.08$, $m=0.0001$

ค่าตัวแปรที่กำหนดขึ้นในการหาค่าจากแบบจำลองทางทฤษฎี เมื่อได้ค่าที่ทำให้ผลของแบบจำลองทางทฤษฎีมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองแล้ว ค่าที่ได้ถือว่าเป็นค่าคงที่สำหรับใช้ในการคำนวณ ซึ่งสามารถนำไปใช้ต่อในการคำนวณอื่นๆ ได้

จากแบบจำลองทางทฤษฎีที่ทำกรหาค่า f_m , m แล้วแทนค่าที่ใช้ในการทดลอง และทำการเปลี่ยนค่าความดันในช่วงของการทดลอง เพื่อหาความเร็วและตำแหน่งสุดท้ายของอาร์กอนพลาสมา ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.9

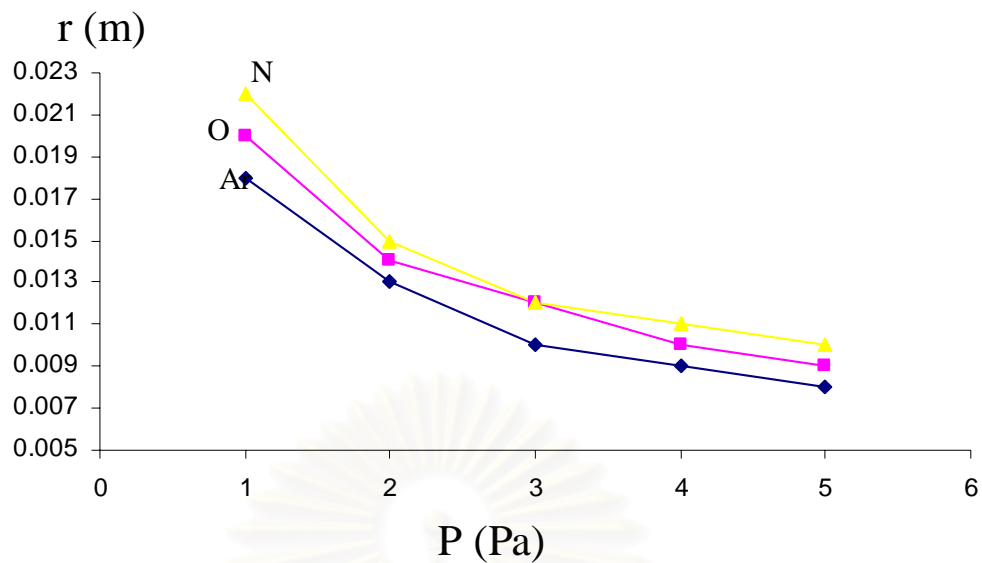
P (Pa)	r (m)	v (m/s)
1	0.00007	36.53
2	0.00005	25.83
3	0.00004	21.09
4	0.00004	18.27
5	0.00004	16.33

ตารางที่ 5.9 แสดงผลของความดันกับระยะทางที่เคลื่อนที่ได้และความเร็วของอาร์กอนพลาสมาที่มีค่ามากที่สุด

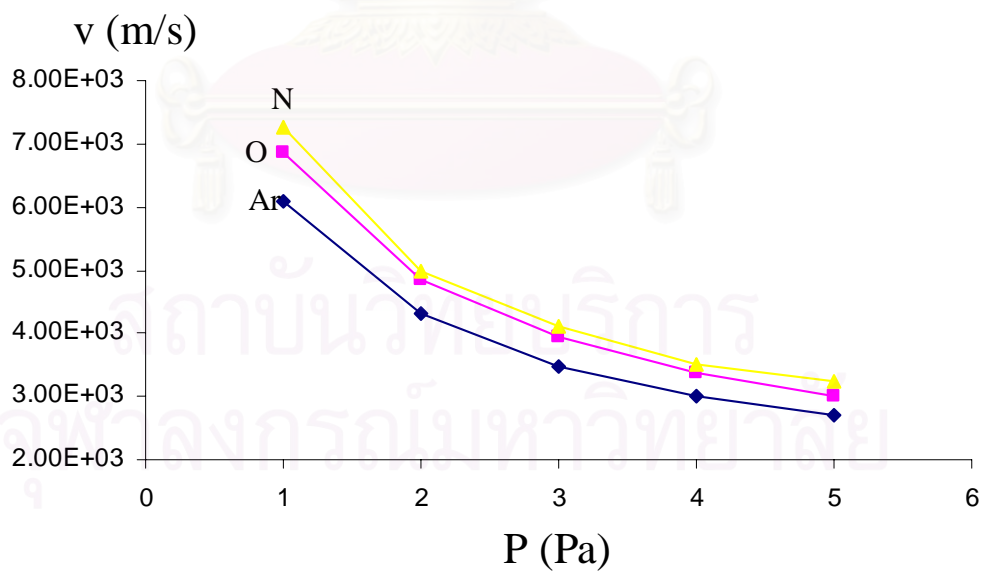


รูปที่ 5.27 แสดงกราฟระหว่างความดันกับระยะทางที่เคลื่อนที่ได้และความเร็วของอาร์กอนพลาสมา

จากนั้นทำการเปลี่ยนชนิดของก๊าซเพื่อดูการเคลื่อนที่ของพลาสมาที่เกิดขึ้น โดยเปรียบเทียบกัน 3 ก๊าซคือ อาร์กอน ออกซิเจน และไนโตรเจน ผลที่ได้ดังแสดงดังรูปที่ 5.28 -5.29



รูปที่ 5.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะทางที่พลาสมาเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 5.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเร็วของพลาสมา

ผลจากแบบจำลองทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นความเร็วของพลาสมาลดลง และระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ลดลงด้วย จากแบบจำลองทำให้เห็นว่าขนาดของเครื่องที่ตาพินซ์ที่ใช้ทำการทดลองนี้พลาสมาไม่สามารถเคลื่อนที่ไปถึงกึ่งกลางท่อควอทซ์ได้ และเมื่อพิจารณาถึงมวลของก๊าซที่แตกตัวเป็นพลาสมา เห็นว่ามวลของก๊าซเพิ่มขึ้น ความเร็ว และระยะทางที่เคลื่อนที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นความเร็วและระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ของ อาร์กอน < ออกซิเจน < ไนโตรเจน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

6.1 สมบัติโดยรวมของเครื่องที่ตาพินซ์

ในการศึกษาเครื่องที่ตาพินซ์กระแสไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญ เพราะกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในเครื่องที่ตาพินซ์เป็นสิ่งที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก เพื่อให้ก๊าซแตกตัวเป็นพลาสมา และกระแสไฟฟ้ายังใช้เป็นตัวเปรียบเทียบหลัก ในการพิสูจน์ของแบบจำลองทางทฤษฎี

สำหรับในการทดลอง และในการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองทางทฤษฎีนั้น ความต่างศักย์ที่ให้กับตัวเก็บประจุความจุสูงคือ 20 กิโลโวลต์ ค่าความจุประจุ 12 ไมโครฟารัด ซึ่งจากการทดลองวัดค่ากระแสไฟฟ้า โดยใช้ขดลวดโรโกวสก็ได้ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดลองเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 128.365 กิโลแอมป์ และได้อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าสูงสุด กับความต่างศักย์สูงสุดค่าแรกที่วัดได้จากขดลวดโรโกวสที่มีค่าเป็น 5.888 กิโลแอมป์ต่อโวลต์

6.2 สมบัติของพลาสมาที่เกิดภายในเครื่องที่ตาพินซ์

ในวิทยานิพนธ์นี้สมบัติของพลาสมาที่ต้องการทราบคือ อุณหภูมิอิเล็กตรอน ในการวัดได้ใช้หัววัดทางไฟฟ้า และสเปคโตรมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ในการวัดค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอน ซึ่งผลที่ได้จากการวัดโดยเครื่องมือทั้งสองได้นำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาวิธีการวัดที่สะดวกสำหรับการนำไปใช้กับงานอื่นต่อไป

โดยการหาค่าของอุณหภูมิอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมาที่ความดัน 1 ปาสคาล ค่าที่ได้จากหัววัดทางไฟฟ้าเท่ากับ 138.889 eV และค่าที่ได้จากสเปคโตรมิเตอร์เท่ากับ 2.737 eV เมื่อพิจารณาถึงการสร้างพลาสมาของเครื่องที่ตาพินซ์ ผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากเครื่องที่

ตาพินซ์อาจมีผลกับการวัดโดยใช้หัววัดทางไฟฟ้า^[8] ดังนั้นในการวัดค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้สเปคโตรมิเตอร์ในการวัด

ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่ได้จากการใช้สเปคโตรมิเตอร์สำหรับการวัดพลาสมาอาร์กอน, ไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ความดัน 1-5 ปาสคาล เป็นดังตารางที่ 6.1

Pressure (Pa)	T _e (eV)		
	Ar	O	N
1	2.737	13.093	20.026
2	2.770	12.771	14.917
3	2.741	16.958	14.296
4	2.670	17.355	14.580
5	2.803	17.741	14.211

ตารางที่ 6.1 แสดงอุณหภูมิอิเล็กตรอนของก๊าซที่ความดัน 1-5 ปาสคาล

ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสำหรับอาร์กอน พลังงานที่ให้ไปนั้นใช้ในการแตกตัวเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าเพราะอาร์กอนมีมวลมาก และมีขนาดใหญ่โอกาสที่รวมตัวกับมาเป็นก๊าซหลังจากแตกตัวไปแล้วจึงมีสูง ทำให้พลังงานส่วนใหญ่ใช้ไปในการทำให้ก๊าซแตกตัว

ส่วนก๊าซออกซิเจนที่ความดันสูงค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนสูง แต่ที่ความดันต่ำค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนสูง ซึ่งตรงข้ามกับก๊าซไนโตรเจนที่ความดันสูงค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนต่ำ ความดันต่ำค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนสูง ทั้งนี้ถ้าพิจารณาโดยคิดว่าพลังงานที่ให้เข้าไปมีค่าคงที่ ที่ความดันต่ำลงค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนควรสูงขึ้น ตามลักษณะของก๊าซไนโตรเจน แต่ในกรณีของออกซิเจนคาดว่า

ที่ความดันต่ำ ออกซิเจนที่แตกตัวให้ค่าความยาวคลื่นที่ไม่ตรงกับที่ใช้ในการทดลองทำให้ค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

6.3 ค่าจากแบบจำลองทางทฤษฎี

ในการใช้แบบจำลองทางทฤษฎีเพื่อดูการเคลื่อนที่ของพลาสมา ก่อนทำการคำนวณต้องทำการปรับค่าของกระแสไฟฟ้าให้ใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองก่อน แล้วจึงนำแบบจำลองทางทฤษฎีที่ได้ไปใช้

ผลจากแบบจำลองทางที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 5 แสดงให้เห็นว่าในการคำนวณค่านั้น ต้องมีความเกี่ยวเนื่องกันระหว่างค่าของกระแสไฟฟ้าในวงจรเครื่องที่ตาพินซ์ กับการเคลื่อนที่ของพลาสมา ดังเห็นได้จากการผลของแบบจำลองทั้งสอง

จากแบบจำลองทางทฤษฎีในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กค่าตัวแปรที่ต้องทำการเทียบข้อมูลระหว่างกระแสไฟฟ้าจากการทดลอง และกระแสไฟฟ้าจากแบบจำลองคือ f_m และ m จากการเทียบข้อมูลได้ $f_m=0.08$, $m=0.0001$ เมื่อได้ตัวแปรทั้งสองแล้วจึงนำแบบจำลองไปคำนวณการเคลื่อนที่ของพลาสมาต่อไป

ผลจากแบบจำลองทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้นระยะทางที่พลาสมาเคลื่อนที่ และความเร็วของพลาสมาลดลง เมื่อเปรียบเทียบชนิดของก๊าซพบว่าการที่มีมวลโมเลกุลน้อยกว่าสามารถเคลื่อนที่ได้ไกลกว่า และมีความเร็วสูงสุดมากกว่า ซึ่งผลจากแบบจำลองทางทฤษฎีที่ได้มีความสอดคล้องกับผลของอนุกรมมิถิลิกตรอนที่วัดได้จากสเปคโตรมิเตอร์ นั่นคือเมื่อความดันหรือมวลโมเลกุลมากขึ้น ระยะทาง และความเร็วของพลาสมาลดลง

6.4 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต และการประยุกต์ใช้งาน

จากผลการทดลองในบทที่ 5 เห็นได้ว่าการวัดค่าอุณหภูมิเล็กทรอนิกส์ด้วยสเปคโตรมิเตอร์ นั้น การเลือกใช้ค่าความยาวคลื่นจากการแผ่รังสีของพลาสมา นั้นมีผลต่อค่าอุณหภูมิเล็กทรอนิกส์ คำนวณได้เป็นอย่างมาก เพื่อให้การวัดค่ามีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ควรทำการจำแนกความยาวคลื่นจากการแผ่รังสีของพลาสมา แล้วทำการคำนวณค่าอุณหภูมิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทำให้สามารถทราบค่าที่เกิดขึ้นในช่วงของการวัดได้ โดยในการจำแนกความยาวคลื่นนั้น จำเป็นต้องทำให้ก๊าซที่ต้องการใช้งานมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งอาจต้องทำการขจัดไอน้ำในอากาศ และก๊าซที่เจือปนออกให้มากที่สุด เมื่อทำให้พลาสมาที่เกิดขึ้นมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่าอุณหภูมิเล็กทรอนิกส์ได้ทุกช่วง ค่าที่ได้จากการคำนวณมีความถูกต้องมากขึ้นด้วย

สำหรับการวัดค่าอุณหภูมิเล็กทรอนิกส์ด้วยหัววัดทางไฟฟ้า ถ้าสามารถหาผลที่เกิดจากสนามแม่เหล็กได้ ซึ่งถ้าผลที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่เป็นค่าคงที่ หรือเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับค่าของสนามแม่เหล็ก อาจสามารถนำหัววัดทางไฟฟ้ามาใช้ในการวัดค่าได้

ในส่วนของแบบจำลองทางทฤษฎีอาจคำนวณค่าการถ่ายเทพลังงานได้ เนื่องจากในการทดลองสามารถวัดค่าพลังงานของพลาสมาได้ และทราบค่าพลังงานที่ให้กับเครื่องที่ตาพินซ์ ดังนั้น ถ้าคำนวณจากค่าพลังงานที่ให้เข้าไปเปรียบเทียบกับค่าพลังงานของพลาสมาจากแบบจำลองได้ สามารถนำผลที่ได้จากแบบจำลองสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองได้ ซึ่งเป็นการยืนยันแบบจำลองว่ามีความถูกต้องอีกด้วย

ในการประยุกต์ใช้งานเครื่องที่ตาพินซ์ที่ได้มีการทดลองไปแล้วนั้นเช่น การศึกษาสมบัติและสัณฐานวิทยาของเส้นใยประดิษฐ์ที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยพลาสมา โดยนำเส้นใยพอลิโพรพิลีน เส้นใยพอลิเอสเตอร์ และเส้นใยเรยอน มาดัดแปรด้วยเครื่องที่ตาพินซ์ ซึ่งผลิตพลาสมาไนโตรเจน

และพลาสติกออกซิเจน ที่จำนวนครั้งในการปรับสภาพต่างๆกัน ผลจากการปรับสภาพทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระ ซึ่งสามารถเห็นได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชนิดของก๊าซ และจำนวนครั้งของการปรับสภาพด้วยพลาสติก มีผลต่อสมบัติด้านแรงดึง ความหนาแน่นเชิงเส้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ในขณะที่สมบัติด้านการตีไฟของเส้นใยที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปร มีค่าใกล้เคียงกัน เส้นใยที่ผ่านการดัดแปรทั้งหมดมีคุณลักษณะในการชอบน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากการเกิดหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำขึ้นบนพื้นผิว ซึ่งสามารถยืนยันได้จากอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี^[20]



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Allen H. Boozer. Physics of Magnetically Confined Plasma. Reviews of Modern Physics. 76, (October 2004) : 1071-1138
2. Simon, Editor, W. B. Thompson, Editor, and J. L. Hirshfield, Reviewer W.B. Thompson. Advances in Plasma Physics, Vol. I. American Association of Physics Teachers 1969
3. M. A. Eissa. Plasma Parameter in The Thetatron. Laser and Plasma Technology, 403-411. Singapore : World Scientific Publishing, 1988.
4. Li Yin-an, Ye Mao-Fu, and Xu Feng-zhi. Introduction to Theta-pinch Discharge. Asian-African Association for plasma training research & Training center Institute of physics, Chinese Academy of Sciences Beijing. 1-17
5. Ye Mao-fu. Discharge Current Measurement By Rogowski Coil. Proceedings of Plasma Physics: Diagnostics. (30 October-9 November 1989) : 46-50.
6. Zhang Bao-Zhen. Magnetic Probe and Its Application. Proceedings of Plasma Physics : Diagnostics. (30 October-9 November 1989) : 20-27.
7. Francis F. Chen. Langmuir Probe Diagnostics. Mini-Course on Plasma Diagnostics, IEEE-ICOPS meeting. Jeju, Korean, June 5, 2003.
8. Yuan Ding-pu. Electric Probes. Proceedings of Plasma Physics : Diagnostics. (30 October-9 November 1989) : 37-45.

9. J. Mirapeix, A. Cobo, O.M. Conde, C. Jaúregui, and J.M. López-Higuera. Real-time arc welding defect detection technique by means of plasma spectrum optical analysis. Sciencedirect. 2000:1-5
10. Li Zan-liang. Spectroscopic Plasma Diagnostic. Proceedings of Plasma Physics : Diagnostics. (30 October-9 November 1989) : 66-78.
11. S. Lee, B.C. Tan, C.S. Wong, and A.C. Chew. Laser and plasma Technology. Proc. Second Tropical College on Applied Physics: World Scientific, 1986.
12. Marek Rabin'ski and Krzytof Zdunek. Snow Plow Model of IPD Discharge. Sciencedirect, 70, (2003) : 303-306.
13. AAAPT, TWELVE YEARS OF UNU/ICTP PFF-A REVIEW, The United Nation University, 1963.
14. C. X. Ong, C. S. Wong and A. C. Chew. Characteristics of A Torodal Helium Plasma. Second Tropical Collage on Applied Physics Laser and Plasma Technology. (17 March – 5 April 1987) : 441-448.
15. Patrick D. Pedrow, Member, IEEE, and Abutaher M. Nasiruddin, Student Member, IEEE. Experimental Study of CF_4 Conical Theta Pinch Plasma Expanding into Vacuum. IEEE Transaction on Plasma Science. 17, 1, (February 1989) : 17-23.
16. A.Trigueiros, S.-G. Pettersson and J. G. Reyna Almandos. Transitions within the $n=4$ complex of Kr VII obtained from a Theta-Pinch Light Source. Physics Scripta. 34, (1986) : 164-166.

17. F.R.T. Luna, G.H. Cavalcanti and A.G. Trigueiros. Atheta-pinch as a spectroscopic light source. J. Phys. D: Appl. Phys. 31, (1998) : 866-872
18. Patrick D. Pedrow, Kumud O. Goyal, R. Mahalingam, and Mohamed A. Osman. Explosion model applied to an intense pulsed plasma source for thin film deposition. IEEE Transactions on plasma science, 25, 1, (February 1977) : 89-96
19. R. Alani, H. Azodi, M. Naraghi, B. Safaii and A. Torabi-Fard. Material testing in a linear theta pinch. J. of Nuc. Material. 13, (1983) : 25-32
20. P. Khaymapanya, P. Kamsing, R. Mongkolnavin and V. Pimpan. 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).



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

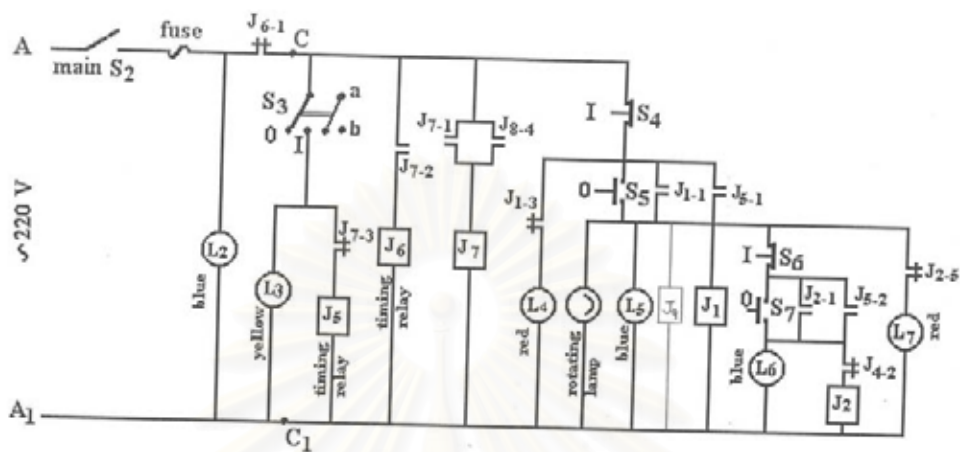
ตารางแสดงค่าของสเปกตรัมของพลาสติกแต่ละชนิด

	λ (nm)	A	E (1/cm)	g
Ar	329.364	1.70E+08	190592.2305	4
	330.188	2.00E+08	204655.7880	5
O	777.539	3.69E+07	86625.7570	3
	520.665	3.33E+07	233430.5300	4
N	648.481	4.20E+06	110247.2880	8
	661.362	1.58E+07	211827.6700	5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

วงจรควบคุมเครื่องชาร์จประจุความต่างศักย์สูง

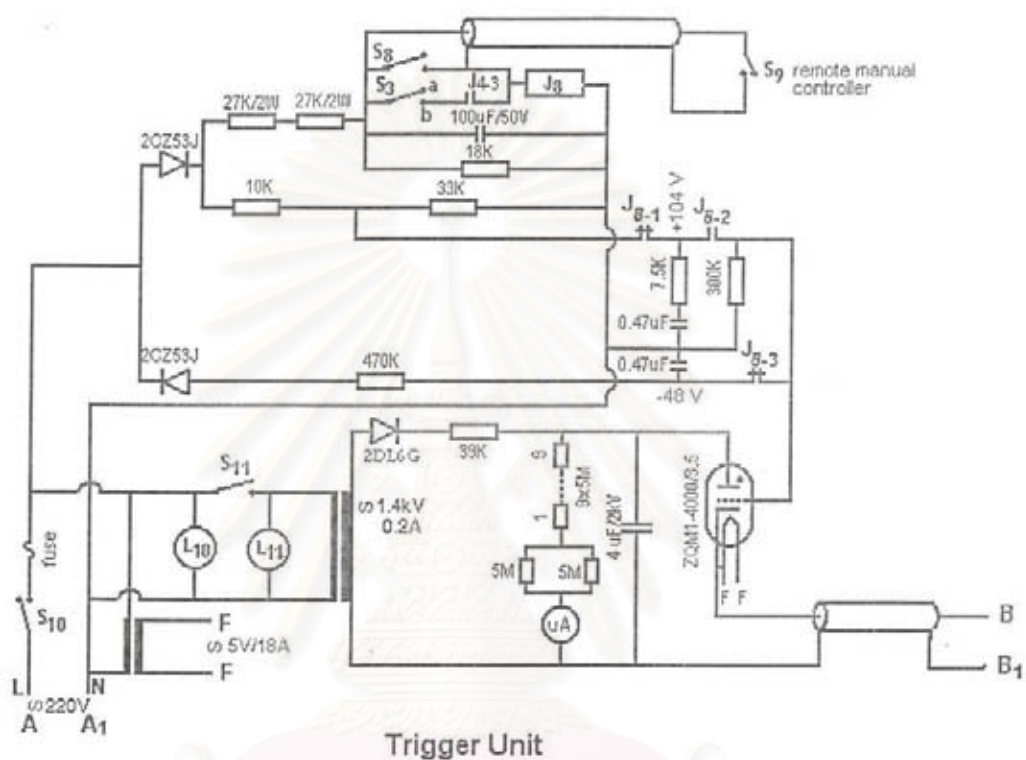


Control unit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทรiggerเกอร์



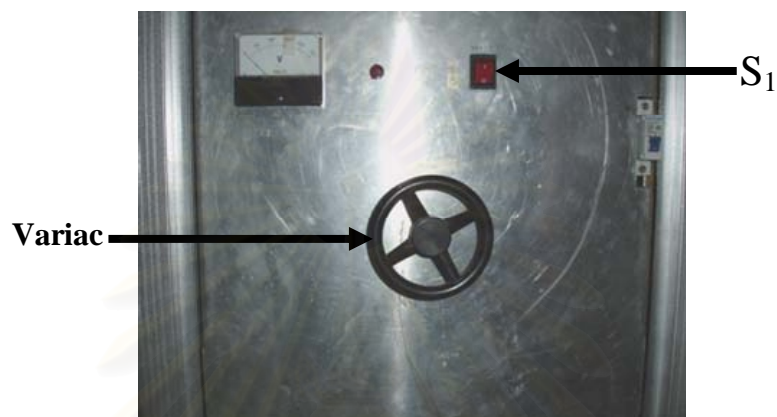
Trigger Unit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ขั้นตอนการเปิดเครื่องควบคุมของเครื่องที่ตาพินซ์

1. เปิดสวิตช์หมายเลข 1 (S_1) ซึ่งเป็นสวิตช์หลัก เพื่อจ่ายไฟให้แก่ส่วนต่างๆ (รูปที่ 1)



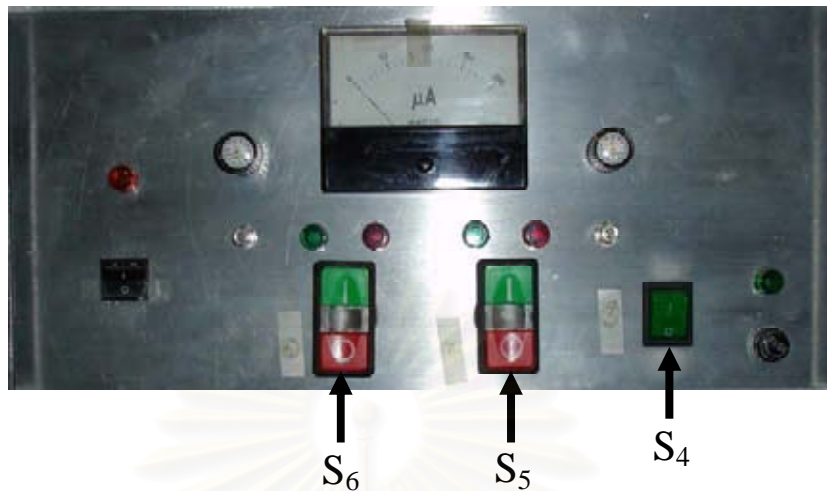
รูปที่ 1

2. เปิดสวิตช์หมายเลข 2 (S_2) เพื่อทำการเตรียมทรานซิสเตอร์สัญญาณภาคเป็นเวลาประมาณ 1 นาที แล้วจึงเปิดสวิตช์หมายเลข 3 (S_3) (รูปที่ 2)



รูปที่ 2

3. เปิดสวิตช์หมายเลข 4 (S_4) เพื่อเป็นการเปิดเครื่องควบคุมการชาร์จประจุ (รูปที่ 3)



รูปที่ 3

4. ปรับค่าความต่างศักย์ที่ต้องการใช้ในการชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุความจุสูง โดยการปรับแวลูแอค (รูปที่ 1)
5. กดสวิตช์หมายเลข 5 สีแดง (ด้านล่าง) เพื่อทำการเปิดเครื่องชาร์จ และกดสวิตช์หมายเลข 6 สีแดง (ด้านล่าง) เพื่อทำการชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุความจุสูง (รูปที่ 3)
6. เมื่อชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุความต่างศักย์สูงจนถึงความต่างศักย์ที่ต้องการ กดสวิตช์หมายเลข 6 สีเขียว (ด้านบน) เพื่อหยุดการทำงานของเครื่องชาร์จประจุ
7. กดสวิตช์ทริกเกอร์หมายเลข 7 (S_7) เพื่อให้เครื่องที่ตาพินซ์ทำงาน (รูปที่ 2)
8. ในกรณีที่มีเหตุฉุกเฉินเกิดขึ้นให้กดสวิตช์หมายเลข 5 สีเขียว (ด้านบน) เพื่อให้เครื่องควบคุมหยุดการทำงาน และดัมสวิตช์ปิดให้กระแสไฟฟ้าไหลออกจากตัวเก็บประจุความจุสูงลงพื้นดิน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล นายไพรัช คำสิงห์

การศึกษา ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2544, จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนพินุลวิทยาลัย จ. ลพบุรี ในปี พ.ศ. 2540, จบการศึกษาระดับมัธยมต้นจากโรงเรียนสุธีวิทยาคม จ. สระบุรี ในปี พ.ศ. 2538

ผลงานที่ผ่านมา

1. A Study of Coating Method for Polymer by using Plasma Focus Device, โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ปี 2543, จุฬาฯ

2. Surface Cleaning of Material Using Plasma Focus Device, Journal of Scientific Research Chulalongkorn University (Section T), 3(1) 2004 p. 11-18

3. V. Pimpan, S. Chuenchon, P. Kamsing and R. Mongkolnavin, "Properties and Morphology of Surface-Modified Polypropylene Fibers Using Theta-pinch Device", Abstracts to International Meeting on Frontiers of Physics 2005, 25-29 July 2005, Kuala Lumpur, Malaysia.

4. P. Khaymapanya, P. Kamsing, R. Mongkolnavin and V. Pimpan, "Surface Modification of Polyester Fabric Using Plasma Generated from Theta-Pinch Device", Abstracts to The 14th Academic Symposium of Faculty of Science, Chulalongkorn University, 16-17 March 2006, Bangkok, Thailand.

5. V. Pimpan, R. Mongkolnavin, O. Siriparu, O. Napavejvij and P. Kamsing, "Improvement of Moisture Absorption of Nylon 6 Fiber by Surface Modification Using Pulsed-plasma Generated from Theta-Pinch Device", Abstracts to Siam Physics Congress 2006, 23-25 March 2006, Chonburi, Thailand.

ประวัติการทำงาน

- ผู้ช่วยสอนวิชา ปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 และ 2 ระดับปริญญาตรี ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2546-2548

- ผู้ประสานงาน The Regional Conference on Plasma Research in 21st Century. Bangkok, Thailand, May 7-12, 2000.