

การตรวจสอบการแผ่รังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสติกขนาดเล็ก



นาย จิตติศักดิ์ กุลเกล้าปภากร

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-5717-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INVESTIGATION OF X-RAY EMISSION FROM A SMALL PLASMA FOCUS DEVICE



Mr. Titisak Kulkoulprakar

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

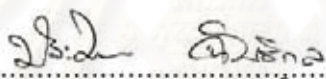
ISBN 974-17-5717-4

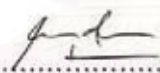
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบการแผ่รังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสมาไฟกัลขนาดเล็
โดย นาย ชูศักดิ์ กุลเกล้าปราการ
สาขาวิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน

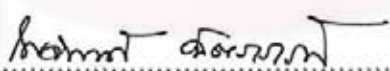
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปียมศักดิ์ เมณะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประไพพรรณ จันธิกุล)


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


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ไชยพงศ์ จิตราภรณ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ริติ บวรรัตนารักษ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฐิติศักดิ์ กุลเกล้าปรภากร : การตรวจสอบการแผ่รังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสมาโฟกัสขนาดเล็ก.
(INVESTIGATION OF X-RAY EMISSION FROM A SMALL PLASMA FOCUS DEVICE)

อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน, 102 หน้า. ISBN 974-17-5717-4.

ในงานวิจัยนี้ได้ตรวจสอบการแผ่รังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสมาโฟกัสขนาดเล็ก พลังงาน 2.3 kJ ตามการเปลี่ยนชนิดของก๊าซ และพารามิเตอร์ของระบบการเกิดพลาสมาโฟกัส ภายใต้ความดันก๊าซ 0.5–2.5 mbar วิธีการการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลาได้ถูกนำมาใช้วัดคุณสมบัติของอิเล็กตรอนในพลาสมา และวิธีการถ่ายภาพโดยรังสีเอกซ์แบบรวมเวลาได้นำมาใช้เพื่อถ่ายภาพจุดโฟกัส เมื่อเทียบคุณสมบัติของอิเล็กตรอนในพลาสมาของก๊าซทั้ง 3 ชนิด พบว่าอาร์กอนพลาสมาทำให้เกิดรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องในช่วงของรังสีเอกซ์แบบอ่อนและแบบเข้ม ส่วนก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนทำให้เกิดรังสีเอกซ์แบบอ่อนที่มีความเข้มน้อยกว่า โดยจะเกิด CuK_{α} มากกว่า และจากภาพถ่ายจุดโฟกัส ก๊าซอาร์กอนให้จุดโฟกัสที่มีลักษณะเป็นจุดอย่างชัดเจน เรียงตัวในแนวตั้งเหนือปลายแอโนด โดยมีความยาวช่วงจุดโดยเฉลี่ย 5.5–13 mm จุดโฟกัสของออกซิเจนพลาสมามีลักษณะเป็นลำยาว จุดโฟกัสของก๊าซไนโตรเจนมีลักษณะเช่นเดียวกับก๊าซออกซิเจน โดยจะมีจุดที่เข้มที่สุดอยู่ด้านล่างลำของจุดโฟกัส ความเข้มของจุดโฟกัสของก๊าซอาร์กอนมีความเข้มมากที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา...ฟิสิกส์.....ลายมือชื่อนิสิต 
สาขาวิชา...ฟิสิกส์.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ปีการศึกษา...2548.....

4572287223 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: PLASMA FOCUS / X-RAY EMISSION / TIME INTEGRATE X-RAY IMAGING /
TIME RESOLVED X-RAY MEASUREMENTS / FILTER RATIO METHOD

TITISAK KULKOULPRAKAR : INVESTIGATION OF X-RAY EMISSION FROM
A SMALL PLASMA FOCUS DEVICE. ASST. PROF. RATTACHAT MONGKOLNAVIN,
Ph.D, 102 pp. ISBN 974-17-5717-4.

In this research, the X-ray emission from a small 2.3 kJ plasma focus is investigated by varying type of gas and operating parameters of the plasma focus operating at the pressure between 0.5 to 2.5 mbar. Time-Resolved X-ray measurements are used to measure the electron temperature and Time-Integrated X-ray imaging is used to show the focusing point. The electron temperature of argon plasma significantly relates to the X-ray signals obtained. It is found that X-ray from argon is a combination of soft and hard X-rays. For oxygen and nitrogen, the X-ray from CuK_{α} is found to be dominant. The intensity of X-ray from argon is higher than oxygen and nitrogen. Multiple Focusing points are shown to be vertically aligned on top of the anode with an average length between 5.5–13.5 mm. Oxygen and Nitrogen gas produce long columnar structure. It is found that argon plasma produces most intense focusing spots.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Physics.....Student's signature.....*Titisaak Kulkoulpakar*
Field of study...Physics.....Advisor's signature.....*R. Mongkolnavin*
Academic year...2005.....

กิตติกรรมประกาศ

กว่าจะถึงวันนี้ ต้องผ่านอุปสรรคที่แสนสาหัสที่น่าับประการ แต่ก็ผ่านพ้นมาจนได้ จนทำให้ในที่สุดงานวิจัยชิ้นนี้ประสบความสำเร็จลงจนได้ ซึ่งต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ ความเข้าใจ แนวคิดในการทำงาน ในการแก้ปัญหา และให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ พร้อมทั้งยังให้เกียรติและให้สติ แก่ลูกศิษย์คนนี้เสมอมา จนประสบความสำเร็จได้ในวันนี้ และขอขอบคุณ Prof. C. S. Wong และ Prof. S. Lee ที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ เป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ คุณแม่และคุณพ่อ ที่ให้ความรัก ความห่วงใย ความเข้าใจ กำลังใจ แนวคิด และเตือนสติ รวมทั้งให้ทุนค่าเล่าเรียนแก่ลูกคนนี้เสมอ ทำให้มีกำลังใจในการ วิทยานิพนธ์นี้เพื่อเป็นของขวัญชิ้นหนึ่ง ที่ลูกคนนี้สามารถจะมอบตอบแทนให้คุณแม่ และคุณพ่อได้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ศักดิ์ ชัยชิต อาจารย์ประจำภาควิชา ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้ สอนให้มีคุณธรรมในการทำงานต่าง ๆ อีกทั้งให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือลูกศิษย์คนนี้ตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณดุสิต งามรุ่งโรจน์ และคุณไพรัช คำสิงห์ ซึ่งเป็นพี่ในแล็บที่ให้ความรู้ ให้คำแนะนำ ช่วยแก้ปัญหา ให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ อย่างมากมายมาโดยตลอด ร่วมทุกข์ ร่วมสุขด้วยกันมา และยังเสียสละเวลาเป็นเพื่อนช่วยทำการทดลองด้วยกันตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณทวีศักดิ์ จันทร์หอม เจ้าหน้าที่หน่วยพัฒนาเครื่องมือวิทยาศาสตร์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยแก้ปัญหา และให้ความช่วยเหลือในการสร้างชิ้นงานจำนวนมากที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งต้องเสียสละเวลา ท่วมเทแรงกายแรงใจ กว่าจะได้ชิ้นงานที่ดี ๆ ออกมาชิ้นหนึ่ง

ขอขอบคุณ พี่น้องผองเพื่อนชาวฟิสิกส์ทุกคน และทุก ๆ คนในแล็บ ที่ให้ความช่วยเหลือกัน และให้กำลังใจกันและกัน ในยามที่เหนื่อยล้าเสมอมา

ขอขอบคุณ แหล่งเงินทุนจากทุกภาคส่วน อันได้แก่ ทุนพัฒนาอาจารย์สาขาขาดแคลน มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ทบวงมหาวิทยาลัย) ทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย และทุนอุดหนุนวิจัย จากภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มีส่วนช่วยให้ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงลงได้

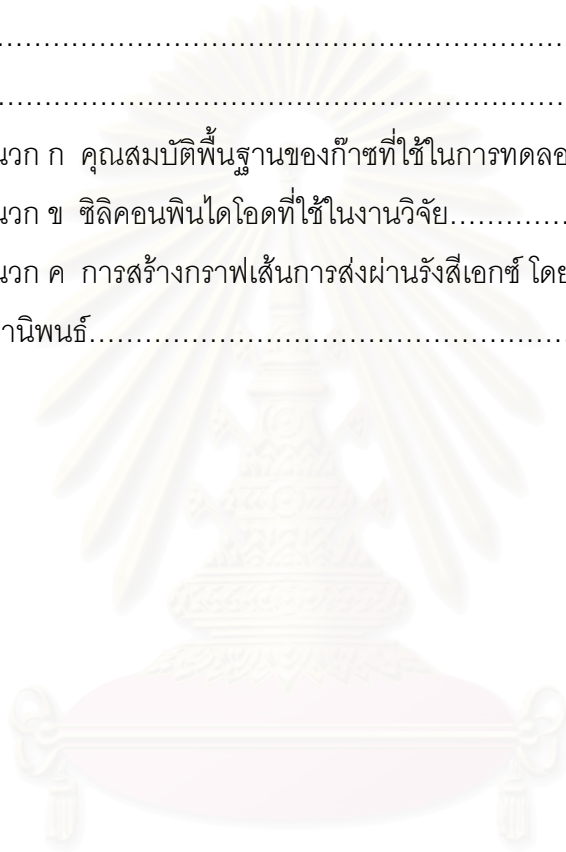
สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เครื่องพลาสมาไฟกัสและการแผ่รังสีเอกซ์.....	6
2.1 เครื่องพลาสมาไฟกัส.....	6
2.2 พลศาสตร์ของพลาสมาไฟกัส.....	10
2.2.1 ช่วงแตกตัว.....	10
2.2.2 ช่วงแอคเซียลรันดาวน์.....	10
2.2.3 ช่วงแนวรัศมี.....	11
2.3 การแผ่รังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสมาไฟกัส.....	12
บทที่ 3 การแผ่รังสีจากพลาสมา.....	15
3.1 แบบจำลองการแผ่รังสีจากพลาสมา.....	16
3.1.1 แบบจำลองพลาสมา.....	16
3.1.2 การคำนวณจากแบบจำลองโคโรนา.....	18
3.1.3 การคำนวณสถานะไอออไนซ์.....	20
3.2 การแผ่รังสีจากพลาสมา.....	23
3.2.1 เบรมสตราลุง.....	23

3.2.2	รีคอมปิเนชัน.....	24
3.2.3	การสลายตัวแผ่รังสี.....	25
3.3	การคำนวณเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์โดยใช้แบบจำลองโคโรนา.....	26
บทที่ 4 เครื่องพลาสมาไฟกัสและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....		34
4.1	เครื่อง UNU/ICTP พลาสมาไฟกัส.....	34
4.2	การวัดความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมาและกระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมา.....	39
4.2.1	การวัดความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมา.....	39
4.2.2	การวัดกระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมาและการสอบเทียบโรโกสกีคอยล์...41	
4.3	พารามิเตอร์ของเครื่อง UNU/ICTP พลาสมาไฟกัส.....	45
4.4	การวัดรังสีเอกซ์.....	46
4.4.1	การวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา.....	47
4.4.1.1	สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง.....	47
4.4.1.2	การติดตั้งและการสอบเทียบสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์.....	49
4.4.1.3	วิธีอัตราส่วนตัวกรอง.....	51
4.4.2	การถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลา.....	52
4.5	สรุปการตรวจสอบการแผ่รังสีเอกซ์.....	55
บทที่ 5 การทดลอง ผลการทดลอง และอภิปรายผล.....		55
5.1	การวัดความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมาภายใต้พารามิเตอร์ต่าง ๆ.....	56
5.1.1	การวัดความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมา.....	56
5.1.2	ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลองวัดความต่างศักย์.....	56
5.2	การวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา.....	62
5.2.1	การวัดอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา.....	62
5.2.2	ผลการทดลอง และอภิปรายผลการวัดอุณหภูมิของอิเล็กตรอน ในพลาสมา.....	64
5.3	การถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลา.....	78
5.3.1	การทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์.....	79
5.3.2	การทดลอง และอภิปรายผลการถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลา.....	80
5.4	การทดลองเปรียบเทียบสัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์ และภาพถ่ายรังสีเอกซ์.....	86

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	93
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	93
6.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	95
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	95
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก คุณสมบัติพื้นฐานของก๊าซที่ใช้ในการทดลอง.....	101
ภาคผนวก ข ซิลิคอนพินไดโอดที่ใช้ในงานวิจัย.....	102
ภาคผนวก ค การสร้างกราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ โดยวิธีอัตราส่วนตัวกรอง.....	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	106



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนภาพภาพโครงสร้างเชิงเรขาคณิตของเครื่องพลาสมาไฟกัสทั้ง 2 แบบ ภาพซ้ายเป็นแบบแมทเธอร์ ($d/l > 1$) และภาพขวาเป็นแบบฟิลิปอบ ($d/l < 1$).....7	
รูปที่ 2.2 แผนภาพโครงสร้างภายในของเครื่องพลาสมาไฟกัสแบบแมทเธอร์.....9	
รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายโครงสร้างภายในของเครื่องพลาสมาไฟกัสที่ใช้ในงานวิจัย.....9	
รูปที่ 2.4 แผนภาพลักษณะลำดับกระบวนการเกิดพลาสมาในเครื่องพลาสมาไฟกัส.....12	
รูปที่ 2.5 แผนภาพช่วงสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ14	
รูปที่ 3.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนไอออนที่ถูก ไอออนไนซ์ไปสู่สถานะไอออนไนซ์ที่ z ของไนโตรเจนพลาสมา จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองโคโรนา.....21	
รูปที่ 3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนไอออนที่ถูก ไอออนไนซ์ไปสู่สถานะไอออนไนซ์ที่ z ของออกซิเจนพลาสมา จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองโคโรนา.....22	
รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนไอออนที่ถูก ไอออนไนซ์ไปสู่สถานะไอออนไนซ์ที่ z ของอาร์กอนพลาสมา จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองโคโรนา.....22	
รูปที่ 3.4 แผนภาพความเข้มของรังสีเอกซ์ $P(\lambda)$ แบบหลายความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ.....28	
รูปที่ 3.5 กราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของอาร์กอนพลาสมาจากแบบจำลองโคโรนา โดยกราฟในรูป (ก) กราฟที่เกิดจาก PST แบบเบรมสตราลุงและรีคอมบิเนชัน (ข) กราฟที่เกิดจาก PST แบบเบรมสตราลุงเท่านั้น.....32	
รูปที่ 3.6 กราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของพลาสมาจากแบบจำลองโคโรนา โดยกราฟในรูป (ก) กราฟสำหรับออกซิเจนพลาสมา (ข) กราฟสำหรับไนโตรเจนพลาสมา.....33	
รูปที่ 4.1 แผนภาพผังโครงสร้างโดยรวมของระบบเครื่องพลาสมาไฟกัส.....36	
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายเครื่องพลาสมาไฟกัสที่ใช้ในงานวิจัย.....37	
รูปที่ 4.3 แผนภาพวงจรไฟฟ้าของเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูง.....38	
รูปที่ 4.4 แผนภาพลักษณะโครงสร้างภายในของแก๊ปสุญญากาศ.....38	
รูปที่ 4.5 แผนภาพด้านซ้ายวงจรแบ่งความต่างศักย์ของโพรวัดความต่างศักย์ และแผนภาพด้านขวาวงจรลดทอนสัญญาณ 10 เท่า.....40	

รูปที่ 4.6 แผนภาพส่วนประกอบของโพรบวัดความต่างศักย์.....	41
รูปที่ 4.7 แผนภาพการต่อวงจรโรโกสกีคอยล์เข้ากับออสซิลอสโคป.....	42
รูปที่ 4.8 แผนภาพโครงสร้างของวงจรสมมูลของโรโกสกีคอยล์.....	42
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายซิลิกอนพินไดโอดรุ่น BPX65.....	47
รูปที่ 4.10 แผนภาพผังวงจรการต่อซิลิกอนพินไดโอดเพื่อเป็นสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์.....	47
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง.....	48
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงสภาวะไวของ BPX65 ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0–40 Å	48
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงสภาวะไวของพินไดโอดที่กั้นด้วยวัสดุและความหนาต่าง ๆ กัน.....	50
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายกล้องรูเข็มสำหรับรังสีเอกซ์.....	52
รูปที่ 4.15 แผนภาพลักษณะเส้นทางเดินของแสงเมื่อผ่านรูเข็ม.....	52
รูปที่ 5.1 แผนภาพผังรูปแบบลำดับการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	55
รูปที่ 5.2 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ต่อเวลา (V/s) ของอาร์กอนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–3.0 mbar	58
รูปที่ 5.3 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ต่อเวลา (V/s) ของออกซิเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–3.0 mbar	59
รูปที่ 5.4 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ต่อเวลา (V/s) ของไนโตรเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–3.0 mbar	60
รูปที่ 5.5 กราฟแนวโน้มสัญญาณความต่างศักย์ต่อเวลา (V/s) ของอาร์กอนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar	61
รูปที่ 5.6 กราฟแนวโน้มสัญญาณความต่างศักย์ต่อเวลา (V/s) ของออกซิเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar	61
รูปที่ 5.7 กราฟแนวโน้มสัญญาณความต่างศักย์ต่อเวลา (V/s) ของไนโตรเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar	62
รูปที่ 5.8 แผนภาพลักษณะการติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง และกล้องรูเข็มสำหรับรังสีเอกซ์ กับแบบจำลองเครื่องพลาสมาไฟกัสน์.....	63
รูปที่ 5.9 แผนภาพลักษณะการติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง กับเครื่องพลาสมาไฟกัสน์ที่ใช้ในการทดลอง.....	64

รูปที่ 5.10 กราฟสัญญาณรังสีเอกซ์ (V/s) ที่วัดได้จากฟิโนไดโอดช่อง 1 ในอาร์กอนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–3.0 mbar	65
รูปที่ 5.11 กราฟสัญญาณรังสีเอกซ์ (V/s) ที่วัดได้จากฟิโนไดโอดช่อง 1 ในออกซิเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–3.0 mbar	66
รูปที่ 5.12 กราฟสัญญาณรังสีเอกซ์ (V/s) ที่วัดได้จากฟิโนไดโอดช่อง 1 ในไนโตรเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–3.0 mbar	67
รูปที่ 5.13 กราฟแนวโน้มสัญญาณรังสีเอกซ์ (V) ที่วัดได้ของฟิโนไดโอดช่อง 1 ในอาร์กอนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar	68
รูปที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรังสีเอกซ์ต่อเวลา (div/time) ของฟิโนไดโอดทั้ง 5 ช่อง ในอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1.0 mbar	69
รูปที่ 5.15 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 0.5 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของอาร์กอนพลาสมา.....	71
รูปที่ 5.16 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1.0 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของอาร์กอนพลาสมา.....	71
รูปที่ 5.17 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1.5 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของอาร์กอนพลาสมา.....	72
รูปที่ 5.18 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 2.0 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของอาร์กอนพลาสมา.....	72
รูปที่ 5.19 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 2.5 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของอาร์กอนพลาสมา.....	73
รูปที่ 5.20 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในออกซิเจนพลาสมา ที่ความดัน 0.5 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของออกซิเจนพลาสมา.....	73
รูปที่ 5.21 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในไนโตรเจนพลาสมา ที่ความดัน 1.0 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของไนโตรเจนพลาสมา.....	74
รูปที่ 5.21 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในไนโตรเจนพลาสมา ที่ความดัน 1.5 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของไนโตรเจนพลาสมา.....	74

รูปที่ 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar ของก๊าซอาร์กอน โดย (ก) เมื่อใช้สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบ 3 ช่อง (ข) เมื่อใช้สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบ 5 ช่อง.....	76
รูปที่ 5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar ของก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน.....	77
รูปที่ 5.24 ภาพถ่ายจุดโฟกัสในพลาสมา และเปรียบเทียบความเข้มของจุดโฟกัส (A) จุดโฟกัสในอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1.0 mbar (B) จุดโฟกัสในออกซิเจนพลาสมา ที่ความดัน 1.0 mbar (C) จุดโฟกัสในไนโตรเจนพลาสมา ที่ความดัน 1.0 mbar	81
รูปที่ 5.25 ภาพถ่ายจุดโฟกัสของอาร์กอนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar	82
รูปที่ 5.26 ภาพถ่ายจุดโฟกัสของออกซิเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar	83
รูปที่ 5.27 ภาพถ่ายจุดโฟกัส ของไนโตรเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar	83
รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดโฟกัสในอาร์กอนพลาสมา ออกซิเจนพลาสมา และไนโตรเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar (Al–mylar 22 μm)	84
รูปที่ 5.29 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดโฟกัส สัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์ ของอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 0.5 mbar (ภาพที่ 1).....	87
รูปที่ 5.30 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดโฟกัส สัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์ ของอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 0.5 mbar (ภาพที่ 2).....	88
รูปที่ 5.31 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดโฟกัส สัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์ ของอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1.0 mbar (ภาพที่ 1).....	89
รูปที่ 5.32 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดโฟกัส สัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์ ของอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1.0 mbar (ภาพที่ 2).....	90
รูปที่ 5.33 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดโฟกัส สัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์ ของอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1.5 mbar (ภาพที่ 1).....	91
รูปที่ 5.34 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดโฟกัส สัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์ ของอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1.5 mbar (ภาพที่ 2).....	92

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.1 การคำนวณโดยวิธีการอัตราส่วนตัวกรองเพื่อคำนวณเส้นส่งผ่านรังสีเอกซ์.....	29
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของเครื่องพลาสมาโฟกัส UNU/ICTP.....	45
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดของเครื่องพลาสมาโฟกัส UNU/ICTP.....	45
ตารางที่ 4.3 การคำนวณหาค่าแฟกเตอร์สอบเทียบฟินไดโอด.....	49
ตารางที่ 4.4 การหาค่าความต่างศักย์จริงที่ฟินไดโอดวัดได้.....	50
ตารางที่ 4.5 การคำนวณหาค่าความต่างศักย์จริงที่ฟินไดโอดวัดได้.....	51
ตารางที่ 4.6 ชนิดของน้ำยาล้างฟิล์มรังสีเอกซ์ และลำดับขั้นตอนการล้างฟิล์มรังสีเอกซ์.....	54
ตารางที่ 5.1 ข้อมูลชนิดวัสดุและความหนาที่ใช้กันฟินไดโอดแต่ละตัว.....	63
ตารางที่ 5.2 ผลการวัดคุณสมบัติของอิเล็กตรอนในพลาสมา ภายใต้ความดันและก๊าซต่าง ๆ โดยใช้สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 3 ช่อง และ 5 ช่อง ตามลำดับ.....	75
ตารางที่ 5.3 ผลการเทียบคุณสมบัติของอิเล็กตรอนในพลาสมากับชนิดของรังสีเอกซ์ในช่วง ความดัน 0.5–2.5 mbar ของก๊าซอาร์กอน ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน.....	75
ตารางที่ 5.4 ข้อมูลชนิดและความหนาของแผ่นกรองรังสีเอกซ์ที่ใช้กันรูเข็ม.....	79
ตารางที่ 5.5 ข้อมูลชนิดและความหนาของแผ่นกรองรังสีเอกซ์ที่ใช้กันรูเข็ม.....	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รังสีเอกซ์ถูกค้นพบโดย Wilhelm Conrad Röntgen ในปี ค.ศ. 1895 ทำให้เขาได้รับรางวัลโนเบล สาขาฟิสิกส์ เป็นคนแรก ในปี ค.ศ. 1901 ปัจจุบันทราบกันดีว่ารังสีเอกซ์มีประโยชน์มากมายเพียงใด ซึ่งได้มีการประยุกต์ใช้รังสีเอกซ์ในงานด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้รังสีเอกซ์ถ่ายภาพโครงสร้างภายในร่างกายมนุษย์หรือสิ่งมีชีวิต (X-ray Radiography) ใช้รังสีเอกซ์ตรวจสอบเพื่อหาโครงสร้างของสารหรือผลึก (X-ray Crystallography) เอกซ์เรย์ไมโครสโคปี (X-ray Microscopy) เอกซ์เรย์ไมโครโทโมกราฟี (X-ray Micro-Tomography) เอกซ์เรย์โฮโลกราฟี (X-ray Holography) เอกซ์เรย์ลิโทกราฟี (X-ray Lithography) และเอกซ์เรย์ไมโครแมทชีน (X-ray Micromachining) เป็นต้น แต่ทุกอย่างในโลกย่อมมีทั้งข้อดีและข้อเสียควบคู่กัน สำหรับข้อเสียของรังสีเอกซ์ รังสีเอกซ์จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหากได้รับรังสีเอกซ์โดยตรงเป็นเวลานาน และปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้

เครื่องพลาสมาไฟกัสเป็นที่รู้จักกันดีมากกว่า 30 ปี ว่าเป็นเครื่องให้กำเนิดรังสีและอนุภาคชนิดต่าง ๆ เช่น รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา อิเล็กตรอน ไอออน และนิวตรอน เป็นต้น เหตุที่นักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจเกี่ยวกับเครื่องพลาสมาไฟกัส เพราะว่าเป็นเครื่องที่สามารถสร้างตัวเองโดยไม่ยุ่งยาก สามารถกำหนดขนาดและองค์ประกอบของเครื่องได้ตามที่ต้องการ เมื่อเทียบกับเครื่องมือที่ให้กำเนิดรังสีและอนุภาคอื่น ๆ แล้ว เครื่องพลาสมาไฟกัสจึงมีประโยชน์หลากหลายมากกว่า เนื่องจากสามารถที่จะกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบการเกิดพลาสมาไฟกัสเพื่อให้ได้รังสีหรืออนุภาคต่าง ๆ ได้ตามต้องการ เช่น ถ้าต้องการให้เกิดนิวตรอนต้องเลือกใช้ก๊าซดิวเทอเรียมหรือก๊าซทริเทียมในการทดลอง ถ้าต้องการให้เกิดรังสีเอกซ์โดยไม่เกิดนิวตรอนด้วยต้องเลือกใช้ ก๊าซอาร์กอน ก๊าซนีออน หรือก๊าซชนิดอื่น ๆ กระบวนการเกิดพลาสมาในเครื่องพลาสมาไฟกัสมีลักษณะเป็นช่วง (pulse) แต่สามารถที่จะออกแบบเครื่องพลาสมาไฟกัสเพื่อทำให้เกิดพลาสมาติดต่อกัน ๆ กัน (repetitive) ได้ ซึ่งจะมีประโยชน์เป็นอย่างมาก ดังนั้น เห็นแล้วว่าเครื่องพลาสมาไฟกัสมีประโยชน์มากมายเพียงใด และสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบเครื่องพลาสมาไฟกัสได้ตามที่ต้องการ เพื่อให้ตรงตามวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ปัจจุบันได้มีการนำเครื่องพลาสมาไฟกัสมาประยุกต์ในงานด้านต่าง ๆ ได้แก่ เอกซ์เรย์ไมโครลิโทกราฟี เอกซ์เรย์

ไมโครเมทรีน ลำอิเล็กตรอนลิโทกราฟี (Electron Beam Lithography) การฝังไอออน (Ion Implantation) การปรับสภาพผิวด้วยพลาสมา (Plasma Surface Modification) เครื่องตรวจสอบและป้องกันที่สนามบิน (Safeguard Service at Airports) และโพซิตรอนอิมิชันโทโมกราฟี (Positron Emission Tomography) เป็นต้น

ด้วยความสำคัญและประโยชน์ของรังสีเอกซ์ รวมทั้งคุณสมบัติที่ดีของเครื่องพลาสมาไฟกัสต์ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ปัจจัยดังกล่าวจึงเป็นเหตุจูงใจให้ผู้วิจัยทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการแผ่รังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสมาไฟกัสต์ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบเครื่องพลาสมาไฟกัสต์ และประยุกต์ใช้รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นซึ่งสามารถที่จะแสดงภาพจุดโฟกัส (Focus point) และวัดอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา (temperature of electron in plasma) เพื่อเป็นข้อมูลที่สำคัญในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป เนื่องจากเครื่องพลาสมาไฟกัสต์แต่ละเครื่องมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น องค์ประกอบของชิ้นส่วน ขนาด และ พลังงาน เป็นต้น และคุณสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นยังแปรผันกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบเครื่องพลาสมาไฟกัสต์ เช่น ความดันและชนิดของก๊าซที่ใช้ เป็นต้น จึงจำเป็นต้องทำการวิจัยเพื่อเก็บข้อมูลเฉพาะของเครื่องพลาสมาไฟกัสต์ที่ใช้ในงานวิจัย และผู้ทำวิจัยได้ทดสอบวิธีการวัดอุณหภูมิอิเล็กตรอนในพลาสมาโดยภาพถ่ายจุดโฟกัส โดยจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ตรวจสอบการแผ่รังสีเอกซ์ในกระบวนการเกิดพลาสมาไฟกัสต์
2. ถ่ายภาพจุดโฟกัสและวัดอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา โดยใช้รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น ภายใต้การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการเกิดพลาสมา
3. ทดสอบวิธีการวัดอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจากภาพถ่ายรังสีเอกซ์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยนี้มีขอบเขตการศึกษาคือวิจัย ดังต่อไปนี้

1. ศึกษากระบวนการเกิดพลาสมาจากเครื่องพลาสมาไฟกัส
2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องพลาสมาไฟกัส การแผ่รังสีเอกซ์ ประโยชน์ และการประยุกต์ใช้รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจากเครื่องพลาสมาไฟกัส
3. ศึกษาและตรวจสอบลักษณะเฉพาะของรังสีเอกซ์ที่แผ่ออกมาจากเครื่องพลาสมาไฟกัส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบเครื่องพลาสมาไฟกัส ได้แก่ ชนิดของก๊าซ (ก๊าซไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน) และความดัน เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับเลือกใช้พารามิเตอร์ในการวิจัยอื่นต่อไป
4. ศึกษาและนำแบบจำลองพลาสมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย เพื่อวัดคุณสมบัติของอิเล็กตรอนในพลาสมา
5. ประยุกต์ใช้รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น เพื่อศึกษาโครงสร้าง ขนาดของจุดโฟกัส และวัดคุณสมบัติของอิเล็กตรอนในพลาสมา
6. เสนอวิธีการวัดคุณสมบัติของอิเล็กตรอนในพลาสมาจากภาพถ่ายรังสีเอกซ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลการแผ่รังสีเอกซ์ คุณสมบัติของอิเล็กตรอนในพลาสมา รวมทั้งทราบโครงสร้างและขนาดของจุดโฟกัสของพลาสมา ในเครื่องพลาสมาไฟกัสขนาดเล็กที่ใช้ทำการวิจัย ภายใต้การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบการเกิดพลาสมาไฟกัส โดยเป็นประโยชน์สำหรับการเลือกใช้พารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับงานที่จะนำไปประยุกต์ต่อไปในอนาคต
2. ได้วิธีการใหม่ในการวัดคุณสมบัติของอิเล็กตรอนในพลาสมา โดยใช้ภาพถ่ายรังสีเอกซ์

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยนี้ได้เริ่มต้นจาก ศึกษาเกี่ยวกับเครื่องพลาสมาไฟกัสและอุปกรณ์ประกอบเครื่องต่าง ๆ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องพลาสมาไฟกัสจากอดีตถึงปัจจุบัน ในช่วงนี้ได้สร้างอุปกรณ์ประกอบเครื่องพลาสมาไฟกัสและเครื่องมือวัดต่าง ๆ ไปพร้อมกันด้วย จากนั้นมุ่งประเด็นเพื่อศึกษารวบรวมข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการแผ่รังสีเอกซ์ที่เกิดจากเครื่องพลาสมาไฟกัส และศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์ในการตรวจสอบรังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสมาไฟกัส และสร้างอุปกรณ์ในการตรวจสอบรังสีเอกซ์ ได้แก่ สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง (Five Channel Diode X-ray Spectrometer (DXS)) และกล้องรูเข็มรังสีเอกซ์ (X-ray Pinhole camera) รวมทั้งศึกษาทฤษฎีและวิธีการวัดคุณสมบัติของอิเล็กตรอนในพลาสมาจากเครื่องพลาสมาไฟกัส และสร้างเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ (X-ray Transmission Curves) โดยใช้แบบจำลองโคโรนา (Corona Model) เพื่อใช้สำหรับเทียบหาคุณสมบัติของอิเล็กตรอนในพลาสมาที่ได้จากการทดลอง และวิธีการถ่ายภาพรังสีเอกซ์จากพลาสมาเพื่อศึกษาโครงสร้างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ลำดับถัดมาจะเข้าสู่การทดลอง โดยเริ่มจากทดลองวัดคุณสมบัติของอิเล็กตรอน โดยใช้สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง กับเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์โดยใช้แบบจำลองโคโรนาที่ได้สร้างขึ้น ด้วยวิธีการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา (Time – resolved X-ray measurements) เพื่อวัดคุณสมบัติของอิเล็กตรอนในพลาสมา และทดลองถ่ายภาพจุดโฟกัสโดยใช้กล้องรูเข็มรังสีเอกซ์ที่สร้างขึ้น ด้วยเทคนิคที่เรียกว่า การถ่ายภาพโดยรังสีเอกซ์แบบรวมเวลา (Time – integrated X-ray imaging) จากนั้นวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง วิเคราะห์การทดลอง พร้อมทั้งเสนอข้อเสนอนี้เพื่อปรับปรุงการทดลอง เพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษาวิจัยต่อไป

1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

การนำเสนอผลงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบไปด้วยเนื้อหาจำนวน 6 บท โดยเริ่มต้นจาก บทที่ 1 เพื่อกล่าวถึงภาพรวมของงานวิจัย ได้แก่ ความเป็นมา ความสำคัญ วัตถุประสงค์ ประโยชน์ที่จะได้รับ และขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ต่อไปในบทที่ 2 อธิบายเกี่ยวกับลักษณะของเครื่องพลาสมาไฟกัส กระบวนการเกิดพลาสมาในเครื่องพลาสมาไฟกัส การแผ่รังสีเอกซ์และการประยุกต์ใช้รังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสมาไฟกัส เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจประวัติความเป็นมาของเครื่องพลาสมาไฟกัสและประโยชน์ของงานวิจัยนี้มากขึ้น บทถัดมาบทที่ 3 ได้อธิบายเกี่ยวกับแบบจำลองการแผ่รังสีจากพลาสมา และ แบบจำลองการแผ่รังสีที่ใช้สำหรับพลาสมาไฟกัส รวมทั้งวิธีการสร้างการคำนวณเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์โดยใช้แบบจำลองโคโรนา เพื่อเป็น

ตัวเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง ในบทนี้เป็นส่วนของทฤษฎีและวิธีการที่สำคัญยิ่ง เพราะเกี่ยวข้องกับทฤษฎีการวัดคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ในพลาสมาในงานวิจัย บทที่ 4 ได้กล่าวถึงรายละเอียดส่วนประกอบของเครื่องพลาสมาไฟกัส เครื่องมือวัดต่าง ๆ และเทคนิคการตรวจสอบการแผ่รังสีเอกซ์ที่ใช้ในการวิจัย จากนั้นก็มาถึงบทที่เกี่ยวข้องกับการทดลองและผลการทดลอง บทที่ 5 ซึ่งจะอธิบายขั้นตอนการวิจัยแยกออกเป็น ส่วน ๆ ชัดเจน รวมถึงนำเสนอผลการทดลองที่ได้ และอภิปรายผลการทดลองเป็นข้อ ๆ เพื่อให้เกิดความชัดเจน และบทสุดท้าย บทที่ 6 จะกล่าวถึงบทสรุปจากการทดลองโดยภาพรวมในงานวิจัย และชี้ให้เห็นว่าการวิจัยประสบความสำเร็จหรือมีข้อขัดข้องและผิดพลาดประการใด และได้ผลตรงตามวัตถุประสงค์หรือไม่อย่างไร และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยในครั้งนี้มีผลอย่างไรต่อไป รวมทั้งมีแนวทางในการดำเนินการแก้ไขปรับปรุงต่อไปอย่างไร



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เครื่องพลาสมาไฟกัสและการแผ่รังสีเอกซ์

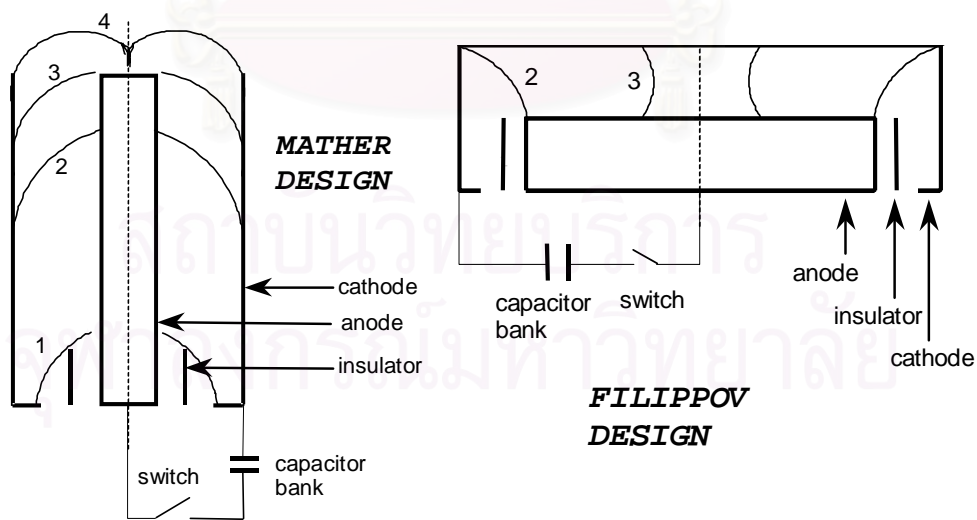
ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดโดยทั่วไปเกี่ยวกับเครื่องพลาสมาไฟกัส เพื่อให้ผู้อ่านได้เข้าใจเกี่ยวกับประวัติความเป็นมา โครงสร้าง หลักการทำงาน และกระบวนการเกิดพลาสมาจากเครื่องพลาสมาไฟกัส รวมทั้งการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีของเครื่องพลาสมาไฟกัสจากอดีตจนถึงปัจจุบันและอนาคต การแผ่รังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสมาไฟกัส ตลอดจนการประยุกต์ใช้รังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสมาไฟกัสในปัจจุบันและอนาคต

เนื่องจากเครื่องพลาสมาไฟกัสมีประโยชน์มากมายหลากหลาย อาทิ การศึกษา การวิจัยค้นคว้า และการประยุกต์ในอุตสาหกรรม จึงได้มีการประยุกต์เครื่องพลาสมาไฟกัสเพื่อใช้ใน งานต่าง ๆ กันอย่างมากมาย ด้วยวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไป [1]

2.1 เครื่องพลาสมาไฟกัส

เครื่องพลาสมาไฟกัสได้ถูกคิดค้นขึ้นโดยแมทเธอร์ (Mather) [2] และ ฟิลิปโปบ (Filippov) [3] ในปี ค.ศ.1965 โดยมีลักษณะที่แตกต่างกันในทางโครงสร้างเชิงเรขาคณิตดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในแบบแมทเธอร์จะมีค่าอัตราส่วน $d/l < 1$ ส่วนแบบของฟิลิปโปบจะมีค่าอัตราส่วน $d/l > 1$ เมื่อ d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของแอโนด และ l คือ ความยาวของแอโนด เครื่องพลาสมาไฟกัสที่ถูกสร้างขึ้นจะมีถังจุพลังงาน (Stored energy bank) ตั้งแต่ 1 kJ ถึง 1 MJ โดยมีความสอดคล้องกับกฎการปรับมาตรา (Scaling law) โดยความจุพลังงานเป็นสัดส่วนกับขนาดของเครื่องพลาสมาไฟกัส จากความจุพลังงานของเครื่องพลาสมาไฟกัสดังกล่าว สามารถแบ่งขนาดของเครื่องพลาสมาไฟกัสได้ 3 ขนาด ได้แก่ เครื่องพลาสมาไฟกัสขนาดเล็ก (Small Plasma Focus) $E_{input} \sim 1-15$ kJ เครื่องพลาสมาไฟกัสขนาดกลาง (Medium Plasma Focus) $E_{input} \sim 15-50$ kJ และเครื่องพลาสมาไฟกัสขนาดใหญ่ (Large Plasma Focus) $E_{input} \sim 50-1000$ kJ [3] เครื่องพลาสมาไฟกัสสามารถเป็นแหล่งให้กำเนิดอิเล็กตรอน ไอออน รังสีต่าง ๆ และนิวตรอนจากปฏิกิริยาฟิวชัน [4]

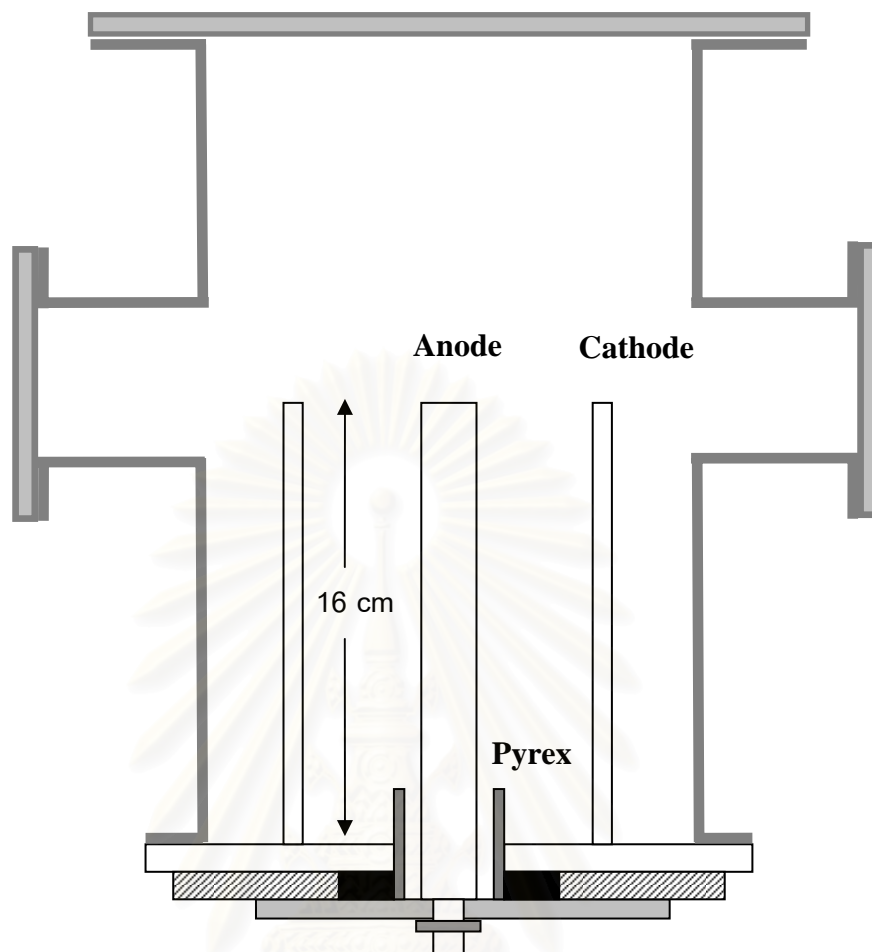
กระบวนการเกิดพลาสมาของเครื่องพลาสมาไฟกัสทั้ง 2 แบบ มีลักษณะขั้นตอนคล้ายกัน เครื่องที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องพลาสมาไฟกัสแบบแมทเธอร์ ชนิดเก็บแบบสุญญากาศ (Vacuum Spark Gap) ซึ่งจะได้กล่าวถึงลักษณะเฉพาะของเครื่องพลาสมาแบบแมทเธอร์ชนิดดังกล่าวต่อไปในบทที่ 4 โดยกระบวนการเกิดพลาสมาจากเครื่องพลาสมาไฟกัสแบบแมทเธอร์มีขั้นตอนดังนี้ เริ่มจากการประจุไฟฟ้าให้แก่ถังเก็บประจุ (Capacitor Bank) ขนาด $30 \mu\text{F}$ และส่งถ่ายประจุไฟฟ้าจากถังเก็บประจุเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าของตัวเครื่องพลาสมาไฟกัสอย่างรวดเร็ว เมื่อประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปถึงบริเวณปลายของฉนวน (Insulator) ที่กั้นระหว่างแอโนด (Anode) และแคโทด (Cathode) จะเกิดการปล่อยกระแส (Current discharge) ทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซภายใต้สภาวะความดันต่ำ กลายเป็นพลาสมาในช่วงระหว่างแอโนดและแคโทดซึ่งเป็นบริเวณที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และจะเกิดแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) ซึ่งเหนี่ยวนำให้พลาสมาเคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร่งจากบริเวณที่ 1 ไปบริเวณที่ 2 และบริเวณที่ 3 ตามลำดับ เรียกพลาสมาในช่วงดังกล่าวนี้ว่า พลาสมาชีท (Plasma sheath) เมื่อพลาสมาชีทเคลื่อนที่ถึงบริเวณที่ 4 บริเวณปลายของแท่งแอโนดและแคโทด พลาสมาในช่วงดังกล่าวจะเคลื่อนที่บีบอัดในแนวรัศมีรวมเข้าสู่บริเวณใจกลางของปลายของแท่งแอโนด และบริเวณนี้จะทำให้เกิดพลาสมาที่ร้อนมาก โดยมีอุณหภูมิประมาณ 1 keV ความหนาแน่นประมาณ 10^{19} cm^{-3} และพลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีช่วงชีวิตประมาณ 50 ns โดยกระบวนการดังกล่าวทั้งหมดใช้เวลาประมาณ $4 \mu\text{s}$ เท่านั้น [5] ทั้งนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของกระบวนการเกิดพลาสมาไฟกัสแต่ละช่วงในหัวข้อถัดไป



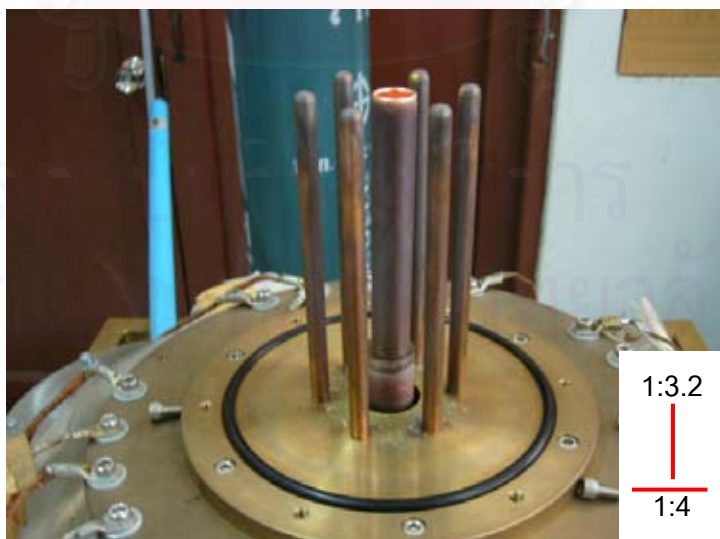
รูปที่ 2.1 แผนภาพโครงสร้างเชิงเรขาคณิตของเครื่องพลาสมาไฟกัสทั้ง 2 แบบ

ภาพซ้ายเป็นแบบแมทเธอร์ ($d/l < 1$) และภาพขวาเป็นแบบฟิลิปโปว ($d/l > 1$) [6]

จากที่ได้กล่าวในข้างต้น เครื่องพลาสมาไฟกัสแบบแมทเธอร์กับแบบฟิลิปอบ มีความแตกต่างกันที่ค่าอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาวของแอโนด (d/l) เครื่องแบบฟิลิปอบ อัตราส่วนดังกล่าวจะมีความมากกว่า 5 และเส้นผ่าศูนย์กลางของแอโนดจะมีขนาดตั้งแต่ 50–200 cm ส่วนเครื่องแบบแมทเธอร์อัตราส่วนดังกล่าวจะมีค่าต่ำกว่า 0.25 และเส้นผ่าศูนย์กลางของแอโนดจะมีขนาดตั้งแต่ 2–22 cm แอโนดและแคโทดส่วนมากจะทำมาจากทองแดงหรือสแตนเลส โดยแอโนดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกตันหรือทรงกระบอกกลวง สำหรับแอโนดแบบทรงกระบอกกลวงทำขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดรังสีเอกซ์แบบเข้ม (Hard X-ray) ระหว่างการเกิดพลาสมาไฟกัส ที่เกิดจากการระดมยิง (Bombardment) อิเล็กตรอนกับแอโนด โดยปกติแคโทดจะวางอยู่รอบแอโนดเป็นวงกลม ส่วนใหญ่แคโทดจะมีจำนวนประมาณ 6 – 24 แท่ง ขึ้นอยู่กับการออกแบบ สำหรับฉนวนจะต้องทนความร้อนสูงได้ดี มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง อาจจะทำจากไพเร็กซ์ (Pyrex) แก้ว (glass) อลูมินา (Alumina) หรือเซรามิก (Ceramic) เป็นต้น โดยแบบจำลองโครงสร้างภายในของเครื่องพลาสมาไฟกัสแบบแมทเธอร์และโครงสร้างภายในของเครื่องพลาสมาไฟกัสที่ใช้ในงานวิจัย ได้แสดงในรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 แผนภาพแบบจำลองโครงสร้างภายในของเครื่องพลาสมาไฟกั๊สแบบแมทเธอร์



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายโครงสร้างภายในของเครื่องพลาสมาไฟกั๊สที่ใช้ในงานวิจัย

2.2 พลศาสตร์ของพลาสมาโฟกัส (Dynamics of Plasma Focus)

ลำดับกระบวนการการเกิดพลาสมาจากเครื่องพลาสมาโฟกัสได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา ในส่วนนี้จะกล่าวถึงพลศาสตร์ของพลาสมาจากเครื่องพลาสมาโฟกัสโฟกัส หรือพลศาสตร์ของพลาสมาโฟกัสในแต่ละช่วง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแตกตัว (Breakdown Phase) ช่วงแอคเซียลรันดาวน์ (Axial Rundown Phase) และช่วงแนวรัศมี (Radial Phase) [6,7] โดยพลาสมาในแต่ละช่วงจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนี้

2.2.1 ช่วงแตกตัว

ช่วงแรกในพลศาสตร์ของพลาสมาโฟกัส เรียกว่า ช่วงแตกตัว เริ่มต้นจากเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูง (High voltage) เข้าสู่แอโนดของเครื่องพลาสมาโฟกัสที่อยู่ภายในแชมเบอร์ (Chamber) ที่มีก๊าซบรรจุอยู่ใต้สภาวะความดันต่ำ จากนั้นจะเกิดการดีจัสชาร์ทของกระแสไฟฟ้าขึ้น การดีจัสชาร์ทที่เกิดขึ้นจะทำให้ก๊าซที่อยู่ภายในเกิดการแตกตัวและกลายเป็นพลาสมา จึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงแตกตัว โดยการแตกตัวในช่วงแรกของก๊าซจะเกิดขึ้นในบริเวณเหนือฉนวนที่กั้นอยู่ระหว่างแอโนดกับแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยพลาสมาจะเริ่มเกิดจากบริเวณผิวของฉนวนในแนวรัศมีไปยังแท่งแคโทด และพลาสมาจะมีจำนวนหนาแน่นมากขึ้นจนกลายเป็นพลาสมาซีท ซึ่งเป็นช่วงสุดท้ายของการเกิดพลาสมาในช่วงแตกตัว ในช่วงแตกตัว กระแสที่ไหลจากแอโนดไปยังแคโทดจะต้องผ่านผิวของฉนวนโดยใช้เวลาเพียง 1–300 ns [6] ระหว่างนั้นแรงลอเรนซ์จะเริ่มส่งผลต่อพลาสมาซีททำให้เริ่มยกตัวขึ้นด้านบน และกระบวนการเกิดพลาสมาจะเข้าสู่ช่วงความเร็วตามแกนต่อไป ในระหว่างช่วงเบรกดาวน์การแตกตัวของก๊าซจะทำให้เกิดรังสีเอกซ์ด้วย

2.2.2 ช่วงแอคเซียลรันดาวน์

ช่วงแอคเซียลรันดาวน์หรือช่วงเร่งตามแกน (Axial acceleration phase) เป็นช่วงที่เกิดขึ้นหลังจากช่วงแตกตัว โดยพลาสมาซีทที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนตัวขึ้นตามแนวแกน Z ไปยังด้านบนของแท่งแอโนดและแคโทด ด้วยอิทธิพลของแรงลอเรนซ์ที่เกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลในแท่งแอโนด และสนามแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยพลาสมาซีทจะเคลื่อนที่จากด้านล่างไปยังบริเวณปลายแอโนดอย่างรวดเร็ว ช่วงเร่งตามแกนนี้เป็นช่วงที่สำคัญมาก เพราะเป็นช่วงที่จะกำหนดการเกิดและลักษณะรูปร่างของพลาสมาหนาแน่น (Dense plasma) หรือพินช์พลาสมา (Pinch plasma) ในช่วงสุดท้าย โดยพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูงเป็นพลาสมาที่เกิดขึ้นในช่วงสุดท้าย เป็นช่วงที่พลาสมามีความหนาแน่นมากที่สุด จะมีลักษณะ

เป็นแท่งอยู่ตรงกลางเหนือปลายแอโนด เกิดขึ้นจากการที่พลาสมาที่เคลื่อนตัวบีบอัดรวมเข้าสู่ใจกลางแท่งแอโนดในแนวรัศมีอย่างรวดเร็วและรุนแรง ทำให้พลาสมาบริเวณดังกล่าวมีความหนาแน่นมากที่สุด ในการที่จะทำให้เกิดพลาสมาลักษณะดังกล่าวขึ้นมีปัจจัย 2 ประการ ได้แก่ ประการที่หนึ่ง กระแสที่ไหลผ่านพลาสมาที่เคลื่อนที่จากเริ่มต้นถึงบริเวณปลายแอโนดจะต้องมีความสม่ำเสมอตลอดช่วง ประการที่สอง โครงสร้างของพลาสมาจะต้องมีรูปร่างลักษณะที่สมดุลงูปร่างแน่นอน และเหมาะสมที่จะทำให้เกิดการโฟกัส (Focusing) ที่ดี ในประการที่หนึ่ง คือ สิ่งที่เครื่องพลาสมาโฟกัสทุกเครื่องจะต้องมีเหมือนกัน นั่นคือ จะต้องมีการถ่ายโอนพลังงานที่ดี และสม่ำเสมอจากถึงเก็บประจุไฟฟ้า จากเริ่มต้นเกิดพลาสมาจนถึงกระบวนการเกิดพินช์พลาสมา ในประการที่สอง พลาสมาที่ที่เกิดขึ้นจะต้องมีสัดส่วนสมดุลงูปร่างของแอโนด พลาสมาที่ จะต้องมีรูปร่างที่เรียบและบาง รวมทั้งมีโครงสร้างที่เหมือนกัน โดยทั่วไปเวลาในช่วงเร่งตามแกน จะอยู่ระหว่าง $1-4 \mu\text{s}$ [6] ขึ้นอยู่กับขนาดและโครงสร้างของเครื่องพลาสมาโฟกัส

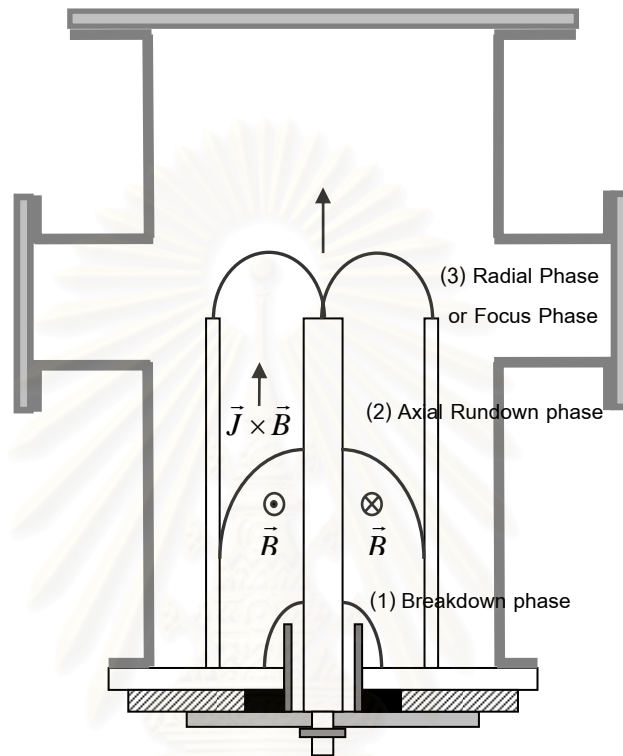
ในช่วงสุดท้ายของช่วงความเร็วตามแกนพลาสมาที่ที่อยู่ด้านในจะกวาดรวมเข้าสู่ใจกลางบริเวณปลายแอโนด ส่วนพลาสมาที่อยู่ด้านนอกจะกวาดรวมตัวเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะลำตามแนวแกนอย่างต่อเนื่องเข้าสู่แนวกลางบริเวณปลายแอโนด โดยพลาสมาเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้นในช่วงนี้จะทำให้เกิดการโฟกัสขึ้นในช่วงสุดท้าย

2.2.3 ช่วงแนวรัศมี (Radial Phase)

ในช่วงสุดท้ายของช่วงความเร็วตามแกนพลาสมาที่จะกวาดรวมเข้าสู่ใจกลางบริเวณปลายแอโนด ทิศของแรงลอเรนซ์จะมีทิศพุ่งเข้าในแนวรัศมี ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จากนั้นพลาสมาบีบอัดตัวเข้าสู่ใจกลางแอโนดมีลักษณะเป็นลำ (Column) และจะสูญสลายไปอย่างรวดเร็ว จึงเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงแนวรัศมี โดยช่วงแนวรัศมีเกิดขึ้นในเวลาเพียง $10-200 \text{ ns}$ [6] โดยเวลาดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับลักษณะและขนาดของเครื่องพลาสมาโฟกัส

ช่วงแนวรัศมีเป็นช่วงสุดท้ายที่มีบทบาทสำคัญมากในการเกิดพลาสมาจากเครื่องพลาสมาโฟกัส เพราะว่าเป็นกระบวนการที่นำไปสู่การบีบอัดตัวของพลาสมา และลักษณะรูปร่างสุดท้ายของลำพลาสมาร้อนและดันพลาสมา โดยพลาสมาในช่วงนี้จะมีอุณหภูมิสูงมาก และในช่วงแนวรัศมีนี้เองเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการแผ่รังสีต่าง ๆ เช่น รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ รังสีอัลตราไวโอเล็ต (EUV or Extreme Ultra Violet) เป็นต้น และให้กำเนิดอนุภาคพลังงานสูงที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน (Nuclear fusion) เช่น นิวตรอน เป็นต้น [7]

การใช้ประโยชน์ต่าง ๆ จากเครื่องพลาสมาไฟกัสจะเกี่ยวข้องกับช่วงนี้เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น กระบวนการเกิดพลาสมาในช่วงนี้จึงเป็นช่วงที่สำคัญมากกว่าช่วงอื่น และโดยทั่วไปมักนิยมเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงไฟกัส (Focus Phase)



รูปที่ 2.4 แผนภาพลักษณะลำดับกระบวนการเกิดพลาสมาในเครื่องพลาสมาไฟกัส

2.3 การแผ่รังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสมาไฟกัส

ในกระบวนการเกิดพลาสมาไฟกัสในช่วงสุดท้ายจะเกิดการแผ่รังสีต่าง ๆ ออกมา โดยหนึ่งในรังสีที่เกิดขึ้นและเป็นที่รู้จักกันดี คือ รังสีเอกซ์ เหตุผลที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจเกี่ยวกับรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจากเครื่องพลาสมาไฟกัส เพราะรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจากพลาสมาไฟกัสเป็นรังสีเอกซ์แบบหลายความยาวคลื่น (multi-wavelength) รังสีเอกซ์ที่เรานำมาใช้กันทั่ว ๆ ไปนั้น จะเป็นรังสีเอกซ์แบบความยาวคลื่นเดียว (single-wavelength) รังสีเอกซ์แบบหลายความยาวคลื่นมีประโยชน์ที่แตกต่างไปจากรังสีเอกซ์แบบความยาวคลื่นเดียว เช่น สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบวัตถุที่ซับซ้อน โดยการฉายรังสีเอกซ์ให้ทะลุผ่านวัตถุนั้น จะทำให้ทราบถึงองค์ประกอบของวัตถุนั้นได้ละเอียดชัดเจนมากกว่าการฉายรังสีเอกซ์แบบความยาวคลื่นเดียว คือ สามารถเห็นลักษณะต้นลิขหนาบางของวัตถุได้ดีกว่า ซึ่งการประยุกต์ดังกล่าวได้นำมาใช้ในงานด้านการ

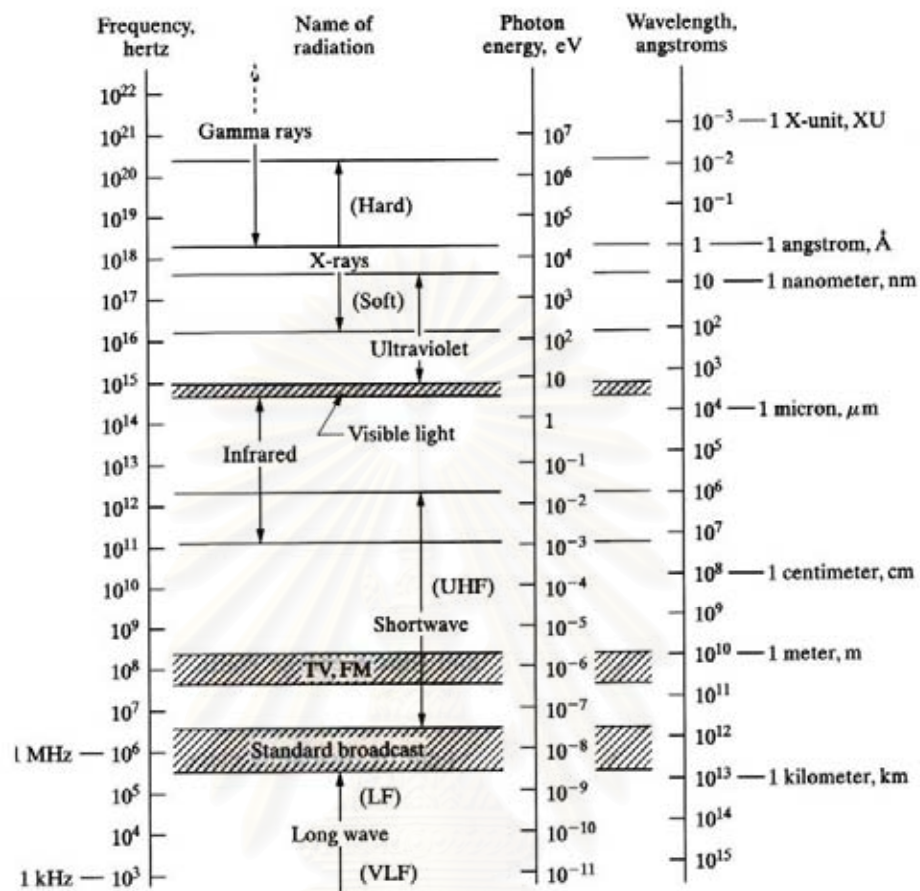
ตรวจสอบวัตถุระเบิดในสถานที่ต่าง ๆ เช่น รถไฟฟ้าใต้ดิน และสนามบิน เป็นต้น ประโยชน์ของรังสีเอกซ์ที่ได้จากเครื่องพลาสมาไฟกัสยังมีอีกหลายอย่างซึ่งจะได้กล่าวต่อไป ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์จะมีค่าในช่วง $0.01-100 \text{ \AA}$ และสามารถแบ่งรังสีเอกซ์ออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ รังสีเอกซ์แบบเข้มมาก (Ultra hard X-ray) มีความยาวคลื่นในช่วง $0.01-0.1 \text{ \AA}$ รังสีเอกซ์แบบเข้ม (Hard X-ray) มีความยาวคลื่นในช่วง $0.1-1 \text{ \AA}$ รังสีเอกซ์แบบอ่อน (Soft X-ray) มีความยาวคลื่นในช่วง $1-10 \text{ \AA}$ และรังสีเอกซ์แบบอ่อนมาก (Ultra soft X-ray) มีความยาวคลื่นในช่วง $10-100 \text{ \AA}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [8]

เมื่อพลาสมาที่เกิดจากเครื่องพลาสมาไฟกัสมีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาในช่วงหลายร้อยอิเล็กตรอนโวลต์ถึงหลายกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าประมาณ 10^{19} cm^{-3} จะทำให้เกิดการแผ่รังสีเอกซ์ออกมา กระบวนการในการทำให้เกิดรังสีเอกซ์มีอยู่ด้วยกัน 3 กระบวนการ ได้แก่ เบรมสตราลุง (Bremsstrahlung) รีคอมบิเนชัน (Recombination) และการสลายตัวแผ่รังสี (Radiative decay) โดยเบรมสตราลุงทำให้เกิดรังสีเอกซ์แบบสเปกตรัมรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuum X-ray spectrum) การสลายตัวแผ่รังสีทำให้เกิดรังสีเอกซ์ที่มีค่าเฉพาะเป็นค่า ๆ เรียกว่า สเปกตรัมรังสีเอกซ์เฉพาะค่า (Characteristic X-ray spectrum) สำหรับรีคอมบิเนชันสามารถเกิดรังสีเอกซ์ได้ทั้งแบบต่อเนื่องและเฉพาะค่า ซึ่งการแผ่แบบเฉพาะค่าของรีคอมบิเนชันจะเกิดจากการที่อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานและถูกจับโดยไอออนถ้าอิเล็กตรอนที่ถูกจับสูญเสียพลังงานจะตกไปสู่สถานะที่มีพลังงานต่ำ พลังงานที่สูญเสียจะทำให้เกิดสเปกตรัมแบบเส้น (Line spectrum) ความสัมพันธ์ของการแผ่แบบต่อเนื่องและเส้นขึ้นอยู่กับว่าพลาสมามีลักษณะเช่นไร โดยทั่วไปพลาสมาที่เกิดจากธาตุที่มีเลขอะตอมสูงจะเกิดการแผ่แบบต่อเนื่องเด่นชัด สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำจะเกิดเป็นสเปกตรัมแบบเส้นมากกว่า

สำหรับพลาสมาที่มีอุณหภูมิของอิเล็กตรอน T_e (eV) ยอด (peak) ของความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องที่เกิดขึ้นจะเป็นดังสมการ [8]

$$\lambda = \frac{6200}{T_e} \text{ \AA} \quad (2.1)$$

แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ (1) แหล่งที่เป่าเป็นของแข็ง (solid-target source) (2) แสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation) (3) พลาสมา (4) เลเซอร์รังสีเอกซ์ (X-ray laser) ซึ่งจะให้รังสีเอกซ์ที่มีคุณสมบัติและลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งจะไม่ขอกล่าวถึงในรายละเอียดดังกล่าว



รูปที่ 2.5 แผนภาพช่วงสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ [8]

บทที่ 3

การแผ่รังสีจากพลาสมา (Plasma Radiation)

จากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงคุณสมบัติและกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสมาฟลักซ์ในเบื้องต้น สำหรับในบทนี้จะกล่าวเกี่ยวกับการคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาด้วยแบบจำลองการแผ่รังสีจากพลาสมา แบบจำลองพลาสมาที่เลือกใช้ในงานวิจัย คือแบบจำลองสมดุลโคโรนา (Corona Equilibrium Model (CE)) เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาจากรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากพลาสมาในงานวิจัยนี้มีลักษณะสอดคล้องกับเงื่อนไขของแบบจำลองโคโรนา จึงนำแบบจำลองโคโรนามาใช้คำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนของพลาสมา วิธีการคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาจากการทดลองเรียกว่า วิธีอัตราส่วนตัวกรอง (Filter Ratio Method) ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำมาเปรียบเทียบกับเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ที่ได้สร้างขึ้นโดยใช้แบบจำลองโคโรนาเพื่อคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา โดยจะกล่าวถึงวิธีการดังกล่าวอย่างละเอียดต่อไป

แบบจำลองพลาสมาหรือแบบจำลองการแผ่รังสีจากพลาสมาเกิดจากความต้องการที่จะอธิบายพฤติกรรมของพลาสมา ซึ่งกล่าวได้ว่าพลาสมาเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร โดยหนึ่งในเรื่องที่ต้องการจะอธิบาย คือ กระบวนการแผ่รังสีจากพลาสมา โดยแบบจำลองพลาสมามีอยู่หลายแบบจำลองด้วยกัน ในการศึกษากระบวนการแผ่รังสีที่เกี่ยวข้องกับการแผ่รังสีจากพลาสมาของเครื่องพลาสมาฟลักซ์นั้นจะมี 3 กระบวนการ ได้แก่ เบรมสตาจุง รัคคอมบิเนชัน และการสลายตัวแผ่รังสี สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายการคำนวณหาความเข้มของการแผ่รังสีจากทั้ง 3 กระบวนการ และใช้แบบจำลองโคโรนาคำนวณเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ที่ใช้สำหรับคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา

3.1 แบบจำลองการแผ่รังสีจากพลาสมา

โดยปกติเป็นเรื่องยากที่จะเข้าใจลักษณะที่แน่นอนของสถานะของพลาสมา การประมาณการโดยการคำนวณภายใต้แบบจำลองพลาสมาจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง แต่เนื่องจากแบบจำลองพลาสมาแต่ละแบบมีเงื่อนไขในการอธิบายพลาสมาต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจและรู้จักเลือกใช้แบบจำลองให้เหมาะสมกับพลาสมาที่สนใจ เงื่อนไขในการเลือกใช้แบบจำลองพลาสมาเพื่อนำมาใช้ในการอธิบายพลาสมามีอยู่หลายเงื่อนไข เช่น ปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพลาสมา ช่วงชีวิตของพลาสมา เป็นต้น

3.1.1 แบบจำลองพลาสมา

แบบจำลองพลาสมามีอยู่หลายแบบจำลอง เช่น แบบจำลองสมดุลอุณหพลวัตเฉพาะที่ (Local Thermodynamic Equilibrium Model (LTE)) แบบจำลองสมดุลโคโรนา และแบบจำลองสมดุลการชน-การแผ่รังสี (Collisional Radiative Equilibrium (CR)) เป็นต้น เงื่อนไขของการนำแบบจำลองต่าง ๆ มาใช้อธิบายพลาสมาแต่ละชนิดนั้น ส่วนใหญ่จะขึ้นกับปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเป็นหลัก

(1) แบบจำลองสมดุลอุณหพลวัตเฉพาะที่

สำหรับข้อจำกัดของแบบจำลองสมดุลอุณหพลวัตเฉพาะที่ หรือ แบบจำลอง LTE คือ ปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของพลาสมาที่น้อยที่สุด N_e^{\min} พลาสมาที่สามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้อธิบายได้จะต้องมีค่า [9]

$$N_e^{\min} > K(T_{eV})^{1/2} \chi_{\max}^3 \quad (3.1)$$

เมื่อ $K \approx 10^{19} - 10^{20}$ และ χ_{\max} คือ ค่าสูงสุดของค่าศักย์การแตกตัวเป็นไอออนของก๊าซ ดังนั้น ถ้าพลาสมาที่เกิดจากก๊าซอาร์กอนมี $T_{eV} = 500$ eV และมี $\chi_{\max} \approx 4426$ eV ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมาจากการคำนวณมีค่า $N_e \approx 1.9 \times 10^{31} \text{ cm}^{-3}$ และถ้าพลาสมาที่เกิดจากก๊าซไนโตรเจนมี $T_{eV} = 500$ eV และมี $\chi_{\max} \approx 667$ eV ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของไนโตรเจนพลาสมาจากการคำนวณมีค่า $N_e \approx 6.6 \times 10^{28} \text{ cm}^{-3}$ เป็นต้น สำหรับเครื่องพลาสมาฟิวส์ที่ใช้ในการทดลองจะมี $N_e \approx 10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า N_e^{\min} จากการคำนวณ ดังนั้น แบบจำลอง LTE ไม่เหมาะสมที่จะนำมาอธิบายพลาสมาจากเครื่องพลาสมาฟิวส์ที่ใช้ในงานวิจัย

(2) แบบจำลองสมดุลโคโรนา

ในกรณีแบบจำลอง LTE จำกัดความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของพลาสมาที่น้อยที่สุด N_e^{\min} แต่สำหรับแบบจำลองโคโรนามีข้อจำกัดของปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่มากที่สุด N_e^{\max} แบบจำลองโคโรนาไม่อาจใช้ได้สำหรับกรณีของพลาสมาที่มี N_e มากไปกว่าสมการที่ (3.2) [10]

$$N_e^{\max} \approx 6.5 \times 10^{16} (z+1)^6 (T_{eV})^{1/2} e^{\left(\frac{0.1(z+1)^2}{T_{eV}}\right)} \quad (3.2)$$

และใช้ได้กับพลาสมาที่เกิดจากก๊าซที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ $z=1$ หรือไฮโดรเจน และก๊าซที่มีเลขควอนตัมหลัก (Principal quantum number) $n \leq 6$

ถ้าพลาสมาที่เกิดจากก๊าซอาร์กอนมี $z=18$ และถ้ามี $T_{eV}=1000$ eV ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมาจากการคำนวณมีค่า $N_e \approx 2.4 \times 10^{25} \text{ cm}^{-3}$ ถ้าพลาสมาที่เกิดจากก๊าซออกซิเจนมี $z=8$ และถ้ามี $T_{eV} \approx 1000$ eV อิเล็กตรอนโวลต์ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของอาร์กอนพลาสมาจากการคำนวณจะมีค่า $N_e \approx 5.3 \times 10^{24} \text{ cm}^{-3}$ เป็นต้น สำหรับเครื่องพลาสมาฟิวส์ที่ใช้ในการทดลองจะมี $N_e \approx 10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า N_e^{\max} จากการคำนวณ

(3) แบบจำลองสมดุลการชน – การแผ่รังสี

แบบจำลองสมดุลการชน – การแผ่รังสี หรือ แบบจำลอง CR [11] ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเติมเต็มช่องว่างที่เกิดขึ้นของปริมาณจำนวนความหนาแน่นของอิเล็กตรอน เมื่อแบบจำลอง LTE หรือแบบจำลองโคโรนาไม่อาจใช้ได้ โดยได้แก้ไขแบบจำลองโคโรนาด้วยการเพิ่มการคำนวณการชนเพื่อเปลี่ยนระดับพลังงานเหมือนกับการสลายตัวปล่อยรังสีจากระดับพลังงานที่สูง และการชนของวัตถุสามชิ้น เป็นต้น โดยหลักการความยากของแบบจำลองนี้คือ แบบจำลองนี้มีการคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งจะต้องใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

ดังนั้น แบบจำลองโคโรนาจึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมมากกว่าแบบจำลองอื่นในการอธิบายพฤติกรรมของพลาสมาที่เกิดจากเครื่องพลาสมาฟิวส์

3.1.2 การคำนวณจากแบบจำลองโคโรนา

ในกรณีของพลาสมาที่มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อเกิดการชนด้วยความถี่ที่สูงเพียงพอจะทำให้เกิดสภาวะที่เสถียรของสมดุลอุณหพลวัต (Thermodynamic Equilibrium) จะใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการอธิบายลักษณะของโคโรนาดวงอาทิตย์ (The solar corona) โดยมีชื่อว่า แบบจำลองสมดุลโคโรนา สำหรับอธิบายพลาสมาในลักษณะเช่นเดียวกับโคโรนาของดวงอาทิตย์ โดยแบบจำลองนี้สมมุติว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการเกิดพลาสมาให้เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ หมายความว่าอิเล็กตรอนจะต้องเกิดสมดุลอุณหพลภาพ (Thermal equilibrium) เสมอในระหว่างพวกมันเอง นั่นคือ อิเล็กตรอนนั้นจะมีการแจกแจงความเร็วแบบแมกเวล (Maxwell velocity distribution) [10,12]

โดยกำหนดให้

$$S(T_e, z) = \text{สัมประสิทธิ์การชนไอออนไนเซชัน}$$

$$R(T_e, z+1) = \text{สัมประสิทธิ์เรดิเอทีฟรีคอมบิเนชัน}$$

$$\frac{N_{z+1}}{N_z}, f_z(T_e, N_e) = \text{สัดส่วนจำนวนไอออนของสถานะไอออนไนซ์ที่ติดกัน}$$

$$N_{z+1} = \text{จำนวนความหนาแน่นของไอออนของประจุ } z+1$$

$$N_z = \text{จำนวนความหนาแน่นของไอออนของประจุ } z$$

$$N_i = \text{ความหนาแน่นของไอออนและอะตอมทั้งหมด}$$

$$N_0 = \text{จำนวนความหนาแน่นของอะตอมก๊าซในภาวะปกติ}$$

$$N_e = \text{จำนวนความหนาแน่นของอิเล็กตรอน}$$

$$\chi_z = \text{ศักย์การแตกตัวเป็นไอออน (eV)}$$

$$T_e = \text{อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (eV)}$$

$$\frac{N_0}{N_i}, \frac{1}{S_f} = \text{สัดส่วนความหนาแน่นของอะตอมที่เป็นกลางกับไอออน}$$

$$\alpha_z = \text{สัดส่วนไอออนที่ถูกไอออนไนซ์ไปสู่สถานะไอออนไนซ์ที่ } z$$

ถ้าสมมติว่าชนิดไอออน (The ionic species) อยู่ในสถานะพื้นเท่านั้น และเมื่ออิเล็กตรอนถูกชนแล้วเกิดการไอออไนเซชันทุกครั้ง โดยการเรดิเอทีฟรีคอมบิเนชัน (Radiative Recombination) ดังนั้น สามารถเขียนสมการได้ว่า [10,12]

$$N_e N_z S(T_e, z) = N_e N_{z+1} R(T_e, z+1) \quad (3.3)$$

จะได้สัดส่วนจำนวนไอออนของสถานะไอออไนเซชันที่ติดกัน ดังนี้

$$\frac{N_{z+1}}{N_z} = \frac{S(T_e, z)}{R(T_e, z+1)} \quad (3.4)$$

แทนค่า $S(T_e, z)$ และ $R(T_e, z+1)$ ในสมการที่ (3.2) จะได้

$$\frac{N_{z+1}}{N_z} = 1.27 \times 10^8 \frac{1}{\chi_z^2} \left(\frac{kT_e}{\chi_z} \right)^{3/4} \exp\left(-\frac{\chi_z}{kT_e}\right) \quad (3.5)$$

จากเงื่อนไขที่ว่าพลาสมาจะต้องเปลี่ยนอย่างช้า ๆ นั่นคือ สมดุลได้เกิดขึ้นแล้ว และเวลาสำหรับการเกิดพลาสมาที่สมดุล เรียกว่า เวลาผ่อนคลายของอะตอม (The atomic relaxation time) [12]

$$\tau \approx \frac{10^{12}}{N_e} \text{ (s)} \quad (3.6)$$

ถ้าช่วงชีวิตของพลาสมาที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าเวลาผ่อนคลาย จะสามารถใช้แบบจำลองโคโรนาในการอธิบายพลาสมานี้ได้

สำหรับเครื่องพลาสมาไฟกัสขนาดเล็กความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพลาสมามีค่า $N_e \approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ และช่วงชีวิตของพลาสมาในช่วงเรเดียลมีค่าประมาณ 50 ns เท่านั้น [12] ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเวลาผ่อนคลายของอะตอม (100 ns) ดังนั้น พลาสมาที่เกิดจากเครื่องพลาสมาไฟกัสจึงสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองสมดุลโคโรนา

3.1.3 การคำนวณสถานะไอออไนซ์

จากสมการที่ (3.5) สามารถนำมาคำนวณหาสัดส่วนของสถานะไอออไนซ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ โดยสามารถเขียนสมการสัดส่วนจำนวนไอออนของสถานะไอออไนซ์ที่ติดกันใหม่ ดังนี้ [12]

$$\frac{N_{z+1}}{N_z} = f_z(T_e, N_e) \quad (3.7)$$

และจำนวนความหนาแน่นของไอออนของประจุ z จากสมการที่ (3.7) สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{cases} N_1 = N_0 f_0 \\ N_2 = N_1 f_1 = N_0 f_0 f_1 \\ N_3 = N_2 f_2 = N_1 f_1 f_2 = N_0 f_0 f_1 f_2 \\ \dots\dots\dots \\ N_{z_n} = N_{z_n-1} f_{z_n-1} = \dots\dots = N_0 f_0 f_1 \dots\dots f_{z_n-1} \end{cases} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.8) จะได้ความหนาแน่นของไอออนและอะตอมทั้งหมด คือ

$$\begin{aligned} N_i &= \sum_{Z=0}^{z_n} N_Z \\ &= N_0 (1 + f_0 + f_0 f_1 + \dots\dots + f_0 f_1 \dots\dots f_{z_n-1}) \\ &= N_0 S_f \end{aligned} \quad (3.9)$$

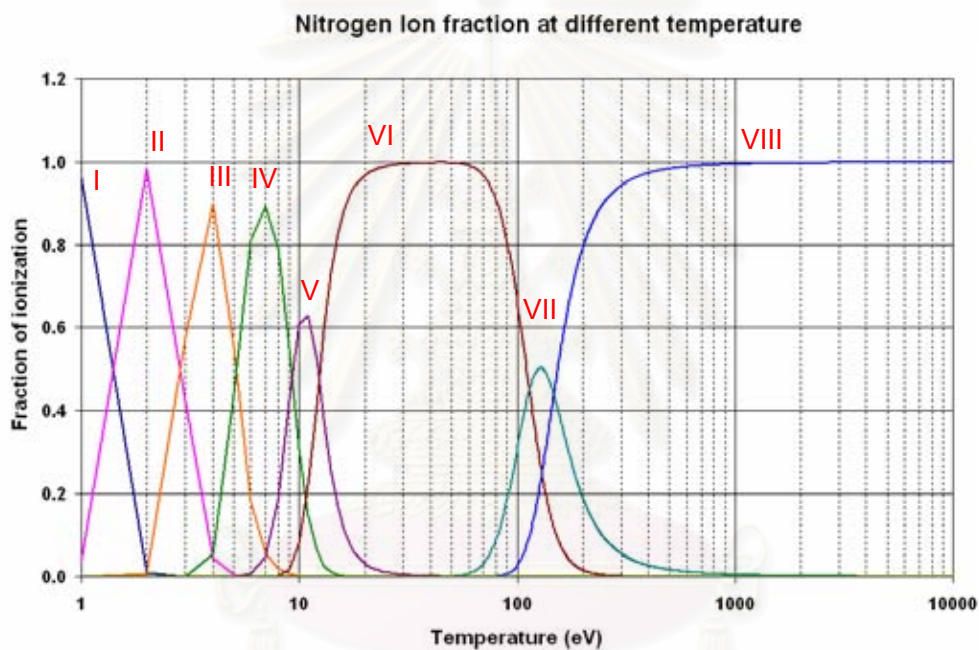
ดังนั้น สัดส่วนความหนาแน่นของอะตอมที่เป็นกลาง (Neutral atom) คือ

$$\frac{N_0}{N_i} = \frac{1}{S_f} \quad (3.10)$$

และสัดส่วนของไอออนที่ซึ่งถูกไอออไนซ์ไปสู่สถานะไอออไนซ์ที่ z คือ

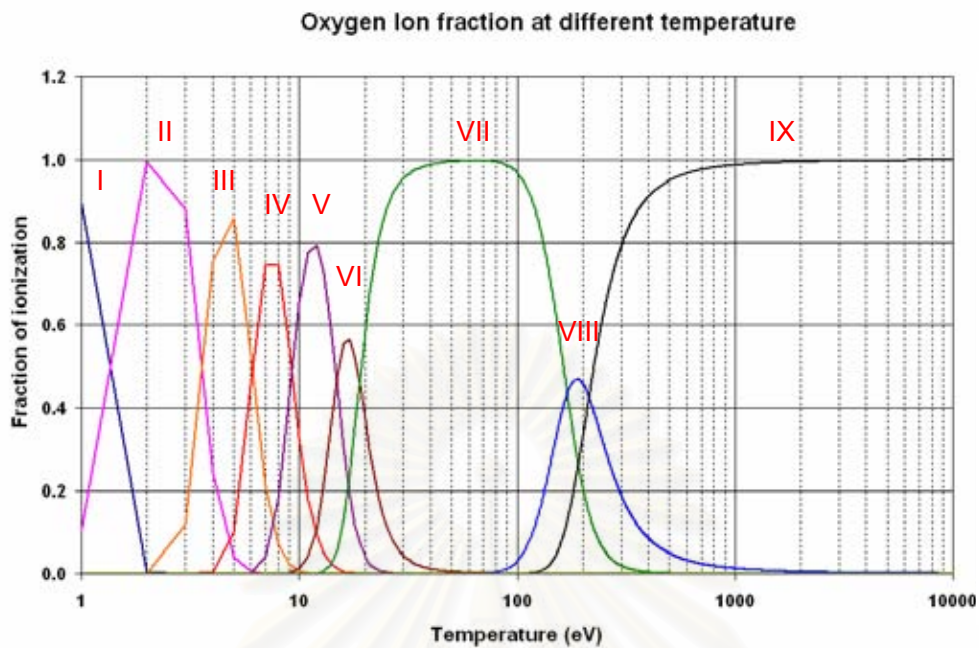
$$\alpha_z \equiv \frac{N_z}{N_i} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.5) (3.7) และ (3.11) สามารถคำนวณและเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนไอออนที่ถูกไอออนไนซ์ไปสู่สถานะไอออนไนซ์ที่ z ตามแบบจำลองสมดุลโคโรนา [สามารถศึกษาวิธีการคำนวณอย่างละเอียดได้ที่ภาคผนวก ค] เช่น ไนโตรเจนพลาสมา (Nitrogen Plasma) ออกซิเจนพลาสมา (Oxygen Plasma) และอาร์กอนพลาสมา (Argon Plasma) ซึ่งเป็นพลาสมาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 รูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ตามลำดับ

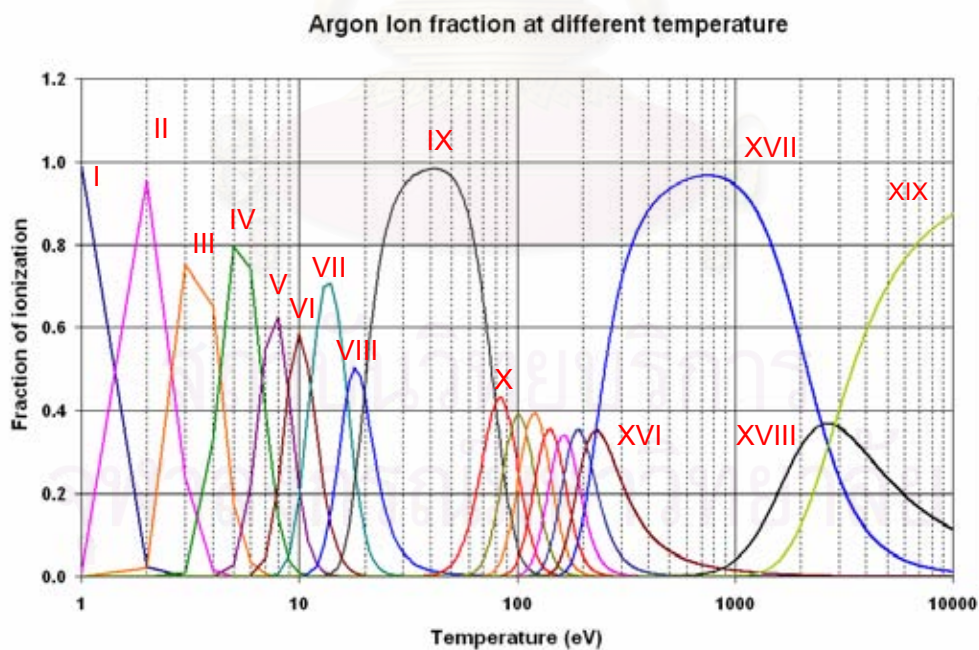


รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนไอออนที่ถูกไอออนไนซ์ไปสู่สถานะไอออนไนซ์ที่ z ของไนโตรเจนพลาสมาจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองโคโรนา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนไอออนที่ถูกไอออนไนซ์ไปสู่สถานะไอออนไนซ์ที่ z ของออกซิเจนพลาสมาจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองโคโรนา



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนไอออนที่ถูกไอออนไนซ์ไปสู่สถานะไอออนไนซ์ที่ z ของอาร์กอนพลาสมาจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองโคโรนา

3.2 การแผ่รังสีจากพลาสมา

พลาสมาประกอบไปด้วยกลุ่มของอิเล็กตรอน และไอออน เกิดขึ้นจากสสารถูก กระตุ้นไปสู่สถานะที่สูงกว่าสถานะไอออไนซ์ (highly ionized state) กระบวนการไอออไนซ์เกิดขึ้น ได้จากการทำให้ก๊าซมีอุณหภูมิสูงมาก ๆ โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิประมาณ $5 \times 10^5 - 10^7$ K หรือ ประมาณ $50 - 1000$ eV ดังเช่นในบรรยากาศของดวงดาวที่มีอุณหภูมิสูงมาก และสามารถจะ เกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่สามารถควบคุมได้ เช่น เครื่องพินช์ (Pinch Devices) และโท คามัค (Tokamaks) เป็นต้น

ในระหว่างกระบวนการเกิดพลาสมาจะเกิดการแผ่รังสีขึ้น โฟตอนที่ถูกปลดปล่อย ออกมาจะมีพลังงานสเปกตรัมในช่วงอินฟราเรดถึงรังสีแกมมา ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของพลาสมาที่ เกิดขึ้น กระบวนการแผ่รังสีจากพลาสมาโดยพื้นฐานมีอยู่ 3 กระบวนการ จากกระบวนการดังกล่าว สามารถจะคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาจากรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นได้ ดังจะได้กล่าว ต่อไป

3.2.1 เบรมสตราลูง

ภายในพลาสมาอิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่ภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของกลุ่ม อนุภาคในพลาสมา อาจเกิดอันตรกิริยาทำให้อิเล็กตรอนถูกหน่วง (retard) และผลจากการถูก หน่วงจะทำให้อิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน กระบวนการนี้เรียกว่า เบรมสตรา ลูง เมื่ออิเล็กตรอนที่ปล่อยโฟตอนออกมาอยู่ในสถานะอิสระทั้งก่อนและหลังจากเกิดปฏิกิริยา จึง เรียกการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า ฟรี - ฟรี แทรนซิชัน (Free - Free transitions) โดยเบรมสตราลูงทำให้ เกิดโฟตอนที่มีพลังงานที่แตกต่างกันอย่างต่อเนื่องและทำให้เกิดสเปกตรัมพลังงานของโฟตอนที่ ต่อเนื่อง

ในกรณีพลาสมาที่เกิดจากการไอออไนซ์ของก๊าซที่มีเลขอะตอมสูงเบรมสตราลูง จะเกิดขึ้นได้เด่นชัดมากกว่ากระบวนการแผ่รังสีอื่น ๆ รังสีที่แผ่ออกมาจะเป็นรังสีแบบต่อเนื่อง

โดยความเข้มของการแผ่รังสีแบบเบรมสตราลูงต่อความถี่และปริมาตร [12,13]

$$E_\nu = \frac{dE_{ff}}{d\nu} = CN_e N_i Z_i^2 \left(\frac{\chi_H}{kT_e} \right)^{\frac{1}{2}} \bar{g}_{ff} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_e} \right) \quad (3.12)$$

$$C = 2^7 \left(\frac{\pi}{3} \right)^2 \alpha^3 \chi_H a_0^3 = 1.7 \times 10^{-53} \text{ J} \cdot \text{m}^3 \quad (3.13)$$

เมื่อแปลงสมการที่ (3.12) เป็นความเข้มของการแผ่รังสีแบบเบรมสตราลุงต่อความยาวคลื่นและปริมาตรจะได้

$$E_\lambda = \frac{dE_{ff}}{d\lambda} = CN_e N_i Z_i^2 \left(\frac{\chi_H}{kT_e} \right)^{\frac{1}{2}} \bar{g}_{ff} \frac{c}{\lambda^2} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT_e}\right) \quad (3.14)$$

เมื่อ

$$E_\nu = \text{ความเข้มของการแผ่รังสีต่อความถี่และปริมาตร} \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot \text{sec}} \text{ หรือ } \frac{\text{W}}{\text{m}^3}$$

$$E_\lambda = \text{ความเข้มของการแผ่รังสีต่อความยาวคลื่นและปริมาตร} \frac{\text{W}}{\text{m}^3 \text{ \AA}}$$

$$C = \text{ค่าคงตัว มีค่าเท่ากับ } 1.7 \times 10^{-53} \text{ J} \cdot \text{m}^3$$

$$\chi_H = \text{ค่าศักย์การแตกตัวเป็นไอออนของไฮโดรเจน } \approx 1360 \text{ eV}$$

$$\bar{g}_{ff} = \text{ฟรี - ฟรี กอนท์แฟกเตอร์ (The Free - Free Gaunt Factor)}$$

มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับความยาวคลื่นในช่วง 1–100 Å

$$c = \text{ความเร็วแสง } 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda = \text{ความยาวคลื่นในหน่วย } \text{Å}$$

3.2.2 รีคอมบิเนชัน

รีคอมบิเนชัน [12] คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานจลน์ E_k ว่างชนกับไอออน อิเล็กตรอนจะถูกจับไว้ในไอออน อิเล็กตรอนที่ถูกจับไว้ที่ระดับพลังงานหนึ่ง จะคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน เพื่อให้อิเล็กตรอนภายในไอออนนั้นอยู่ในสภาวะเสถียร โดยพบว่าพลังงานของโฟตอนจะมีค่าขึ้นกับพลังงานของอิเล็กตรอนและมีค่าต่อเนื่อง โดยสามารถ

เขียนสมการได้เป็น $h\nu = E_k + \chi_{i-1}^n$ สำหรับในกรณีที่โฟตอนมีพลังงานมากกว่า χ_{i-1}^n เท่านั้นที่จะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในสเปกตรัมต่อเนื่องขึ้น เรียกว่า ขอบรีคอมบิเนชัน (Recombination edges) โดยความเข้มของการแผ่รังสีแบบรีคอมบิเนชันต่อความถี่และปริมาตรเป็นดังสมการ ที่ (3.15)

$$E_\nu = \frac{dE_{fb}}{d\nu} = CN_e N_i \left(\frac{\chi_H}{kT_e} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\chi_{i-1}^n}{\chi_H} \right)^2 \frac{\zeta_n}{n} \bar{g}_{fb} \exp\left(-\frac{\chi_{i-1}^n - h\nu}{kT_e} \right) \quad (3.15)$$

เมื่อแปลงสมการที่ (3.15) เป็นความเข้มของการแผ่รังสีแบบรีคอมบิเนชันต่อความยาวคลื่นและปริมาตรจะได้

$$E_\lambda = \frac{dE_{fb}}{d\lambda} = CN_e N_i \left(\frac{\chi_H}{kT_e} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\chi_{i-1}^n}{\chi_H} \right)^2 \frac{\zeta_n}{n} \bar{g}_{fb} \frac{c}{\lambda^2} \exp\left(-\frac{\chi_{i-1}^n - \frac{hc}{\lambda}}{kT_e} \right) \quad (3.16)$$

เมื่อ

\bar{g}_{fb} = ฟรี-บาวน์ กอนท์แฟกเตอร์ (The Free – Bound Gaunt Factor)

ζ_n = จำนวนสถานะที่ว่างในระดับชั้นที่ n ก่อนการรีคอมบิเนชัน

χ_{i-1}^n = ศักย์ไอออไนเซชันของสถานะไอออนหลังจากการรีคอมบิเนชัน

3.2.3 การสลายตัวแผ่รังสี

เมื่ออะตอมหรือไอออนถูกชนโดยอนุภาคต่าง ๆ ทำให้อิเล็กตรอนภายในมีพลังงานเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่าเดิม จากนั้นอิเล็กตรอนในอะตอมหรือไอออนจะคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนเพื่อจะกลับสู่ระดับพลังงานเดิม เพื่อให้อยู่ในสภาวะเสถียร พลังงานของโฟตอนจะมีค่าเท่ากับผลต่างของสองระดับพลังงานดังกล่าว ดังนั้นลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดพลังงานที่มีค่าไม่ต่อเนื่อง จึงเรียกว่า การแผ่แบบเส้น (Line radiation) และเป็นการเปลี่ยนแปลงระหว่างสองสถานะภายในไอออนหรืออะตอม จึงเรียกว่า บาวน์-บาวน์ แทรนซิชัน (Bound – Bound transitions) [12]

โดยความเข้มของการแผ่แบบเส้นระหว่างการเปลี่ยนระดับจากระดับ p ไปสู่ระดับ q เขียนได้เป็น

$$I_{pq} = (hv)A(p,q)N(p) = \frac{hc}{\lambda} A(p,q)N(p) \quad (3.17)$$

เมื่อ

I_{pq} = ความเข้มของการแผ่แบบเส้นระหว่างการเปลี่ยนระดับจากระดับ p
ไปสู่ระดับ q มีหน่วยเป็น $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$

$A(p,q)$ = ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน

$N(p)$ = จำนวนความหนาแน่นของสถานะที่สูงกว่า

3.3 การคำนวณเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์โดยใช้แบบจำลองโคโรนา

จากหัวข้อ 3.2 และหัวข้อ 3.3 ทำให้สามารถคำนวณเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นเส้นกราฟที่สามารถบอกคุณสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นได้ โดยอาศัยทฤษฎีการแผ่รังสีเอกซ์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากพลาสมาที่สามารถผ่านตัวกรอง (Filter) ที่ความหนาต่าง ๆ กัน จากนั้นจะสามารถคำนวณเส้นกราฟเพื่อคำนวณคุณสมบัติของอิเล็กตรอนในพลาสมา [12-16]

โดยกำหนดให้

I_0	= ความเข้มของรังสีเอกซ์ก่อนผ่านแผ่นตัวกรอง
I	= ความเข้มของรังสีเอกซ์หลังผ่านแผ่นตัวกรอง
μ	= ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแผ่นตัวกรอง
μ_s	= ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของซิลิกอน
x	= ความหนาของแผ่นตัวกรอง
x_1	= ความหนาของชั้นซิลิกอน
x_2	= ความหนาของชั้นผิวหน้า
Q	= จำนวนประจุทั้งหมดที่เกิดขึ้นในพินไดโอด
$I(t)$	= กระแสไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลา

$V(t)$	= ความต่างศักย์ที่ขึ้นกับเวลา
E'_λ	= พลังงานของรังสีเอกซ์ที่ถูกดูดกลืน
E''_λ	= พลังงานของรังสีเอกซ์ที่ถูกดูดกลืนเมื่อมีแผ่นตัวกรอง
$S(\lambda_0)$	= ค่าตอบสนองของหัววัดรังสีเอกซ์
$S(\lambda)$	= ค่าตอบสนองของฟิสิกัลคอนไดโอด BPX 65
d	= ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์กับเครื่องวัดรังสีเอกซ์
A	= พื้นที่ตอบสนองรังสี
$P(\lambda, T_e)$	= ความเข้มของการแผ่รังสีต่อความยาวคลื่นและปริมาตร จากแหล่งกำเนิดรังสีโดยตรง $\frac{W}{m^3 \text{ } \overset{\circ}{A}}$
E_λ	= ความเข้มของการแผ่รังสีต่อความยาวคลื่นและปริมาตร จากการคำนวณ (สมการที่ (3.14) และ (3.16))
V_{plasma}	= ความต่างศักย์ของพลาสมา
$\frac{dQ}{dt}$	= อัตราการเปลี่ยนแปลงประจุต่อเวลา
PST	= ผลรวมความเข้มทั้งหมดของการแผ่รังสีที่อุณหภูมิ T_e

จากสมบัติของรังสีเอกซ์ จำนวนโฟตอนหลังผ่านตัวกรองเป็นไปตามสมการ [13]

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (3.18)$$

จำนวนประจุที่เกิดขึ้นในฟิสิกัลคอนไดโอดช่วงที่ได้รับโฟตอนของรังสีเอกซ์จะได้

$$Q = \int I(t) dt = \frac{\int V(t) dt}{50} \quad (3.19)$$

$$V(t) = I(t) \times 50 \quad (3.20)$$

หากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นจุด และเป็นจุดกำเนิดเอกภพรงค์ (Monochromatic point source) หรือเป็นการแผ่รังสีแบบเส้น เมื่อ $\lambda = \lambda_0$ จากสมการที่ (3.19) สามารถคำนวณพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ถูกดูดกลืน ได้ดังสมการ

$$E'_\lambda = \frac{Q}{S(\lambda_0)} \quad (3.21)$$

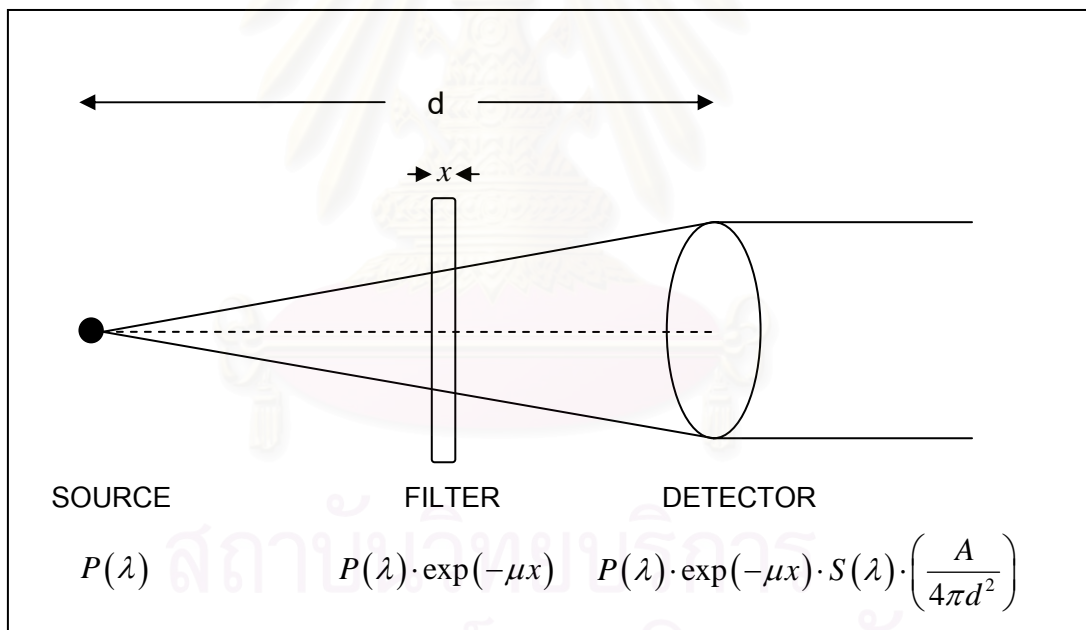
เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านแผ่นดูดกลืน (Foil absorption)

$$E''_\lambda = \frac{Q}{S(\lambda_0)} \cdot \frac{1}{\exp(-\mu x)} \quad (3.22)$$

ดังนั้น จะได้พลังงานทั้งหมดของรังสีเอกซ์ที่แผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิด

$$E_x = \frac{Q}{S(\lambda_0)} \cdot \frac{1}{\exp(-\mu x)} \cdot \frac{4\pi d^2}{A} \quad (3.23)$$

การตรวจวัดรังสีเอกซ์จากพลาสติกนั้น ความเข้มของแหล่งกำเนิดจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านแผ่นตัวกรองและเมื่อเข้าสู่ฟิโนไดโอด ดังแสดงในภาพที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพความเข้มของรังสีเอกซ์ $P(\lambda)$ แบบหลายความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ

เมื่อ $S(\lambda)$ คือ ค่าตอบสนองของ BPX65 ซึ่งเป็นฟิโนไดโอดที่ใช้ในการตรวจวัดรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นมีค่าตามสมการ

$$S(\lambda) = 0.28 \exp(-\mu_s x_1) [1 - \exp(-\mu_s x_2)] \quad (3.24)$$

พลาสมาที่เกิดจากเครื่องพลาสมาไฟกัส จะให้รังสีเอกซ์แบบหลายความยาวคลื่น และหากพิจารณารังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องที่เกิดจากเบรมสตราลุงและรีคอมบิเนชัน จะได้อัตราการการเปลี่ยนแปลงประจุต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปกับการแผ่รังสีเอกซ์จากพลาสมา ดังนี้

$$\frac{dQ}{dt} = V_{plasma} \int_{all \lambda} P(\lambda, T_e) \cdot \frac{A}{4\pi d^2} \cdot \exp(-\mu x) \cdot S(\lambda) d\lambda \quad (3.25)$$

จะได้สมการในการคำนวณค่าผลรวมความเข้มทั้งหมดของการแผ่รังสีที่อุณหภูมิ T_e ใด ๆ ดังสมการ

$$PST = S(\lambda) \cdot \exp(-\mu x) \cdot \sum E_\lambda \quad (3.26)$$

ดังนั้น จะได้สมการที่จะนำมาใช้ในการคำนวณเส้นส่งผ่านรังสีเอกซ์ เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา การเขียนกราฟเส้นส่งผ่านรังสีเอกซ์เพื่อเทียบกับอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา จะต้องแทนค่าอุณหภูมิที่ต้องการในสมการที่ (3.26) และต้องเปลี่ยนความหนาของแผ่นตัวกรองที่ใช้ในการกั้นฟินไดโอดแต่ละตัว แผ่นตัวกรองที่ใช้จะต้องเป็นตัวกรองชนิดเดียวกัน แล้วนำค่าที่คำนวณได้มาหาอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การคำนวณโดยวิธีการอัตราส่วนตัวกรองเพื่อคำนวณเส้นส่งผ่านรังสีเอกซ์

PIN DIODE CHANNEL	$\sum PST \text{ at } T_e$	Ratio at T_e : $R(T_e)$
1	$\sum (PST)_1$	$R_1 = \frac{\sum (PST)_1}{\sum (PST)_1}$
2	$\sum (PST)_2$	$R_2 = \frac{\sum (PST)_2}{\sum (PST)_1}$
3	$\sum (PST)_3$	$R_3 = \frac{\sum (PST)_3}{\sum (PST)_1}$
4	$\sum (PST)_4$	$R_4 = \frac{\sum (PST)_4}{\sum (PST)_1}$
5	$\sum (PST)_5$	$R_5 = \frac{\sum (PST)_5}{\sum (PST)_1}$

การสร้างกราฟดังกล่าวเพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบกับอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาที่เกิดจากการทดลอง เมื่อใช้ก๊าซต่าง ๆ กันนั้น จะต้องทราบเงื่อนไขในการคำนวณ โดยจากการคำนวณข้างต้นมีการคำนวณโดยหลักการที่ว่ารังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจากพลาสมา เกิดจากกระบวนการทั้ง 2 กระบวนการ คือ เบรมสตราลูง และ รีคอมบิเนชัน แต่โดยส่วนใหญ่รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นในพลาสมาจากเครื่องพลาสมาไฟกัสจะเกิดจากกระบวนการเบรมสตราลูงโดยส่วนใหญ่ จึงต้องมีเงื่อนไขในการที่จะสร้างและเลือกกราฟเพื่อนำมาใช้ โดยจะเป็นกราฟที่ประกอบด้วยผลรวมความเข้มของการแผ่รังสีแบบเบรมสตราลูงและรีคอมบิเนชัน หรือกราฟที่มีเฉพาะผลรวมความเข้มของการแผ่รังสีแบบเบรมสตราลูงเท่านั้นในการคำนวณ โดยขึ้นกับเงื่อนไขดังสมการ

$$kT_e > 3Z_i^2 \chi_H \quad (3.27)$$

ถ้าคำนวณออกมาเป็นดังสมการที่ (3.27) จะได้ว่าความเข้มของการแผ่รังสีแบบเบรมสตราลูงจะมีผลมากกว่าความเข้มของการแผ่รังสีแบบรีคอมบิเนชันต่อความยาวคลื่นและปริมาตร นั่นคือ

$$\frac{dE_{ff}}{d\lambda} > \frac{dE_{fb}}{d\lambda} \quad (3.28)$$

ตัวอย่าง เช่น ถ้าพลาสมาที่เกิดจากก๊าซอาร์กอน $Z_i = 18$, $\chi_H = 1.36$ keV ดังนั้น $kT_e = 3Z_i^2 \chi_H = 1,321,920$ eV จะได้ $T_e = 1.32$ keV หากผลการทดลองวัดอุณหภูมิอิเล็กตรอนในพลาสมาที่เกิดจากก๊าซอาร์กอนมีค่ามากกว่า 1.32 keV จะต้องเลือกใช้กราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ที่ใช้เฉพาะผลรวมความเข้มของการแผ่รังสีแบบเบรมสตราลูงเท่านั้น

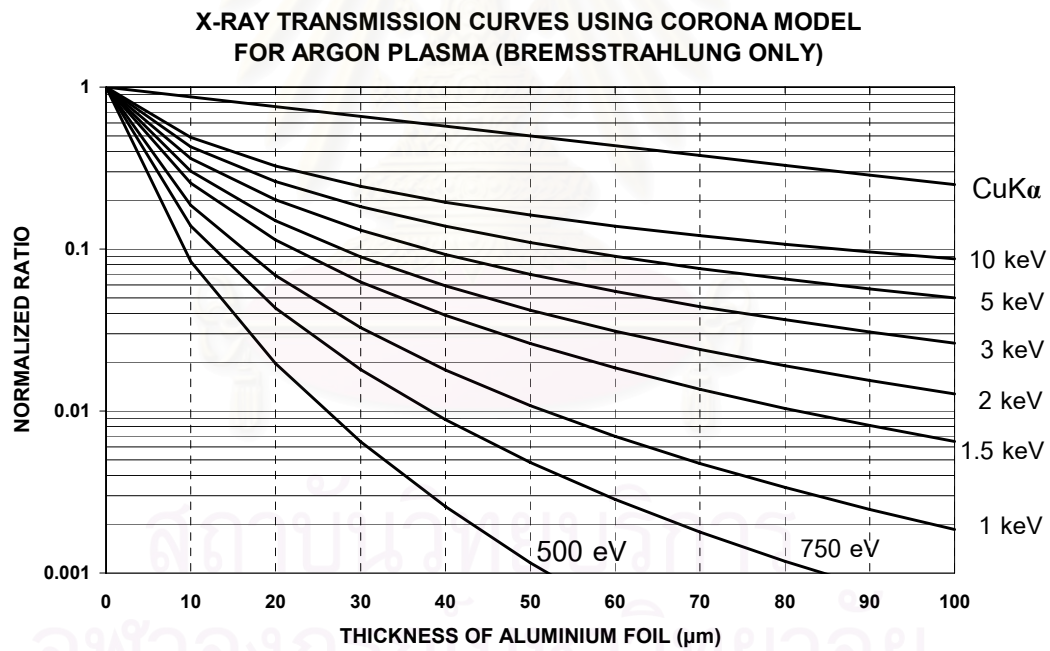
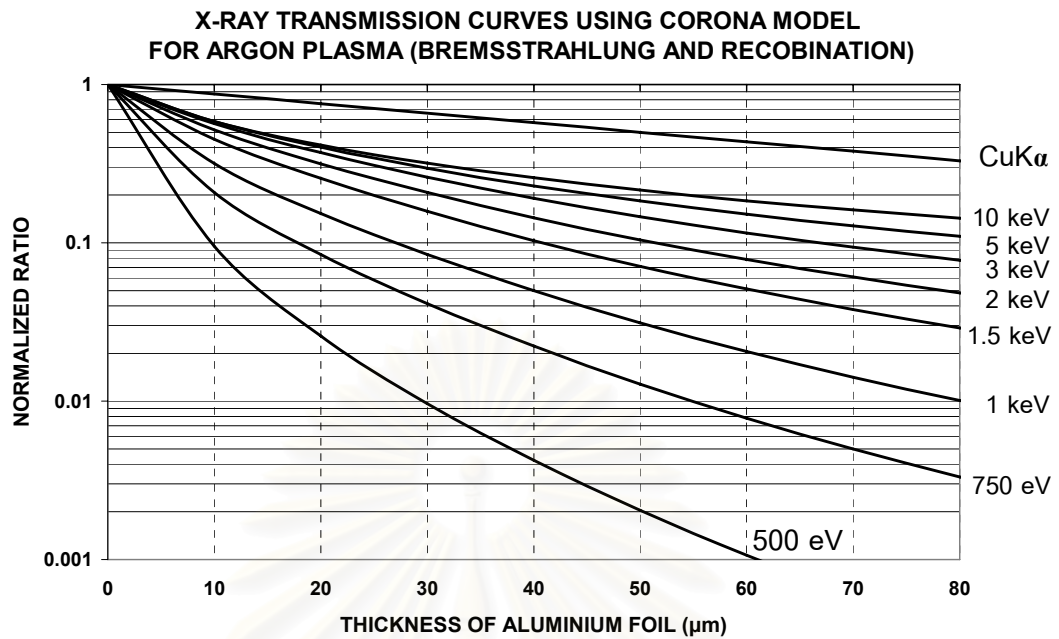
จากการคำนวณตามสมการ (3.27) สำหรับก๊าซอาร์กอน ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน พบว่าการคำนวณกราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์จะใช้เฉพาะผลรวมความเข้มของการแผ่รังสีแบบเบรมสตราลูงเท่านั้น

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าอัตราส่วนตัวกรอง $R(T_e)$ กับอุณหภูมิ T_e และความหนาของแผ่นกรองรังสีเอกซ์ที่ใช้ โดยกราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์โดยใช้แบบจำลองโคโรนาที่สร้างขึ้น สำหรับก๊าซอาร์กอน ออกซิเจน และไนโตรเจน จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 ตามลำดับ (วิธีการสร้างกราฟดังกล่าว ได้แสดงอย่างละเอียดในภาคผนวก ค)

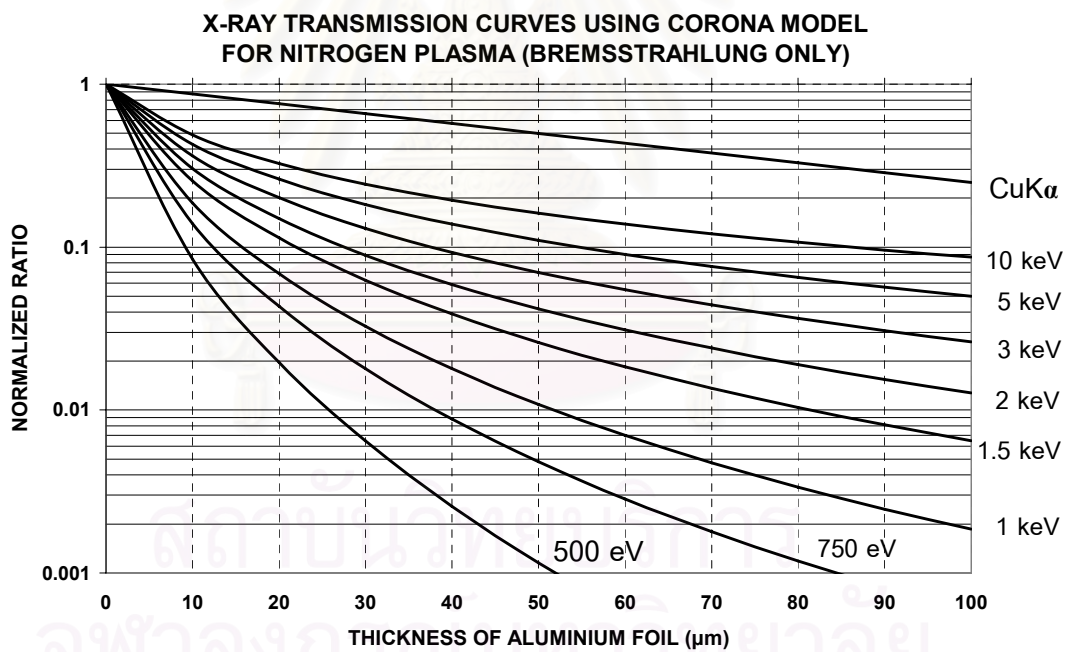
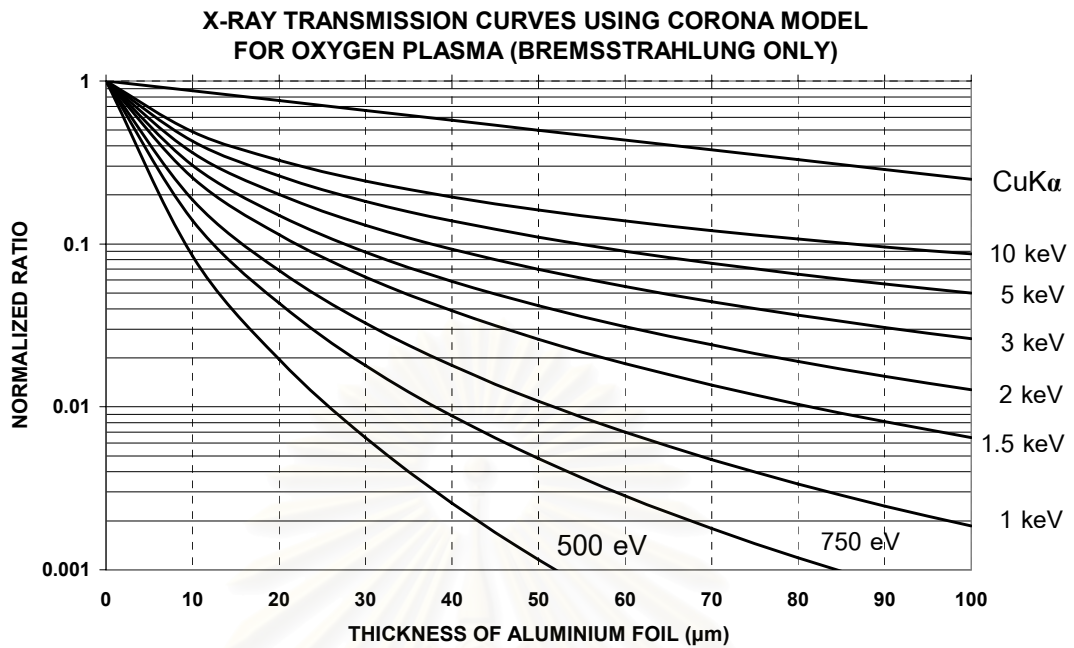
ดังนั้น เมื่อได้กราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์แล้ว จะนำไปคำนวณหาคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ของพลาสมาจากการทดลองวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลาต่อไป วิธีในการคำนวณคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ในพลาสมาดังกล่าว เรียกว่า วิธีอัตราส่วนตัวกรอง ข้อมูลจากการทดลองจะนำมาเปรียบเทียบกับเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ที่ได้สร้างขึ้น จะกล่าวถึงวิธีการดังกล่าวอย่างละเอียดในบทที่ 4



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 กราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของอาร์กอนพลาสมาจากแบบจำลองโคโรนา
โดยกราฟในรูป (ก) แสดงกราฟที่เกิดจาก *PST* แบบเบรมสตราลุงและรีคอมบิเนชัน
(ข) แสดงกราฟที่เกิดจาก *PST* แบบเบรมสตราลุงเท่านั้น



รูปที่ 3.6 กราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของพลาสมาจากแบบจำลองโคโรนา
โดยกราฟในรูป (ก) แสดงกราฟสำหรับออกซิเจนพลาสมา
(ข) แสดงกราฟสำหรับไนโตรเจนพลาสมา

บทที่ 4

เครื่องพลาสมาไฟกัสและเครื่องมือวัด

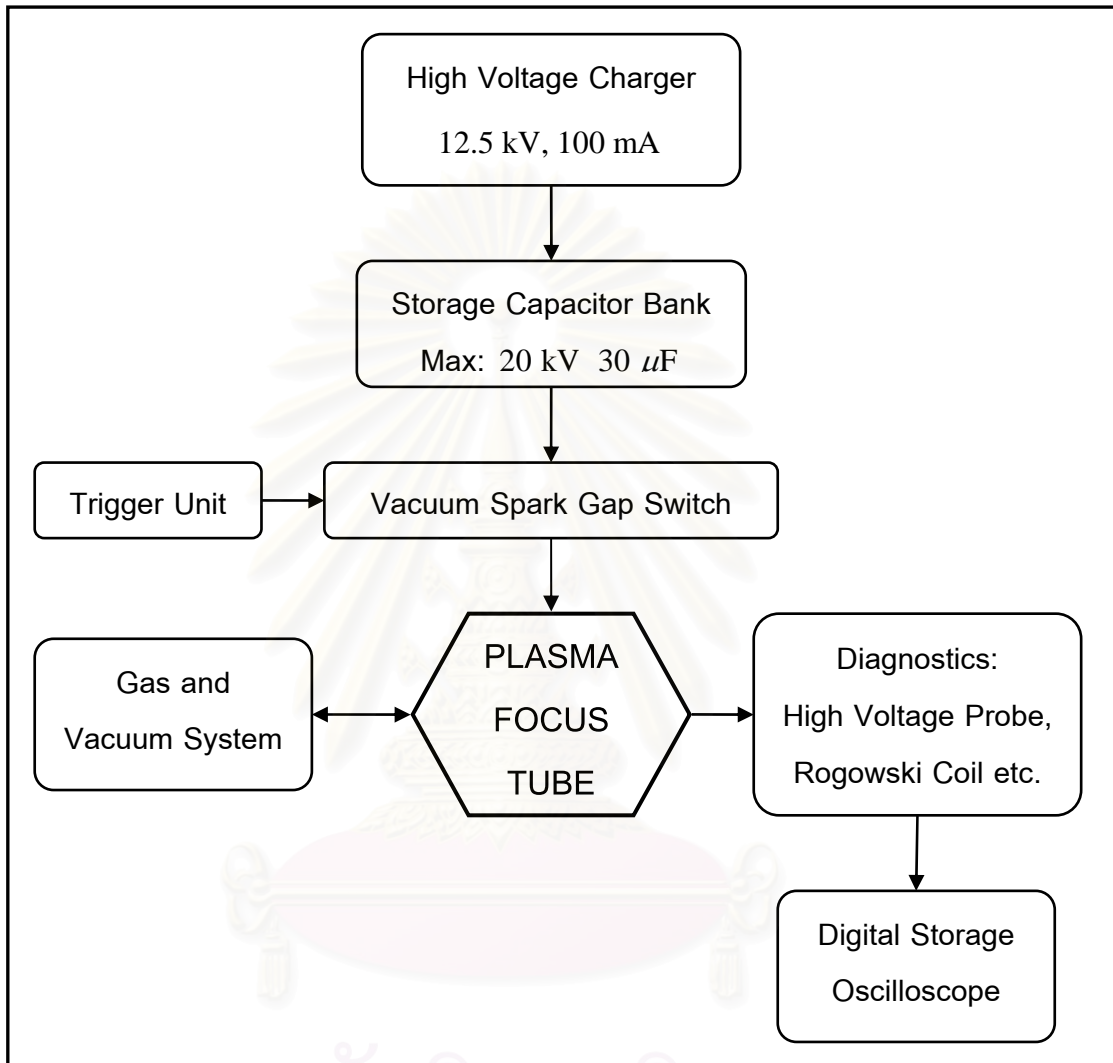
การวัดคุณสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นจากเครื่องพลาสมาไฟกัสจำเป็นต้องมีเครื่องมือในการวัดโดยเฉพาะ เนื่องจากเครื่องพลาสมาไฟกัสเป็นเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบช่วงช่วงเวลาในขณะที่เกิดพลาสมาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก ในช่วงเวลาประมาณ $10 \mu\text{s}$ เท่านั้น โดยการวัดคุณสมบัติที่สำคัญประกอบด้วย กระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมา (The total current through the plasma) ความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมา (The total voltage across the plasma) และการวัดอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาจากการแผ่รังสีเอกซ์ เป็นต้น ซึ่งการวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ดังกล่าวต้องอาศัยเครื่องมือวัดที่แตกต่างกัน ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

4.1 เครื่อง UNU/ICTP พลาสมาไฟกัส

เครื่อง UNU/ICTP (United Nation University/International Center for Theoretical Physics) พลาสมาไฟกัส [17] เป็นรูปแบบของเครื่องพลาสมาไฟกัสที่ใช้ในงานวิจัย เครื่อง UNU/ICTP พลาสมาไฟกัส เป็นเครื่องพลาสมาไฟกัสขนาดเล็กพลังงานขนาด 2.34 kJ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าภายใต้ความต่างศักย์ 12.5 kV ให้แก่ตัวเก็บประจุขนาด $30 \mu\text{F}$ โครงสร้างของระบบเครื่องพลาสมาไฟกัสจะมีลักษณะดังแสดงในแผนภาพที่ 4.1 สำหรับเครื่องพลาสมาไฟกัสที่ใช้ในงานวิจัยจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบเครื่องพลาสมาที่สำคัญ สามารถแบ่งออกเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

1. เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (high voltage charger) เป็นเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่ได้สร้างขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัย เพื่อให้สามารถจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าความต่างศักย์สูงสุด 15 kV โดยวงจรไฟฟ้าของเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงได้แสดงในรูปที่ 4.3
2. ถังเก็บประจุ (storage capacitor bank) หรือตัวเก็บประจุสามารถทนความต่างศักย์สูงสุดได้ถึง 20 kV และสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้สูงสุด $30 \mu\text{F}$ แต่ในการทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ 12.5 kV เท่านั้น ดังนั้นพลังงานภายในจะมีค่าเท่ากับ 2.34 kJ

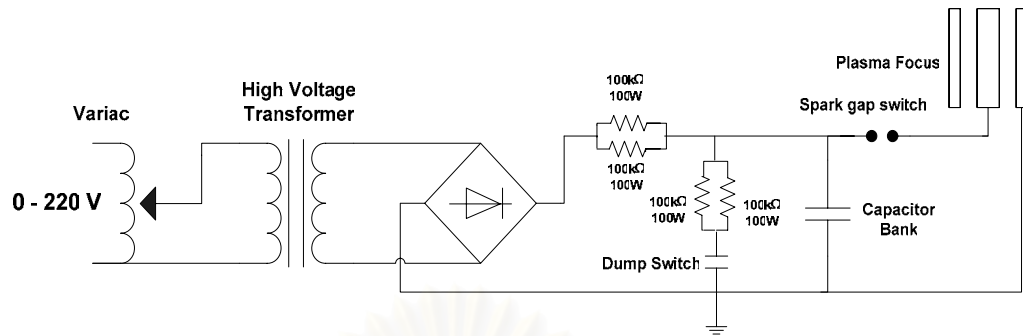
3. ทริกเกอร์และเก็บประกายแบบสุญญากาศ (Trigger Units and Vacuum Spark Gap) ทริกเกอร์ทำหน้าที่จุดระเบิดบนเก็บประกายสุญญากาศเพื่อถ่ายโอนประจุไฟฟ้าจากถังเก็บประจุไฟฟ้าไปยังแอโนดของเครื่องพลาสมาไฟกัสนต่อไป โดยโครงสร้างภายในเก็บประกายสุญญากาศมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.4
4. ระบบแก๊สและสุญญากาศ (gas and vacuum System) ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) มานอมิเตอร์ (manometer) วาล์วแก๊ส (valves working) และถังบรรจุแก๊ส (gas container) เป็นต้น
5. เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย โพรบวัดความต่างศักย์ (voltage probe) โรโกสกีคอยล์ (Rogowski Coil) สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง และกล่องรูเข็มสำหรับรังสีเอกซ์ ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป
6. ออสซิลโลสโคปดิจิทัล (digital storage oscilloscope) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการแสดงผลและเก็บผลข้อมูลในการทดลอง เครื่องออสซิลโลสโคปที่ใช้เป็นเครื่อง Tektronix รุ่น TDS 3034 และ TDS 3054



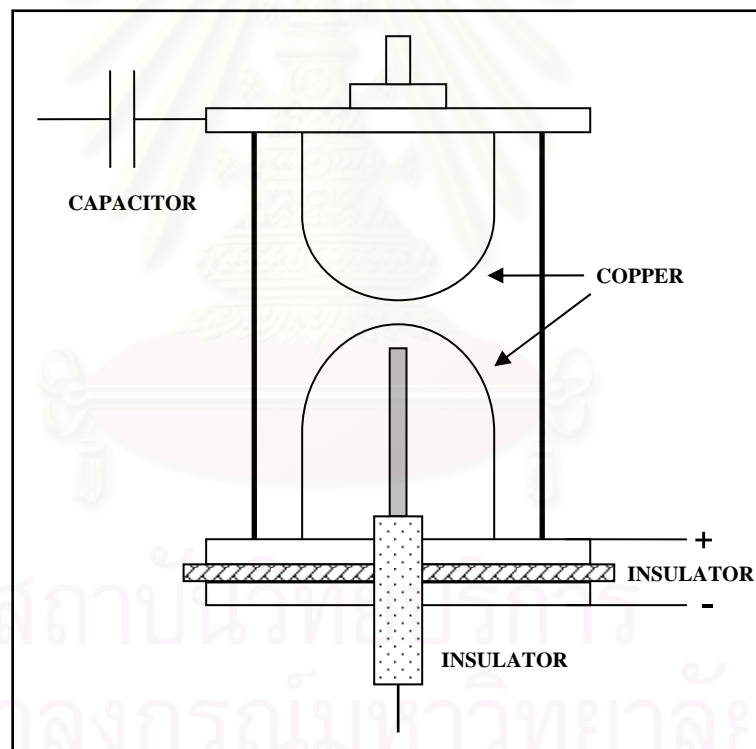
รูปที่ 4.1 แผนภาพผังโครงสร้างของระบบเครื่องพลาสมาไฟกัส



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายเครื่องพลาสมาไฟกัสที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.3 แผนภาพวงจรของเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูง



รูปที่ 4.4 แผนภาพลักษณะโครงสร้างภายในของแก๊ปัสตูญญากาศ

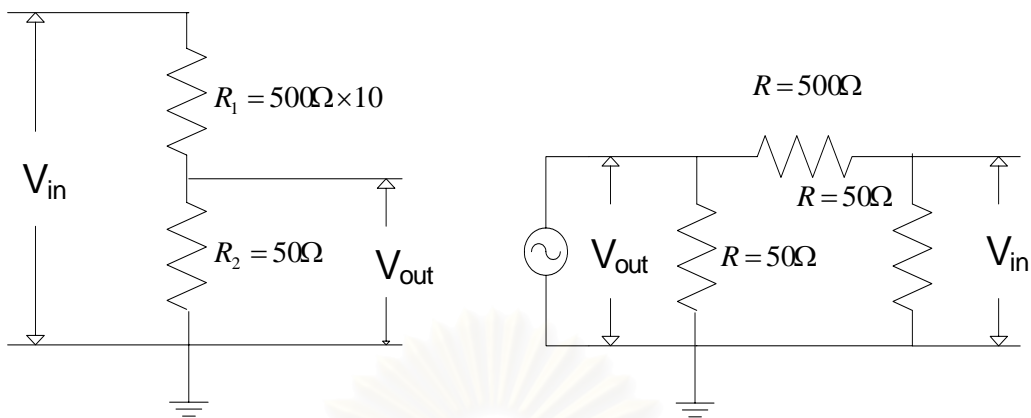
4.2 การวัดความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมาและกระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมา

หัวข้อนี้จะอธิบายวิธีการตรวจสอบหรือวิธีการวัดคุณสมบัติของพลาสมา ได้แก่ กระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมา ความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมา มีความจำเป็นและสำคัญอย่างมากที่จะต้องทำการวัดคุณสมบัติดังกล่าว เพราะคุณสมบัติดังกล่าวจะบ่งบอกถึงปรากฏการณ์ หรือพฤติกรรมของพลาสมาที่เกิดขึ้นว่ามีลักษณะอย่างไร

4.2.1 การวัดความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมา

การวัดความต่างศักย์ของสิ่งที่สนใจในการทดลองพลาสมาฟิสิกส์มีอยู่ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 การวัดไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์สูง (high DC voltages) บนตัวเก็บประจุโดยตรง และรูปแบบที่ 2 การวัดไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์สูงที่เกิดขึ้นชั่วขณะหนึ่งอย่างรวดเร็วระหว่างการถ่ายโอนประจุจากตัวเก็บประจุ ในรูปแบบที่ 2 จะใช้ตัวต้านทานไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเป็นตัวแบ่งความต่างศักย์ เพื่อให้ได้ความต่างศักย์ที่อยู่ในระดับที่สามารถวัดโดยใช้เครื่องออสซิลโลสโคปจับสัญญาณที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นได้ โดยรูปแบบการวัดความต่างศักย์ทั้ง 2 รูปแบบ ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

การวัดความต่างศักย์ในรูปแบบที่ 1 นั้นทำได้ไม่ยากและเป็นหลักการวัดความต่างศักย์บนตัวเก็บประจุที่ใช้กันทั่วไป และเครื่องมือวัดที่ใช้ก็มีแบบสำเร็จรูปแล้วสามารถซื้อมาใช้ได้เลยโดยไม่ต้องดัดแปลง จึงไม่ขออธิบายในที่นี้ ที่สำคัญคือการวัดความต่างศักย์ในรูปแบบที่ 2 เพราะจะต้องสร้างอุปกรณ์เครื่องมือวัดความต่างศักย์ให้เหมาะสมกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การวัดในรูปแบบที่ 2 จะมีเครื่องมือที่ใช้วัดความต่างศักย์ดังกล่าวเรียกว่าโพรบวัดความต่างศักย์ โดยวงจรของโพรบวัดความต่างศักย์จะประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน 500Ω จำนวน 10 ตัว และตัวต้านทาน 50Ω 1 ตัว ต่ออนุกรมกัน เพื่อจะได้อัตราส่วนในการแบ่งความต่างศักย์เป็น 100 เท่า และก่อนที่จะต่อเข้ากับออสซิลโลสโคปจะต้องต่อเข้ากับวงจรลดทอนสัญญาณอีก 10 เท่า ทำให้สัญญาณที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปจะเป็นสัญญาณที่ถูกลดทอน 1000 เท่า สาเหตุเนื่องมาจากความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่ตัวเก็บประจุมีค่าสูงถึง 12.5 kV แต่เครื่องออสซิลโลสโคปมีขีดความสามารถในการวัดสัญญาณที่ไม่สูงมาก ดังนั้นจะต้องลดทอนสัญญาณนั้นลงมาให้ได้มากที่สุดหรือไม่เกินขีดจำกัดสูงสุด และจะต้องไม่ต่ำกว่าขีดความสามารถในการวัดสัญญาณความต่างศักย์ที่เครื่องออสซิลโลสโคปสามารถจะวัดได้ โดยวงจรแบ่งความต่างศักย์ของโพรบวัดความต่างศักย์และวงจรลดทอนสัญญาณ 10 เท่า [10,12,17] แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภาพด้านซ้ายวงจรแบ่งความต่างศักย์ของโพรบวัดความต่างศักย์ และแผนภาพด้านขวาวงจรลดทอนสัญญาณ 10 เท่า

เมื่อไฟฟ้าความต่างศักย์สูง V_{in} ถูกแบ่งความต่างศักย์ตามวงจรรูปที่ 4.5 รูปซ้าย โดยตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ดังนั้นจากวงจรสามารถคำนวณหาความต่างศักย์ที่ตกคร่อม R_2 คือ V_{out} ได้ดังนี้

$$V_{in} = IR_1 + IR_2$$

$$V_{out} = IR_2$$

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

ดังนั้น

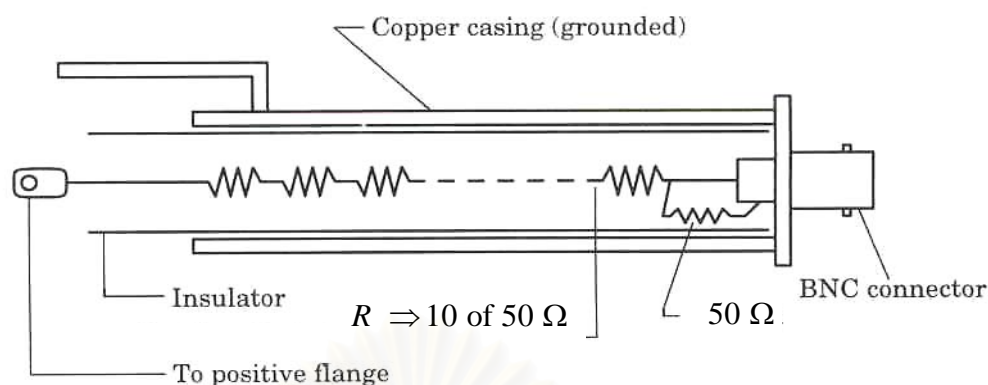
$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in}$$

เมื่อ

V_{in} คือ ความต่างศักย์ที่ต้องการวัด

V_{out} คือ ความต่างศักย์ที่ถูกแบ่งแล้ว

ดังนั้น เมื่อวัดสัญญาณโดยออสซิลโลสโคปสัญญาณที่ได้จะต้องคูณด้วย 1,000 จึงจะได้ค่าความต่างศักย์ที่แท้จริง ลักษณะการต่อเครื่องมือวัดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงหรือโพรบวัดความต่างศักย์จะมีลักษณะตามรูปที่ 4.6



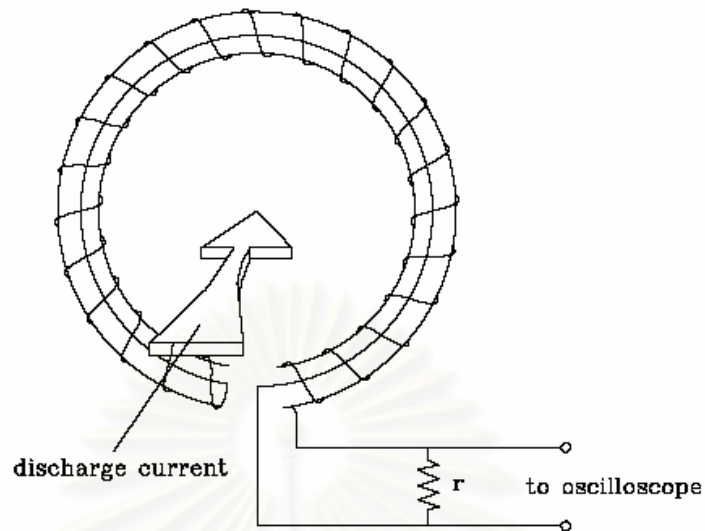
รูปที่ 4.6 แผนภาพส่วนประกอบของโพรบวัดความต่างศักย์

4.2.2 การวัดกระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมา และการสอบเทียบโรโกสกีคอยล์

กระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมาเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานและสำคัญในการทดลองพลาสมาอุณหภูมิสูงและเทคโนโลยีแบบช่วงที่มีความเร็วสูงมาก ซึ่งเกิดขึ้นในเครื่องพลาสมาไฟกัสที่กำลังศึกษาอยู่ด้วย และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการวัดกระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมาที่เกิดขึ้นเพื่อที่จะสามารถเข้าใจปรากฏการณ์หรือพฤติกรรมของพลาสมาและฟังก์ชันของเครื่องพลาสมาไฟกัส เนื่องจากกระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมาที่เกิดขึ้นมีปริมาณมหาศาลอยู่ในช่วงหลายพันแอมแปร์ไปจนถึงหลายล้านแอมแปร์ และเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากภายในช่วง $10 \mu\text{s}$ เท่านั้น บางครั้งมีค่าสูงมากถึง 10^3 A/s โรโกสกีคอยล์ถือว่าเป็นเครื่องมือพื้นฐานและมีประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้วัดกระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมาที่เกิดขึ้น

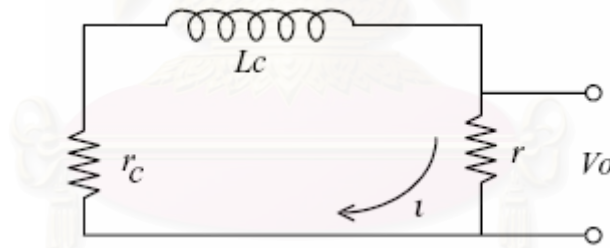
โรโกสกีคอยล์ คือ เครื่องมือที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้ามีลักษณะเป็นลวดโซลินอยด์ (Solenoid) ที่พันรอบแกนเป็นวงกลมหลาย ๆ รอบ และแกนนั้นก็มียลักษณะรูปร่างขดกึ่งวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยลักษณะการต่อโรโกสกีคอยล์บริเวณปลายของขดลวดจะต่อกับตัวต้านทานที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เมื่อมีกระแสไหลผ่านหน้าตัดของโรโกสกีคอยล์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นตามกฎของแอมแปร์ [10,12,17]

โรโกสกีคอยล์จะต้องต่อเข้ากับวงจรรวมอารีซี (RC Integrating Network) เพื่อแปลงสัญญาณเข้าสู่ออสซิลโลสโคปต่อไป โดยก่อนที่จะต่อกับออสซิลโลสโคปโดยตรงนั้นจะต้องต่อผ่านวงจรลดทอนสัญญาณ 30 เท่า ในลักษณะเช่นเดียวกับการวัดความต่างศักย์เช่นกัน เพราะสัญญาณที่ได้จะมีค่าสูงมากทำให้ไม่สามารถวัดได้ทั้งหมด จึงจำเป็นต้องลดทอนสัญญาณลง



รูปที่ 4.7 แผนภาพการต่อวงจรโรโกสกีคอยล์เข้ากับออสซิลโลสโคป

วงจรสมมูลของโรโกสกีคอยล์แสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แผนภาพโครงสร้างของวงจรสมมูลของโรโกสกีคอยล์

สมการของวงจรสามารถเขียนได้ดังนี้

$$L_c \frac{di}{dt} + (r + r_c)i = K \frac{dI}{dt} \quad (4.4)$$

ถ้า $L_c \frac{di}{dt} \gg (r + r_c)i$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.4) จะได้ว่า $i = \frac{K}{L_c} I$ ความต่าง

ศักย์ที่จ่ายให้แก่ระบบจะมีค่าเท่ากับ

$$V_0 = ri = r \frac{K}{L} \times I = K_1 I \quad (4.5)$$

ในกรณีนี้โรโกสก็คอยล์จะเป็นเสมือนหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

เมื่อ

- L_c = ค่าความเหนี่ยวนำของโรโกสก็คอยล์
- r_c = ค่าความต้านทานของโรโกสก็คอยล์
- i = กระแสที่ไหลในโรโกสก็คอยล์
- r = ตัวต้านทานที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ
- V_0 = ความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่ระบบ
- K = ค่าแฟกเตอร์สอบเทียบของโรโกสก็คอยล์

การใช้โรโกสก็คอยล์ต้องมีการสอบเทียบโรโกสก็คอยล์เสียก่อน สำหรับวงจรอาร์แอลซี (RLC circuit) ที่ทราบค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่ระบบและค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ สามารถคำนวณกระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมา โดยค่าของกระแสที่ไหลในวงจรเขียนได้ดังนี้

$$I = \frac{\pi C_0 V_0 (1 + f)}{T} \quad (4.6)$$

โดยที่

$$f = \frac{1}{4} \left(\frac{V_5}{V_4} + \frac{V_4}{V_3} + \frac{V_3}{V_2} + \frac{V_2}{V_1} \right) \quad (4.7)$$

$$T = \frac{T_2 + T_1}{2} \quad (4.8)$$

ดังนั้น ค่าแฟกเตอร์การสอบเทียบสำหรับโรโกสก็คอยล์สามารถหาได้ดังนี้

$$K = \frac{I}{V_0} \quad (4.9)$$

สาเหตุที่จำเป็นต้องคำนวณหาค่าแฟกเตอร์การสอบเทียบ เนื่องจากว่า สัญญาณโรโกสกีคอยล์ที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปจะเป็นสัญญาณของค่าความต่างศักย์ ดังนั้น ในการหาค่ากระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมาจริงที่เกิดขึ้นก็ต้องนำเอาค่าแฟกเตอร์การสอบเทียบ คูณกับค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ จึงจะได้ค่ากระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมาที่เกิดขึ้นจริง โดยไม่ จำเป็นที่จะต้องคำนวณจากสมการที่ (4.6) ทุกครั้งที่ต้องการหาค่ากระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมา เพราะวิธีนี้จะสะดวกและรวดเร็วอย่างมาก เพียงแค่คำนวณหาค่าแฟกเตอร์เพียงครั้งเดียวเท่านั้น

จากสัญญาณรูปคลื่นของกระแสที่วัดได้สามารถนำมาคำนวณหาค่าความ เหนี่ยวนำและค่าความต้านทานของโรโกสกีคอยล์ได้จากสมการ

$$t_0 = \frac{T}{2\pi} = \sqrt{L_c C_0} \quad (4.10)$$

$$L_c = \frac{t_0^2}{C_0} = \frac{T^2}{4\pi^2 C_0} \quad (4.11)$$

$$r_c = -\frac{2}{\pi} \ln f \sqrt{\frac{L_c}{C_0}} \quad (4.12)$$

เมื่อ

I = กระแสที่ไหลในวงจร (A)

C_0 = ความจุของตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 30 μF

f = อัตราส่วนย้อนกลับ

T = คาบของเวลา (s)

t_0 = เวลาปลดปล่อยเฉพาะ (s)

K = ค่าแฟกเตอร์การสอบเทียบสำหรับโรโกสกีคอยล์ $\left(\frac{\text{A}}{\text{V}}\right)$

4.3 พารามิเตอร์ของเครื่องพลาสมาไฟกัส UNU/ICTP

พารามิเตอร์ของเครื่องพลาสมาไฟกัสที่ใช้ในงานวิจัยแสดงในตารางที่ 4.1 และพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดโดยใช้โพรบวัดความต่างศักย์และโรโกสกีคอยล์แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของเครื่องพลาสมาไฟกัส UNU/ICTP

Parameters	UNU/ICTP Plasma Focus Machines
Bank Capacitance	30 μ F
Charging Voltage	12.5 kV
Stored Energy	2.34 kJ
Anode Radius	9.5 mm
Anode Length	160 mm
Cathode Radius	3.2 mm
Cathode Type	6 rods
Anode Material	Hollow Copper
Insulator	Pyrex Glass
Bank Capacitance	30 μ F
Charging Voltage	12.5 kV
Stored Energy	2.34 kJ

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดของเครื่องพลาสมาไฟกัส UNU/ICTP

Measured Parameters	UNU/ICTP Plasma Focus Machines
Circuit Inductance	$L_c = 177$ nH
Circuit Impedance	$Z = 76.89$ m Ω
Circuit Resistance	$r_c = 185$ m Ω
Peak Discharge Current	$I_{\max} = 135.7$ kA
Circuit Time T/4 Time	$T / 4 = 3.625$ μ s

4.4 การตรวจสอบการแผ่รังสีเอกซ์

การตรวจสอบรังสีเอกซ์ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การถ่ายภาพโดยรังสีเอกซ์แบบรวมเวลา และการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา ในส่วนแรกการถ่ายภาพโดยรังสีเอกซ์แบบรวมเวลาเป็นวิธีการตรวจสอบโครงสร้าง ขนาด และลักษณะรูปร่างของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจากพลาสมาไฟกัส ในส่วนที่สองเป็นการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา วัดอุประสงค์ในส่วนนี้เพื่อต้องการวัดคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ทรอนในพลาสมา ซึ่งไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรงสำหรับเครื่องพลาสมาไฟกัส แต่ได้มีการประยุกต์นำเอาทฤษฎีการแผ่รังสีของพลาสมาในบทที่ผ่านมา นำมาประยุกต์ใช้โดยอาศัยคุณสมบัติของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจากพลาสมา เพื่อคำนวณหาคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ทรอนในพลาสมา โดยรายละเอียดวิธีการถ่ายภาพและการวัดคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ทรอนในพลาสมาโดยใช้รังสีเอกซ์จะได้กล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป สำหรับสาเหตุที่จำเป็นต้องมีการตรวจสอบรังสีเอกซ์จากพลาสมาที่เกิดขึ้น เนื่องจากต้องการนำรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัยและพัฒนาไปใช้กับงานในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป เช่น งานด้านลิโทกราฟี งานด้านการตรวจสอบวัตถุระเบิด เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาวิจัยเพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากเครื่องพลาสมาไฟกัส เช่น พลังงาน ปริมาณ ขนาด รูปร่าง หรือลักษณะแหล่งที่ให้กำเนิดรังสีเอกซ์ เป็นต้น เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสมต่อไป

4.4.1 การวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา

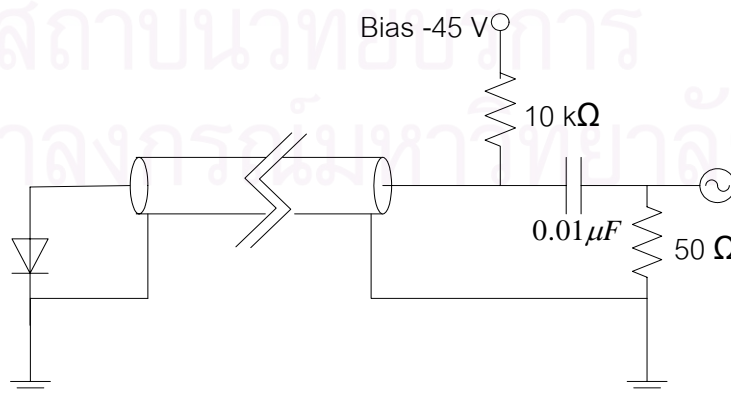
วิธีการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา เป็นวิธีการตรวจสอบรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น ณ เวลา นั้น ๆ โดยสามารถระบุได้ว่า ณ เวลาใดที่เกิดรังสีเอกซ์ขึ้นบ้างและมากน้อยเพียงใด การตรวจวัดรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นสามารถทำได้โดยใช้เครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์โดยทั่วไป เช่น หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube) ซิลิคอนพินไดโอด (Silicon PIN diode) เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ซิลิคอนพินไดโอดเป็นเครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น โดยวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบรังสีเอกซ์ในส่วนนี้ต้องการตรวจสอบรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น ด้วยเทคนิคด้วยวิธีการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา เพื่อคำนวณหาคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ทรอนด้วยวิธีที่เรียกว่า วิธีอัตราส่วนตัวกรอง โดยใช้อุปกรณ์ในการตรวจวัดรังสีเอกซ์ที่ประกอบไปด้วยซิลิคอนพินไดโอด 5 ตัว โดยมีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการว่า สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง

4.4.1.1 สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง

สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง [14] คือ เครื่องมือที่ประกอบด้วย ซิลิคอนพินไดโอด จำนวน 5 ตัว และวงจรไบแอส (bias circuit) ใช้สำหรับตรวจสอบรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเกิดพลาสมาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.9 รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ตามลำดับ ซิลิคอนพินไดโอดเป็นอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ชนิดหนึ่ง โดยถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดรังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสมาไฟกัส ซิลิคอนพินไดโอดที่ใช้เป็นรุ่น BPX65 (ภาคผนวก ข) โดยก่อนนำไปใช้จะต้องนำเอาแผ่นแก้วที่ปิดอยู่ด้านหน้าของไดโอดออกก่อน เพื่อให้พินไดโอดสามารถตรวจจذبรังสีเอกซ์ได้ เหตุผลที่เลือกใช้พินไดโอดรุ่น BPX65 เพราะมีสภาพไว (sensitivity) ที่ดีอยู่ในช่วง $0.1-20 \text{ \AA}$ ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.12 [12] ซึ่งเป็นช่วงที่ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่สนใจ และเนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษอื่น คือ ขนาดเล็ก ตอบสนองอย่างรวดเร็ว (fast rise time) และทราบสภาพไวในแต่ละช่วงความยาวคลื่น จึงได้เลือกซิลิคอนพินไดโอดรุ่น BPX65 เป็นตัวตรวจจذبรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องพลาสมาไฟกัสในงานวิจัยนี้ เพราะกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์ในเครื่องพลาสมาไฟกัสจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว



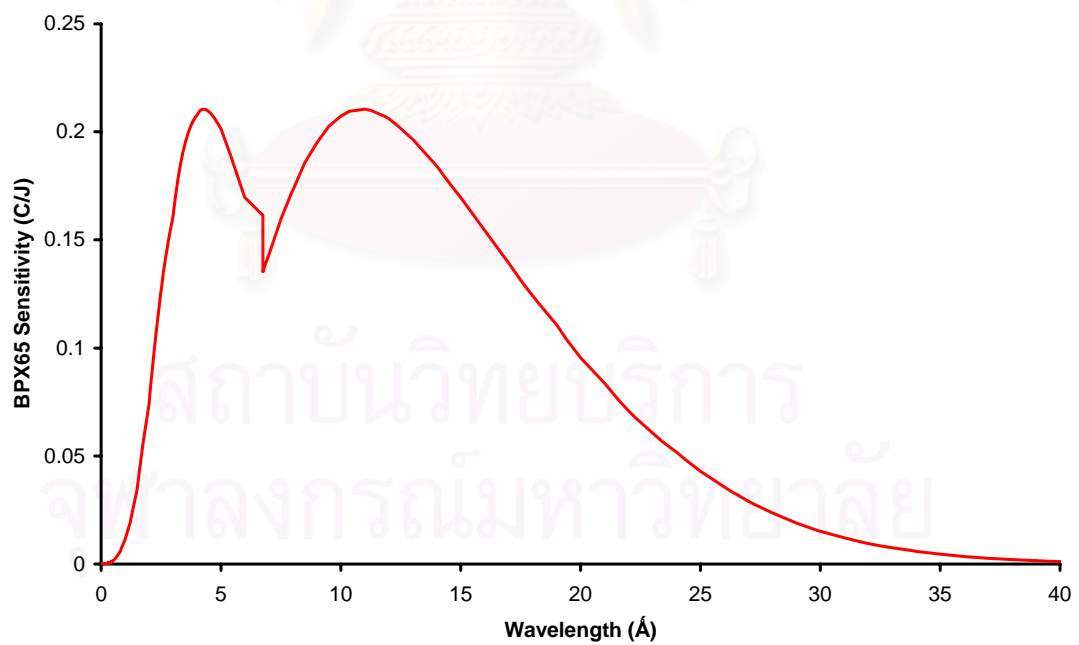
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายซิลิคอนพินไดโอดรุ่น BPX65



รูปที่ 4.10 แผนภาพผังวงจรการต่อซิลิคอนพินไดโอดเพื่อเป็นสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงสภาพไวของ BPX65 ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0–40 Å

4.4.1.2 การติดตั้งและการสอบเทียบสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์

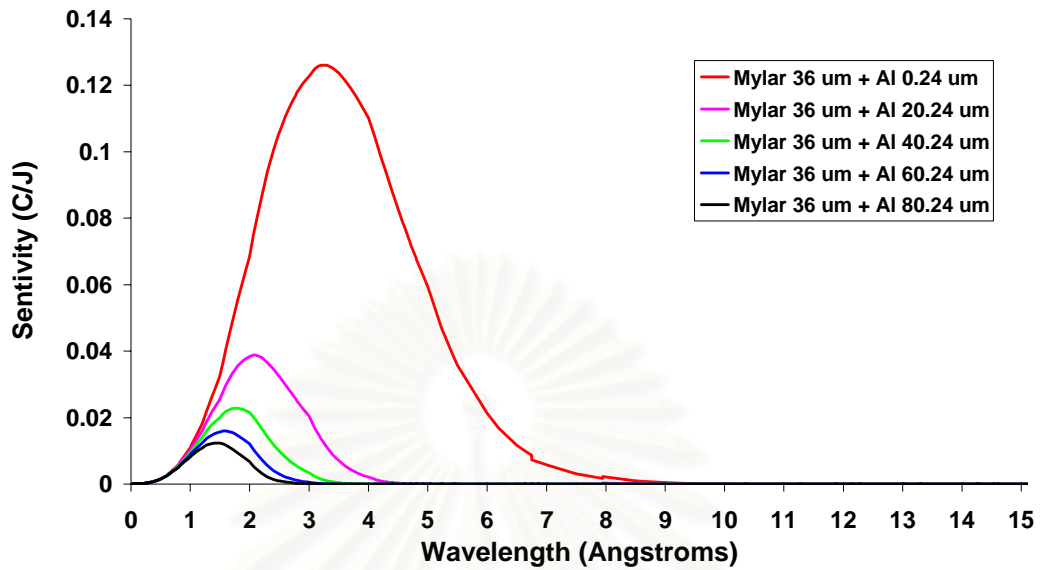
การติดตั้งหรือจัดวางสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง เข้ากับเครื่องพลาสติกโฟกัสจะวางอยู่ในตำแหน่งบริเวณแนวรัศมีบริเวณเหนือปลายแอโนดพอดี โดยจะมีระยะห่างจากปลายแอโนดเท่ากับ 18.5 cm ไดโอดแต่ละตัวจะถูกกั้นด้วยแผ่นอลูมิเนียมไมลาร์ด้วยความหนา $36 \mu\text{m}$ เท่ากันทั้ง 5 ช่อง เนื่องจากก่อนที่จะทำการทดลองวัดรังสีเอกซ์และใช้วิธีอัตราส่วนตัวกรองในการทดลองหาคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ในพลาสติกที่เกิดขึ้น จะต้องมีการสอบเทียบพินไดโอดแต่ละตัวก่อน เพื่อเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่พินไดโอดแต่ละตัวที่วัดได้มีความแตกต่างกันอย่างไร โดยทดลองวัดรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจากพลาสติก เมื่อให้พินไดโอดตัวใดตัวหนึ่งเป็นตัวหลักในการสอบเทียบดังตารางที่ 4.3 โดยค่าสอบเทียบที่ได้จะนำไปคูณกับผลการทดลองจริงอีกครั้ง เพื่อให้พินไดโอดแต่ละตัวมีมาตรฐานของการวัดที่เท่ากัน

จากนั้นทำการเปลี่ยนความหนาที่กั้นพินไดโอดแต่ละตัว เพื่อทดลองตามวิธีอัตราส่วนตัวกรองต่อไป โดยพินไดโอดแต่ละตัวจะถูกกั้นด้วยความหนาต่างกัน และเมื่อกั้นพินไดโอดด้วยวัสดุที่มีความหนาต่าง ๆ กัน สภาพไวของพินไดโอดแต่ละตัวจะมีค่าเปลี่ยนไป ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.3 การคำนวณหาค่าแฟกเตอร์สอบเทียบพินไดโอด

PIN Diode Channel	ความต่างศักย์ที่วัดได้จากการทดลอง เมื่อกั้นตัวกรองด้วยความหนาเท่ากัน	ค่าแฟกเตอร์สอบเทียบ
1	V_1	$V_1/V_1 = f_1 = 1$
2	V_2	$V_2/V_1 = f_2$
3	V_3	$V_3/V_1 = f_3$
4	V_4	$V_4/V_1 = f_4$
5	V_5	$V_5/V_1 = f_5$

BPX 65 Sensitivity with Filter



รูปที่ 4.13 กราฟสภาพไวของพินไดโอดที่กั้นด้วยวัสดุและความหนาต่าง ๆ กัน

เมื่อทำการทดลอง ผลการวัดที่ได้จะต้องนำมาคูณกับแฟกเตอร์สอบเทียบที่ได้คำนวณไว้จากตารางที่ 4.3 จึงจะได้ค่าความต่างศักย์ที่แท้จริงในการคำนวณ ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การคำนวณค่าความต่างศักย์จริงที่พินไดโอดวัดได้

PIN Diode Channel	ความต่างศักย์ที่วัดได้จากการทดลอง เมื่อกันตัวกรองด้วยความหนาต่างกัน	ความต่างศักย์จริงที่ใช้ในการ คำนวณ
1	V_1	$V_1 \times f_1$
2	V_2	$V_2 \times f_2$
3	V_3	$V_3 \times f_3$
4	V_4	$V_4 \times f_4$
5	V_5	$V_5 \times f_5$

4.4.1.3 วิธีอัตราส่วนตัวกรอง

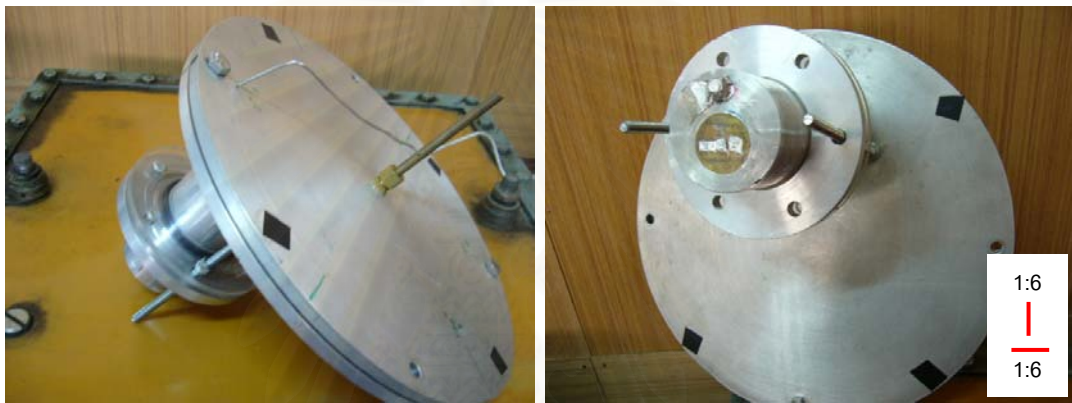
วิธีอัตราส่วนตัวกรองเป็นวิธีการคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์ในพลาสมาจากรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น [12-14] โดยอาศัยคุณสมบัติของรังสีเอกซ์ที่เมื่อผ่านวัสดุที่มีความหนาต่างกัน รังสีเอกซ์ที่ผ่านออกมาจะมีความเข้มต่างกันตามความหนาและชนิดของวัสดุนั้น จากหัวข้อที่แล้ว 4.4.1.2 เมื่อเปลี่ยนความหนาที่กั้นฟินไดโอดแต่ละตัว และทำการทดลองเพื่อวัดรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น จากนั้นนำค่าสัญญาณที่ฟินไดโอดแต่ละตัววัดได้จากออสซิลโลสโคป คำนวณหาอัตราส่วนเปรียบเทียบเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ที่ได้สร้างขึ้น ดังที่ได้นำเสนอแล้วในบทที่ 3 การคำนวณค่าอัตราส่วนของสัญญาณที่จะนำไปใช้คำนวณอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์ในพลาสมาได้แสดงในตารางที่ 4.5 โดยนำไปเปรียบเทียบกับกราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ดังกล่าว จะคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์ในพลาสมาได้

ตารางที่ 4.5 การคำนวณอัตราส่วนค่าความต่างศักย์ด้วยวิธีอัตราส่วนตัวกรอง

PIN Diode Channel	ความต่างศักย์จากการทดลองเมื่อคูณกับค่าแฟกเตอร์สอบเทียบแล้ว	อัตราส่วนความต่างศักย์ที่จะนำไปใช้ในการคำนวณ T_e
1	$V_1 \times f_1$	$\frac{V_1 \times f_1}{V_1}$
2	$V_2 \times f_2$	$\frac{V_2 \times f_2}{V_1}$
3	$V_3 \times f_3$	$\frac{V_3 \times f_3}{V_1}$
4	$V_4 \times f_4$	$\frac{V_4 \times f_4}{V_1}$
5	$V_5 \times f_5$	$\frac{V_5 \times f_5}{V_1}$

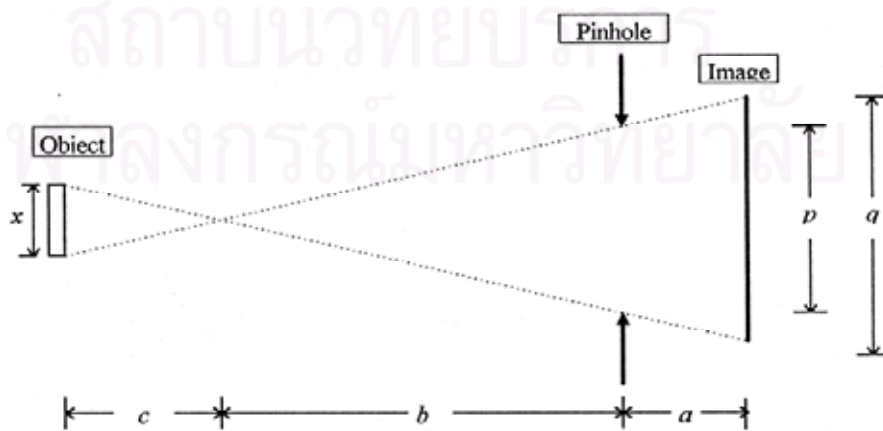
4.4.2 การถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลา

การถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลามีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างและขนาดของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นในพลาสมา ด้วยการนำหลักการของกล้องรูเข็มมาประยุกต์ใช้เพื่อถ่ายภาพที่เกิดขึ้นในช่วงแวนรัศมี โดยเรียกบริเวณที่เกิดรังสีเอกซ์นั้นว่า จุดโฟกัส หรือ ลำบีบอัด (Pinch column) โดยจะใช้กล้องรูเข็มสำหรับรังสีเอกซ์ ที่สร้างขึ้นเป็นอุปกรณ์ในการถ่ายภาพจุดโฟกัส ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะทำให้ทราบถึงโครงสร้างและขนาดของจุดโฟกัสที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดันและก๊าซต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายกล้องรูเข็มสำหรับรังสีเอกซ์

การถ่ายภาพโดยกล้องรูเข็มมีหลักการง่าย ๆ คือ ใช้คุณสมบัติของแสงที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง โดยรูเข็มจะต้องมีขนาดเล็กกว่าวัตถุมาก ๆ สำหรับกรณีที่วัตถุมีขนาดเล็กกว่ารูเข็ม ภาพที่ได้ก็จะมีลักษณะเป็นจุดกลม จากรูปที่ 4.15 สามารถคำนวณหาขนาดของวัตถุได้ดังนี้ [12]



รูปที่ 4.15 แผนภาพแสดงลักษณะเส้นทางการเดินทางของแสงเมื่อผ่านรูเข็ม

กรณีที่ขนาดของวัตถุมีขนาดใหญ่กว่ารูเข็ม ($x > p$) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$x = \left(\frac{O}{I}\right)q$$

กรณีที่ขนาดของวัตถุมีขนาดเล็กกว่ารูเข็ม ($x < p$) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$x = \left(\frac{O(q-p)}{I}\right) - p$$

เมื่อ

x = ขนาดวัตถุ

q = ขนาดภาพ

p = ขนาดรูเข็ม

O = ระยะห่างระหว่างวัตถุกับรูเข็ม เท่ากับ $c + b$

I = ระยะระหว่างภาพกับรูเข็ม เท่ากับ a

สำหรับการนำกล้องรูเข็มมาใช้เพื่อถ่ายภาพรังสีเอกซ์นั้น จะแตกต่างจากการถ่ายภาพโดยทั่วไป โดยจะต้องนำแผ่นกรองแสงมาปิดกั้นบริเวณรูเข็มเพื่อไม่ให้แสงสามารถผ่านได้ แต่รังสีเอกซ์จะต้องสามารถผ่านได้ จะสามารถถ่ายภาพรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นได้

ฟิล์มถ่ายภาพรังสีเอกซ์ที่ใช้ คือ AGFA STRUCTURE D7 X-RAY FILM เพราะเป็นฟิล์มที่มีความละเอียดสูง เนื่องจากมีความละเอียดสูงและมีความไวต่อรังสีเอกซ์สูงมาก จึงมีคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทดลอง และน้ำยาล้างฟิล์มที่ใช้ประกอบด้วยน้ำยา 3 ชนิด โดยเรียงลำดับการล้างและเวลาในการล้างฟิล์มในน้ำยาแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.6

การล้างฟิล์มจะกระทำในห้องมืดเท่านั้น เมื่อนำฟิล์มขึ้นจากน้ำยาชนิดใดก็ตาม จะต้องล้างน้ำสะอาดก่อนแล้วจึงนำลงแช่ในน้ำยาถัดไป และเมื่อล้างในน้ำยาสุดท้ายก็จะมี การล้างน้ำอีกครั้ง แล้วจึงนำฟิล์มไปตากให้แห้งต่อไป

ตารางที่ 4.6 ชนิดของน้ำยาล้างฟิล์มรังสีเอกซ์ และลำดับขั้นตอนการล้างฟิล์มรังสีเอกซ์

ลำดับการล้าง	ชนิดน้ำยาที่ใช้ล้างฟิล์ม	เวลาในกระบวนการล้างฟิล์ม
1	STRUCTURIX G 150 DEVELOPER	5 min
2	WATER	15 sec
3	STOP BATH (Acetic Acid 10 %)	1 min
4	WATER	15 min
5	STRUCTURE G 354 FIXING	5 min
6	WATER	1 min

4.5 สรุปการวิจัยตรวจสอบการแผ่รังสีเอกซ์

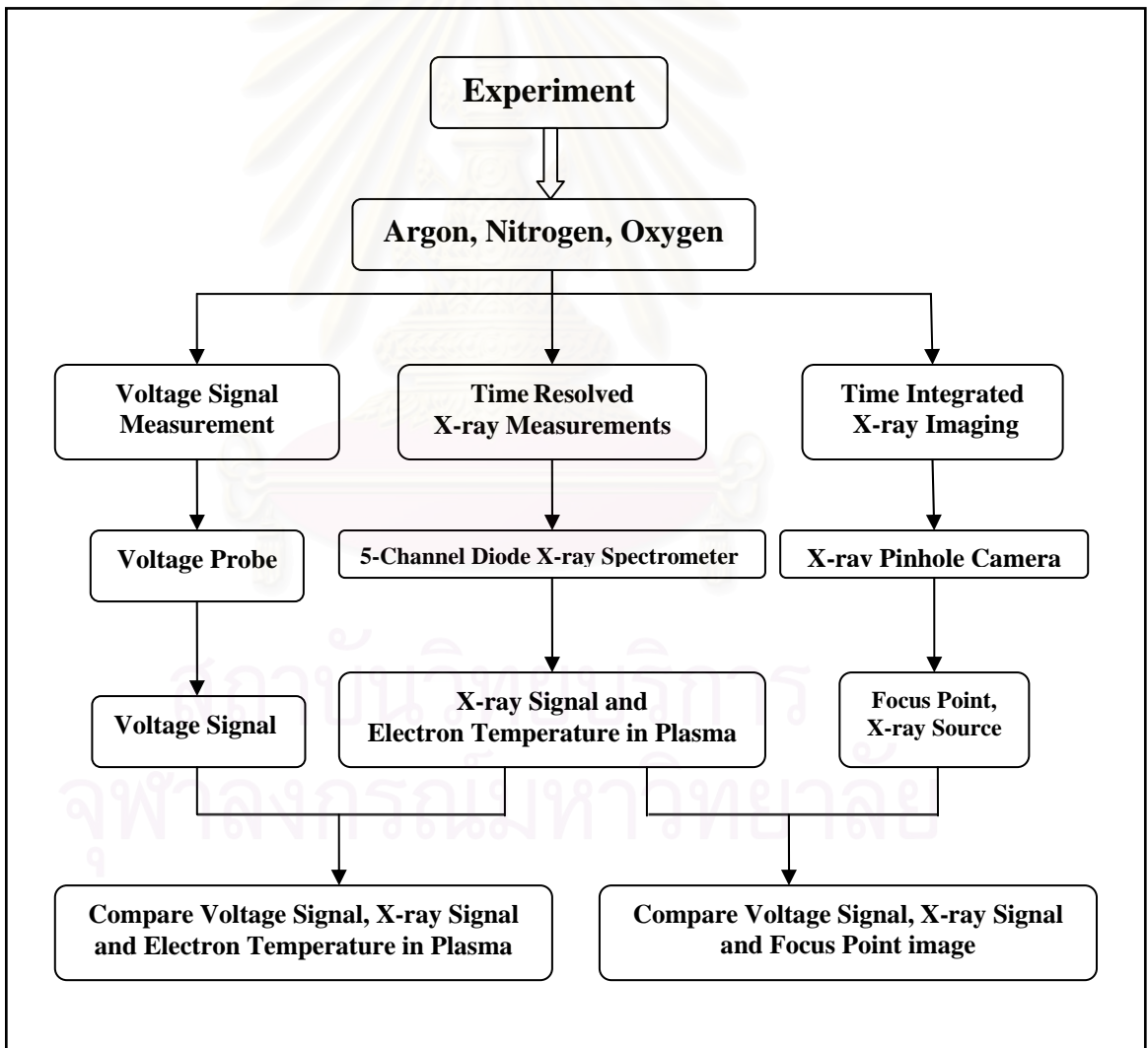
โดยสรุปการวิจัยเพื่อตรวจสอบการแผ่รังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสติกไฟฟ้า ได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

1. การวัดความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสติกภายใต้พารามิเตอร์ของระบบเครื่องพลาสติกไฟฟ้าต่าง ๆ กัน
2. การวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์ในพลาสติก
3. การถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลา เพื่อทราบขนาดและโครงสร้างของจุดไฟฟ้า
4. เปรียบเทียบลักษณะสัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์ และภาพถ่ายรังสีเอกซ์ ว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร
5. การคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์ในพลาสติก จากการถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลา โดยเทียบเคียงกับการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา

บทที่ 5

การทดลอง ผลการทดลอง และอภิปรายผล

การทดลองได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การวัดความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมา การวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา และการถ่ายภาพโดยรังสีเอกซ์แบบรวมเวลาตามตัวแปรต่าง ๆ เช่น ชนิดของก๊าซ ระดับความดันก๊าซ เป็นต้น โดยสรุปแล้วสามารถแบ่งลำดับการทดลองออกได้ดังแสดงในรูปภาพที่ 5.1 ดังนี้



รูปที่ 5.1 แผนภาพผังรูปแบบลำดับการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 การวัดความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมาภายใต้พารามิเตอร์ต่าง ๆ

ในการทดลองส่วนนี้เครื่องมือที่ใช้วัดความต่างศักย์ คือ โพรบวัดความต่างศักย์ โดยมีวิธีและขั้นตอนในการวัดดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1 สัญญาณความต่างศักย์ที่ได้จากการทดลองส่วนนี้ จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองในส่วนถัดไปจากนี้

5.1.1 การวัดความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมา

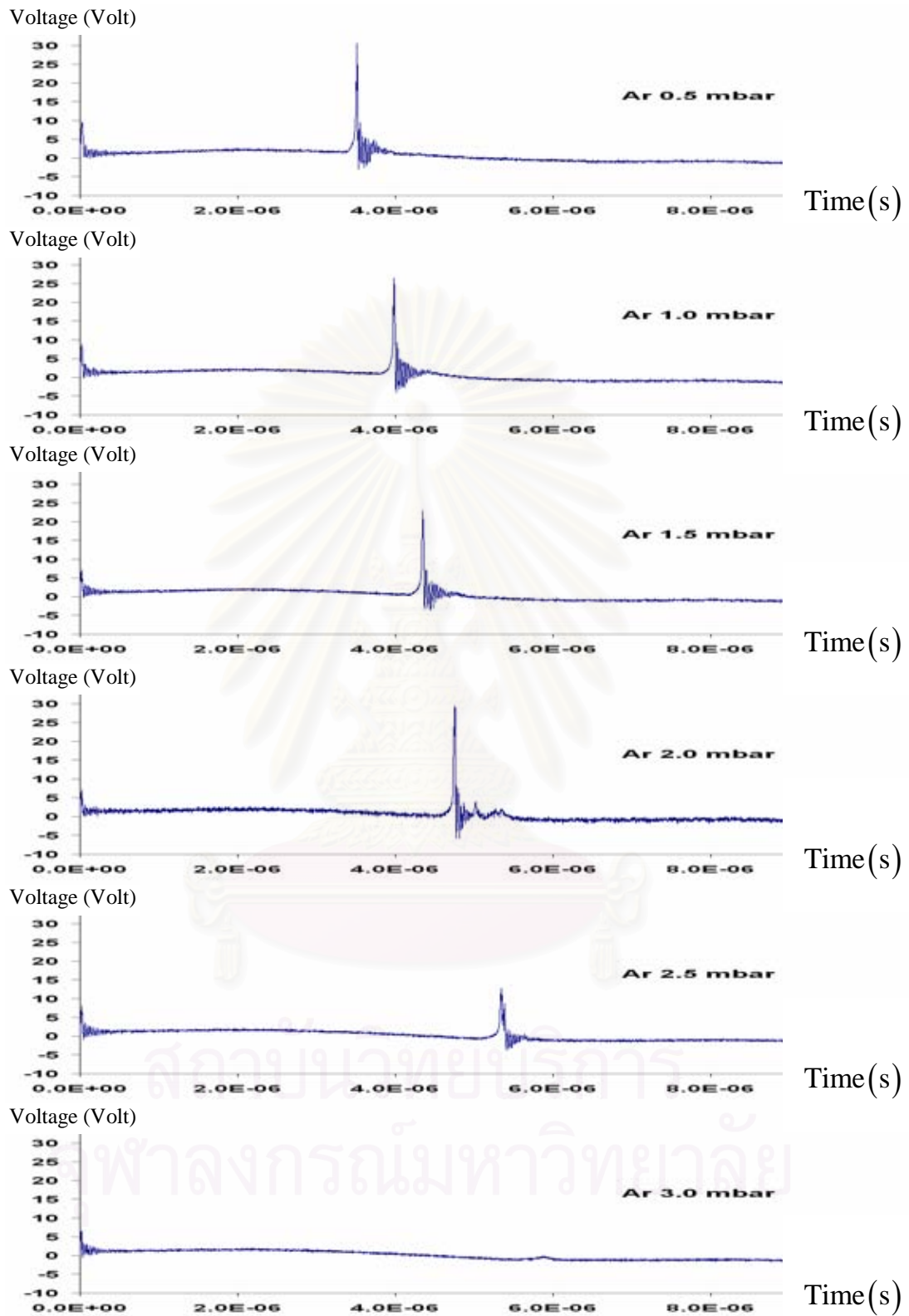
การทดลองวัดความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมา เพื่อศึกษาความแตกต่างของความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมาในเครื่องพลาสมาไฟกัส ภายใต้สภาวะความดันและก๊าซต่างกัน ก๊าซที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ก๊าซอาร์กอน ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน ในช่วงความดัน 0.5 – 3.0 mbar เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะนำไปวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลาและการถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลาต่อไป

5.1.2 ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลองวัดความต่างศักย์

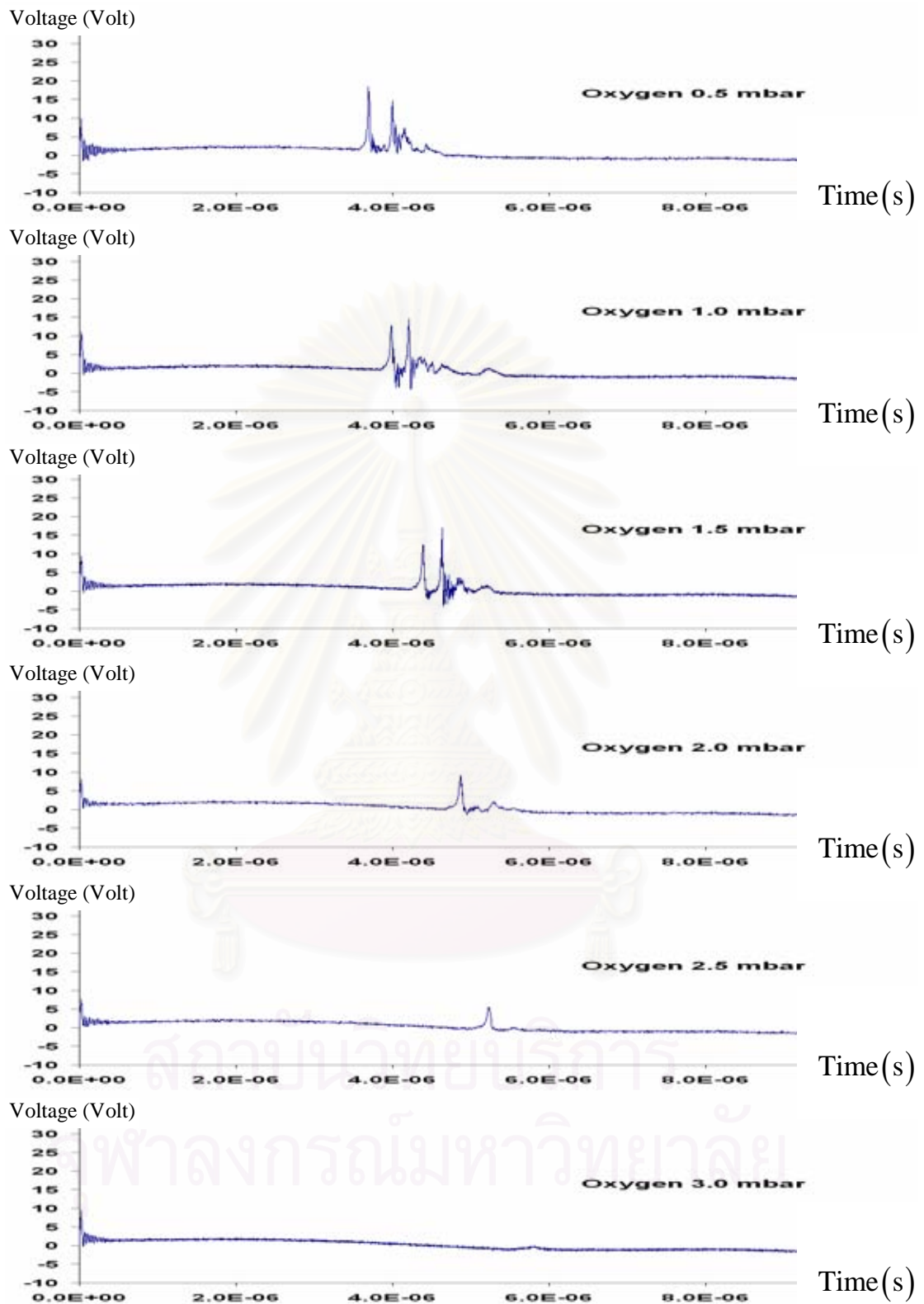
จากการทดลองวัดความต่างศักย์หรือความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมา ได้ทำการทดลองโดยใช้ก๊าซทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ก๊าซอาร์กอน ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน ภายใต้สภาวะความดัน 0.5 mbar, 1.0 mbar, 1.5 mbar, 2.0 mbar, 2.5 mbar และ 3.0 mbar ผลการทดลองได้แสดงในกราฟรูปที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ

จากกราฟสัญญาณความต่างศักย์ของอาร์กอนพลาสมา ออกซิเจนพลาสมา และไนโตรเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5 – 3.0 mbar ดังรูปที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 พบว่าสัญญาณความต่างศักย์ในช่วงไฟกัสของอาร์กอนพลาสมามีลักษณะเป็นยอดเดี่ยว และมีค่าสูงมากกว่ายอดสัญญาณของออกซิเจนพลาสมาและไนโตรเจนพลาสมา สัญญาณความต่างศักย์ของออกซิเจนพลาสมาและไนโตรเจนพลาสมามีลักษณะเป็นยอด 2 – 3 ยอด ซึ่งจะได้ทำการวิเคราะห์ต่อไปว่า ยอดสัญญาณแต่ละยอด เมื่อเทียบกับสัญญาณรังสีเอกซ์แล้วยอดสัญญาณแต่ละยอดเป็นช่วงที่ให้กำเนิดรังสีเอกซ์แบบใดต่อไป ช่วงเวลาจากช่วงแตกตัวจนถึงช่วงไฟกัสของพลาสมาจากก๊าซทั้ง 3 ชนิด จะอยู่ในช่วงเวลาระหว่าง $3.5 \times 10^{-6} - 6.0 \times 10^{-6}$ μs และพบว่าช่วงเวลาตั้งแต่ช่วงแตกตัวถึงช่วงไฟกัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความดันก๊าซมีค่ามากขึ้น

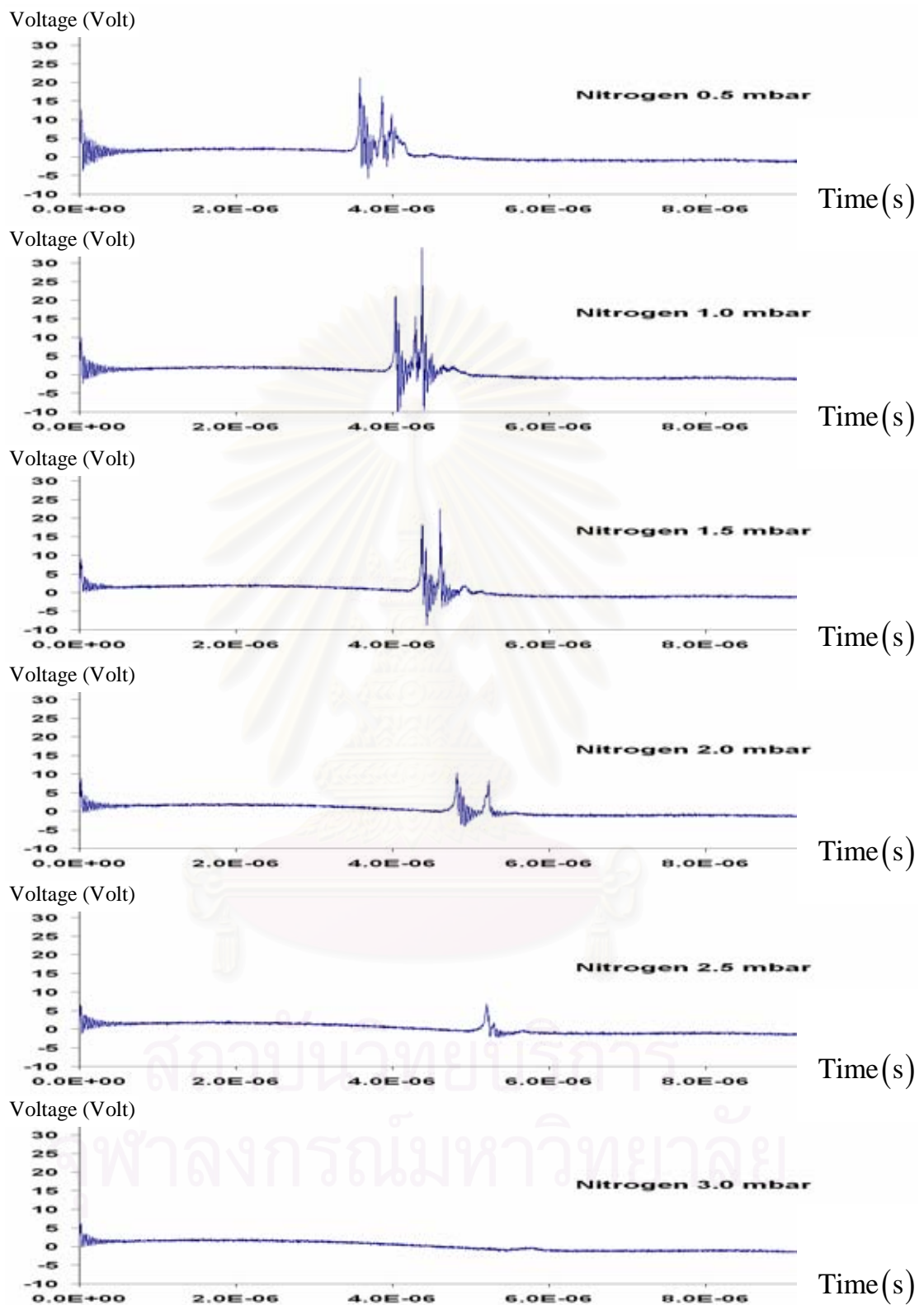
เมื่อเขียนกราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar การทดลองได้ทดลองวัดความต่างศักย์จำนวน 10 ครั้ง ในแต่ละความดัน จากนั้นหาค่าเฉลี่ยความต่างศักย์ทั้ง 10 ครั้ง โดยคำนวณค่าคลาดเคลื่อน (error) ในการวัดจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) จะได้กราฟดังรูปที่ 5.5, 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ โดยพบว่าค่าความต่างศักย์ของพลาสมาจากก๊าซทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันสูงขึ้น จากรูปที่ 5.5 กราฟแนวโน้มสัญญาณความต่างศักย์ของอาร์กอนพลาสมา พบว่า โดยเฉลี่ยความต่างศักย์ที่ความดัน 0.5 mbar และ 2.0 mbar จะมีค่าสูงมากกว่าช่วงอื่น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ในกรณีความดันในแชมเบอร์มีค่าต่ำและเหมาะสม พลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณน้อยแต่มีพลังงานสูง ทำให้เคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว ดังนั้น จึงทำให้พลาสมาที่ความดันดังกล่าวเคลื่อนที่ในช่วงแนวรัศมีอย่างรวดเร็ว และในกรณีที่ความดันภายในแชมเบอร์มีค่าสูงถึงค่าหนึ่งและเหมาะสม จะเกิดพลาสมาจำนวนมากเนื่องจากมีปริมาณของก๊าซมาก ทำให้พลาสมาเคลื่อนที่มารวมตัวในช่วงแนวรัศมีมากเช่นกัน ทำให้สัญญาณค่าความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมาที่วัดได้มีค่าสูง โดยความดันที่เหมาะสมในทั้ง 2 กรณีดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องพลาสมาไฟกัสแต่ละเครื่องด้วย และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ M. Zakaulah et al. [18] ในช่วงความดัน 0.5–2.0 mbar พบว่าสัญญาณความต่างศักย์ของอาร์กอนพลาสมามีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันสูงขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 5.2 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ต่อเวลา (V/s) ของอาร์กอนพลาสมา
ในช่วงความดัน 0.5 – 3.0 mbar

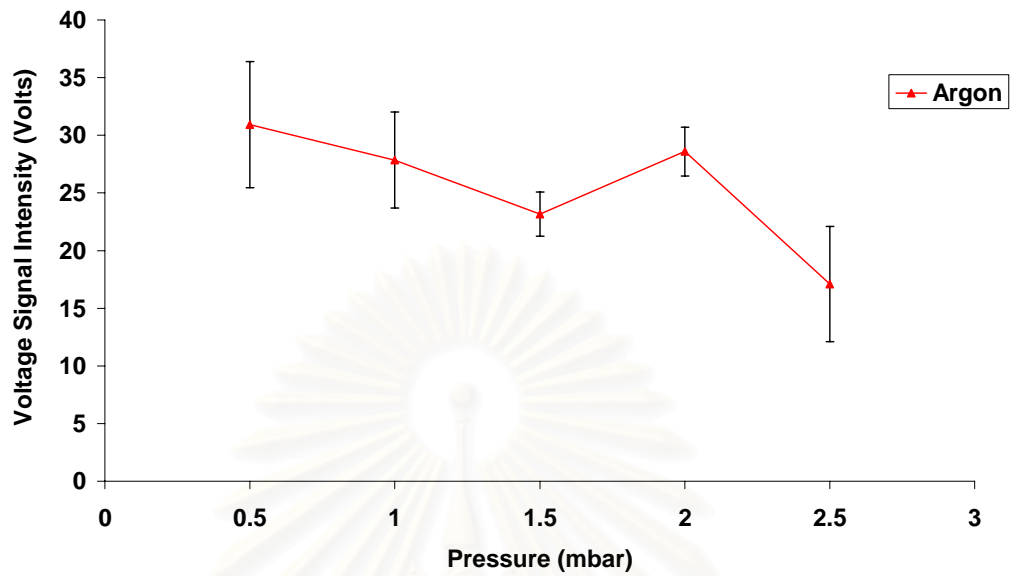


รูปที่ 5.3 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ต่อเวลา (V/s) ของออกซิเจนพลาสมา
ในช่วงความดัน 0.5 – 3.0 mbar



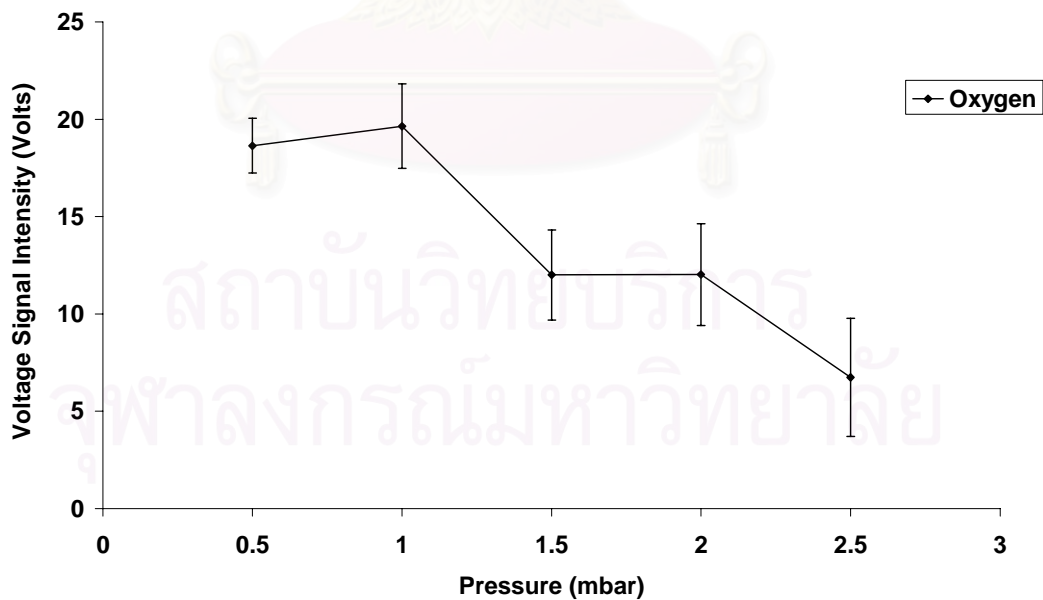
รูปที่ 5.4 กราฟสัญญาณความต่างศักย์ต่อเวลา (V/s) ของไนโตรเจนพาสมา ในช่วงความดัน 0.5–3.0 mbar

VOLTAGE SIGNAL VARY PRESSURE OF ARGON GAS

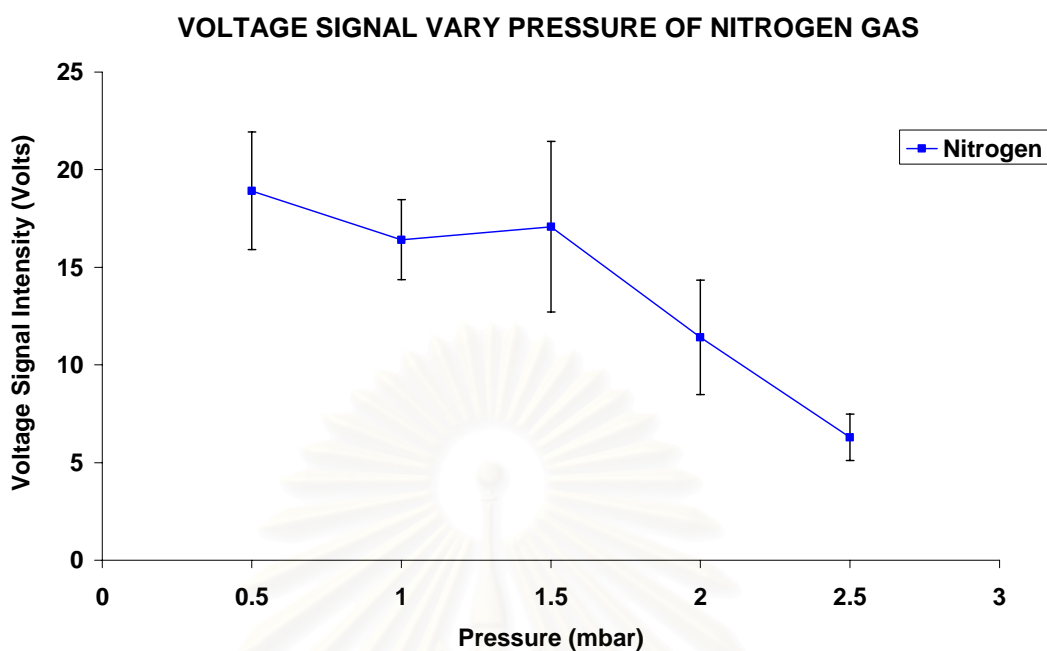


รูปที่ 5.5 กราฟแนวโน้มสัญญาณความต่างศักย์ต่อเวลา (V/s) ของอาร์กอนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5 – 2.5 mbar

VOLTAGE SIGNAL VARY PRESSURE OF OXYGEN GAS



รูปที่ 5.6 กราฟแนวโน้มสัญญาณความต่างศักย์ต่อเวลา (V/s) ของออกซิเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5 – 2.5 mbar



รูปที่ 5.7 กราฟแนวโน้มสัญญาณความต่างศักย์ต่อเวลา (V/s) ของไนโตรเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5 – 2.5 mbar

5.2 การวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา

การทดลองนี้วัดอุปประสงค์เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา ด้วยวิธีอัตราส่วนตัวกรองในการคำนวณ โดยเครื่องมือที่สำคัญในการทดลองนี้ คือ สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง

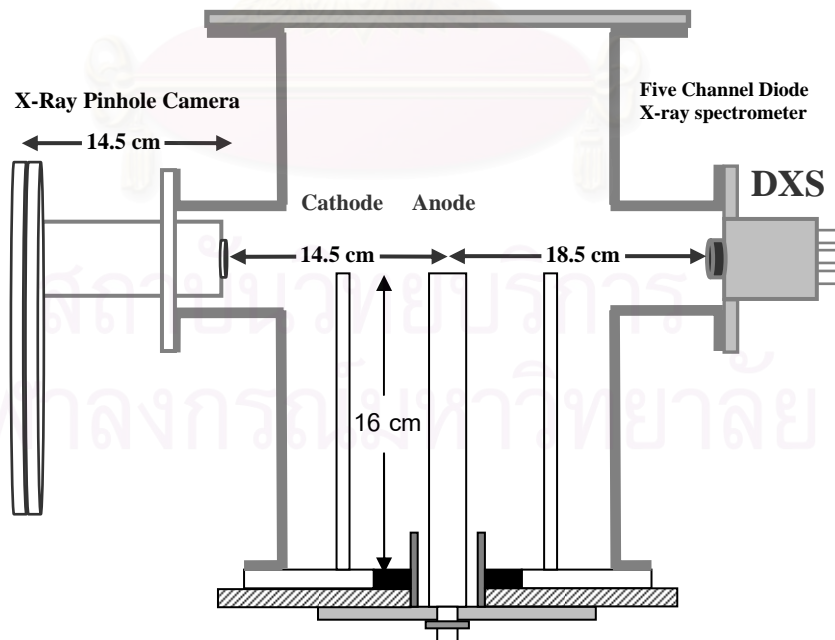
5.2.1 การวัดอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา

การติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 โดยมีระยะห่างของสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์กับจุดศูนย์กลางเหนือปลายแท่งแอโนดมีระยะห่างเท่ากับ 18.5 cm ก่อนทำการทดลองต้องทำการสอบเทียบพินไดโอดก่อนที่จะทำการทดลองจริง โดยจะกั้นด้วยแผ่นอลูมิเนียมไม่ลาร์หนา $36 \mu\text{m}$ (Al $0.24 \mu\text{m}$) จากนั้นจึงเปลี่ยนความหนาและวัสดุในการทดลองวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา พินไดโอดแต่ละตัวจะกั้นด้วยแผ่นไม่ลาร์และอลูมิเนียมด้วยความหนาที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ทำให้สภาพไวของไดโอดเปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 4.13 สัญญาณจากพินไดโอดที่วัดได้จะถูกประมวลผลโดยออสซิลโลสโคป และจะนำไปคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนต่อไป

การทดลองวัดอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา ทำการทดลองโดยใช้ก๊าซทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ก๊าซอาร์กอน ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน ที่ความดัน 0.5 mbar, 1.0 mbar, 1.5 mbar, 2.0 mbar และ 2.5 mbar จากสัญญาณความต่างศักย์ที่ 3.0 mbar บ่งบอกให้ทราบว่าไม่เกิดกระบวนการเกิดการโฟกัสของพลาสมาในช่วงแอมป์มี ส่งผลทำให้ไม่เกิดการแผ่รังสีเอกซ์ จึงไม่ทำการทดลองที่ความดันดังกล่าว

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลชนิดวัสดุและความหนาที่ใช้กันพื้นไดโอดแต่ละตัว

หมายเลข พื้นไดโอด	วัสดุและความหนาที่กันพื้นไดโอด
1	อลูมิเนียมไม่ลาร์หนา $36 \mu\text{m}$ (Al $0.24 \mu\text{m}$)
2	อลูมิเนียมไม่ลาร์หนา $36 \mu\text{m}$ (Al $0.24 \mu\text{m}$) และอลูมิเนียมหนา $20 \mu\text{m}$
3	อลูมิเนียมไม่ลาร์หนา $36 \mu\text{m}$ (Al $0.24 \mu\text{m}$) และอลูมิเนียมหนา $40 \mu\text{m}$
4	อลูมิเนียมไม่ลาร์หนา $36 \mu\text{m}$ (Al $0.24 \mu\text{m}$) และอลูมิเนียมหนา $60 \mu\text{m}$
5	อลูมิเนียมไม่ลาร์หนา $36 \mu\text{m}$ (Al $0.24 \mu\text{m}$) และอลูมิเนียมหนา $80 \mu\text{m}$



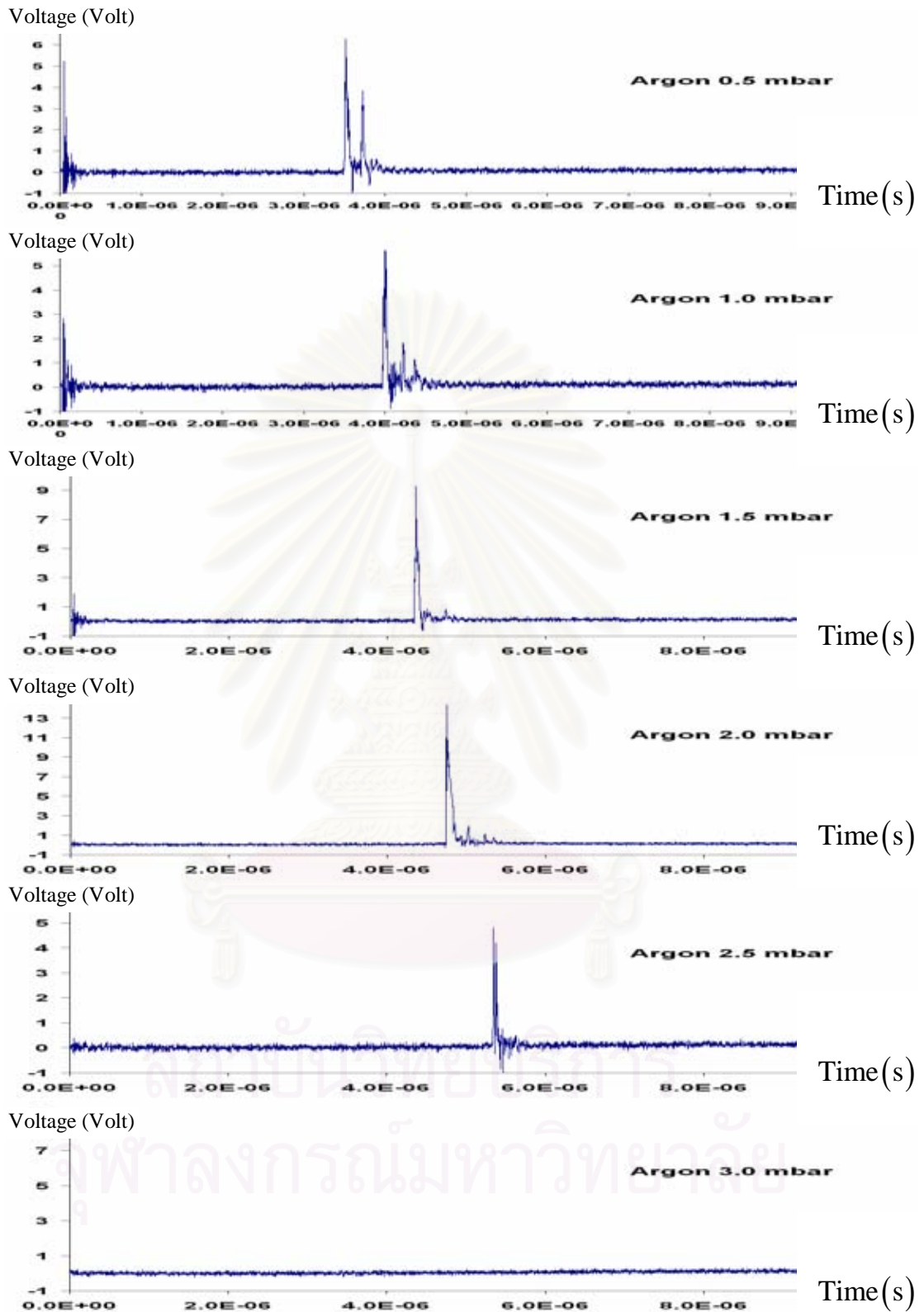
รูปที่ 5.8 แผนภาพลักษณะการติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง และกล้องรูเข็มสำหรับรังสีเอกซ์ กับแบบจำลองเครื่องพลาสมาโฟกัส



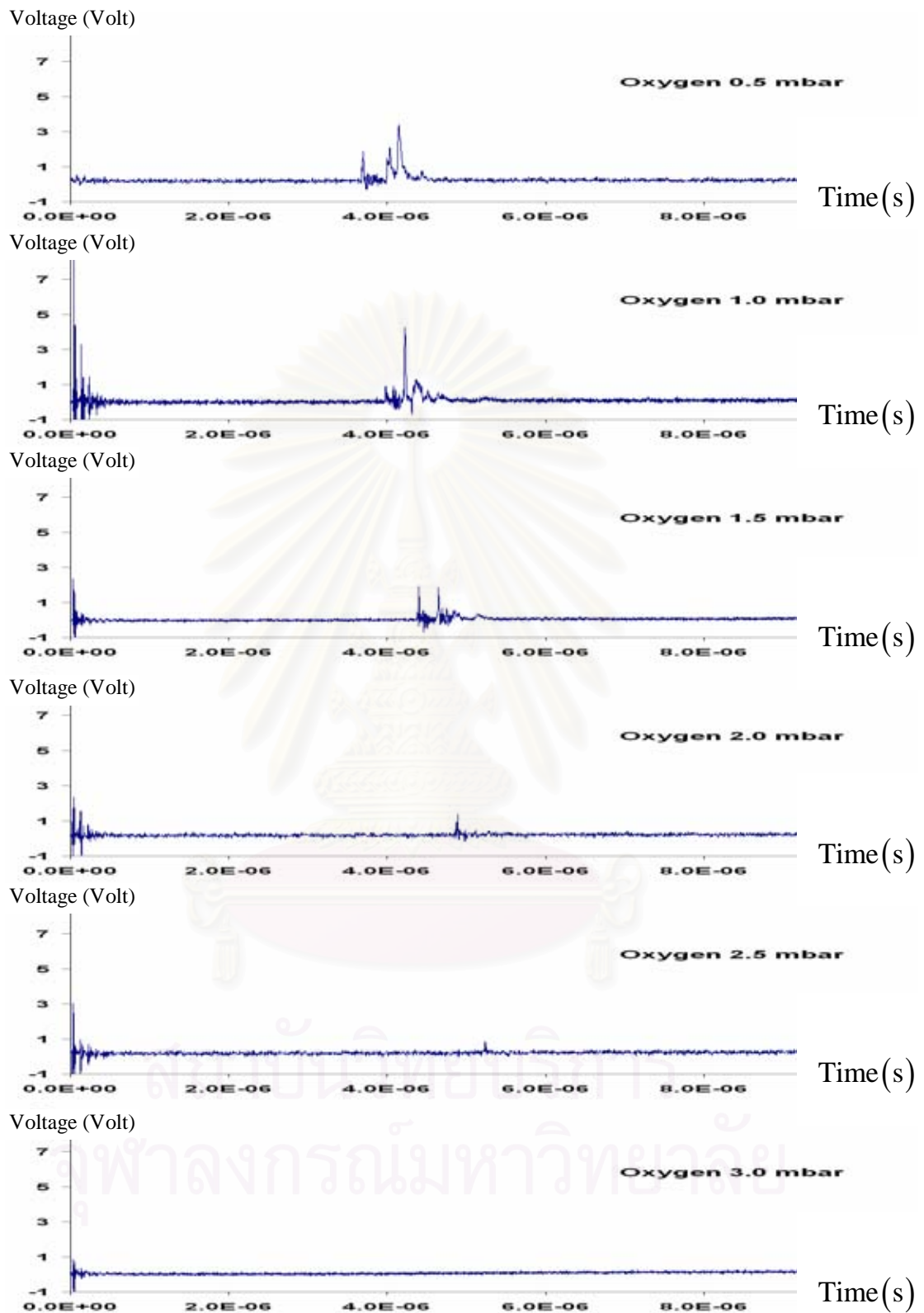
รูปที่ 5.9 ภาพถ่ายลักษณะการติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง
กับเครื่องพลาสมาไฟกัสที่ใช้ในการทดลอง

5.2.2 ผลการทดลอง และอภิปรายผลการวัดคุณสมบัติของอิเล็กตรอนในพลาสมา

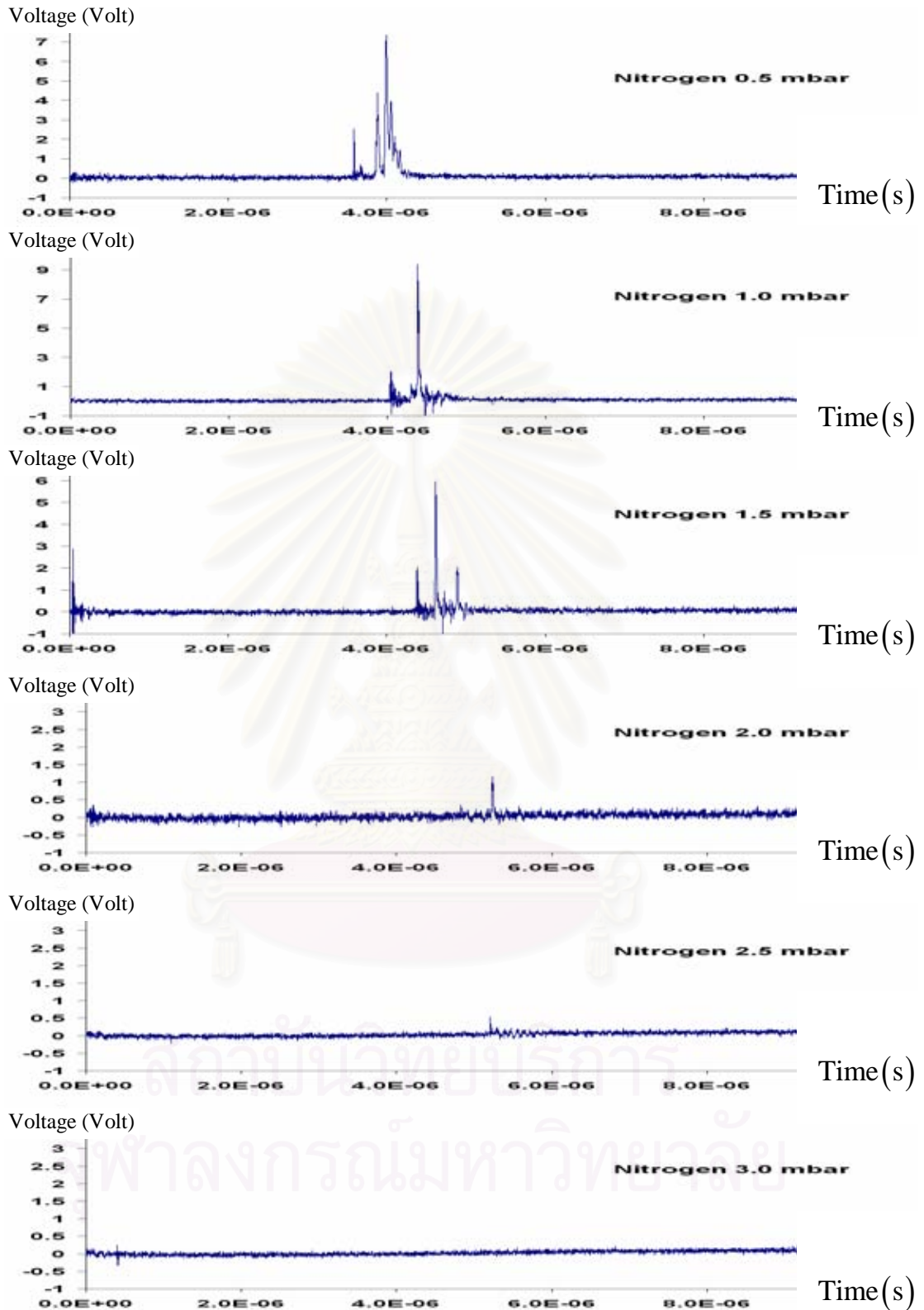
จากการทดลองพบว่าสัญญาณรังสีเอกซ์ของก๊าซทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 5.10, 5.11 และ 5.12 ตามลำดับ โดยกราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรังสีเอกซ์ที่วัดได้ของพินไดโอดช่อง 1 ในอาร์กอนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–3.0 mbar จะมีลักษณะดังกราฟรูปที่ 5.13 โดยได้จากการทดลองวัดสัญญาณรังสีเอกซ์จำนวน 10 ครั้ง ในแต่ละความดัน จากนั้นคำนวณค่าเฉลี่ยและคำนวณค่าคลาดเคลื่อนในการวัดจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



รูปที่ 5.10 กราฟสัญญาณรังสีเอกซ์ (V/s) ที่วัดได้จากพินไดโอดช่อง 1
ในอาร์กอนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–3.0 mbar

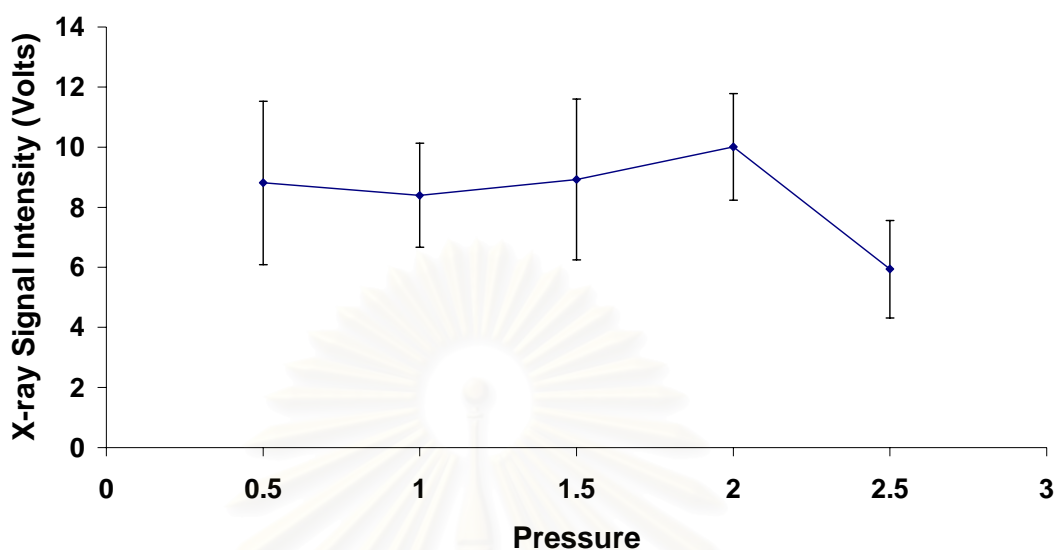


รูปที่ 5.11 กราฟสัญญาณรังสีเอกซ์ (V/s) ที่วัดได้ของฟินไดโอดช่อง 1
ในออกซิเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–3.0 mbar



รูปที่ 5.12 กราฟสัญญาณรังสีเอกซ์ (V/s) ที่วัดได้ของพินไดโอดช่อง 1
ในไนโตรเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5–3.0 mbar

X-Ray Signal with Pressure of Argon



รูปที่ 5.13 กราฟแนวโน้มสัญญาณรังสีเอกซ์ (V) ที่วัดได้จากฟินไดโอดช่อง 1 ในอาร์กอนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5 – 2.5 mbar

จากผลการทดลองสามารถสรุปลักษณะยอดสัญญาณรังสีเอกซ์ของก๊าซแต่ละชนิด และเปรียบเทียบกับยอดสัญญาณความต่างศักย์ในการทดลองที่ 5.1 ได้ดังนี้

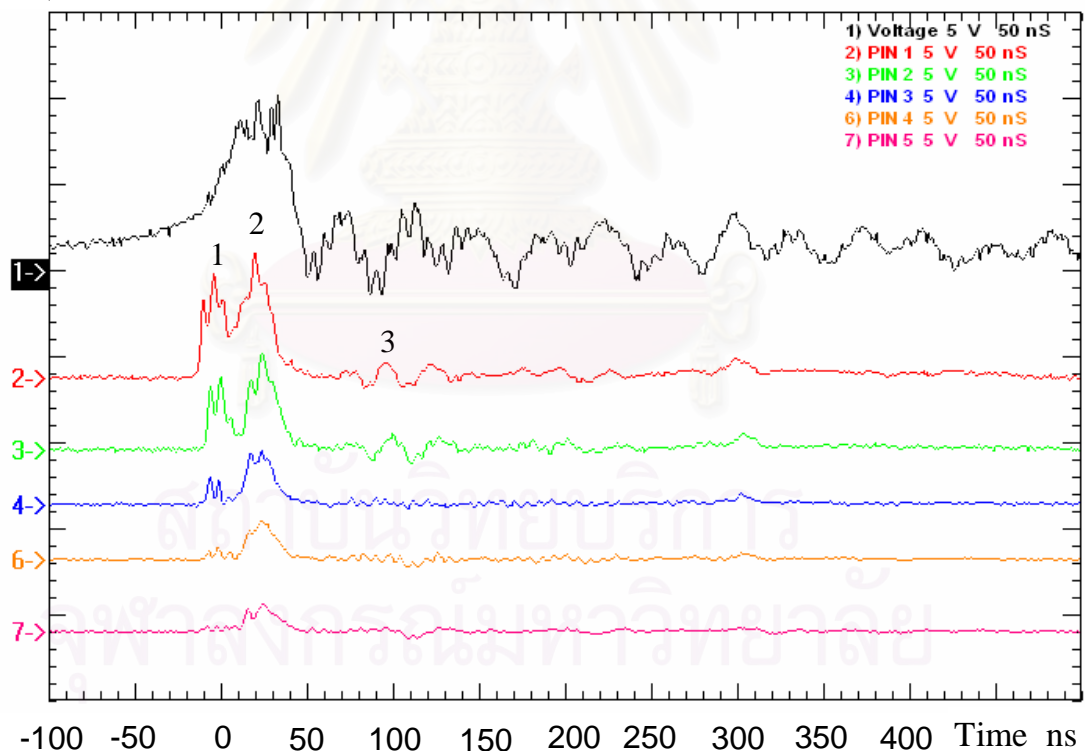
1. ลักษณะสัญญาณรังสีเอกซ์ของก๊าซทุกชนิดมีลักษณะของยอดเช่นเดียวกับ ยอดสัญญาณความต่างศักย์ เช่น ก๊าซอาร์กอนจะเป็นยอดเดี่ยว ก๊าซ ออกซิเจนและไนโตรเจนจะมีลักษณะเป็นยอดหลายยอด ซึ่งมีลักษณะ เหมือนกับยอดสัญญาณความต่างศักย์ของก๊าซแต่ละชนิด
2. ความสูงของยอดสัญญาณรังสีเอกซ์ของก๊าซอาร์กอนที่ความดันต่าง ๆ พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันในช่วงความดัน 0.5 – 2.0 mbar และมีค่าต่ำที่สุดที่ความดัน 2.5 mbar จากการทดลองของ M. Zakoullah et al. [18] ในช่วงความดัน 0.5 – 2.5 mbar พบว่าสัญญาณรังสีเอกซ์มีลักษณะแนวโน้มที่ลดลง ส่วนก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจน พบว่าความสูงของยอดสัญญาณรังสีเอกซ์ในยอดแรกมีสัญญาณค่อนข้างต่ำมาก เมื่อเทียบกับยอดแรกของ สัญญาณรังสีเอกซ์ที่วัดได้จากก๊าซอาร์กอน และพบว่าความสูงของยอด

สัญญาณรังสีเอกซ์ของก๊าซออกซิเจน และไนโตรเจน มีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันสูงขึ้น

3. ช่วงเวลาหน่วง (time delay) ของยอดสัญญาณรังสีเอกซ์ของก๊าซทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ M. Zakauallah et al. [19]

เมื่อเปรียบเทียบกราฟสัญญาณรังสีเอกซ์ที่วัดได้จากสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง แสดงในรูปที่ 5.14 ซึ่งเป็นสัญญาณเมื่อใช้ก๊าซอาร์กอนในการทดลองที่ความดัน 1.0 mbar กับสัญญาณความต่างศักย์ของอาร์กอนพลาสมา พบว่าลักษณะยอดสัญญาณรังสีเอกซ์จะมีค่าต่ำลงตามลำดับ เนื่องจากไดโอดแต่ละตัวถูกกันด้วยแผ่นกรองที่มีความหนาที่ต่างกัน และพบว่ายอดสัญญาณรังสีเอกซ์ที่วัดได้จากพินไดโอดมีหลายยอด

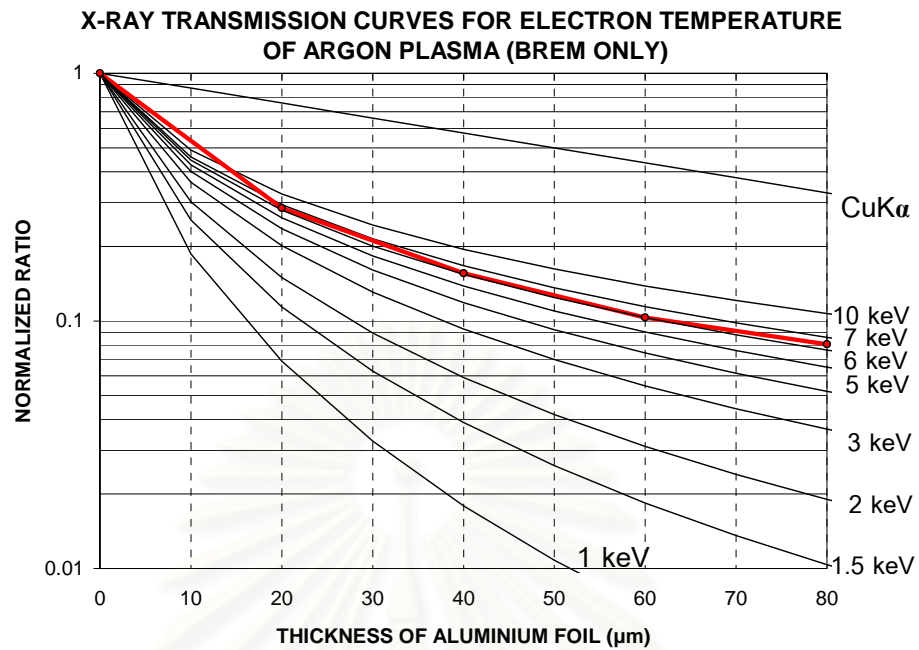
div/time



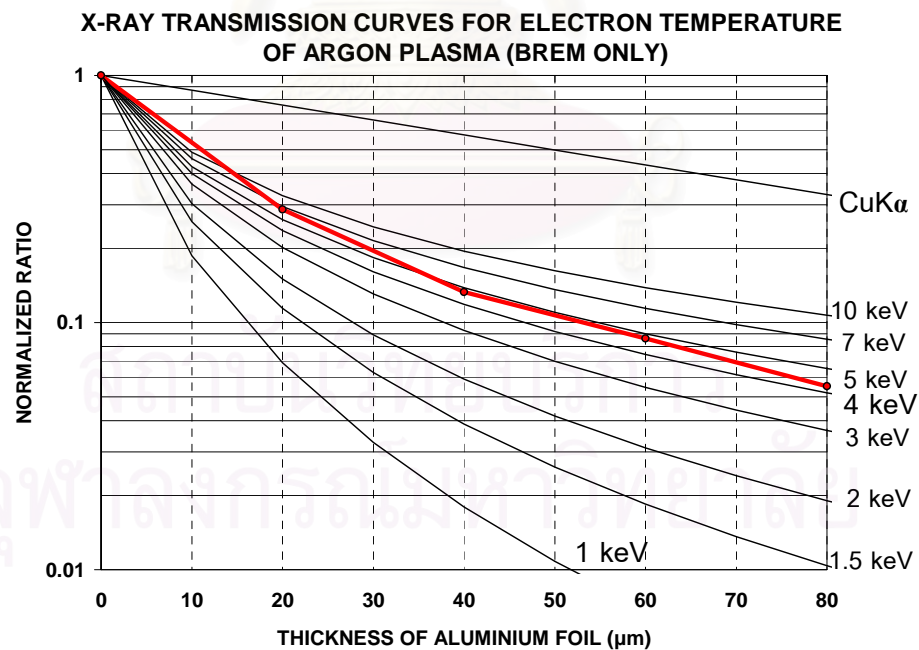
รูปที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรังสีเอกซ์ต่อเวลา (div/time) ของพินไดโอดทั้ง 5 ช่อง ในอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1.0 mbar

เมื่อทำการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา พบว่ายอดสัญญาณรังสีเอกซ์ที่วัดได้ดังรูปที่ 5.14 ปรากฏว่า ยอดสัญญาณกลุ่มที่ 1 ส่วนใหญ่เป็นสัญญาณของรังสีเอกซ์แบบอ่อนที่เกิดจากการแผ่รังสีจากพลาสมาแบบเบรมสตราลูง ส่วนกลุ่มยอดที่ 2-3 พบว่าเป็นกลุ่มสัญญาณของรังสีเอกซ์ของ CuK_{α} เนื่องจากเมื่อคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในกลุ่มยอดสัญญาณดังกล่าว เมื่อเทียบอัตราส่วนกับกราฟเส้นส่งผ่านรังสีเอกซ์ พบว่าเส้นอัตราส่วนของสัญญาณกลุ่มหลังนี้มีค่ามากกว่า 10 keV ขึ้นไป ซึ่งเป็นบริเวณ CuK_{α} ซึ่งพบว่าผลการทดลองมีสอดคล้องกับผลการทดลองของ C.S. Wong et al. [20] และ Chee Mang Ng et al. [21] แต่จากการทดลองหลายครั้งพบว่า มีสัญญาณบางชุดที่ไม่เป็นไปตามนั้น นั่นคือ ยอดสัญญาณแรกที่จะเป็นสัญญาณของ CuK_{α} ส่วนสัญญาณที่สองถัดมาจะเป็นสัญญาณที่เกิดจากรังสีเอกซ์แบบอ่อน และสัญญาณกลุ่มหลังจะเป็นสัญญาณของ CuK_{α} อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งอาจจะอธิบายได้ว่าเกิดจากการที่พลาสมาขณะเคลื่อนตัวมาถึงบริเวณปลายแอโนด มีประจุอิเล็กตรอนบางส่วนที่มีความเร็วสูงกว่าอิเล็กตรอนกลุ่มอื่นได้วิ่งชนปลายแอโนดที่ทำด้วยทองแดง ทำให้พบสัญญาณของ CuK_{α} เกิดขึ้นก่อน แทนที่จะเป็นสัญญาณของรังสีเอกซ์แบบอ่อน ที่เกิดจากกระบวนการเบรมสตราลูง

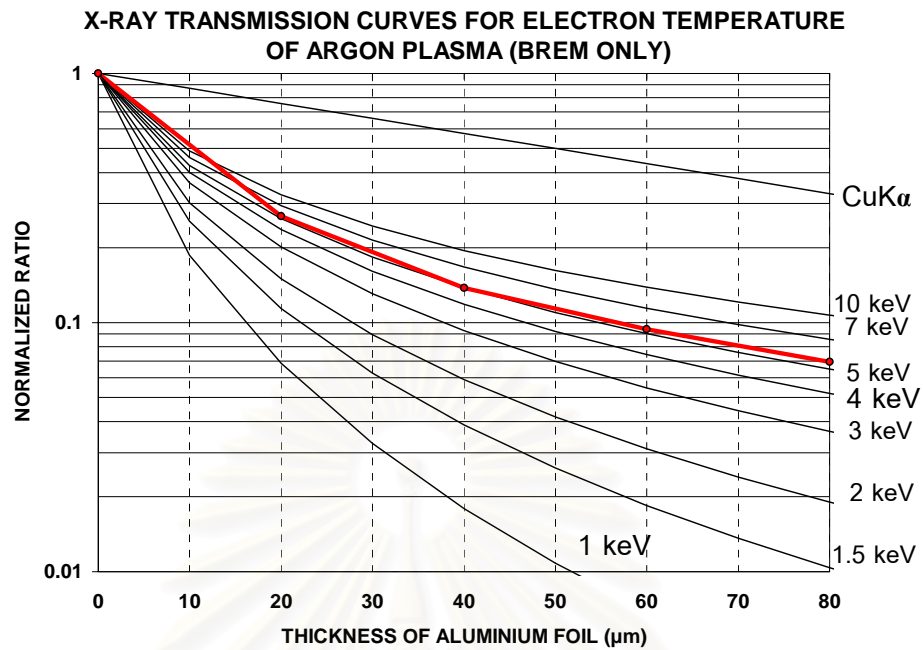
การคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาด้วยวิธีอัตราส่วนตัวกรอง ในอาร์กอนพลาสมา ออกซิเจนพลาสมา และไนโตรเจนพลาสมา จากคำนวณค่าอัตราส่วนตัวกรองที่ได้จากการทดลองของฟินไดโอดทั้ง 5 ช่อง เปรียบเทียบกับกราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์โดยใช้แบบจำลองโคโรนาที่สร้างขึ้น ผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาในช่วงความดัน 0.5–2.0 mbar ได้แสดงดังรูปที่ 5.15 ถึงรูปที่ 5.21 การทดลองได้ทดลองวัดอุณหภูมิจำนวน 10 ครั้ง ในแต่ละความดัน จากนั้นหาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา และคำนวณค่าคลาดเคลื่อนในการวัดจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยออกซิเจนพลาสมาและไนโตรเจนพลาสมาสามารถวัดอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาได้บางความดันเท่านั้น เนื่องจากรังสีเอกซ์แบบอ่อนเนื่องที่เกิดขึ้นในพลาสมาทั้งสองมีปริมาณน้อยมาก ทำให้ไม่สามารถนำมาคำนวณได้ (วัดจากยอดสัญญาณกลุ่มที่หนึ่งเท่านั้น) รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่เป็นรังสีเอกซ์แบบเข้ม CuK_{α} เป็นกลุ่มสัญญาณรังสีเอกซ์ในกลุ่มที่ 2-3 สรุปผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาของก๊าซทั้ง 3 ชนิด ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar แสดงในตารางที่ 5.2



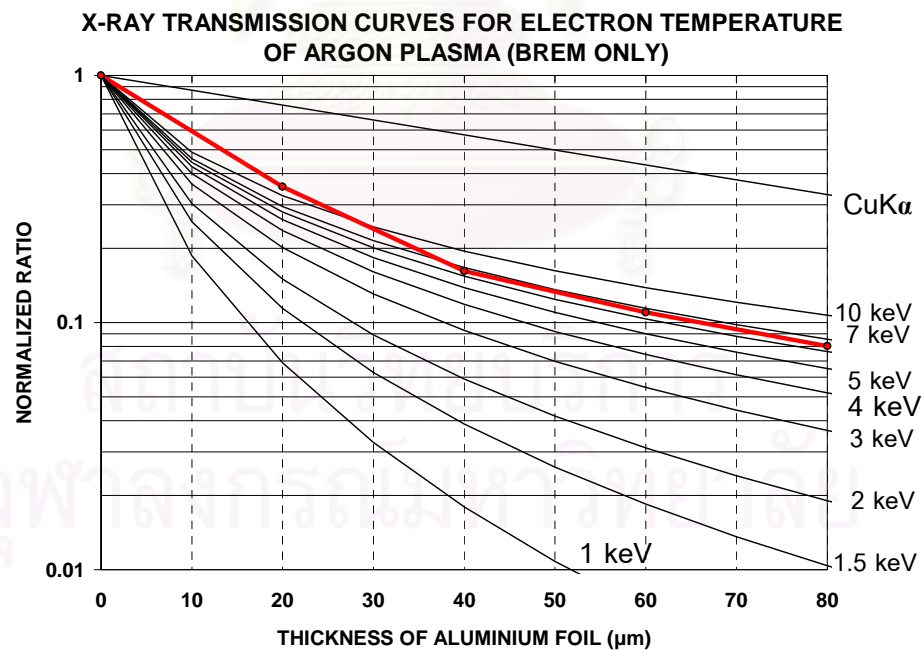
รูปที่ 5.15 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในอาร์กอนพลาสมา
ที่ความดัน 0.5 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของอาร์กอนพลาสมา



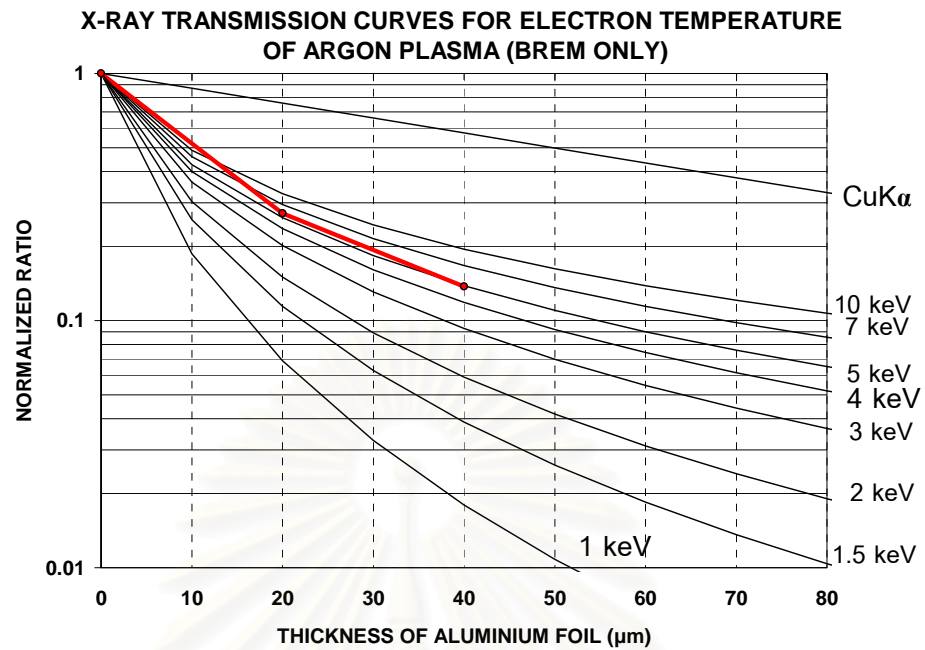
รูปที่ 5.16 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในอาร์กอนพลาสมา
ที่ความดัน 1.0 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของอาร์กอนพลาสมา



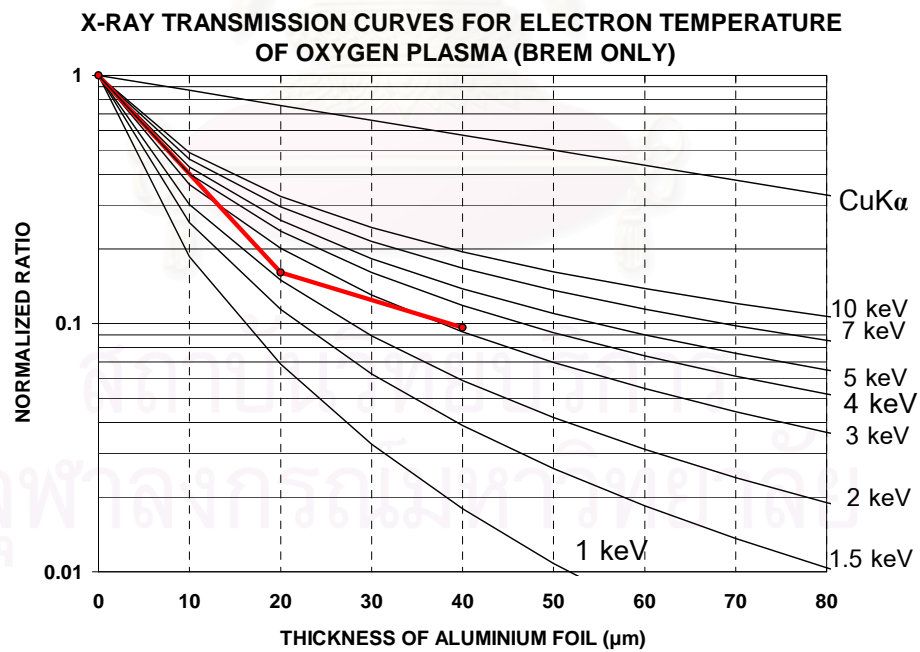
รูปที่ 5.17 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในอาร์กอนพลาสมา
ที่ความดัน 1.5 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของอาร์กอนพลาสมา



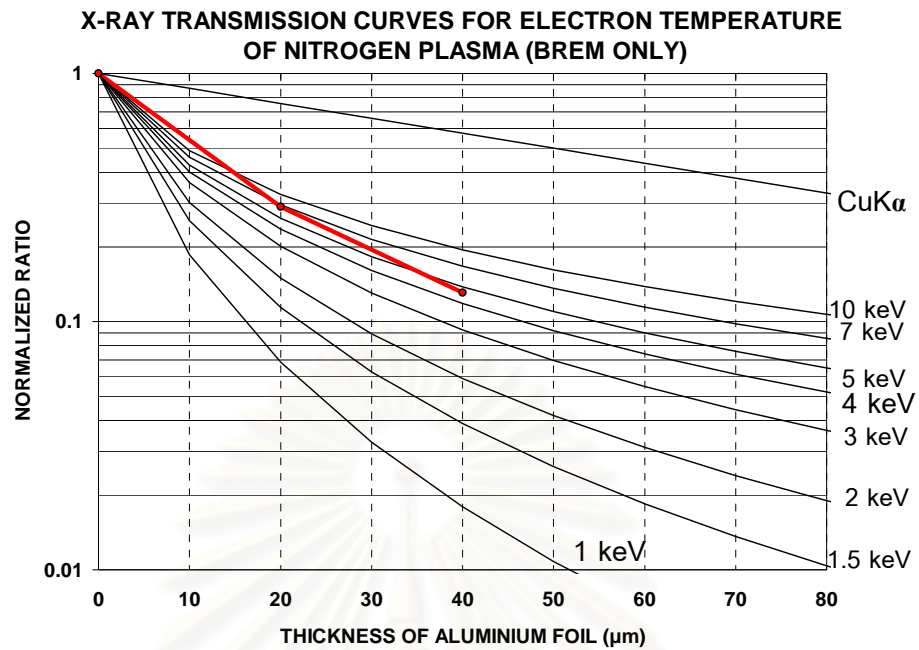
รูปที่ 5.18 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในอาร์กอนพลาสมา
ที่ความดัน 2.0 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของอาร์กอนพลาสมา



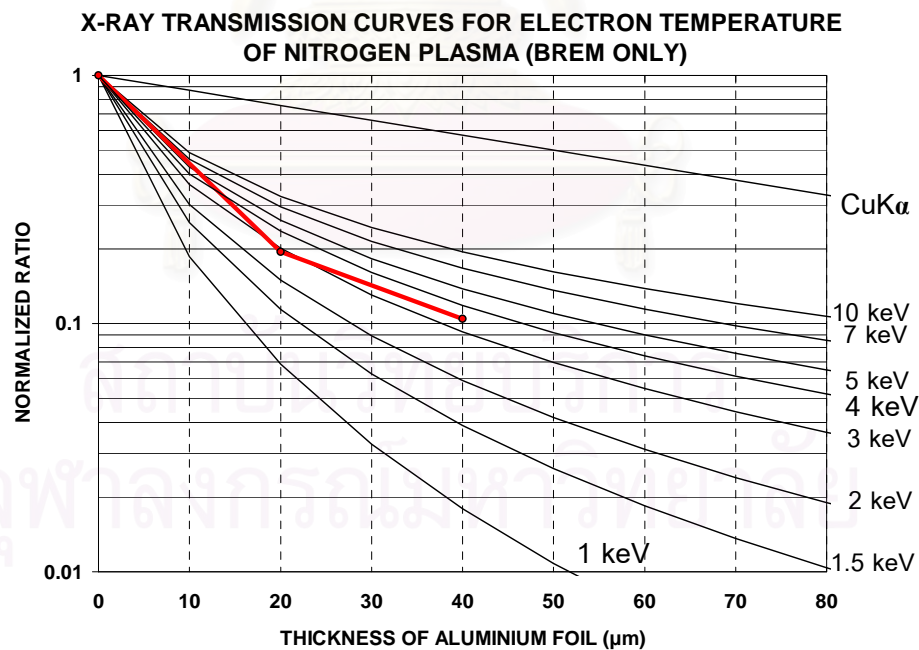
รูปที่ 5.19 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในอาร์กอนพลาสมา
ที่ความดัน 2.5 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของอาร์กอนพลาสมา



รูปที่ 5.20 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในออกซิเจนพลาสมา
ที่ความดัน 0.5 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของออกซิเจนพลาสมา



รูปที่ 5.21 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในไนโตรเจนพลาสมา
ที่ความดัน 1.0 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของไนโตรเจนพลาสมา



รูปที่ 5.21 กราฟผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในไนโตรเจนพลาสมา
ที่ความดัน 1.5 mbar ด้วยเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของไนโตรเจนพลาสมา

ตารางที่ 5.2 ผลการวัดอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาต่าง ๆ ในช่วงความดัน

0.5 – 2.5 mbar โดยใช้สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 3 ช่อง และ 5 ช่อง

Gas	Argon (keV)		Oxygen (keV)		Nitrogen (keV)	
	3 Ch.	5 Ch.	3 Ch.	5 Ch.	3 Ch.	5 Ch.
0.5 mbar	6.1±1.9	6.4±3.0	3.2±0.7	–	–	–
1.0 mbar	4.8±1.4	4.3±0.7	–	–	4.6±2.1	–
1.5 mbar	5.0±2.0	5.5±1.0	–	–	3.4±1.4	–
2.0 mbar	6.6±2.9	6.5±1.3	–	–	–	–
2.5 mbar	5.0±3.0	–	–	–	–	–

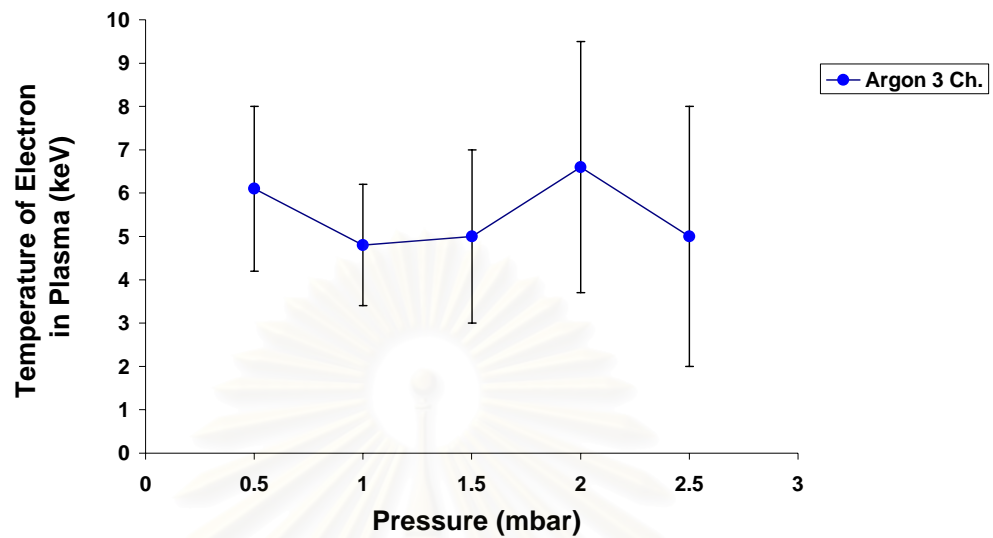
ตารางที่ 5.2 เป็นผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา โดยได้เปรียบเทียบการคำนวณเมื่อใช้สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 3 ช่อง (ช่องหมายเลข 1, 2 และ 3) และสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง (ช่องหมายเลข 1, 2, 3, 4 และ 5) ตามลำดับ สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมากับความดันก๊าซได้ดังกราฟในรูปที่ 5.22 เมื่อเทียบอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมากับชนิดของรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องจากสมการที่ (2.1) จะได้ประเภทของรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องที่เกิดขึ้น ได้แสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการเทียบอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมากับชนิดของรังสีเอกซ์ ภายใต้

ความดัน 0.5 – 2.5 mbar ของก๊าซอาร์กอน ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน

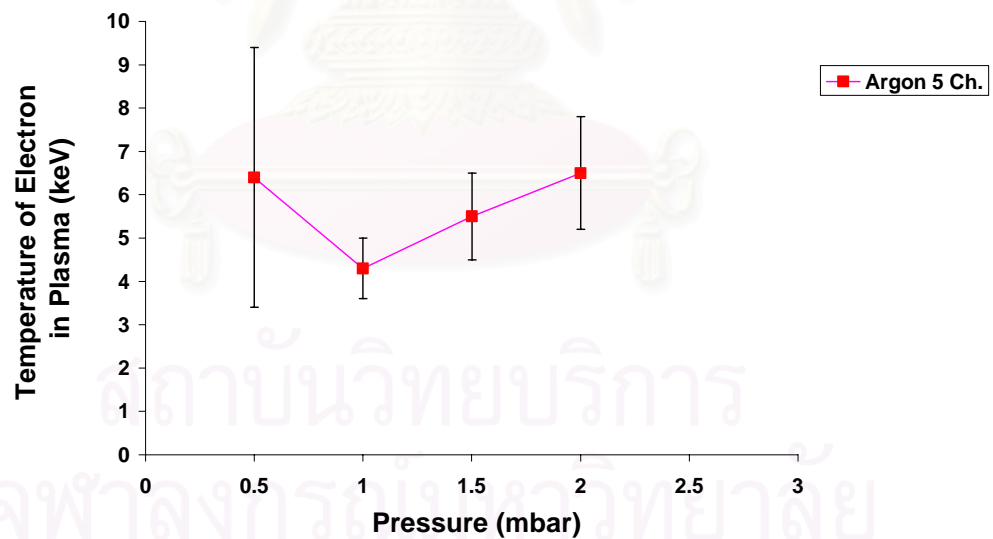
Pressure	Argon	Oxygen	Nitrogen
0.5 mbar	Soft and Hard X-ray	Soft X-ray	–
1.0 mbar	Soft and Hard X-ray	–	Soft and Hard X-ray
1.5 mbar	Soft and Hard X-ray	–	Soft X-ray
2.0 mbar	Soft and Hard X-ray	–	–
2.5 mbar	Soft and Hard X-ray	–	–

Electron Temperature in Plasma



(ก)

Electron Temperature in Plasma



(ข)

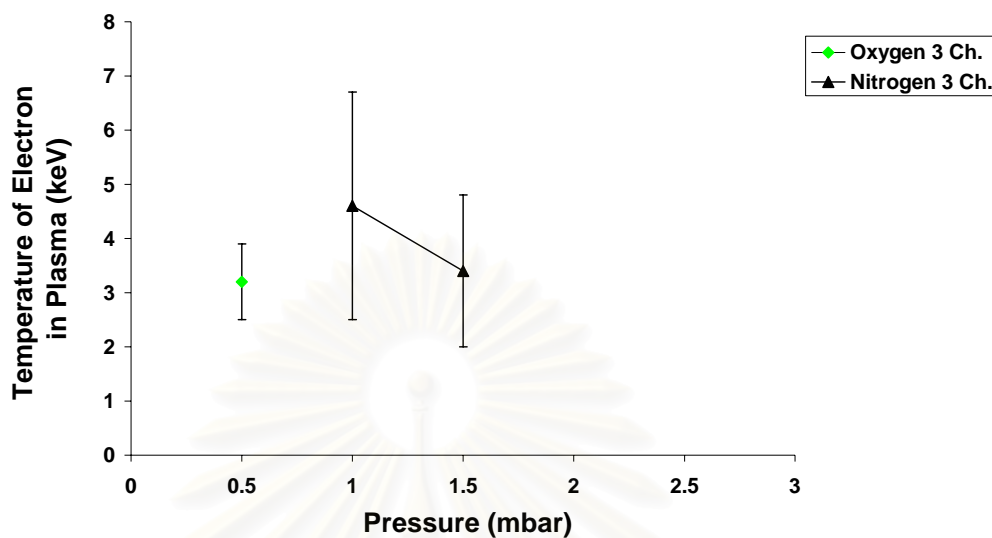
รูปที่ 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา

ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar ของก๊าซอาร์กอน โดย

(ก) เมื่อใช้สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบ 3 ช่อง

(ข) เมื่อใช้สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบ 5 ช่อง

Electron Temperature in Plasma



รูปที่ 5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5 – 2.5 mbar ของก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน

จากผลการทดลอง พบว่า

1. รังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดได้ ก๊าซอาร์กอนทำให้เกิดรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องในช่วงของรังสีเอกซ์แบบอ่อนและแบบเข้ม รวมทั้งเกิด CuK_{α} ส่วนก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนให้รังสีเอกซ์แบบอ่อนแต่มีความเข้มต่ำมาก โดยจะเกิด CuK_{α} เป็นส่วนใหญ่ จึงไม่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับรังสีเอกซ์ เว้นแต่จะหาทางป้องกันไม่ให้เกิด CuK_{α} ขึ้น
2. กลุ่มสัญญาณรังสีเอกซ์ จากการวิเคราะห์สัญญาณรังสีเอกซ์พบว่า ยอดของสัญญาณกลุ่มที่ 1 จะเป็นสัญญาณที่เกิดจากรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง ส่วนยอดกลุ่มที่ 2-3 จะเป็น CuK_{α} แต่มีสัญญาณบางชุดที่ไม่เป็นไปตามนั้น ดังที่ได้อธิบายในข้างต้นแล้ว
3. เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณความต่างศักย์และสัญญาณรังสีเอกซ์ พบว่าไม่อาจสรุปได้ถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวเมื่อเทียบกับความดันที่ใช้ในการทดลอง จากการเปรียบเทียบการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอน เมื่อใช้สเปกโตรมิเตอร์แบบไดโอด 3 ช่อง และ 5 ช่อง พบว่าการใช้แบบไดโอด 5 ช่อง มีความ

น่าเชื่อถือมากกว่าการใช้แบบไดโอด 3 ช่อง เนื่องจากมีค่าคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์น้อยกว่า

5.3 การถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลา

การทดลองในส่วนนี้ทดลองเพื่อต้องการทราบขนาดและโครงสร้างของจุดโฟกัส โดยจะต้องใช้เทคนิคที่เรียกว่า การถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลา ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.3.2

การทดลองนี้ผู้ทำวิจัยได้ตั้งวัตถุประสงค์นอกจากการถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลา เพื่อศึกษาขนาดและโครงสร้างของจุดโฟกัสแล้วนั้น ยังได้คิดที่จะทดลองเพื่อใช้วิธีถ่ายภาพแบบรวมเวลาในการคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์แทนวิธีการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา ซึ่งคิดว่าจะมีข้อดีมากกว่าวิธีเดิม กล่าวคือ วิธีการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา ให้ข้อมูลเพียงยอดสัญญาณรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่าง ๆ แต่ไม่อาจทราบขนาดและโครงสร้างของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นได้ ฉะนั้นมีข้อดีเพียงประการเดียว คือ ใช้คำนวณอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์ในพลาสมาได้เท่านั้น

ถ้าใช้การถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลาเพื่อคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์ในพลาสมา ได้จากวิธีอัตราส่วนตัวกรองโดยวัดความเข้มของจุดโฟกัสจากภาพที่ถ่ายได้เช่นเดียวกับการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา จะทำให้การถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบแยกเวลามีข้อดีเพิ่มขึ้น ซึ่งจะให้ข้อมูลที่หลากหลายมากกว่าการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา นั่นคือ 1) จะทำให้ทราบขนาดและโครงสร้างของจุดโฟกัส 2) ทำให้ทราบอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์ในพลาสมา และ 3) เนื่องจากจุดโฟกัสที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นจุดหลายจุด เกิดจากพลาสมาที่บีบอัดเข้ามาในช่วงเวลาและตำแหน่งต่างกัน ดังนั้น ภาพถ่ายจะสามารถแยกแยะได้ว่าจุดโฟกัสที่ถ่ายได้เกิดจากพลาสมาที่มีอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์ในพลาสมานั้นเป็นเท่าใด โดยวิธีวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลาไม่อาจแยกแยะในเรื่องดังกล่าวได้

5.3.1 การทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์

ในการทดลองกล้องรูเข็มสำหรับรังสีเอกซ์ จะมีรูเข็มจำนวน 3 รู เรียงอยู่ในแนวเดียวกัน โดยมีขนาดรูเท่ากับ $200 \mu\text{m}$ รูเข็มแต่ละรูจะกั้นด้วยแผ่นกรงรังสีเอกซ์ ดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลชนิดและความหนาของแผ่นกรงรังสีเอกซ์ที่ใช้กับรูเข็ม

รูเข็ม	วัสดุและความหนาที่กั้นรูเข็ม
1	อลูมิเนียมไมลาร์หนา $36 \mu\text{m}$ (Al $0.24 \mu\text{m}$)
2	อลูมิเนียมไมลาร์หนา $36 \mu\text{m}$ (Al $0.24 \mu\text{m}$) และอลูมิเนียมหนา $20 \mu\text{m}$
3	อลูมิเนียมไมลาร์หนา $36 \mu\text{m}$ (Al $0.24 \mu\text{m}$) และอลูมิเนียมหนา $40 \mu\text{m}$

ลักษณะการติดตั้งกล้องรูเข็มสำหรับรังสีเอกซ์เข้ากับเครื่องพลาสติกโฟกัสได้แสดงดังรูป 5.8 โดยแนวของรูเข็มทั้งหมดจะอยู่บริเวณเหนือปลายแท่งแอนโนดพอดี โดยระยะห่างของรูเข็มกับจุดกึ่งกลางบนปลายแท่งแอนโนดมีค่าเท่ากับ 14.5 cm และระยะห่างระหว่างรูเข็มกับฟิล์มรังสีเอกซ์มีค่าเท่ากับ 14.5 cm ดังนั้น ระยะห่างของฟิล์มกับปลายแอนโนดมีค่าเท่ากับ 29 cm

ได้ทำการทดลองโดยใช้ก๊าซทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ก๊าซอาร์กอน ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน ในช่วงความดัน $0.5 - 2.5 \text{ mbar}$ ในการทดลองได้มีการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลาไปพร้อมกัน จะได้เทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสติกจากวิธีทั้ง 2 ว่ามีความสอดคล้องเหมือนกันหรือไม่ เพื่อทดลองว่าวิธีการถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลา จะสามารถนำมาใช้แทนวิธีการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลาได้หรือไม่ โดยใช้แผ่นกรงรังสีเอกซ์ความหนาเท่ากันกับที่ใช้กับรูเข็มกันสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบฟินไดโอด 3 ช่อง เพื่อให้เป็นอัตราส่วนจากแผ่นกรงรังสีเอกซ์ชนิดเดียวกันและมีความหนาเท่ากัน

5.3.2 ผลการทดลอง และอภิปรายผลการถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลา

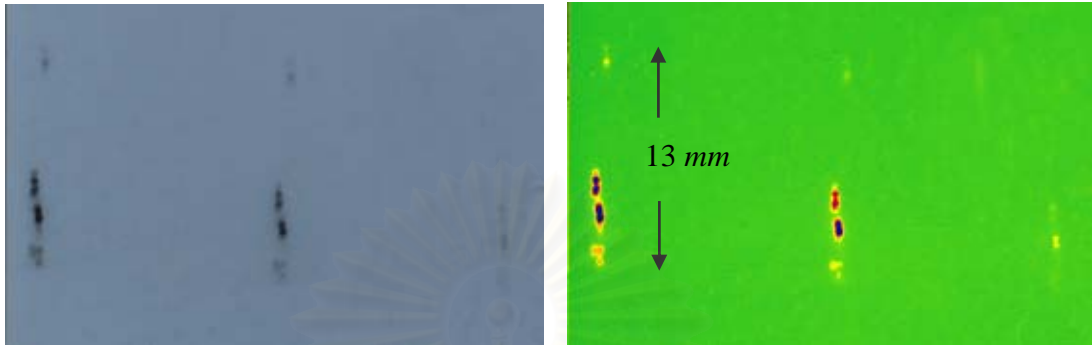
จากการทดลองภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลาเมื่อกันด้วยแผ่นกรองรังสีเอกซ์ ดังตารางที่ 5.4 ปรากฏว่าภาพถ่ายจุดโฟกัสจากรูเข็มทั้ง 3 รู มีเพียงภาพถ่ายจุดโฟกัสจุดภาพเดียวเกิดขึ้นบนฟิล์ม ซึ่งเป็นภาพที่เกิดจากรูเข็มที่กันด้วยอลูมิเนียมไม่ลาร์หนา $36 \mu\text{m}$ (Al $0.24 \mu\text{m}$) ทำให้ไม่อาจจะทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสติก จากวิธีการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลากับการถ่ายภาพแบบรวมเวลาได้ ข้อสังเกตเกี่ยวกับการไม่เกิดภาพบนฟิล์ม เนื่องจากแผ่นกรองรังสีเอกซ์มีความหนาเกินไป ทำให้รังสีเอกซ์ที่มีความเข้มและปริมาณไม่มากพอที่จะสามารถผ่านแผ่นกรองรังสีเอกซ์แล้วตกลงบนฟิล์มจนเกิดปฏิกิริยากับฟิล์ม เพราะฟิล์มที่ใช้ อาจจะมีสภาพไวต่อรังสีเอกซ์แบบอ่อนไม่ดีมากนัก รวมทั้งระยะห่างระหว่างแผ่นฟิล์มกับจุดโฟกัสมีระยะห่างที่ค่อนข้างมาก ทำให้ถ้าหากรังสีเอกซ์ผ่านเข้ามาไม่มากพอหรือไม่เข้มพอจะไม่ทำให้เกิดภาพบนฟิล์ม ซึ่งต่างจากฟินไดโอดที่มีสภาพไวที่ดีมาก จึงสามารถตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์ได้ดี แม้รังสีเอกซ์จะมีปริมาณไม่มากก็ตาม ดังนั้น จำต้องเปลี่ยนแผ่นกรองรังสีเอกซ์ใหม่เพื่อให้ถ่ายภาพจุดโฟกัสจากรูเข็มได้ทั้ง 3 รู จึงปรับลดความหนาของแผ่นกรองรังสีเอกซ์ดังแสดงในตารางที่ 5.5

จากผลการทดลองนี้ ส่งผลให้ไม่อาจจะทำการเปรียบเทียบการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจาก 2 วิธี ดังที่ได้กล่าวไปแล้วได้ เนื่องจากแผ่นกรองรังสีเอกซ์ที่ใช้มีความแตกต่างกัน และไม่สอดคล้องกับหลักการคำนวณอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสติกด้วยวิธีอัตราส่วนตัวกรอง ซึ่งต้องมีแผ่นกรองรังสีเอกซ์เป็นฐานที่เหมือนกัน และกันด้วยแผ่นกรองรังสีเอกซ์ด้วยวัสดุอีกชนิดหนึ่ง โดยปรับความหนาให้ต่างกัน

ตารางที่ 5.5 ข้อมูลชนิดและความหนาของแผ่นกรองรังสีเอกซ์ที่ใช้กันรูเข็ม

รูเข็ม	วัสดุและความหนาที่กันรูเข็ม
1	อลูมิเนียมไม่ลาร์หนา $22 \mu\text{m}$ (Al $0.16 \mu\text{m}$)
2	อลูมิเนียมไม่ลาร์หนา $66 \mu\text{m}$ (Al $0.48 \mu\text{m}$)
3	อลูมิเนียมหนา $20 \mu\text{m}$

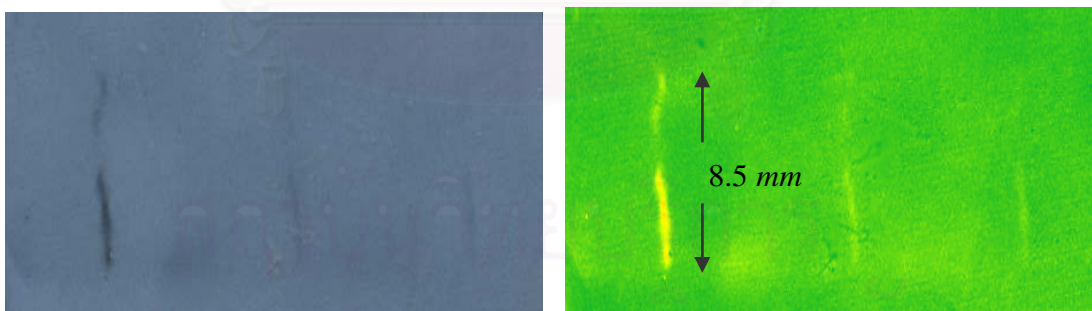
จากนั้นทำการทดลองอีกครั้ง ทำให้ได้ผลการทดลองออกมาตามที่ต้องการ โดยภาพถ่ายรังสีเอกซ์แบบรวมเวลาโดยใช้กล้องรูเข็มรังสีเอกซ์มีลักษณะดังแสดงดังรูป 5.24



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.24 แสดงภาพถ่ายจุดโฟกัสในพลาสมา และเปรียบเทียบความเข้มของจุดโฟกัส

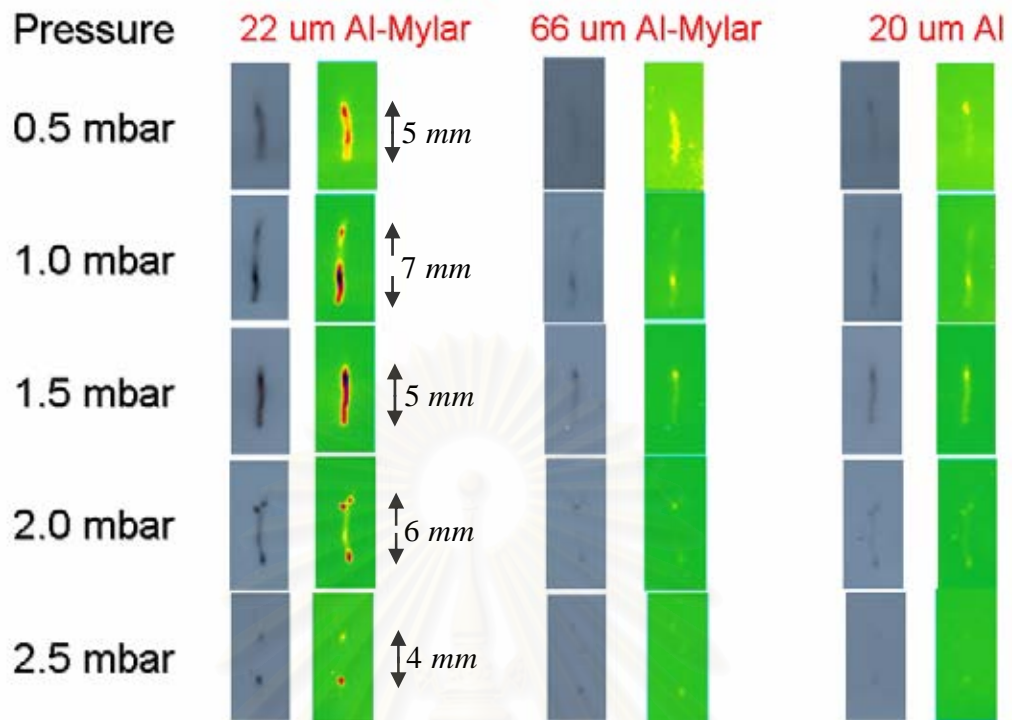
- (ก) จุดโฟกัสในอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1.0 mbar
- (ข) จุดโฟกัสในออกซิเจนพลาสมา ที่ความดัน 1.0 mbar
- (ค) จุดโฟกัสในไนโตรเจนพลาสมา ที่ความดัน 1.0 mbar

เมื่อสังเกตบริเวณด้านล่างของจุดโฟกัสบนฟิล์มซึ่งเป็นบริเวณปลายแอโนดพบว่า มีความเข้มเป็นแถบ ซึ่งอธิบายได้ว่าเกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนในพลาสติกมาวิ่งชนกับปลายแอโนด ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ของ CuK_{α} ขึ้น ความเข้มในบริเวณดังกล่าวของพลาสติกที่เกิดจากก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจนจะมีความเข้มมากกว่าก๊าซอาร์กอน ซึ่งมีผลสอดคล้องกับผลการทดลองที่ 5.1 โดยจะเกิด CuK_{α} ในพลาสติกมาจากก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนสูงกว่าก๊าซอาร์กอน

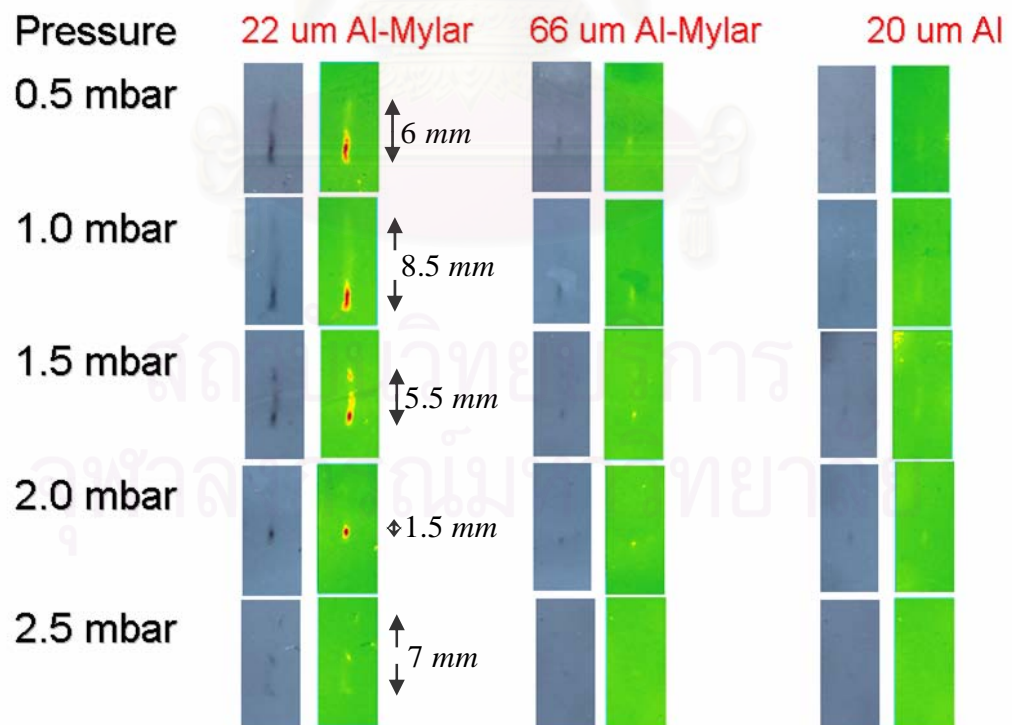
เมื่อเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดโฟกัสของก๊าซอาร์กอน ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน ที่ความดันต่าง ๆ ผลปรากฏดังแสดงในรูปที่ 5.25, 5.26, 5.27 และรูปที่ 5.28 โดยได้ใช้โปรแกรมโฟโต้ช็อป (Photoshop) ปรับเกรเดียนต์แมป (Gradient map) แยกสีให้เห็นความเข้มของจุดโฟกัสในแต่ละบริเวณ เพื่อแยกให้เห็นว่าช่วงบริเวณไหนมีความเข้มมากน้อยกว่ากัน



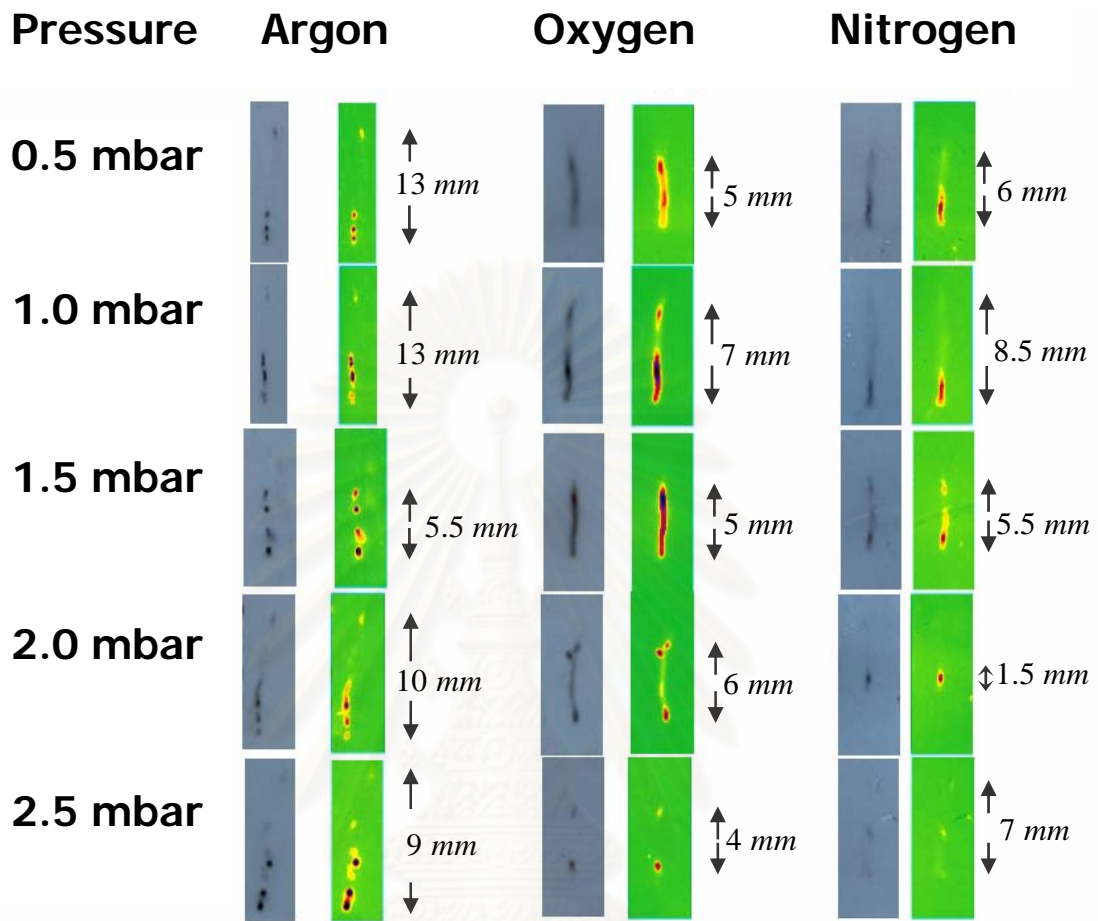
รูปที่ 5.25 ภาพถ่ายจุดโฟกัสของอาร์กอนพลาสติก ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar



รูปที่ 5.26 ภาพถ่ายจุดโฟกัสของออกซิเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5 – 2.5 mbar



รูปที่ 5.27 ภาพถ่ายจุดโฟกัสของไนโตรเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5 – 2.5 mbar



รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดไฟกัสในอาร์กอนพลาสมา ออกซิเจนพลาสมา และไนโตรเจนพลาสมา ในช่วงความดัน 0.5 – 2.5 mbar (Al – mylar 22 μm)

จากผลการทดลอง พบว่า

- จุดไฟกัสของอาร์กอนพลาสมามีลักษณะเป็นจุดชัดเจน มีจำนวนจุดค่อนข้างมาก โดยเรียงเป็นแนวเดียวกัน จุดไฟกัสของออกซิเจนพลาสมามีลักษณะเป็นแท่งลำชัดเจน แต่จะมีจุดหนึ่งที่เข้มกว่าบริเวณอื่น และจุดไฟกัสของไนโตรเจนพลาสมามีลักษณะคล้ายจุดไฟกัสของออกซิเจน
- ช่วงจุดไฟกัสของอาร์กอนพลาสมา มีความยาวและมีความเข้มสูง มากกว่าจุดไฟกัสของออกซิเจนพลาสมาและไนโตรเจนพลาสมา และจุดไฟกัสของ

ออกซิเจนพลาสมามีความเข้มข้นมากกว่าไนโตรเจนพลาสมา โดยลักษณะจุดไฟกัสของออกซิเจนและไนโตรเจนมีลักษณะเหมือนกัน คือ ลำแสงยาว

3. โดยเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางของจุดไฟกัสของทุกก๊าซมีค่าระหว่าง 0.5 – 1 mm
4. ความยาวของช่วงจุดไฟกัสของอาร์กอนพลาสมาเท่ากับ 5.5 – 13 mm
5. ความยาวของช่วงจุดไฟกัสของออกซิเจนพลาสมากับ 4 – 7 mm
6. ความยาวของช่วงจุดไฟกัสของไนโตรเจนพลาสมาเท่ากับ 1.5 – 8.5 mm

7. การประยุกต์การถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลาในการทดลองนี้ ไม่อาจนำมาใช้คำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาได้ เนื่องจากคุณสมบัติของฟิล์มที่ใช้ถ่ายภาพ อาจจะมีสภาพไวต่อรังสีเอกซ์แบบอ่อนไม่สูงมาก ทำให้ไม่เกิดภาพบนฟิล์ม แต่หากมีอุปกรณ์ในการถ่ายภาพที่มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าฟิล์ม เช่น กล้องซีซีดี (CCD Camera) หรือ แผ่นสารเรืองแสง (Phosphor Plate) เป็นต้น อาจจะสามารถประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา จากภาพถ่ายรังสีเอกซ์แบบรวมเวลาได้ อีกทั้งแผ่นอลูมิเนียมที่นำมาใช้เป็นแผ่นกรองรังสีเอกซ์มีความหนาค่อนข้างมาก ทำให้รังสีเอกซ์เกิดภาพบนฟิล์มได้ไม่ดีเท่ากับการวัดสัญญาณจากฟินไดโอด

เมื่อเปรียบเทียบผลการถ่ายภาพจุดไฟกัสของพลาสมาที่เกิดจากก๊าซอาร์กอนกับการทดลองของ Chee Mang Ng et al. [21] และ F. N. Beg et al. [22] พบว่ามีลักษณะสอดคล้องกัน คือ มีลักษณะเป็นแท่งที่มีจุดไฟกัสหลายจุด และมีความยาวของช่วงจุดใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบภาพจุดไฟกัสของพลาสมาที่เกิดจากก๊าซไนโตรเจนจากผลการทดลองกับการทดลองของ F. N. Beg et al. [22] และ H. Bhuyan et al. [23] พบว่ามีลักษณะเป็นลำของจุดไฟกัสในลักษณะเดียวกัน คือ เป็นลำยาว โดยจะมีความเข้มข้นมากที่สุดบริเวณด้านล่างลำของจุดไฟกัส

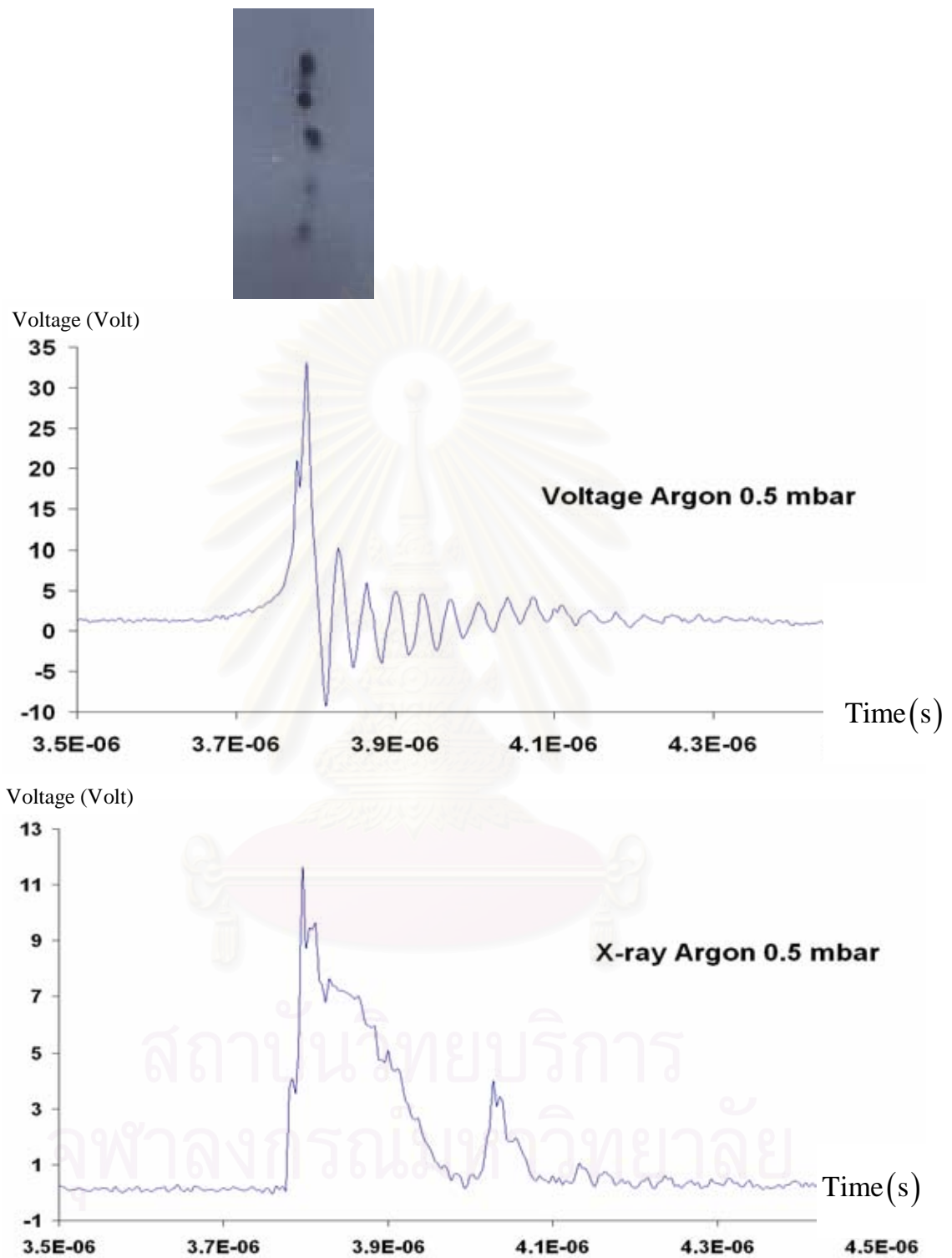
ลำดับการเกิดจุดไฟกัสได้มีผลการทดลองถ่ายภาพจุดไฟกัสที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ในการทดลองของ Takeshi et al. [24] โดยพบว่าลำดับการเกิดจุดไฟกัสจะเริ่มเกิดจากด้านล่างขึ้นด้านบน ตามช่วงเวลาที่เกิดรังสีเอกซ์ที่ได้จากการวัด

5.4 การทดลองเปรียบเทียบสัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์

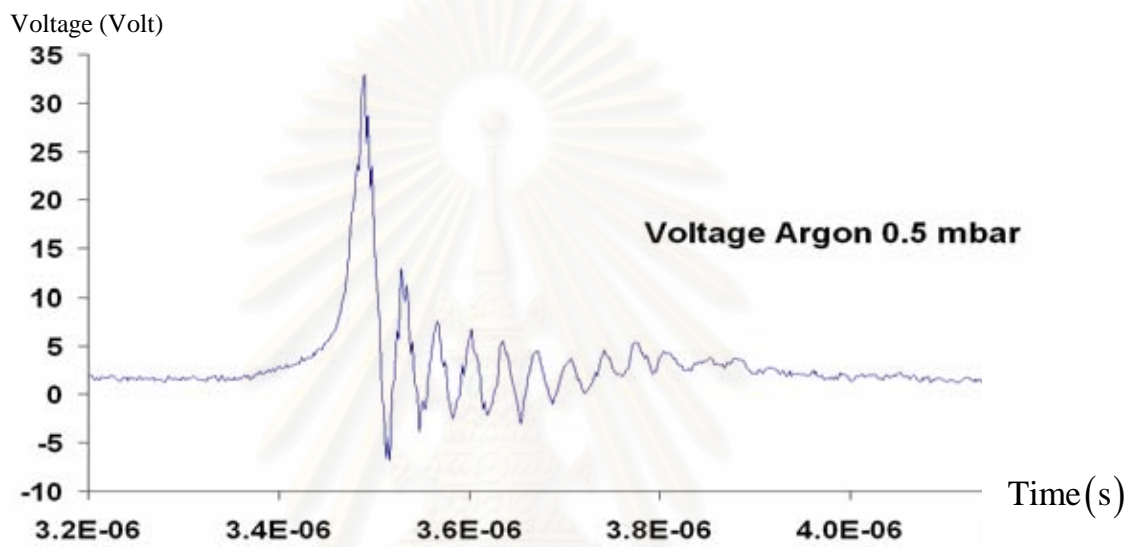
และภาพถ่ายรังสีเอกซ์

จากผลการทดลองการวัดความต่างศักย์ในการทดลองที่ 5.1 ผลการทดลองวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ในการทดลองที่ 5.2 และผลการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ในการทดลองที่ 5.3 เมื่อนำสัญญาณความต่างศักย์และสัญญาณรังสีเอกซ์ มาเปรียบเทียบกับภาพถ่ายจุดโฟกัสในพลาสติกที่เกิดจากก๊าซอาร์กอน ที่ความดัน 0.5 mbar, 1.0 mbar และ 1.5 mbar ก็เริ่มด้วยแผ่นกรองรังสีเอกซ์ด้วยแผ่นอลูมิเนียมไนลาร์หนา $36 \mu\text{m}$ (Al 0.24 μm)

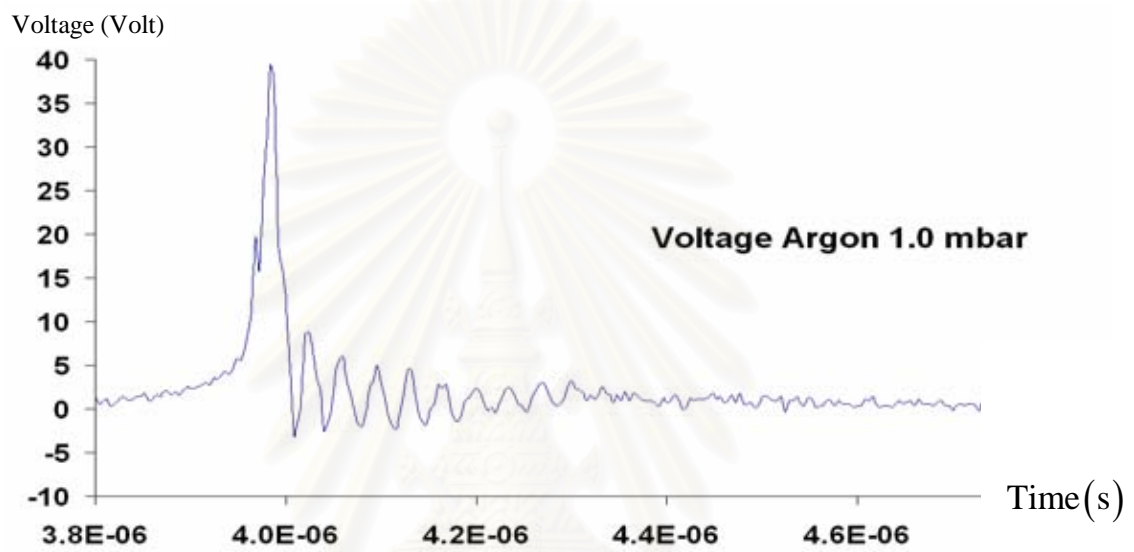
จากการทดลองเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 5.29 ถึง 5.34 พบว่า ไม่สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ลักษณะจุดโฟกัสที่เกิดขึ้นกับ สัญญาณความต่างศักย์ และสัญญาณรังสีเอกซ์ สาเหตุที่ทำการเปรียบเทียบลักษณะสัญญาณดังกล่าวกับภาพจุดโฟกัส เพราะต้องการหาความเชื่อมโยงความสัมพันธ์ดังกล่าว เพื่อหาทางที่จะทำให้เกิดจุดโฟกัสเพียงจุดเดียว



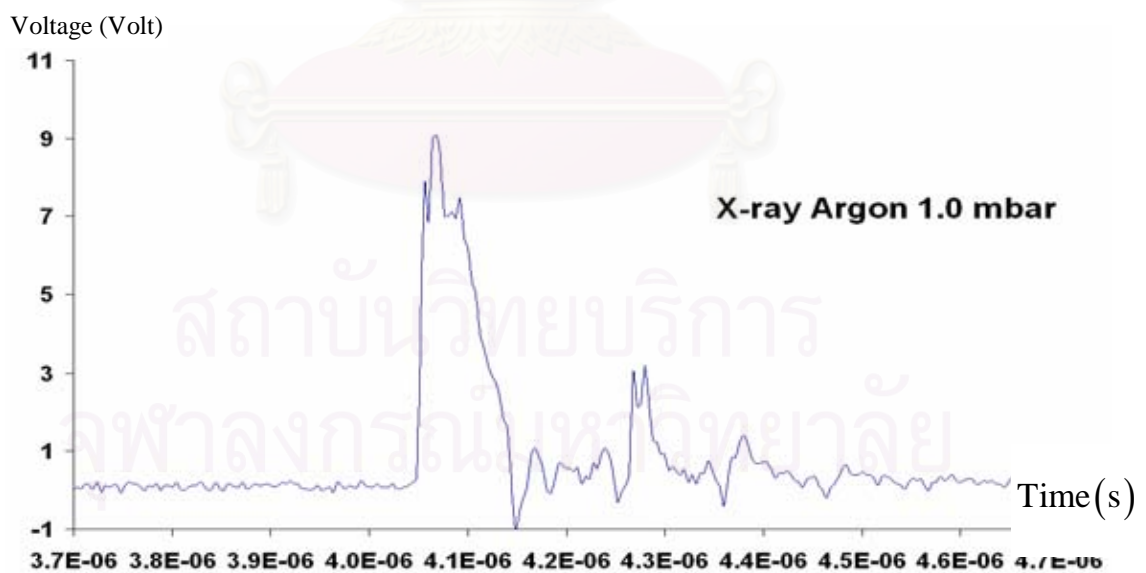
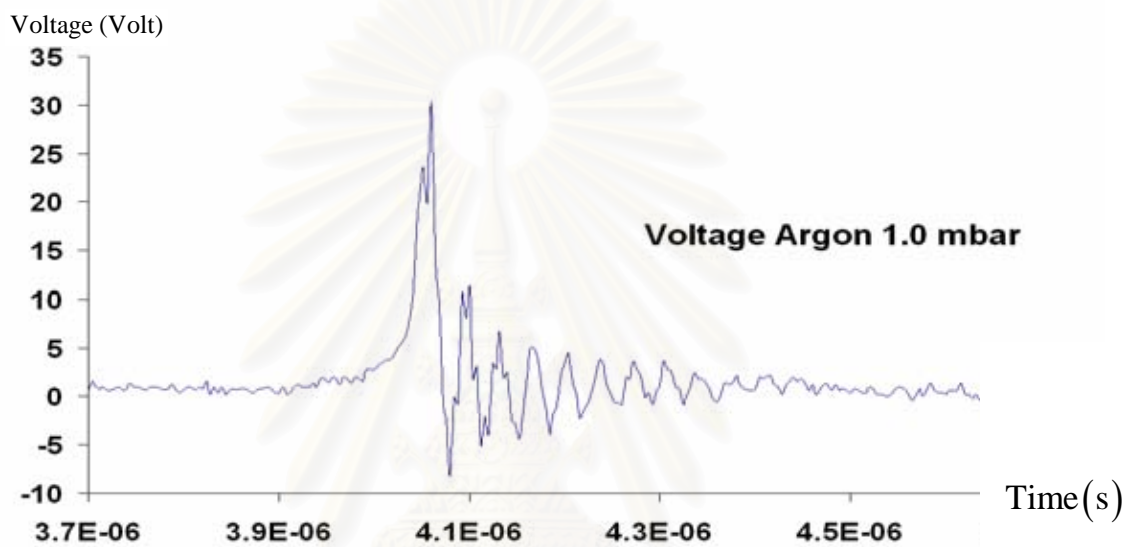
รูปที่ 5.29 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดไฟก๊ส สัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์
ของอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 0.5 mbar (ภาพที่ 1)



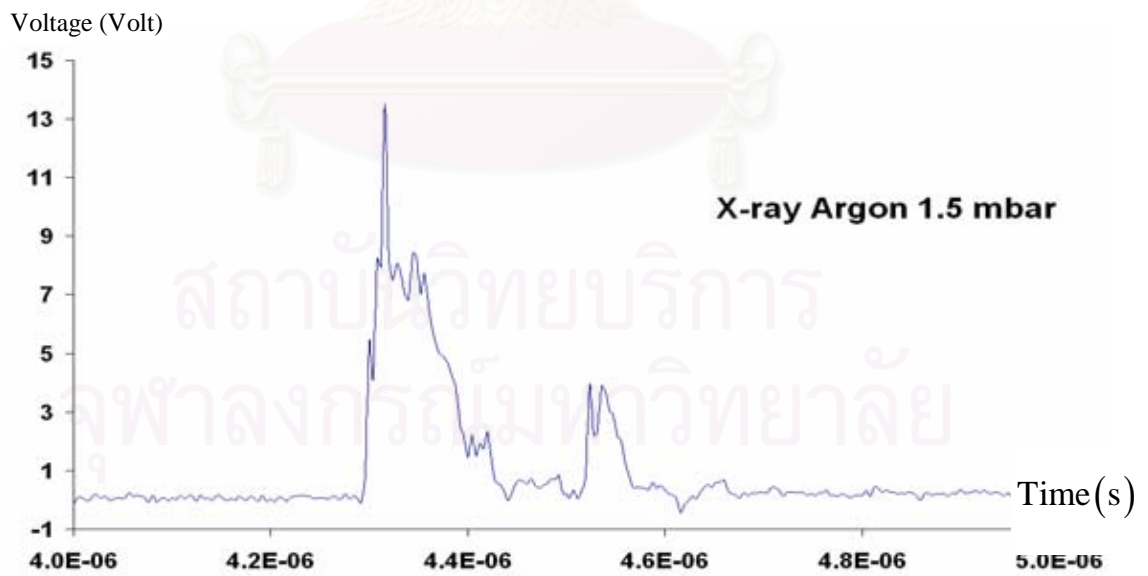
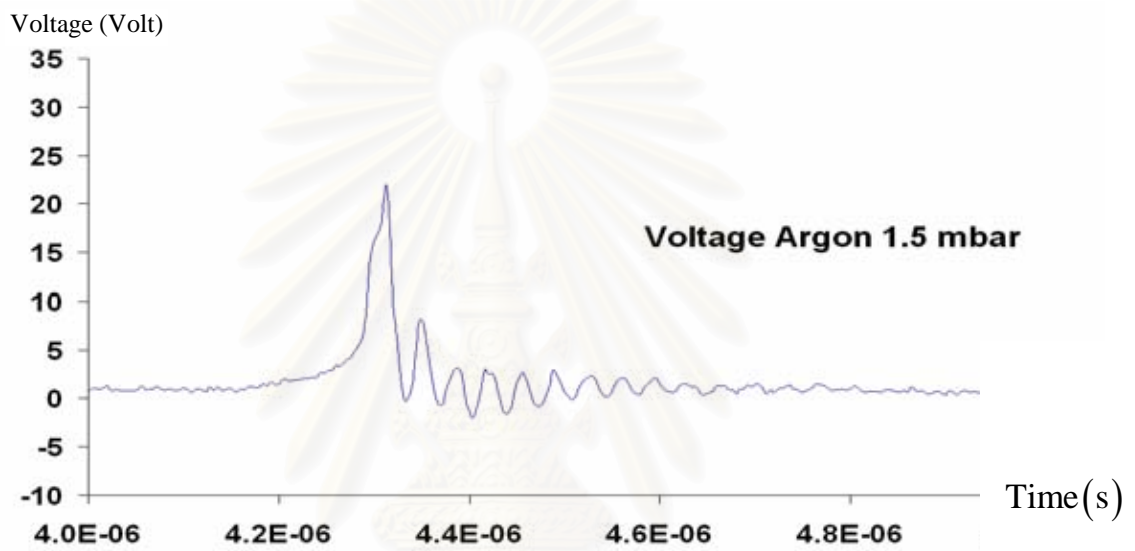
รูปที่ 5.30 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดโฟกัส สัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์
ของอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 0.5 mbar (ภาพที่ 2)



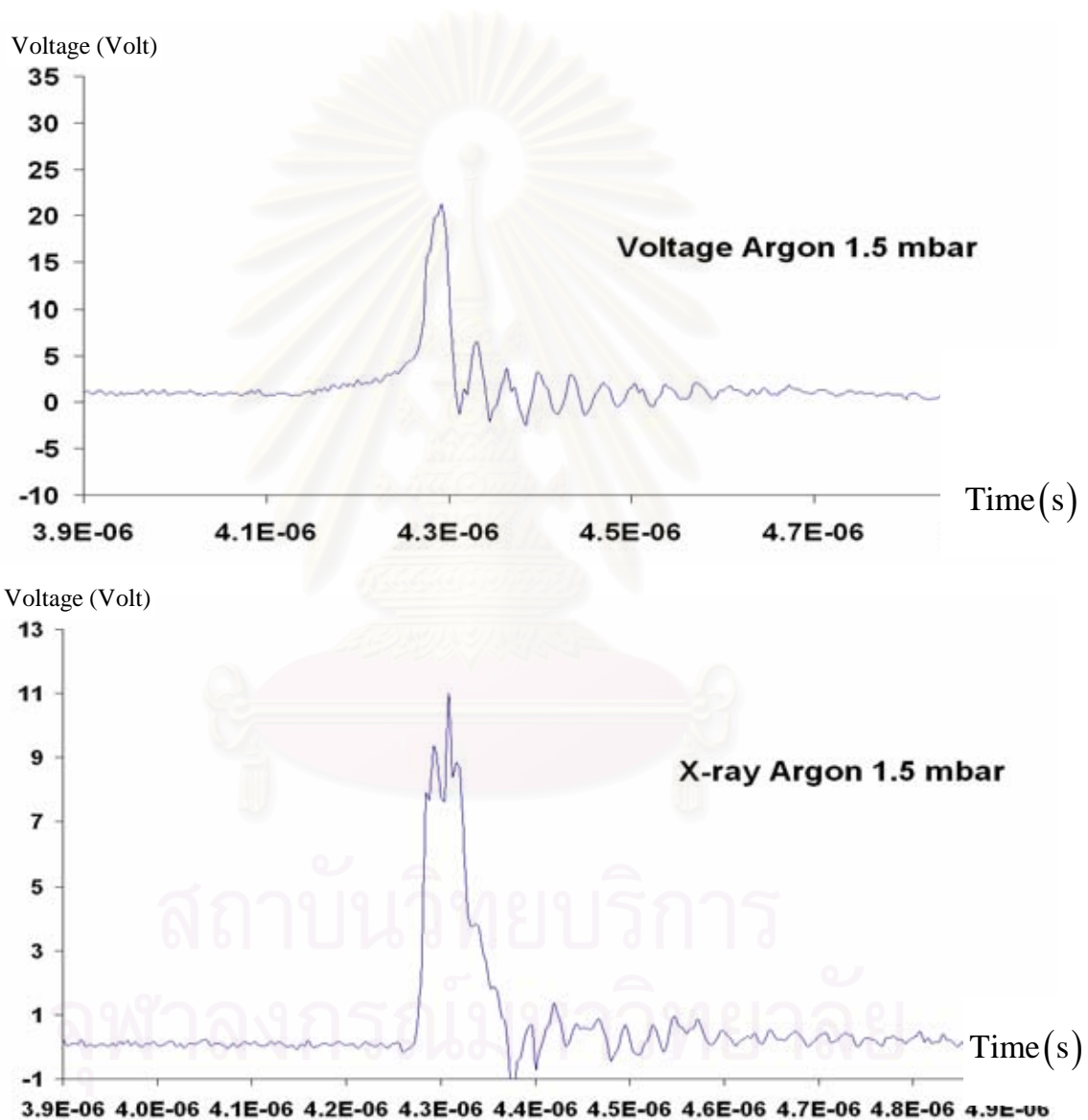
รูปที่ 5.31 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดไฟแก๊ส สัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์
ของอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1.0 mbar (ภาพที่ 1)



รูปที่ 5.32 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดไฟก๊ส สัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์
ของอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1.0 mbar (ภาพที่ 2)



รูปที่ 5.33 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดไฟแก๊ส สัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์
ของอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1.5 mbar (ภาพที่ 1)



รูปที่ 5.34 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดไฟแก๊ส สัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณรังสีเอกซ์
ของอาร์กอนพลาสมา ที่ความดัน 1.5 mbar (ภาพที่ 2)

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลอง ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลองในบทที่ 5 สามารถสรุปการทดลองได้ทั้งหมด 5 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ความดันก๊าซ และชนิดของก๊าซ

ความสูงของสัญญาณความต่างศักย์ตกคร่อมพลาสมาของก๊าซทุกชนิด พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น

ส่วนที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรังสีเอกซ์ ความดันก๊าซ และชนิดของก๊าซ

1. เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนในการทดลอง พบว่า สัญญาณรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องมีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น และมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณรังสีเอกซ์ที่เกิดจาก CuK_{α}
2. เมื่อใช้ก๊าซอาร์กอนในการทดลอง แนวโน้มความสูงของยอดสัญญาณรังสีเอกซ์ในช่วงความดัน 0.5 – 2.5 mbar พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน
3. ช่วงเวลาหน่วงของยอดสัญญาณรังสีเอกซ์ของก๊าซทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น โดยยอดแรกของสัญญาณรังสีเอกซ์จะตรงกับยอดสัญญาณความต่างศักย์ในช่วงโพกัส

ส่วนที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา ความดันก๊าซ

และชนิดของก๊าซที่ใช้

1. เมื่อใช้ก๊าซอาร์กอนในการทดลอง ทำให้เกิดรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องในช่วงของรังสีเอกซ์แบบอ่อนและแบบเข้ม ในช่วงความดัน 0.5–2.5 mbar รวมทั้งเกิด CuK_{α}
2. เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนในการทดลอง ไม่สามารถวัดอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาที่เกิดจากก๊าซทั้งสองชนิดได้ทุกความดัน เนื่องจากมียอดสัญญาณที่ต่ำ จนทำให้ไม่สามารถวัดได้อย่างถูกต้อง โดยจะเกิด CuK_{α} เป็นส่วนใหญ่

ส่วนที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างภาพถ่ายจุดโฟกัส ความดัน และชนิดของก๊าซ

1. เมื่อใช้ก๊าซอาร์กอนในการทดลอง ภาพถ่ายจุดโฟกัสที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นจุดเรียงตัวในแนวตั้งและเห็นเป็นจุดชัดเจน และมีความยาวและความเข้มมากกว่าจุดโฟกัสเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนในการทดลอง
2. เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนในการทดลอง ภาพถ่ายจุดโฟกัสมีลักษณะเหมือนกัน คือ มีลักษณะเป็นลำตรง เป็นแถบต่อเนื่อง และมีจุดที่เข้มที่สุดอยู่ด้านล่างของลำ
3. พบว่าบริเวณที่เกิด CuK_{α} จะอยู่เหนือปลายแอโนดพอดี และความเข้มของ CuK_{α} ที่เกิดจากก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจน มีความเข้มมากกว่า CuK_{α} ที่เกิดจากก๊าซอาร์กอน

ส่วนที่ 5 การเปรียบเทียบภาพถ่ายจุดโฟกัส สัญญาณความต่างศักย์

และสัญญาณรังสีเอกซ์

จากการเปรียบเทียบไม่สามารถสรุปได้ถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ลักษณะหรือจำนวนจุดโฟกัสที่เกิดขึ้น สัญญาณความต่างศักย์ และสัญญาณรังสีเอกซ์ ว่ามีความสัมพันธ์สอดคล้องกันแต่อย่างใด

6.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

การตรวจสอบรังสีเอกซ์ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงแล้ว โดยประสบความสำเร็จในการวัดอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์ในพลาสติกด้วยการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา โดยใช้สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง ได้สำเร็จ หากแต่ไม่สามารถทำการวัดได้ทุกก๊าซตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ เนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 5 แล้ว และประสบความสำเร็จในการถ่ายภาพจุดโฟกัสจากวิธีการถ่ายภาพแบบรวมเวลาตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ แต่ยังไม่สามารถที่จะทดลองเพื่อแสดงให้เห็นว่าสามารถนำวิธีการถ่ายภาพแบบรวมเวลา มาใช้คำนวณอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์ในพลาสติกด้วยวิธีอัตราส่วนตัวกรอง เหมือนกับวิธีการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลาได้

ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ จะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการใช้อ้างอิงเพื่อศึกษาค้นคว้า ทดลอง ปรับปรุงพัฒนา และต่อยอดงานวิจัยในด้านนี้ต่อไปได้ ถือได้ว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะการทดลองเกี่ยวกับเครื่องพลาสติกโฟกัสที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการทดลองเกี่ยวกับการแผ่รังสีเอกซ์ในพลาสติกจากเครื่องพลาสติกโฟกัสโดยทั่วไปได้

6.3 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลอง ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลองที่ผ่านมา ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะในการที่จะปรับปรุงการวิจัย พัฒนางานวิจัย หรือนำข้อมูลงานวิจัยไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไปดังนี้

1. ในการวัดรังสีเอกซ์แบบแยกเวลา แผ่นกรองรังสีเอกซ์ที่ใช้ดังตารางที่ 5.1 สามารถใช้ได้เฉพาะการวัดรังสีเอกซ์ที่เกิดจากพลาสติกของก๊าซอาร์กอน สำหรับรังสีเอกซ์จากพลาสติกของก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจนมีปริมาณน้อยหรือความเข้มต่ำ ทำให้ไม่สามารถวัดได้ ดังนั้น ควรเลือกแผ่นกรองรังสีเอกซ์ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับปริมาณรังสีเอกซ์ที่เกิด เช่น ชนิดของวัสดุ ความหนา และคุณสมบัติเกี่ยวกับแผ่นกรองรังสีเอกซ์ที่สามารถกั้นให้รังสีเอกซ์สามารถทะลุผ่านหรือไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นกรอง ในบางช่วงความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ได้ โดยสามารถศึกษาได้จากการทดลองของ M. Zakauallah et al. [25-27]

2. ในการถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบรวมเวลา เพื่อศึกษาโครงสร้างและขนาดของ จุดโฟกัสในงานวิจัยนี้มีผลการทดลองที่ค่อนข้างดี แต่ถ้าหากจะวัดคุณสมบัติ ของอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีการถ่ายภาพแบบรวมเวลานี้ จะต้องมีฟิล์มหรือกล้อง ถ่ายภาพรังสีเอกซ์ที่มีสภาพไวต่อรังสีเอกซ์ที่ดีมาก และควรเลือกใช้แผ่นกรอง รังสีเอกซ์ให้เหมาะสม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. M. Scholz, B. Bieńkowska, V. A. Gribkov, R. Miklaszewski, Plasma Focus as A Source of Intense Radiation and Plasma Steams for Technology Application. Acta physica slovacca, 54, 1 (January 2004) : 35 – 42.
2. J. Marshall, Performance of a Hydromagnetic Plasma Gun. Physics of Fluids. 3 (1960) : 134 – 135.
3. N. V. Filippov, T. I. Filippova, and V. P. Vinogradov, Dense high-temperature plasma within region of non-cylindrical compression. Nuclear Fusions Supple. 2 (1962) : 577 – 585.
4. S. Lee, Scaling of the Plasma Focus – Viewpoint from Dynamics. International Plasma Focus Symposium at Kudowa, Poland, July 1998.
5. J. W. Mather, Formation of a high-density plasma focus. Physics Fluids, 8 (1965) : 366-377.
6. Liu Mahe, Soft X-rays from Compact Plasma Focus. PH.D. Thesis, School of Science, Nanyang Technological University 1996.
7. Shan Bing, PLASMA DYNAMICS AND X-RAY EMISSION OF THE PLASMA FOCUS. PH.D. Thesis, School of Science, Nanyang Technological University 2000.
8. Eugene P. Bertin, Principles and Practice of X-ray Spectrometric Analysis. New York: Plenum Press, 2nd Ed, 1975.
9. Richard H. Huddiestone, and Stanley L. Leonard, Plasma Diagnostic Techniques. New York: Academic Press, 1965.
10. R.P McWhirter, Plasma Diagnostic Techniques. Eds. R.H. Huddleston, and S.L. Leonard, New York: Academic Press, 1965.
11. D. R. Bates, A. E. Kingston and R. W. P. McWhirter, Proc. Roy. Soc., A 267 (1962) : 297 – 305.
12. C. S. Wong, Elements of Plasma Technology. Physics Department, University of Malaya, Malaysia, 2002.

13. F. C. Jahoda, E.M. Little, W. E. Quinn, G. A. Sawyer, and T. F. Stratton, Continuum Radiation in the X-ray and Visible Regions from a Magnetically Compressed Plasma (Scylla)*. Physical Review, 19, 3 (AUGUST 1960) : 843-856.
14. C.S Wong. Five Channel Diode X-ray Spectrometer (Type B). Instruction Manual, ICAC-UM/DXS-3, University of Malaya, Malaysia., 1995.
15. Hans R. Griem., Plasma Spectroscopy. Professor of Physics, University of Maryland, USA, 1964.
16. John A. Victoreen, The Calculation of X-Ray Mass Absorption Coefficients. Journal of Applied Physics, 20 (DECEMBER 1949) : 1141 – 1148.
17. S. Lee, Experiments with the ICTP-UM 3.3 KJ Plasma Fusion Facility. Spring College on Plasma Physics International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy, June 1991.
18. M. Zakauallah, Imtiaz Ahmad, A. Omar, G. Murtaza and M. M. Beg. Effects of anode shape on plasma focus operation with argon. Plasma Sources Sci. Technol, 5 (1996) : 544 – 552.
19. M. Zakauallah, K. Alamgir, M. Shafiq, S. M. Hassan, M. Sharif, S. Hussain and A. Waheed. Characteristics of x-rays from a plasma focus operated with neon gas. Plasma Sources Sci, Technol. 11 (2002) : 377 – 382.
20. Wong C.S., Moo S.P., Singh J., Choi P., Dumitrescu-Zoita C., and Silawatshanani C., Dynamic of X-ray emission from a small Plasma Focus. Malaysian Journal of Science, 17B (1996) : 109 – 117.
21. Chee Mang Ng, Siew Pheng Moo, and Chiow San Wong. Variation of Soft X-Ray Emission with Gas Pressure in a Plasma Focus. IEEE Transaction on Plasma Science, 26, 4 (AUGUST 1998) : 1146 – 1153.
22. F. N. Bag, I. Ross, A. Lorenz, J. F. Worley, A. E. Dangor, and M. G. Haines, Study of x-ray emission from a table top plasma focus and its application as an x-ray backlighter. Journal of Applied Physics, 88, 6 (September 2000) : 3225 – 3230.
23. H. Bhuyan, S. R. Mohanty, N. K. Neog, S. Bujarbarua and R. K. Rout. Comparative study of soft x-ray emission characteristics in a low energy dense plasma focus device. Journal of Applied Physics, 95, 6 (March 2004) : 2975 – 2981.

24. Takeshi Yanagidaira and Katsumi Hirano, An image converting system in framing and streak mode for impulsive soft x-ray observation. Rev. Sci. Instrum, 68, 8 (August 1997) : 3074 – 3078.
25. M. Zakauallah, K. Alamgir, M. Shafiq, M. Sharif, and A. Waheed. Scope of Plasma Focus With Argon as a Soft X-Ray Source. IEEE Transaction on Plasma Science, 30, 6 (December 2002) : 2089 – 2094.
26. M Zakauallah, Khalid Alamgir, M Shafiq, S M Hassan, G Murtaza and A Waheed. Improved temperature measurement in a plasma focus by means of a cobalt filter. Plasma Sources Sci. Technol, 10 (2001) : 295 – 301.
27. M. Zakauallah, K. Alamgir, M. Shafiq, M. Sharif, A. Waheed, and G. Murtaza. Low – Energy Plasma Focus as a Tailored X-ray Source. Journal of Fusion Energy, 19, 2 (June 2000) : 143 – 157.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติพื้นฐานของก๊าซที่ใช้ในการทดลอง

ก. คุณสมบัติพื้นฐานของก๊าซที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติพื้นฐานของก๊าซที่ใช้ในการทดลอง

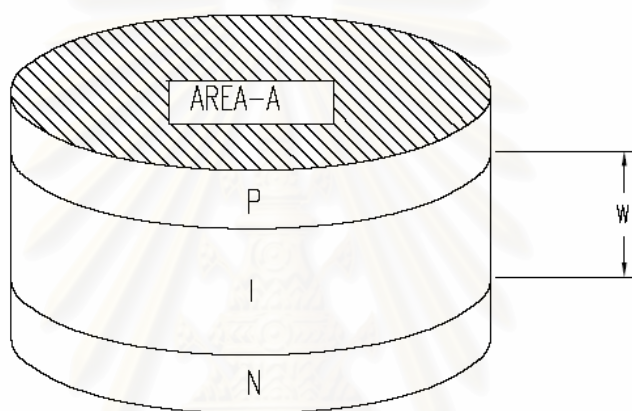
คุณสมบัติพื้นฐาน		ไนโตรเจน	ออกซิเจน	อาร์กอน
เลขอะตอม		7	8	18
น้ำหนักอะตอม (amu)		14.0067	15.9994	39.948
จุดหลอมเหลว (K)		63.14	50.35	83.80
จุดเดือด (K)		77.35	90.18	87.30
ศักย์การแตกตัว เป็นไอออน (eV)	1 st	21.56454	13.61806	15.75962
	2 nd	40.96328	35.1173	27.62967
	3 rd	63.45	54.9355	40.74
	4 th	97.12	77.41353	59.81
	5 th	126.21	113.899	75.02
	6 th	157.93	138.1197	91.009
	7 th	207.2759	739.29	124.323
	8 th	239.0989	871.1101	143.46
	9 th	1195.8286		422.45
	10 th	1362.1995		478.69
	11 th			538.96
	12 th			618.26
	13 th			686.10
	14 th			755.74
	15 th			854.77
	16 th			918.03
	17 th			4120.8857
	18 th			4426.2296

ภาคผนวก ข

ซิลิคอนพินไดโอด

ข.1 โครงสร้างของซิลิคอนพินไดโอด

ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนพินไดโอดโดยทั่วไปมีลักษณะดังภาพ ข.1 โดยประกอบไปด้วยชั้นพี (p-type), ชั้นเอ็น (n-type) และ อินทรินซิก (Intrinsic)



รูปที่ ข.1 แผนภาพโครงสร้างของซิลิคอนพินไดโอด

ข.2 คุณสมบัติทั่วไปของพินไดโอดรุ่น BPX65

พินไดโอดที่ใช้ประกอบเป็นสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบไดโอด 5 ช่อง คือ พินไดโอดรุ่น BPX – 65 โดยมีคุณสมบัติทั่วไปดังนี้

พื้นที่ตอบสนองรังสี	1 mm^2
ความหนาของชั้นซิลิคอนที่เป็นอินทรินซิก (โดยประมาณ)	$10 \text{ }\mu\text{m}$
ความหนาของชั้นผิวหน้า (โดยประมาณ)	$0.5 \text{ }\mu\text{m}$
เวลาตอบสนองต่อรังสีที่ 900 nm	0.5 ns
กระแสมืด (Dark current)	$< 5 \text{ nA}$

ภาคผนวก ค

การสร้างกราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ โดยวิธีอัตราส่วนตัวกรอง

ค.1 การคำนวณสัดส่วนของไอออนที่ถูกไอออไนซ์ไปสู่สถานะไอออไนซ์ที่ z ที่อุณหภูมิใด ๆ

จากบทที่ 3.1.2 สามารถคำนวณสัดส่วนของไอออนที่ถูกไอออไนซ์ไปสู่สถานะ ไอออไนซ์ที่ z (α_z) ที่อุณหภูมิใด ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณสร้างกราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ต่อไป โดยมีขั้นตอนในการคำนวณได้ดังนี้

1. เลือกก๊าซที่ใช้ในการทำให้เกิดพลาสมา เช่น สมมุติเลือกใช้ก๊าซอาร์กอน จากนั้นต้องทราบค่าศักย์การแตกตัวเป็นไอออน χ_z (eV) ของก๊าซอาร์กอน
2. ในการคำนวณต้องกำหนดค่าอุณหภูมิที่จะทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออนที่อุณหภูมินั้น เพื่อจะคำนวณหาจำนวนไอออนที่ถูกไอออไนซ์แต่ละชนิดที่อุณหภูมิดังกล่าว เช่น สมมุติกำหนดอุณหภูมิเป็น 1 keV
3. แทนค่าค่าศักย์การแตกตัวเป็นไอออนของไอออนแต่ละตัว เพื่อคำนวณหาสัดส่วน

จำนวนไอออนของสถานะไอออไนซ์ที่ติดกัน $\left(\frac{N_{z+1}}{N_z}\right)$ ที่อุณหภูมิ $T_e = 1 \text{ keV}$
 เช่น $\frac{N_{0+1}}{N_0}, \frac{N_2}{N_1}, \frac{N_3}{N_2}, \dots, \frac{N_{17}}{N_{16}}$, และ $\frac{N_{18}}{N_{17}}$ ในสมการที่ (3.5), (3.7) และ (3.9) จะได้

$$\frac{N_{z+1}}{N_z} = 1.27 \times 10^8 \frac{1}{\chi_z^2} \left(\frac{kT_e}{\chi_z}\right)^{3/4} \exp\left(-\frac{\chi_z}{kT_e}\right) \quad \text{ค.1}$$

$$\frac{N_{z+1}}{N_z} = f_z(T_e, N_e) \quad \text{ค.2}$$

$$N_i = \sum_{Z=0}^{Z_i} N_Z = N_0 S_f \quad \text{ค.3}$$

โดยจะต้องคำนวณหาค่า S_f ของไอออนที่อุณหภูมิ 1 keV เมื่อ

$$S_f = 1 + f_0 + f_0 f_1 + \dots + f_0 f_1 \dots f_{Z_n-1} \quad \text{ค.4}$$

แทนค่าในสมการที่ (3.11) จะได้ว่า

$$\alpha_z = \frac{N_z}{N_i} = \frac{f_{z-1}}{S_f} \quad \text{ค.5}$$

จะได้สัดส่วนของไอออนที่ถูกไอออนไนซ์ไปสู่สถานะไอออนไนซ์ที่ z ที่อุณหภูมิตั้ง 1 keV

$$\text{ของก๊าซอาร์กอน เช่น } \alpha_0 = \frac{N_0}{N_i} = \frac{1}{S_f}, \quad \alpha_1 = \frac{N_1}{N_i} = \frac{f_0}{S_f}, \quad \alpha_2 = \frac{N_2}{N_i} = \frac{f_1}{S_f},$$

$$\alpha_{17} = \frac{N_{17}}{N_i} = \frac{f_{16}}{S_f} \quad \text{และ} \quad \alpha_{18} = \frac{N_{18}}{N_i} = \frac{f_{17}}{S_f} \quad \text{เป็นต้น}$$

ดังนั้นถ้าต้องการทราบสัดส่วนของไอออนที่ถูกไอออนไนซ์ไปสู่สถานะไอออนไนซ์ที่ z ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของก๊าซอาร์กอน ให้เปลี่ยนค่าอุณหภูมิในการคำนวณตามที่ต้องการในสมการ ค.1

ค.2 การสร้างกราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของพลาสมาด้วยวิธีอัตราส่วนตัวกรอง

จากภาคผนวก ค.1 ทำให้เราทราบค่าสัดส่วนไอออนที่ถูกไอออนไนซ์ไปสู่สถานะไอออนไนซ์ที่ z ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ค่าดังกล่าวจะนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อสร้างกราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ในบทที่ 3.2 มีขั้นตอนในการคำนวณดังต่อไปนี้

1. ในขั้นต้นจะต้องทราบค่าตอบสนอง $S(\lambda)$ ของฟิโนโดไอด์ (BPX65) ที่นำมาใช้ในการทดลอง และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแผ่นกรองรังสีเอกซ์ที่จะนำมาใช้กับฟิโนโดไอด์ ในช่วงความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ 1–100 Å จากนั้นกำหนดความหนาของแผ่นกรองที่จะใช้กับฟิโนโดไอด์ทั้ง 5 ตัว (สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบ 5 ช่อง) กำหนดให้ตรงกับกรณนำไปใช้ในการทดลองจริง สมมุติในการทดลองกับฟิโนโดไอด์ทุกตัวด้วยอลูมิเนียมหนา 36 μm ที่เคลือบด้วยอลูมิเนียมหนา 0.24 μm (ต้องเลือกใช้แผ่นกรองรังสีเอกซ์ที่ไม่สามารถให้แสงผ่านเข้าได้) แล้วกำหนดความหนาของแผ่นกรองรังสีเอกซ์ที่จะมากับฟิโนโดไอด์ตัวที่ 2, 3, 4 และ 5 (ในการคำนวณกำหนดไว้ 10 ช่อง) เช่น 20 μm , 40 μm , 60 μm และ 80 μm เป็นต้น จากนั้นคำนวณค่าตอบสนองของฟิโนโดไอด์แต่ละตัวหลังจากกันด้วยแผ่นกรองรังสีเอกซ์ด้วยความหนาต่างกัน (x) จากสมการที่ (3.24) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$S(\lambda) = S_{BPX-65}(\lambda) \cdot \exp(-\mu x_{Al}) \cdot \exp(-\mu x_{mylar}) \quad \text{ค.6}$$

2. คำนวณความเข้มของการแผ่รังสีต่อความยาวคลื่นและปริมาตร (E_λ) สมมุติเมื่อเลือกใช้ก๊าซอาร์กอน ให้นำค่า α_z ที่คำนวณได้จาก ค.5 ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_{18}$) โดยแทนค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ 1 keV ในสมการ (3.14) โดยเขียนใหม่ได้เป็น

$$E_\lambda = \frac{dE_{ff}}{d\lambda} = \alpha_z \cdot Z_i^2 \frac{\exp\left(-\frac{hc}{\lambda T_e}\right)}{\lambda^2 \cdot \sqrt{T_e}} \quad \text{ค.8}$$

จะได้ความเข้มของการแผ่รังสีจากไอออนที่ถูกไอไนซ์ที่อุณหภูมิ 1 keV

3. จากนั้นจะสามารถคำนวณหาความเข้มของการแผ่รังสีที่ฟิโนไดโอดแต่ละตัว สามารถวัดได้ที่ความยาวคลื่น λ เมื่อถูกกั้นด้วยแผ่นกรองรังสีเอกซ์ที่มีความหนาต่างกันจากสมการที่ (3.26) เขียนใหม่ได้เป็น

$$P_\lambda = S(\lambda) \cdot \sum_z E_{\lambda,z} \quad \text{ค.9}$$

ดังนั้น จะได้ผลรวมความเข้มของการแผ่รังสีเอกซ์ที่ฟิโนไดโอดวัดได้ เป็นดังนี้

$$PST = \sum_{\lambda=0.1\text{\AA}}^{100} P_\lambda \quad \text{ค.10}$$

4. จากนั้นคำนวณค่าอัตราส่วนของ PST ของฟิโนไดโอดแต่ละตัว โดยเทียบกับฟิโนไดโอดที่กั้นแผ่นกรองรังสีเอกซ์ที่น้อยที่สุด และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กั้นฟิโนไดโอดกับอัตราส่วนของ PST ที่คำนวณได้ จะได้กราฟเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ของพลาสติกที่อุณหภูมิ 1 keV

ดังนั้น ถ้าต้องการสร้างเส้นการส่งผ่านรังสีเอกซ์ที่อุณหภูมิใด ๆ ให้เปลี่ยนค่าอุณหภูมิ

ในการคำนวณตามที่ต้องการ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ข้อมูลทั่วไป

ชื่อ-นามสกุล นายฐิติศักดิ์ กุลเกล้าปราการ วัน/เดือน/ปีเกิด 17 มีนาคม 2524

ประวัติการศึกษา

- 2545 – 2548 การศึกษาระดับวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิตปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2541 – 2544 การศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผลงานทางวิชาการ

- 2548 ได้รับรางวัลการเสนอผลงานทางวิชาการแบบบรรยาย สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ ประเภทดี การประชุมวิชาการ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ครั้งที่ 13 “Variation of X-Ray Emission with Vary Pressure and Gas (N_2 , O_2 and Argon) from a Small Plasma Focus Device by Time – Integrated X-Ray Imaging.”
- 2547 นำเสนอผลงานทางวิชาการแบบโปสเตอร์ งานประชุมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วทท.) ครั้งที่ 30 เรื่อง “Variation Plasma Electron Temperature Measured from X-Ray of a Small Plasma Focus Device with Charge Energy.”
- 2547 นำเสนอผลงานวิชาการแบบบรรยาย ในการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 12 คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เรื่อง “Study Corundum Surface Change by Ions Generated from a Small Plasma Focus Device.”

ทุนการศึกษาที่ได้รับ

- 2545 – 2548 นักเรียนทุนพัฒนาอาจารย์สาขาขาดแคลน สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- 2541 – 2544 นักเรียนทุนในโครงการผลิตบัณฑิตวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์ สาขาฟิสิกส์ ทุนสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)