การดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสเพื่อก่อกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต

นายปรัชญา ตั้งจิตสมบูรณ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PLASMA FOCUS DEVICE MODIFICATION FOR GENERATING OF EXTREME ULTRAVIOLET RADIATION

Mr. Prajya Tangjitsomboon

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 2008
Copyright of Chulalongkorn University

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสเพื่อก่อกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีม อัลตราไวโอเลต
โดย	นาย ปรัชญา ตั้งจิตสมบูรณ์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี)

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

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปรัชญา ตั้งจิตสมบูรณ์ : การดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสเพื่อก่อกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต. (PLASMA FOCUS DEVICE MODIFICATION FOR GENERATING OF EXTREME ULTRAVIOLET RADIATION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน, 137 หน้า.

รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต (อียูวี) เป็นรังสีที่คาดว่ามีการใช้อย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำในอนาคตและเครื่องพลาสมาโฟกัสเป็นเครื่องที่มีศักยภาพในการเป็นแหล่งกำเนิดรังสีและอนุภาค เครื่องดังกล่าวสามารถดัดแปรเพื่อใช้กับงานต่าง ๆได้โดยไม่ยุ่งยาก ดังนั้นการวิจัยเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตจึงให้ความสนใจกับการประยุกต์เครื่องพลาสมาโฟกัส สำหรับการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมต่อการกำเนิดรังสีดังกล่าวได้ใช้แบบจำลองสมดุลคอโรนาและแบบจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมา แบบจำลองดังกล่าวได้ใช้วิธีการประมาณค่าในช่วงเพื่อทำนายกระแสที่นอร์มัลไลซ์กับความดันที่ใช้ในการทดลอง เมื่อได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมแล้ว จากนั้นทำการดัดแปรเครื่องพลาสมาให้สอดคล้องกับตัวแปรดังกล่าว ผลที่ได้จากการคำนวณตามแบบจำลองและการทดลองจะนำมาเปรียบเทียบกัน ในการตรวจจับพลาสมาในการทดลองได้ใช้อุปกรณ์ตรวจจับกระแส ความต่างศักย์ของเครื่องพลาสมาและสัญญาณของรังสีที่แผ่ออกมา จากแบบจำลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสำหรับการดัดแปรเครื่องพลาสมานั้นมีสองเงื่อนไข ได้แก่ ความยาวของแท่งแอโนด 7.5 เซนติเมตร ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 6.5 กิโลโวลต์ ที่ความดัน 2 มิลลิบาร์ โดยเป็นเครื่องพลาสมาโฟกัสพลังงานขนาด 634 จูล และความยาวของแท่งแอโนด 9.0 เซนติเมตร ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 8.0 กิโลโวลต์ ที่ความดัน 2.5 มิลลิบาร์ โดยเป็นเครื่องพลาสมาโฟกัสพลังงานขนาด 960 จูล เมื่อทำการดัดแปรตามพารามิเตอร์ดังกล่าวพบว่ารังสีที่แผ่ออกจากเครื่องพลาสมาโฟกัสนั้นครอบคลุมความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต จากการทดลองพบว่าความเข้มของรังสีที่มากที่สุดเมื่อดัดแปรเครื่องดังกล่าวให้สอดคล้องกับพารามิเตอร์ตามเงื่อนไขถัดมาที่ความดัน 0.5 มิลลิบาร์ แต่เมื่อเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดลอง พบว่าความดันในระบบปฏิบัติการที่จุดเหมาะสมไม่สอดคล้องกับการทดลอง อย่างไรก็ตามที่จุดดังกล่าวมีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่อนิสิต ....

สาขาวิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

ปีการศึกษา 2551

4872359023 : MAJOR PHYSICS

KEYWORDS: EXTREME ULTRAVIOLET RADIATION/ COMPUTATIONAL SIMULATION/ PLASMA FOCUS DEVICE / SEMICONDUCTOR

PRAJYA TANGJITSOMBOON : PLASMA FOCUS DEVICE MODIFICATION FOR GENERATING OF EXTREME ULTRAVIOLET RADIATION. ADVISOR : ASST.PROF. RATTACHAT MONGKOLNAVIN, Ph.D., 137 pp.

As Extreme Ultra Violet (EUV) radiation will be widely used in future semiconductor industry and a plasma focus (PF) device has been known to be the powerful source of radiation and particles which can be easily modified to suit different applications' need, therefore an interest in the modification of a PF device as an extreme ultraviolet radiation source is explored in this research. An evaluation of optimum operating parameters of a PF device for production of EUV radiation has been made by applying the corona equilibrium model and the dynamics model of plasma in a computational simulation. An interpolation method has been used to predict the relationship between the normalized current and operating pressures. Once optimum parameters are found, the parameters are used for constructing and operating of the modified PF device. The result obtained from the simulation and the experiments are then compared. Plasma diagnostics such as current probe, voltage probe and photo detector are used to determined different plasma characteristics in each experimental conditions. The results from the simulation show that the optimum parameters and conditions for EUV radiation production are when the anode length is 7.5 cm and charging voltage is 6.5 kV with the operating pressure of 2.0 mbar for 634 J PF device and the anode length is 9.0 cm and charging voltage is 8.0 kV with the operating pressure of at 2.5 mbar for 960 J PF device. Under these two optimum operating conditions, it is found that the radiation emitted from the source is in the region of extreme ultraviolet frequency, where the maximum intensity is obtained when operating with the latter conditions with operating pressure of 0.5 mbar. However, by comparing the result from the experiment and the simulation, it is found that the relationship of the operating pressure and the intensity of the optimized condition from experiment does not correspond to the simulation even though both produce EUV radiation as required.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Physics Student's Signature : Prajya Tangjitsomboon

Field of Study : Physics Advisor's Signature : ....

Academic Year : 2008

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้บรรลุเป้าหมายได้เนื่องจากบุคคลต่างๆที่ให้ความช่วยเหลือด้านการเงิน คำแนะนำทางด้านวิชาการและกำลังใจในการทำงาน

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งให้ความรู้ ความเข้าใจ แนวคิดในการทำงานและให้ความช่วยเหลือต่างๆตลอดจนกระตุ้นและเตือนให้ทำงาน ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ เชา ซาน วอง (Prof. C S Wong) ที่ช่วยเหลือให้ความรู้และให้ยืมอุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวกับงานนี้ซึ่งเปรียบเสมือนอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมในวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ซิง ลี (Prof. Sing Lee) ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับแบบจำลองเพื่อนำไปใช้ในงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่ช่วยเหลือด้านทุนในการทำงานและเตือนสติให้ตั้งใจทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิศิษฐ์ รัตนวรารักษ์ ที่อบรมให้ความรู้และแสดงให้เห็นความสวยงามของวิชาฟิสิกส์ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ ที่ให้กำลังใจตลอดจนให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือต่างๆตั้งแต่ที่ข้าพเจ้าก้าวเข้าสู่รั้วจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบพระคุณ อ.ดร.รุจิกร ธนวิทยาพล ที่ให้กำลังใจตลอดจนคำปรึกษาต่างๆตลอดมา

ขอขอบคุณ แหล่งเงินทุนจากทุกภาคส่วน อันได้แก่ ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ จากบัณฑิตวิทยาลัย ทุนค่าเดินทางเพื่อสัมนางานการประชุมทางวิชาการ เอ็มพีเอสจีซีครั้งที่สาม (MPSGC 3Th) จากคณะวิทยาศาสตร์ และทุนอุดหนุนวิจัย จากภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ คุณดุสิต งามรุ่งโรจน์ ซึ่งให้ความรู้ ให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ปัญหา และเสียสละเวลาเป็นเพื่อนช่วยทำการทดลองด้วยกันตลอดมา

ขอขอบคุณ พี่น้องและเพื่อนๆชาวฟิสิกส์และชาวมาตรวิทยาที่คอยสอบถามและให้กำลังใจในการทำงานซึ่งกันและกัน

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ ประเทศไทย ภาษาไทย เพลงชาติไทยและบรรพบุรุษที่ทำให้ข้าพเจ้าภูมิใจในความเป็นเอกราช มีภาษา ตัวอักษรและวัฒนธรรมเป็นของตนเอง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วยภาษาไทยซึ่งเป็นภาษาที่แสดงเอกลักษณ์ของชนชาติไทยได้สำเร็จด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...จ

กิตติกรรมประกาศ...ฉ

สารบัญ..ช

สารบัญตาราง..ญ

สารบัญภาพ..ฎ

บทที่ 1 บทนำ...1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย...1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย...3

1.3 ขั้นตอนสำหรับการวิจัย...3

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย..4

1.5 องค์ประกอบของวิทยานิพนธ์...4

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม..5

บทที่ 3 แบบจำลองการแผ่รังสีและการเคลื่อนที่ของพลาสมา...................................9

3.1 การแผ่รังสีของพลาสมา...9

3.1.1 แบบจำลองสมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่.. 13

3.1.2 แบบจำลองสมดุลคอโรนา...14

3.1.3 แบบจำลองสมดุลเชิงการชน-การแผ่รังสี.. 15

3.2 การเคลื่อนที่ของพลาสมา... 19

3.2.1 เฟสการแตกตัว... 19

3.2.2 เฟสตามแกน.. 20

3.2.3 เฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี...27

3.2.4 เฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมี...33

3.2.5 เฟสการแผ่รังสี..35

3.2.6 เฟสตามแกนแผ่ขยายตามคอลัมน์ 39

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

บทที่ 4 ระบบของพลาสมาโฟกัส ระเบียบวิธีการจำลอง
และการตรวจวิเคราะห์พลาสมา.......... 40
4.1 ระบบพลาสมาโฟกัส..........40
4.1.1 ระบบการจ่ายพลังงาน..........41
4.1.2 ระบบแก๊สและสุญญากาศ..........41
4.1.3 ระบบประจุพลังงาน..........41
4.1.4 ระบบดิสชาร์จ..........41
4.1.5 ระบบตรวจวัด..........42
4.1.6 ระบบแสดงผล.......... 42
4.2 ระเบียบวิธีการจำลองโดยใช้โปรแกรม RADPF05.13.9b..........47
4.3 ระเบียบวิธีการจำลอง..........55
4.3.1 เฟสตามแกน.......... 55
4.3.2 เฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี..........66
4.3.3 เฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมี..........70
4.3.4 เฟสการแผ่รังสี.......... 73
4.3.5 เฟสตามแกนแผ่ขยายตามคอลัมน์..........76
4.4 การตรวจวิเคราะห์พลาสมา.......... 78
4.4.1 โรว์โกว์สกีคอยล์..........78
4.4.2 โพรบวัดความต่างศักย์ที่สูง..........83
4.4.3 ซิลิคอนพินไดโอดชนิดBPX65..........85
4.4.4 โฟโตไดโอดชนิดSXUV100..........89
บทที่ 5 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง.......... 91
5.1 ผลการจำลองหาค่าพารามิเตอร์ที่ให้กำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต..........91
5.2 ผลการทดลองตรวจจับความต่างศักย์ที่วัดได้ในเงื่อนไขทั่วไปและเงื่อนไข
ที่ได้จากการจำลอง.......... 96
5.3 ผลการทดลองตรวจจับรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตและ
ผลที่ได้จากการจำลองในเครื่องพลาสมาโฟกัส..........102

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง....115
รายการอ้างอิง....120
ภาคผนวก....124
ก พลังงานไอออไนเซชันของแก๊สอาร์กอนและพลังงานต่ออะตอมของอาร์กอน....125
ข ช่องว่างประกายสุญญากาศ....127
ค กราฟผลการทดลอง....128
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....137

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองที่ได้โดยการปรับค่าตัวแปรต่างๆและแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาแล้วนำไปเปรียบเทียบกับการทดลอง....52
ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของโปรแกรมที่พัฒนาจาก ศาสตราจารย์ ดร. ชิง ลี 54
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน สัญญาณของกระแส และ เวลา ณ จุดสิ้นสุดเฟสตามแกน....59
ตารางที่ 5.1 ตารงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน, ความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด, ความยาวแท่งแอโนดและอุณหภูมิพลาสมา.... .95
ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลอง....96
ตารางที่ 5.3 ตารางผลการทดลองหาจำนวนประจุซึ่งได้จากการตรวจจับรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ความดันตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ โดยปรับเปลี่ยนขนาดของท่อ d ให้มีขนาดเป็น 10 เซนติเมตรและ 30 เซนติเมตร ตามลำดับที่ได้จากการจำลอง โดยกำหนดให้ z_o คือ ความยาวของแท่งแอโนด และ V_o คือ ความต่างศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุ....107
ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณตามแบบจำลองเพื่อหาจำนวนประจุเนื่องจากการแผ่รังสีของแหล่งกำเนิดซึ่งไปตกกระทบอุปกรณ์ตรวจจับโดยกำหนดให้ z_o คือความยาวของแท่งแอโนด และ V_o คือ ความศักย์ต่างที่ให้แก่ตัวเก็บประจุ.....111
ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงแสดงพลังงานไอออไนเซชันอาร์กอนที่สถานะต่างๆ....125
ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงแสดงพลังงานต่ออะตอมของอาร์กอน....126

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงแถบความยาวคลื่น ความถี่ และพลังงานในช่วงต่างๆ............5

รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงโครงสร้างภายในของเครื่องพลาสมาโฟกัสชนิด UNU/ICTP....8

รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงกระบวนการการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นภายในพลาสมา เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนซึ่งประกอบด้วยกระบวนการ ฟรี-ฟรี แทรนซิชัน กระบวนการฟรี-บาวน์ด แทรนซิชัน และกระบวนการ บาวน์ด-บาวน์ แทรนซิชัน...12

รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนไอออไนเซชัน กับอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่สถานะต่างๆของอาร์กอน....................................18

รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธในเฟสการแตกตัว.....................20

รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธในเฟสตามแกน.........................20

รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาโฟกัสตามแบบจำลองสลัก ซึ่งให้ส่วนช็อคถูกส่วนพิสตันกระทำให้เคลื่อนที่ในแนวแกน..........................21

รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงวงจรของเครื่องพลาสมาโฟกัส... 23

รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี.......29

รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมี..... 33

รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีพิสตัน รัศมีช็อค ที่เวลาตั้งแต่เริ่มต้น ที่เฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมีจนถึงเฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมี................35

รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดงกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเครื่องพลาสมาโฟกัสตั้งแต่ เฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมีจนถึงเฟสการแผ่รังสี ของแก๊สดิวทีเรียมที่ ความดัน 4 มิลลิบาร์...38

รูปที่ 4.1 รูปภาพแสดงระบบของเครื่องพลาสมาโฟกัสที่มีช่องว่างประกาย แบบสุญญากาศซึ่งอยู่ในกรอบวงกลมสีเหลือง.. 43

รูปที่ 4.2 ก. รูปภาพแสดงส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ถังเก็บ ประจุ
ข. รูปภาพส่วนที่ทำหน้าที่ในการแปลงไฟฟ้าซึ่งแปลงจาก ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีศักย์สูง........44

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

รูปที่ 4.3 แผนภาพวงจรระบบจ่ายพลังงานซึ่งต่อเข้ากับเครื่องพลาสมาโฟกัส โดยกรอบสีเหลือง คือ ส่วนควบคุมการจ่ายไฟฟ้า กรอบสีเขียว คือ ส่วนที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้า สุดท้ายกรอบสีน้ำเงินคือ เครื่องพลาสมาโฟกัส....45
รูปที่ 4.4 แผนภาพแสดงโครงสร้างของระบบเครื่องพลาสมาโฟกัส....46
รูปที่ 4.5 แผนภาพแสดงระบบปฏิบัติการ การจำลองตามแบบจำลองที่ใช้ในเครื่องพลาสมาโฟกัสซึ่งพัฒนาโดย ศาสตราจารย์ ซิง ลี....48
รูปที่ 4.6 แผนภาพที่แสดงขีดจำกัดของการดำเนินการซึ่งโปรแกรมดังกล่าวต้องการลดความดันหรือเพิ่มศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุหรือปรับลดขนาดความยาวของแท่งแอโนด....51
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมของ ศาสตราจารย์ ซิง ลี กับ ผลการทดลองที่ความดันที่ 0.5 มิลลิบาร์ ความต่างศักย์ 12.5 กิโลโวลต์ และความยาวของแท่งแอโนดเป็น 16 เซนติเมตร ตามลำดับ....53
รูปที่ 4.8 แผนภาพแสดงเครื่องพลาสมาโฟกัสชนิด UNU/ICTP....57
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของพลาสมาที่นอร์มัลไลซ์กับเวลาที่เปลี่ยนไปในแต่ละความดันที่ระบบปฏิบัติการ 12.5 กิโลโวลต์....58
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านอร์มัลไลซ์กระแสพลาสมากับความดัน.... 60
รูปที่ 4.11 แผนภูมิสายงานการจำลองเพื่อคำนวณค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ γ ของพลาสมาที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สอาร์กอน.... 62
รูปที่ 4.12 แผนภูมิสายงานจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่นอร์มัลไลซ์ I ความต่างศักย์ที่นอร์มัลไลซ์ v และอุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยเคลวิน ที่เวลาต่างๆ T ใน เฟสตามแกน....65
รูปที่ 4.13 แผนภูมิสายงานจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่นอร์มัลไลซ์ I ความต่างศักย์ที่นอร์มัลไลซ์ v และอุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยเคลวิน ที่เวลาต่างๆ T ใน เฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี.... 68

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

รูปที่ 4.14 แผนภูมิสายงานจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสที่นอร์มัลไลซ์ l ความต่างศักย์ที่นอร์มัลไลซ์ v และอุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยเคลวิน ที่เวลาต่างๆ T ในเฟสช็อคสะท้อนช็อคตามแนวรัศมี....71
รูปที่ 4.15 แผนภูมิสายงานเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I ความต่างศักย์ V และ อุณหภูมิของพลาสมา T ที่เวลาต่างๆ ในเฟสการแผ่รังสี.... 74
รูปที่ 4.16 แผนภูมิสายงานจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสที่นอร์มัลไลซ์ l ความต่างศักย์ที่นอร์มัลไลซ์ v ในเฟสตามแกนแผ่ขยายตามคอลัมน์.... 76
รูปที่ 4.17 แผนภาพแสดงการไหลของกระแสผ่านหน้าตัดของขดลวดซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กภายในขดลวดโซลีนอยด์....78
รูปที่ 4.18 ก. แผนภาพวงจรแบ่งความต่างศักย์ ข. แผนภาพวงจรการใช้งานวงจรบังความต่างศักย์ซึ่งด้านขาเข้าต่อกับโรว์โกสกีคอยล์และด้านขาออกต่อกับออสซิลโลสโคป....80
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากโรโกว์สกีคอยล์กับเวลาโดยใช้แก๊สอาร์กอนที่ความดัน 25 มิลลิบาร์....81
รูปที่ 4.20 ก. แผนภาพแสดงโพรบวัดความต่างศักย์ ข. แผนภาพแสดงวงจรตัวแบ่งศักย์ของโพรบ....84
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความต่างศักย์ที่ตรวจจับได้จากเครื่องพลาสมาโฟกัสซึ่งใช้แก๊สอาร์กอนที่ความดัน 1มิลลิบาร์ และความต่างศักย์ที่ชาร์จให้แก่ตัวเก็บประจุขนาด 12.5 กิโลโวลต์....85
รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายซิลิคอนพินไดโอดรุ่น BPX65....85
รูปที่ 4.23 แผนภาพแสดงวงจรการต่อซิลิคอนพินไดโอดเพื่อตรวจวัดรังสีเอกซ์....86

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพไวกับความยาวคลื่นที่ความหนาของตัวกรองแผ่นอะลูมิเนียมที่แตกต่างกัน..87

รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพไวกับความยาวคลื่นของโฟโตไดโอด SXUV 100.. 90

รูปที่ 5.1 ก. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพลาสมากับเศษส่วนของไอออไนเซชันในสถานะต่างๆของอาร์กอน ได้แก่ Ar 6+ ,Ar 7+ ,Ar 10+ ,Ar 11+
ข. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพลาสมากับผลรวมเศษส่วนไอออไนเซชันในสถานะต่างๆของอาร์กอน ได้แก่ ได้แก่ Ar 6+ ,Ar 7+ ,Ar 10+ ,Ar 11+...92

รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของแท่งแอโนด ค่าความต่างศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุกับอุณหภูมิของพลาสมาที่ความดันตั้งแต่ 1.0 – 2.5 มิลลิบาร์...94

รูปที่ 5.3 แผนภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์โพรบวัดความต่างศักย์ที่สูงเพื่อตรวจจับสัญญาณความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทด... 97

รูปที่ 5.4 กราฟผลการทดลองวัดความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรดซึ่งประจุไฟฟ้าแก่ตัวเก็บประจุด้วยศักย์ 6.5 กิโลโวลต์และแท่งแอโนดยาว 7.5 เซนติเมตร...98

รูปที่ 5.5 กราฟผลการทดลองวัดความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรดซึ่งประจุไฟฟ้าแก่ตัวเก็บประจุด้วยศักย์ 8.0 กิโลโวลต์ และแท่งแอโนดยาว 9.0 เซนติเมตร..99

รูปที่ 5.6 ผลการทดลองวัดความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรดซึ่งประจุไฟฟ้าแก่ตัวเก็บประจุด้วยศักย์ 12.5 กิโลโวลต์ และแท่งแอโนดยาว 16.0 เซนติเมตร..100

รูปที่ 5.7 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองตรวจจับรังสีและความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรด..103

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการทดลองซึ่งประกอบด้วยความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเครื่องพลาสมา สัญญาณที่ได้จาก BPX 65 และ สัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 กับ เวลา ที่ความดัน 2.0 มิลลิบาร์ ความยาวของแท่งแอโนด 7.5 เซนติเมตร และ ความต่างศักย์ให้แก่ตัวเก็บประจุเป็น 6.5 กิโลโวลต์ ซึ่งวัดห่างจากแหล่งกำเนิด 34 เซนติเมตร.. 104

รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการทดลองซึ่งประกอบด้วยความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเครื่องพลาสมาสัญญาณที่ได้จาก BPX 65 และสัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 กับ เวลา ที่ความดัน 2.5 มิลลิบาร์ ความยาวของแท่งแอโนด 9.0 เซนติเมตร และ ความต่างศักย์ให้แก่ตัวเก็บประจุเป็น 8.0 กิโลโวลต์ ซึ่งวัดห่างจากแหล่งกำเนิด 34 เซนติเมตร..105

รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการทดลองซึ่งประกอบด้วยความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเครื่องพลาสมาสัญญาณที่ได้จาก BPX 65 และสัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 กับ เวลา ที่ความดัน 0.5 มิลลิบาร์ ความยาวของแท่งแอโนด 16.0 เซนติเมตร และ ความต่างศักย์ให้แก่ตัวเก็บประจุเป็น 12.5 กิโลโวลต์ ซึ่งวัดห่างจากแหล่งกำเนิด 34 เซนติเมตร..106

รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประจุที่ตรวจวัดได้จาก SXUV 100 กับความดันที่เปลี่ยนแปลงในงื่อนไขต่างๆ กำหนดให้ คือ z_o ความยาวของแท่งแอโนด V_o คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ตัวเก็บประจุ และ d คือ ความยาวของท่อเชื่อมต่อออกจากภาชนะสุญญากาศเพื่อทำหน้าที่ส่งผ่านรังสีไปยังอุปกรณ์ตรวจจับ..108

รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประจุที่ได้จากการจำลองกับความดันที่เปลี่ยนแปลงในงื่อนไขที่ 1 และ เงื่อนไขที่ 2..112

รูปที่ ข.1 แผนภาพลักษณะโครงสร้างภายในของช่องว่างประกายสุญญากาศ.............127

หน้า

รูปที่ ค.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลองซึ่งใช้โปรแกรมที่เขียนโดย ศาสตราจารย์ ซิง ลี ที่ความยาวแอโนด 7.5 เซนติเมตร ศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุขนาด 6.5 กิโลโวลต์....................128
รูปที่ ค.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาที่ได้จากการทดลองกับ ผลที่ได้จากแบบจำลองซึ่งใช้โปรแกรมที่เขียนโดย ศาสตราจารย์ ซิง ลี ที่ความยาวแอโนด 9.0 เซนติเมตร ศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุขนาด 8.0 กิโลโวลต์....................129
รูปที่ ค.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลองซึ่งใช้โปรแกรมที่เขียนโดย ศาสตราจารย์ ซิง ลี ความยาวแอโนด 16.0 เซนติเมตร ศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุขนาด 12.5 กิโลโวลต์....................130
รูปที่ ค.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากทดลองกับเวลา โดยเส้นสีน้ำเงิน คือ สัญญาณความต่างศักย์ เส้นสีฟ้า คือ สัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 และเส้นสีเหลือง คือ สัญญาณที่ได้จาก BPX65 ซึ่งปฏิบัติการณ์ที่ความยาวของแท่งแอโนดมีขนาด 7.5 เซนติเมตร ศักย์ที่ประจุแก่ให้ถังเก็บประจุขนาด 6.5 กิโลโวลต์ ในช่วงความดันตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับรังสีห่างจากแหล่งกำเนิด 34 เซนติเมตร....................131
รูปที่ ค.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากทดลองกับเวลา โดยเส้นสีน้ำเงิน คือ สัญญาณความต่างศักย์ เส้นสีฟ้า คือ สัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 และเส้นสีเหลือง คือ สัญญาณที่ได้จาก BPX65 ซึ่งปฏิบัติการณ์ที่ความยาวของแท่งแอโนดมีขนาด 9.0 เซนติเมตร ศักย์ที่ประจุแก่ให้ถังเก็บประจุขนาด 8.0 กิโลโวลต์ ในช่วงความดัน ตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับรังสีห่างจากแหล่งกำเนิด 34 เซนติเมตร....................132

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

รูปที่ ค.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากทดลองกับเวลา โดยเส้นสีน้ำเงิน คือ สัญญาณความต่างศักย์ เส้นสีฟ้า คือ สัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 และเส้นสีเหลือง คือ สัญญาณที่ได้จาก BPX65 ซึ่งปฏิบัติการณ์ที่ความยาวของแท่งแอโนดมีขนาด 16.0 เซนติเมตร ศักย์ที่ประจุแก่ให้ถังเก็บประจุขนาด 12.5 กิโลโวลต์ในช่วงความดันตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับรังสีห่างจากแหล่งกำเนิด 34 เซนติเมตร................................133
รูปที่ ค.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากทดลองกับเวลา โดยเส้นสีน้ำเงิน คือ สัญญาณความต่างศักย์ เส้นสีฟ้า คือ สัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 และเส้นสีเหลือง คือ สัญญาณที่ได้จาก BPX65 ซึ่งปฏิบัติการณ์ที่ความยาวของแท่งแอโนดมีขนาด 7.5 เซนติเมตร ศักย์ที่ประจุแก่ให้ถังเก็บประจุขนาด 6.5 กิโลโวลต์ ในช่วงความดันตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับรังสีห่างจากแหล่งกำเนิด 54 เซนติเมตร.........................134
รูปที่ ค.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากทดลองกับเวลา โดยเส้นสีน้ำเงิน คือ สัญญาณความต่างศักย์ เส้นสีฟ้า คือ สัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 และเส้นสีเหลือง คือ สัญญาณที่ได้จาก BPX65 ซึ่งปฏิบัติการณ์ที่ความยาวของแท่งแอโนดมีขนาด 9.0 เซนติเมตร ศักย์ที่ประจุแก่ให้ถังเก็บประจุขนาด 8.0 กิโลโวลต์ ในช่วงความดันตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับรังสีห่างจากแหล่งกำเนิด 54 เซนติเมตร.................................135
รูปที่ ค.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากทดลองกับเวลา โดยเส้นสีน้ำเงิน คือ สัญญาณความต่างศักย์ เส้นสีฟ้า คือ สัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 และเส้นสีเหลือง คือ สัญญาณที่ได้จาก BPX65 ซึ่งปฏิบัติการณ์ที่ความยาวของแท่งแอโนดมีขนาด 16.0 เซนติเมตร ศักย์ที่ประจุแก่ให้ถังเก็บประจุขนาด 12.5 กิโลโวลต์ ในช่วงความดันตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับรังสีห่างจากแหล่งกำเนิด 54 เซนติเมตร.........................136

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต(Extreme Ultraviolet: EUV) คือ รังสีที่มีแถบความยาวคลื่นอยู่ระหว่างรังสีเอกซ์อย่างอ่อน (soft x-ray) กับ รังสีอัลตราไวโอเลต โดยที่รังสีชนิดนี้มีความยาวคลื่นครอบคลุมความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตร (nanometer: nm) รังสีดังกล่าวได้รับความสนใจอย่างมากในวงการอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ(semiconductor industry) [1,2] เนื่องจากการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (electronics) ในปัจจุบันซึ่งสร้างลายวงจรบนแผ่นพริ้นท์นั้นได้ใช้รังสีที่มีความยาวคลื่นประมาณ 193 นาโนเมตร [3] ซึ่งส่งผลกระทบให้ความกว้างของลายบนแผ่นดังกล่าวมีขนาดกว้าง ดังนั้น ลายวงจรบนแผ่นดังกล่าวมีจำนวนน้อยซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากชิ้นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ได้เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นในการพัฒนาขั้นถัดไปจึงแสวงหาแหล่งกำเนิดรังสีที่สามารถแผ่รังสีที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งรังสีดังกล่าวคือเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต ดังนั้นรังสีชนิดนี้จึงมีบทบาทสำคัญในการก้าวถัดไปสู่อุตสาหกรรมด้านลิโทกราฟฟี(next-generation lithography)[4]

สำหรับงานวิจัยนี้ให้ความสนใจต่อการประยุกต์ดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต เนื่องจากเครื่องดังกล่าวเป็นเครื่องที่สามารถให้กำเนิดรังสีและอนุภาคต่างๆ เช่น รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต ไอออน อิเล็กตรอน และนิวตรอน เป็นต้น เครื่องดังกล่าวมีความหยืดหยุ่นต่อการปรับเปลี่ยนขนาดและองค์ประกอบของเครื่องได้ตามต้องการโดยไม่ยุ่งยากและเมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดรังสีชนิดอื่นๆ เช่น เครื่องซินโครตรอน (synchrotron) พบว่าเครื่องดังกล่าวใช้ต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าเครื่องที่ให้กำเนิดดรังสีและอนุภาคอื่นๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเครื่องพลาสมาโฟกัสมาใช้เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต โดยทำการหาตัวแปรที่เหมาะสำหรับการกำเนิดรังสีและดัดแปรเครื่องดังกล่าวเพื่อตรวจสอบผลที่ได้ตามสมมุติฐาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การแผ่รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตจากเครื่องพลาสมาโฟกัสเกิดขึ้นโดยการให้พลังงานจากแหล่งกำเนิดไปยังถังเก็บประจุ (capacitor bank) และทำการปล่อยประจุไฟฟ้า (discharge) จากแหล่งเก็บประจุดังกล่าวไปยังขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ภายในภาชนะสุญญากาศซึ่งนำไปสู่กระบวนการ การเคลื่อนที่ของพลาสมาและการแผ่รังสีของพลาสมาในเครื่องพลาสมาโฟกัส

ปัจจุบันงานที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เครื่องพลาสมาโฟกัสซึ่งขอยกตัวอย่าง ได้แก่ เอกซ์เรย์ไมโครลิโทกราฟฟี (x-ray microlithography) เอกซ์เรย์ไมโครแมทชีนนิง (x-ray micromachining) การฝังไอออน (ion implantation) การปรับสภาพผิวด้วยพลาสมา (plasma surface modification) เครื่องตรวจสอบและป้องกันที่สนามบิน (safeguard service at airports) และโพซิตรอนอิมิชชันโทโมกราฟฟี (positron emission tomography) เป็นต้น

สำหรับสมบัติของรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่เป็นก้าวสำคัญสำหรับการเปลี่ยนแปลงต่ออุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำและสมบัติของเครื่องพลาสมาโฟกัสที่ความหยืดหยุ่นสูง รวมทั้งประโยชน์หลายด้านของเครื่องมือดังกล่าวจึงเป็นเหตุจูงใจให้ผู้วิจัยทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการให้กำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตจากเครื่องพลาสมาโฟกัส รวมถึงการจำลองสถานการที่ให้รังสีชนิดนี้ใน สภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำตัวแปรที่ได้จากการจำลองไปดัดแปรกับเครื่องพลาสมาโฟกัสแล้วเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างชุดการทดลองที่ได้จากการดัดแปรกับผลการทดลองที่ได้จากสภาวะที่ใช้ในการปฏิบัติการในห้องปฏิบัติการเพื่อนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองซึ่งนำไปสู่การประยุกต์ในอุตสหกรรม

การพัฒนางานวิจัยก้าวต่อไปในอนาคต คือ การสร้างเครื่องพลาสมาโฟกัสที่มีการเกิดติดต่อซ้ำๆ (repetitive) โดยการปลดปล่อยพลังงานเป็นพัลส์ (pulse) ที่ต่อเนื่อง ซึ่งนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในอุตสหกรรม ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และการสร้างแหล่งกำเนิดรังสีชนิดต่างๆโดยใช้เครื่องพลาสมาโฟกัส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดภายในเครื่องพลาสมาโฟกัสเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสำหรับการเกิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต
2. ดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสให้สอดคล้องตามค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากแบบจำลองของพลาสมาภายในเครื่องพลาสมาโฟกัส
3. ตรวจสอบการแผ่รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ได้จากเครื่องพลาสมาโฟกัสซึ่งถูกดัดแปรตามแบบจำลองและเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการคำนวณ

1.3 ขั้นตอนสำหรับการวิจัย

สำหรับขั้นตอนการวิจัยในวิทยานิพนธ์ มีดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ประกอบด้วยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเครื่องพลาสมาโฟกัสและทฤษฎีการแผ่รังสีของพลาสมา
2. ศึกษาหลักการที่เกี่ยวกับเครื่องพลาสมาโฟกัส การปฏิบัติการเกี่ยวกับเครื่องพลาสมาโฟกัสและองค์ประกอบของเครื่องพลาสมาโฟกัส
3. จำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาและการแผ่รังสีที่เกิดขึ้น เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสำหรับการแผ่รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต
4. ดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสให้สอดคล้องตามเงื่อนไขดังกล่าวแล้วทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลอง
5. ทำการรวบรวมผลและสรุปผลที่เกิดขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้องค์ความรู้และข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับการกำเนิดรังสีด้วยเครื่องพลาสมาโฟกัส
2. สามารถใช้แบบจำลองพลาสมาโฟกัสทำเพื่อการดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสให้สามารถปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต
3. สามารถดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสเพื่อให้กำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต

1.5 องค์ประกอบของวิทยานิพนธ์

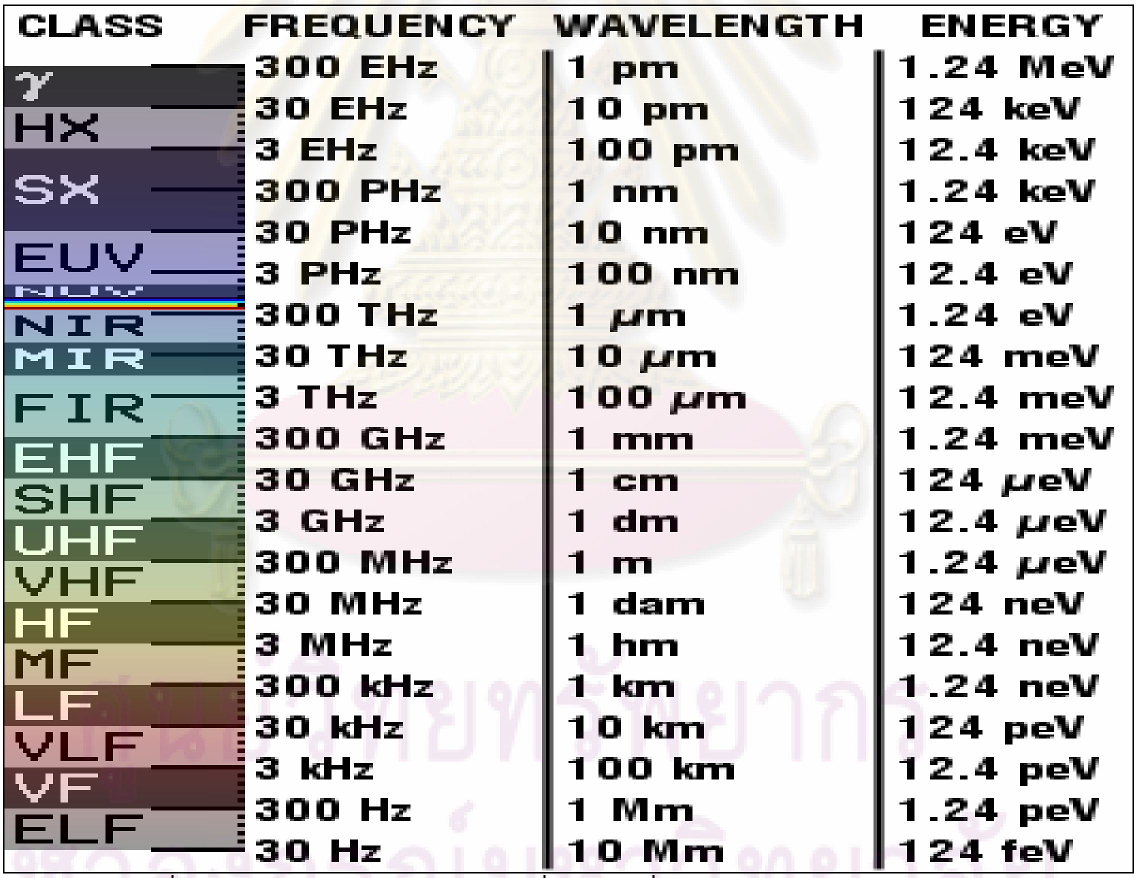
การนำเสนองานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยเนื้อหาจำนวน 6 บท โดยเริ่มต้นจาก บทที่ 1 เพื่อกล่าวถึงภาพรวมของงานวิจัยซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขั้นตอนสำหรับการวิจัยและประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย สำหรับบทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต ในส่วนของบทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ สำหรับบทที่ 4 กล่าวถึงรายละเอียดของเครื่องพลาสมาโฟกัส ส่วนประกอบของเครื่องพลาสมาโฟกัสและเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ในบทที่ 5 เกี่ยวข้องกับการทดลอง ผลที่ได้จากการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองที่เกิดขึ้น สำหรับบทสุดท้ายคือบทที่ 6 ซึ่งสรุปผลการทดลองทั้งหมดเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงและต่อยอดงานวิจัยและนำไปพัฒนาให้เกิดประโยชน์ต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตคือรังสีที่มีความยาวคลื่นครอบคลุมความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตร (nanometer: nm) ด้วยสมบัติดังกล่าวจึงเป็นที่สนใจสำหรับอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ [5] จากรายงานของโครงการเทคโนโลยีระดับนานาชาติเกี่ยวสารกึ่งตัวนำ (International Technology Roadmap for Semiconductors: ITRS) [2] ได้กล่าวว่าภายในปีคริตศักราช 2009 รังสีดังกล่าวจะมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นงานที่เกี่ยวข้องกับรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตจึงเป็นการก้าวสู่รุ่นถัดไปในด้านลิโทกราฟฟี (Next Generation Lithography: NGL) [6]



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงแถบความยาวคลื่น ความถี่ และพลังงานในช่วงต่างๆ [7]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ใช้ในระบบปฏิบัติการปัจจุบัน มีด้วยกัน 4 แหล่ง ได้แก่ เครื่องซินโครตรอน (synchrotron) [8] เลเซอร์-โปรดิวซ์พลาสมา (Laser-produced plasma) การอาร์คสุญญากาศ (vacuum arcs) และแก๊สดิสชาจร์ (gas discharges) [9]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่มาจากเครื่องซินโครตรอนได้แก่ งานวิจัยของ กลัส เฮสช์ (Klaus Hesch) และคณะ [8] ซึ่งใช้การเร่งอิเล็กตรอนให้ปลดปล่อยพลังงานในรูปของรังสีดังกล่าว ผลที่ได้ คือ กำลังของการแผ่รังสีนั้นอยู่ในช่วง 50 – 150 วัตต์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้รังสีดังกล่าว โดยใช้เครื่องซินโครตรอนซึ่งเป็นงานวิจัยของ แซง ฮุน ลี (Sang Hun Lee) และ คณะ [10]

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์กระบวนการเลเซอร์-โปรดิวซ์พลาสมา ได้แก่ งานวิจัยของ อิซาวา (Y. Izawa) และคณะ[11] ได้ทำการพัฒนาแหล่งกำเนิดรังสีชนิดนี้ด้วยกระบวนการดังกล่าว โดยจัดทำภายใต้โครงการของกระทรวงการศึกษา, วัฒนธรรม, วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี (Ministry of Education, Culture, Science and Technology) แห่งประเทศญี่ปุ่น งานวิจัยของ อัทสึชิ สุนาฮาระ (Atsushi Sunahara) และคณะ[12] ได้ทำการจำลองทางอุทกพลศาสตร์เชิงการแผ่รังสี 1มิติ (1-D radiations hydrodynamics simulation) ซึ่งจำลองการพลวัต (dynamic) ของพลาสมาที่เกิดจากเป้าดีบุก (tin) และการแผ่รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต ผลการจำลองที่ได้ คือ การใช้เลเซอร์ที่มาจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

งานวิจัยที่เกี่ยวกับระบบการอาร์คสุญญากาศเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต ได้แก่ งานวิจัยของ เคียฟท์ (E. R. Kieft)และคณะ[13] ซึ่งทำการวิจัยโดยจัดระบบการทดลอง การกระเจิงแบบทอมสัน (Thomson scattering) เพื่อวัดอุณหภูมิอิเล็กตรอน และความหนาแน่นของไอดีบุกที่ถูกดิสชารจ์ โดยระบบนี้ทำให้พลาสมาที่เกิดจากไอของดีบุกปลดปล่อยรังสีดังกล่าวออกมา

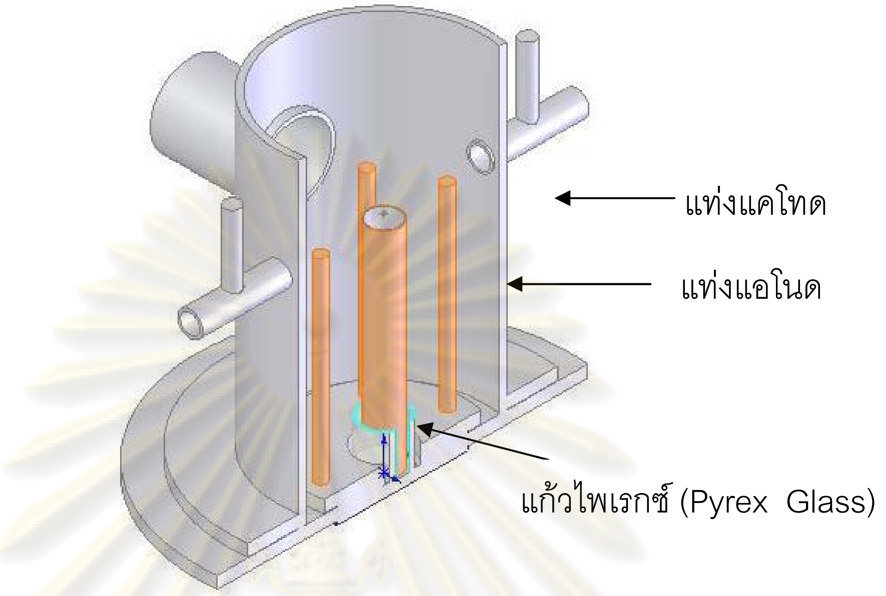
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับระบบการดิสชาร์จ์แก๊สซึ่งได้แก่ ระบบคาปิลารีดิสชาร์จ (capillary discharge) ระบบแซดพินช์ (Z-pinch) และระบบการโฟกัสพลาสมาหนาแน่น(dense plasma focus) พิจารณางานวิจัยที่เกี่ยวข้องระบบคาปิลารีดิสชารจ ได้แก่ งานวิจัยของ จัสช์คินและคณะ (L Juschkin, et.al) [14] โดยงานวิจัยดังกล่าวใช้แก๊สซีนอน (Xe) และแก๊สคริปตอน (Kr) ทำการแตกตัวเป็นพลาสมาเพื่อปลดปล่อยรังสีที่มีความยาวคลื่นในช่วง 10-15 นาโนเมตร ผลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับแบบจำลองเพื่อพัฒนาให้สามารถนำไปใช้หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเป็นแหล่งกำเนิดรังสีดังกล่าว งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบแซดพินช์ได้แก่งานวิจัยของ อคิยามา (H. Akiyama) และคณะ[15] ซึ่งทำการทดลองโดยใช้พลาสมาของแก๊สซีนอน ผลการทดลองดังกล่าวถูกสังเคราะห์โดย นักวิจัยของมหาวิทยาลัยคุมาโมโต (Kumamoto University) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการโฟกัสพลาสมาหนาแน่นได้แก่งานวิจัยของ ฮัสสัน (S. M. Hassan) และคณะ [16] โดยใช้เครื่องไมโครพลาสมาโฟกัสแบบ 3 มีชื่อย่อว่าเครื่องเอ็มพีเอฟ 3 (Micro Plasma Focus 3: MPF 3) เป็นแหล่งกำเนิดรังสีดังกล่าว

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาระบบการโฟกัสควบแน่นพลาสมาซึ่งใช้เครื่องพลาสมาโฟกัสชนิด สหประชาชาติมหาวิทยาลัย/ศูนย์กลางฟิสิกส์ทฤษฎีนานาชาติมีชื่อย่อว่ายูเอ็นยู/ไอซีทีพี (United Nations University/International Centre for Theoretical Physics: UNU/ICTP) และทำการจำลองผลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสำหรับการกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต จากนั้นจึงดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสให้สอดคล้องกับพารามิเตอร์ดังกล่าวเพื่อทำการทดลองแล้วนำผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองมาเปรียบเทียบกัน

พิจารณาแผนภาพโครงสร้างภายในของเครื่องพลาสมาโฟกัสชนิดดังกล่าวซึ่งประกอบแท่งแอโนด (anode) , แท่งแคโทด (cathode) และฉนวนที่ทำจากแก้วซึ่งล้อมรอบแท่งแอโนดที่อยู่ด้านนอก ดังรูปที่ 2.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงโครงสร้างภายในของเครื่องพลาสมาโฟกัสชนิดยูเอ็นยู/ไอซีทีพี [17]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์เครื่องพลาสมาโฟกัสชนิดนี้ ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยเกี่ยวกับรังสีเอกซ์ [18,19] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงวัสดุ [20] งานวิจัยด้านนิวเคลียร์ฟิวชัน [21] ดังนั้น เห็นได้ว่างานที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์เครื่องพลาสมาโฟกัสชนิดดังกล่าวมีความหลากหลาย

ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้สนใจนำเครื่องพลาสมาโฟกัสชนิดยูเอ็นยู/ไอซีทีพี ซึ่งเป็นเครื่องที่มีในห้องปฏิบัติการมาประยุกต์ใช้สำหรับแผ่รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองการแผ่รังสีและการเคลื่อนที่ของพลาสมา

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลจากการคำนวณโดยอาศัยแบบจำลอง ดังนั้น การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพลาสมาจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการคำนวณหาพารามิเตอร์ที่ได้เพื่อนำไปใช้ดัดแปรกับเครื่องพลาสมาโฟกัสจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆของพลาสมาที่เกิดภายในเครื่องพลาสมาโฟกัส

สำหรับทฤษฎีที่ใช้ในการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การแผ่รังสีของพลาสมา (plasma radiation) และพลศาสตร์ของพลาสมา (plasma dynamics) ซึ่งแบ่งตามหัวข้อดังต่อไปนี้

3.1 การแผ่รังสีของพลาสมา

การแผ่รังสีของพลาสมาเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานที่สูงกว่าไปสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่าซึ่งทำให้เกิดการปลดปล่อยของพลังงานอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

กระบวนการ การแผ่รังสีของพลาสมา พิจารณาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ กระบวนการฟรี - ฟรี แทรนซิชัน (free – free transition) กระบวนการฟรี - บาวน์ด แทรนซิชัน (free - bound transition) และ กระบวนการบาวน์ด - บาวน์ด แทรนซิชัน (bound – bound transition) [22] สำหรับกระบวนการต่างๆ สามารถอธิบายดังต่อไปนี้

กระบวนการฟรี - ฟรี แทรนซิชัน เป็นกระบวนการที่เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระสูญเสียพลังงานจลน์ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากนิวเคลียสของอะตอม สำหรับการแผ่รังสีแบบเบรมสตาลุง (bremsstrahlung) เป็นการแผ่รังที่เกิดจากกระบวนการนี้เช่นกัน [23] สำหรับรังสีที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้มีความยาวคลื่นต่อเนื่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระบวนการฟรี - บาวน์ด แทรนซิชัน คือกระบวนการที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะจากอิเล็กตรอนอิสระได้ปลดปล่อยพลังงานเพื่อมาอยู่ในระดับชั้นต่างๆของอะตอม สำหรับการแผ่รังสีแบบรีคอมบิเนชัน (recombination radiation) จัดเป็นการแผ่รังสีซึ่งสอดคล้องตามกระบวนการดังกล่าว

กระบวนการบาวน์ด – บาวน์ด แทรนซิชัน คือ กระบวนการการแผ่รังสีที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนที่ระดับชั้นซึ่งมีพลังงานสูงเป็น E_j ไปสู่ระดับชั้นซึ่งมีพลังงานต่ำเป็น E_i โดยกระบวนการดังกล่าวได้แสดงดังรูปที่ 3.1 สำหรับกระบวนการที่เกิดขึ้นดังกล่าว อิเล็กตรอนได้ปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีแบบเส้น (line radiation) [24] จัดเป็นการแผ่รังสีที่สอดคล้องตามกระบวนการดังกล่าว

สำหรับการแผ่รังสีในแต่ละกระบวนการ สามารถคำนวณหาพลังงานได้ดังสมการที่ 3.1, 3.2, 3.3[24]

ความหนาแน่นกำลังของการแผ่รังสีแบบเบรมสตาลุง(power density of bremsstrahlung: P_B)

$$P_B \approx \frac{64}{3}(\frac{\pi}{3})^{\frac{1}{2}}(\alpha a_o)^3(\frac{kT}{E_H})^{\frac{1}{2}}\frac{E_H^2}{\hbar}(zeff)^2 N_i N_e \tag{3.1}$$

ความหนาแน่นกำลังของการแผ่รังสีแบบรีคอมบิเนชัน(power density of recombination: P_R)

$$P_R \approx \frac{64}{3}(\frac{\pi}{3})^{\frac{1}{2}}(\alpha a_o)^3(\frac{E_H}{kT})^{\frac{1}{2}}\frac{E_H E_\infty}{\hbar}(Z_n)^2 N_i N_e \tag{3.2}$$

ความหนาแน่นกำลังของการแผ่รังสีแบบเส้น(power density of line radiation: P_L)

$$P_L \approx 32\pi(\frac{\pi}{3})^{\frac{1}{2}}(\frac{E_H}{kT})^{\frac{1}{2}}\frac{E_H^2}{\hbar}(\sum_m \bar{g} f_{mn}\exp(-\frac{E_{mn}}{kT}))a_o^3 N_i N_e \tag{3.3}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำหนดให้

E_H คือ พลังงานไอออไนเซชันของอะตอมไฮโดรเจน(ionization energy of hydrogen)

E_∞ คือ พลังงานไอออไนเซชัน (ionization energy)

E_{mn} คือ ผลต่างของพลังงานระหว่างสถานะ m กับ n

f_{mn} คือ ความแรงออสซิลเลเตอร์การปล่อยรังสี (emission oscillator strength)

N_e คือ เลขความหนาแน่นอิเล็กตรอน (number of electron density)

N_i คือ เลขความหนาแน่นไอออน (number of ion density)

α คือ ค่าคงที่โครงสร้างรายละเอียด (fine structure constant)

a_o คือ รัศมีของโบร์ (Bohr radius)

k คือ ค่าคงที่ของโบลซ์มันน์ (Boltzmann s' factor)

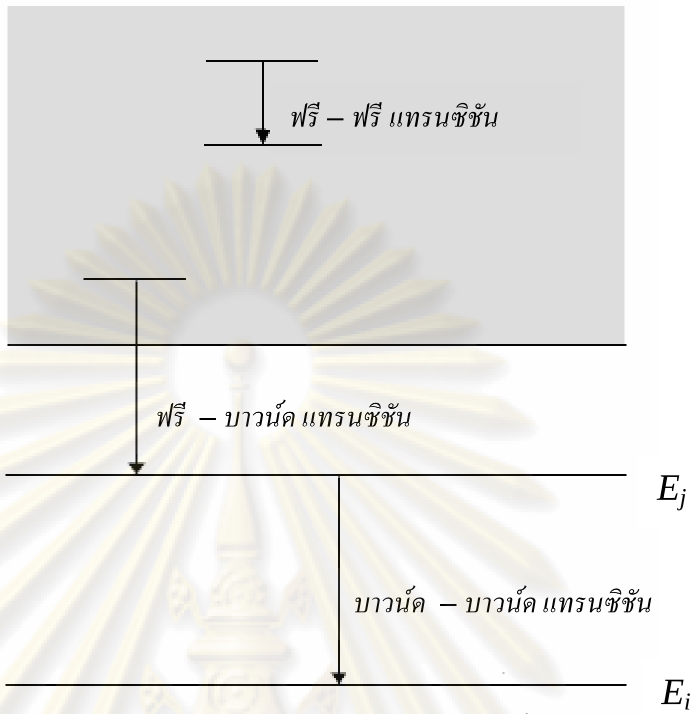
$zeff$ คือ ค่าประจุยังผล (effective charge)

Z_n คือ เลขอะตอม (atomic number)

$\bar{g}$ คือ ค่ายังผลกันท์ (effective gaunt factor)

T คือ อุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยเคลวิน (plasma temperature: Kelvin)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงกระบวนการการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นภายในพลาสมา เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนซึ่งประกอบด้วยกระบวนการ ฟรี - ฟรี แทรนซิชัน กระบวนการฟรี - บาวน์ด แทรนซิชัน และ กระบวนการบาวน์ด - บาวน์ด แทรนซิชัน [22]

สำหรับการแผ่รังสีของพลาสมาเนื่องจากกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองสมดุลต่างๆ ได้แก่ แบบจำลองสมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่ (local thermodynamics equilibrium model : LTE) แบบจำลองสมดุลคอโรนา (corona equilibrium model : CE) และ แบบจำลองสมดุลเชิงการชน - การแผ่รังสี (collisional - radiative equilibrium)

การวิเคราะห์แบบจำลองต่างๆเพื่อนำไปใช้อธิบายการแผ่รังสีของพลาสมาซึ่งขึ้นกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสามารถอธิบายตามหัวข้อต่อไปนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.1 แบบจำลองสมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่

ในการศึกษาสมบัติของพลาสมา ถ้ากำหนดให้พลาสมามีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ตลอดจนพลาสมามีสมดุลอุณหพลศาสตร์แล้ว ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะสามารถอธิบายได้โดยง่ายแต่ในความเป็นจริงความหนาแน่นของพลาสมามีความไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงไม่สามารถพิจารณาพลาสมาทั้งระบบได้ด้วยสมดุลอุณหพลศาสตร์ ด้วยเหตุดังกล่าวจึงพิจารณาศึกษาพลาสมาเฉพาะที่โดยการแบ่งปริมาตรของพลาสมาทั้งหมดให้มีขนาดเล็กและสมมติให้พลาสมาภายในปริมาตรเล็กๆ นั้นมีสมดุลอุณหพลศาสตร์ ดังนั้นแบบจำลองสมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่จึงเป็นแบบจำลองซึ่งใช้อธิบายพลาสมาเพียงส่วนหนึ่งจากระบบทั้งหมด

แบบจำลองดังกล่าวใช้กับพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูง สำหรับเงื่อนไขที่ถูกนำมาพิจารณา คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.4 [25]

$$N_e > KT_{eV}^{\frac{1}{2}}\chi_{\max}^{3} \tag{3.4}$$

เมื่อ $K \approx 10^{19}$ - 10^{20}, T_{eV} คือ อุณหภูมิอิเล็กตรอนในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (electron temperature : electronvolte,eV) และ $\chi_{\max}$ คือ พลังงานไอออไนเซชันที่สูงสุดของอะตอมที่พิจารณา สำหรับแก๊สอาร์กอนพลังงานดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 4426 อิเล็กตรอนโวลต์

พิจารณาพลาสมาของแก๊สอาร์กอน โดยกำหนดให้อุณหภมิอิเล็กตรอนของพลาสมาดังกล่าวมีค่าเป็น 113.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งพลังงานที่ได้ถูกพิจารณาสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ เมื่อแทนดังกล่าวลงในสมการที่ 3.4 พบว่า ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าอยู่ในช่วง 9.22×10^{30} - 9.22×10^{31} ต่อลูกบาศก์เมตร แต่สำหรับเครื่องพลาสมาโฟกัสที่ใช้ในการทดลองพบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง 10^{25} – 10^{26} ต่อลูกบาศก์เมตร [26] ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงไม่เหมาะสำหรับการนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.2 แบบจำลองสมดุลคอโรนา

แบบจำลองนี้ใช้กับกรณีที่พลาสมาที่มีความหนาแน่นต่ำ โดยแบบจำลองนี้สร้างขึ้นเพื่ออธิบายลักษณะของคอโรนาดวงอาทิตย์ (solar corona) ซึ่งกำหนดให้อธิบายพลาสมาในลักษณะเช่นเดียวกับดวงอาทิตย์ โดยสมมติว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของพลาสมาเป็นไปอย่างช้าๆ อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในพลาสมาดังกล่าวเกิดสมดุลอุณหภาพ (thermal equilibrium) ระหว่างอิเล็กตรอนด้วยกันเอง

สำหรับเงื่อนไขการใช้แบบจำลองนี้ พิจารณาให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่มากสุดที่เกิดขึ้นภายในพลาสมาของระบบนี้เป็นไปตามสมการที่ 3.5 และให้เลขควอนตัม (quantum number) $n \leq 6$

$$N_e^{\max} \approx 6.5\times10^{16}(z+1)^6 T_{eV}^{\frac{1}{2}} \exp\left({0.1(z+1)^2}\Big/{T_{eV}}\right) \tag{3.5}$$

เมื่อ z คือ เลขประจุของไอออน

พิจารณาพลาสมาที่เกิดจากแก๊สอาร์กอนซึ่งมีเลขประจุเป็น 18 และให้อุณหภูมิอิเล็กตรอนที่นำมาพิจารณามีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ได้กล่าวไว้ในแบบจำลองสมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่ โดยพิจารณาอุณหภูมิอิเล็กตรอนดังกล่าวเป็นอุณหภูมิที่นำมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 113.5 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 3.5 มีค่าเท่ากับ 4.47×10^{25} ต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 10^{25} – 10^{26} ต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกัน ดังนั้น แบบจำลองสมดุลคอโรนาจึงเหมาะสำหรับการนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.3 แบบจำลองสมดุลเชิงการชน-การแผ่รังสี

สำหรับแบบจำลองนี้พิจารณาความหนาแน่นของพลาสมาที่อยู่ในช่วงระหว่างแบบจำลองสมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่กับแบบจำลองสมดุลคอโรนา [27] ซึ่งพบว่าแบบจำลองนี้มีความยุ่งยากสำหรับการนำมาใช้ ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงไม่ถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงใช้แบบจำลองสมดุลคอโรนาเพื่ออธิบายปรากฏการณ์การแผ่รังสีของพลาสมาในเครื่องพลาสมาโฟกัส

พิจารณาแบบจำลองสมดุลคอโรนาซึ่งกำหนดให้การแผ่รังสีของพลาสมาเกิดจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนที่มีพลังงานในระดับสถานะ i ซึ่งส่งผลให้ไอออนดังกล่าวมีพลังงานเพิ่มขึ้นแล้วเปลี่ยนสถานะระดับพลังงานอยู่ระดับสถานะ $i+1$ หลังจากนั้นไอออนที่สถานะดังกล่าวจึงปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนสถานะให้อยู่ในระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ดังนั้น อัตราการเปลี่ยนสถานะของไอออนที่ระดับสถานะ i เนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนนั้นสมดุลกับอัตรารีคอมบิเนชันเชิงการแผ่รังสี(radiative recombination) ของไอออนสถานะ $i+1$ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการต่อไปนี้ดังนี้ [28]

$$N_e N_i S(T_{eV}, i) = N_e N_{i+1} R(T_{eV}, i+1) \tag{3.6}$$

กำหนดให้

N_e	คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
N_{i+1}	คือ ความหนาแน่นของไอออนที่สถานะ $i+1$
N_i	คือ ความหนาแน่นของไอออนที่สถานะ i
$R(T_{eV}, i+1)$	คือ สัมประสิทธิ์รีคอมบิเนชันเชิงการแผ่รังสี (radiative recombination coefficient)
$S(T_{eV}, i)$	คือ สัมประสิทธิ์การชนไอออไนเซชัน (collisional ionization coefficient)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการที่ 3.6 สามารถจัดรูปความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไอออนที่สถานะ $i+1$ และ i ได้ตามสมการที่ 3.7 คือ

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} = \frac{S(T_{eV}, i)}{R(T_{eV}, i+1)} \tag{3.7}$$

จากสมการที่ 3.7 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $R(T_{eV}, i+1)$ และ $S(T_{eV}, i)$ สามารถแสดงดังสมการที่ 3.8 [28]

$$\frac{S(T,i)}{R(T,i+1)} = \frac{N_{i+1}}{N_i} = 1.27\times10^{8}\,\frac{1}{\chi_i^2}\left(\frac{T_{eV}}{\chi_i}\right)^{3/4}\exp\left(-\frac{\chi_i}{T_{eV}}\right) \tag{3.8}$$

กำหนดให้

T_{eV} คือ อุณหภูมิอิเล็กตรอนในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์
(electron temperature: electronvolte)

χ_i คือ ศักย์ไอออไนเซชันของไอออนในสถานะ i
(ionization potential of ith ion)

สำหรับวิธีการหาสถานะไอออไนเซชันโดยใช้แบบจำลองสมดุลคอโรนาซึ่งทำได้โดยอาศัยสมการที่ 3.8 เป็นฟังก์ชันโดยตรงกับอุณหภูมิอิเล็กตรอน

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} = f_i(T_{eV}) \tag{3.9}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการที่ 3.9 สถานะไอออไนเซชันที่ระดับต่างๆสามารถแสดงตามลำดับได้ตั้งแต่ 0 ถึง Z_n ต่อไปนี้

$$\begin{cases} N_1 = N_o f_o \\ N_2 = N_1 f_1 = N_o f_1 f_o \\ N_3 = N_2 f_2 = N_o f_2 f_1 f_o \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ N_{Z_n} = N_{Z_n-1} f_{Z_n-1} = N_o f_{Z_n-1} f_{Z_n-2} \ldots\ldots f_1 f_o \end{cases} \tag{3.10}$$

โดย Z_n คือ เลขอะตอมของไอออนที่พิจารณา

จากสมการที่ 3.10 ความหนาแน่นของไอออนรวมภายในระบบมีค่าเท่ากับผลรวมของความหนาแน่นไอออนสถานะเป็นกลางซึ่งกำหนดให้ $Z = 0$ ถึง $Z = Z_n$ ซึ่งแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$N = \sum_{Z=0}^{Z_n} N_Z$$

$$N = N_0 (1 + f_0 + f_0 f_1 + \ldots + f_0 f_1 \ldots f_{Z_n-1}) \tag{3.11}$$

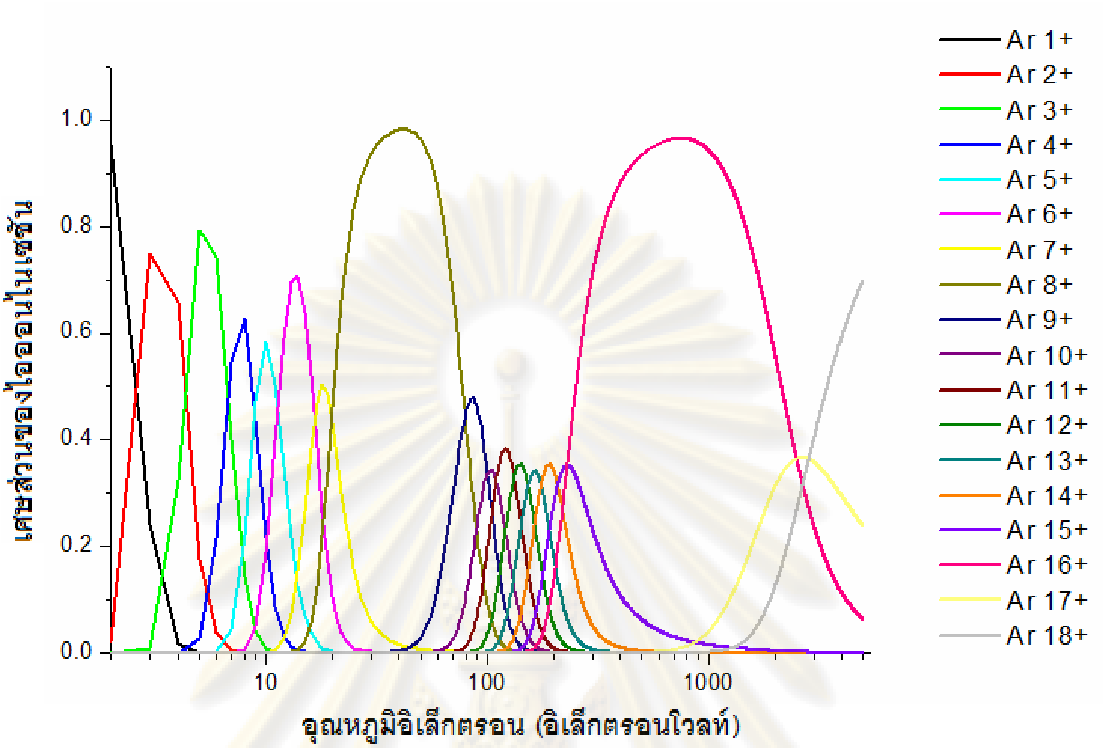
$$N = N_0 S_f$$

พิจารณาเศษส่วนของไอออไนเซชัน (fraction of ionization) ในสถานะ i สามารถแสดงได้ตามสมการดังนี้

$$\alpha_i = \frac{N_i}{N} \tag{3.12}$$

จากสมการที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนของไอออไนเซชันกับอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่สถานะต่างๆของอาร์กอนได้ ดังรูปที่ 3.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนของไอออไนเซชันกับอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่สถานะต่างๆของธาตุอาร์กอนตั้งแต่สถานะที่อาร์กอนแตกตัวเป็น Ar 1+ ถึง Ar 18+

จากรูปที่ 3.2 กราฟที่แสดงในแต่ละเส้น คือ ความหนาแน่นของไอออนในแต่ละสถานะต่อความหนาแน่นของไอออนทั้งหมด พบว่ากราฟดังกล่าวมีการเรียงลำดับสถานะไอออนจากไอออนที่สถานะต่ำไปยังไอออนที่สถานะสูง

พิจารณาแบบจำลองสมดุลคอโรนาซึ่งใช้สำหรับหาอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่ทำให้ได้จำนวนไอออนในสถานะที่มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตได้มากที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบจำลองการแผ่รังสีของพลาสมามีความสำคัญต่อการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะเพื่อกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเวต เนื่องจาก ในการแผ่รังสีของพลาสมาที่ความยาวคลื่นต่างๆ ขึ้นกับสถานะของไอออนที่อุณหภูมิต่างๆกัน ดังนั้น การสร้างแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตต้องพิจารณาสถานะของไอออนที่สามารถปลดปล่อยรังสีชนิดนี้ได้ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิอิเล็กตรอนภายในพลาสมา

เมื่อได้อุณหภูมิที่เหมาะสมแล้วจึงทำการคำนวณหาตัวแปรของเครื่องพลาสมาโดยการศึกษาแบบจำลองของการเคลื่อนที่ของพลาสมาภายในเครื่องพลาสมาโฟกัส สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับแบบจำลองของการเคลื่อนที่ของพลาสมาขออธิบายในหัวข้อถัดไป

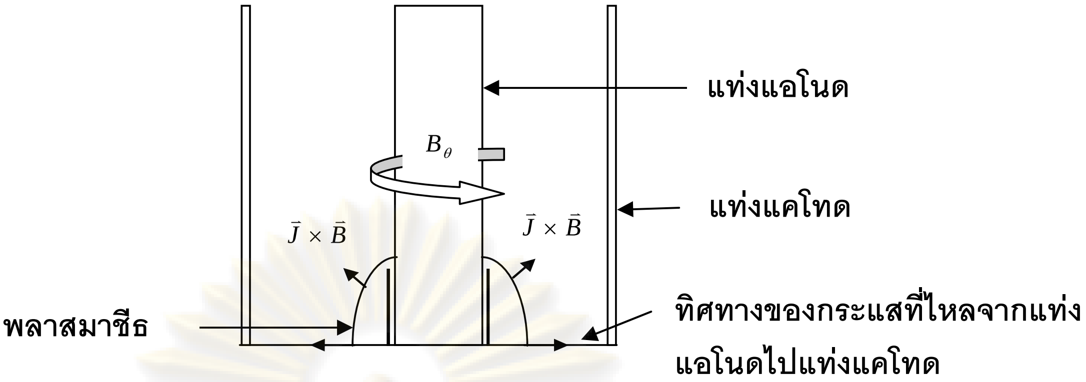
3.2 การเคลื่อนที่ของพลาสมา

สำหรับหัวข้อนี้ อธิบายการเคลื่อนที่ของพลาสมาภายในเครื่องพลาสมาโฟกัสซึ่งแบ่งออกเป็น 6 เฟส ได้แก่ 1. เฟสการแตกตัว (breakdown phase) 2.เฟสตามแกน (axial phase) 3. เฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี (radial inward shock phase) 4. เฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมี (radial reflected shock phase) 5. เฟสการแผ่รังสี (radiative phase) 6. เฟสตามแกนแผ่ขยายตามคอลัมน์ (expanded column axial phase) สำหรับรายละเอียดในแต่ละหัวข้อซึ่งอธิบายดังต่อไปนี้ [29]

3.2.1 เฟสการแตกตัว

สำหรับเฟสนี้เกิดขึ้นหลังจากดิสชาร์จพลังงานที่ถูกสะสมไว้ภายในถังเก็บประจุซึ่งส่งผลให้แก๊สที่อยู่ระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทดเกิดการแตกตัว ณ บริเวณฉนวน (insulator) ที่ครอบแท่งแอโนด หลังจากนั้นพลาสมาชีธ (plasma sheath) ดังกล่าวเคลื่อนที่ออกจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดและพลาสมาชีธถูกทำให้ยกตัวสูงขึ้นเหนือขอบบนของฉนวนเนื่องจากแรงโลเรนตซ์ (Lorentz force) $\vec{J} \times \vec{B}$ กระทำกับพลาสมาดังรูปที่ 3.3

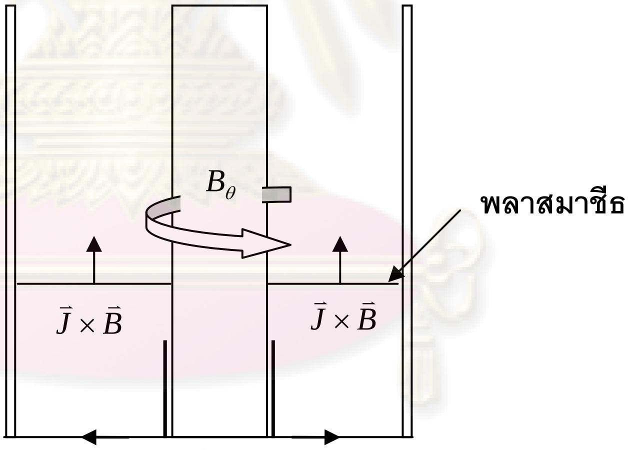
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธใน เฟสการแตกตัว

3.2.2 เฟสการตามแกน

สำหรับเฟสดังกล่าวเริ่มต้นเมื่อพลาสมาชีธเคลื่อนที่ตามแนวแกน z เนื่องจากแรงโลเรนตซ์ที่กระทำดังรูป

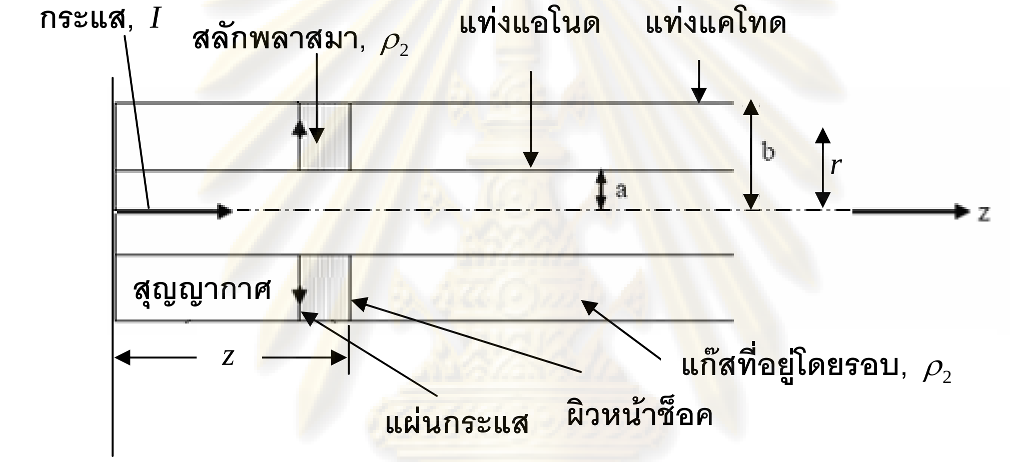


รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธใน เฟสตามแกน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาแบบจำลองที่อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเฟสดังกล่าว คือ แบบจำลองสลัก (slug model) [30] ซึ่งกำหนดให้พลาสมาชีธที่เคลื่อนที่ประกอบด้วยผิวหน้าช็อค (shock front) สลักพลาสมา (plasma slug) และชีธกระแส (current sheath) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยรูปดังกล่าวเป็นส่วนขยายของพลาสมาชีธในรูปที่ 3.4 โดยกำหนดให้พลาสมาทั้งหมดเคลื่อนที่ขึ้นตามแกน z

ในระหว่างการเคลื่อนของพลาสมาชีธ ความเร็วของพลาสมาจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลาสมาชีธถูกแรงโลเรนตซ์กระทำจึงส่งให้พลาสมาดังกล่าวถูกเร่งให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น ดังนั้น พลังงานของพลาสมาซึ่งแปรผันตรงกับความเร็วของพลาสมาจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธตามแบบจำลองสลักซึ่งให้ส่วนช็อคถูกส่วนของพิสตันกระทำให้เคลื่อนที่ในแนวแกน [30]

สมการที่ใช้สำหรับอธิบายการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธมาจากแบบจำลองสลักแบบ 1 มิติ โดยใช้กฏการเคลื่อนที่ของนิวตันเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นซึ่งสมมติให้แรงเสียดทานที่กระทำเป็นศูนย์ สำหรับการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธได้กำหนดให้มวลที่เคลื่อนที่คือส่วนของสลักพลาสมาซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5 พิจารณาแรงที่กระทำต่อระบบ คือ แรงโลเรนตซ์ ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ของพลาสมาสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt}(\rho_1 \pi (b^2 - a^2) z \frac{\Gamma - 1}{\Gamma} \frac{dz}{dt}) = \int_a^b \frac{B^2}{2\mu_o} 2\pi r dr \qquad (3.13)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำหนดให้

$\Gamma = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\gamma+1}{\gamma-1}$ คือ ค่าอัตราส่วนมวล (mass ratio)

ρ_1 คือ ความหนาแน่นของแก๊สที่อยู่โดยรอบ (ambient gas)

ρ_2 คือ ความหนาแน่นของสลักพลาสมา (plasma slug)

γ คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ (specific heat ratio)

$\frac{dz}{dt}$ คือ ความเร็วช็อค (shock velocity)

B คือ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสในแท่งแอโนดซึ่งมีค่าเป็น $\frac{\mu_o I}{2\pi r}$

$\int_a^b \frac{B^2}{2\mu_o} 2\pi r dr$ คือ ขนาดของแรงโลเรนตซ์ที่กระทำกับกระแสพลาสมา

I คือ กระแสที่ไหลตามแท่งแอโนด

z คือ ตำแหน่งของผิวหน้าช็อค

a คือ รัศมีของแท่งแอโนด

b คือ ระยะห่างจากกึ่งกลางแท่งแอโนดไปยังขอบในของแท่งแคโทด

z_o คือ ความยาวของแท่งแอโนด

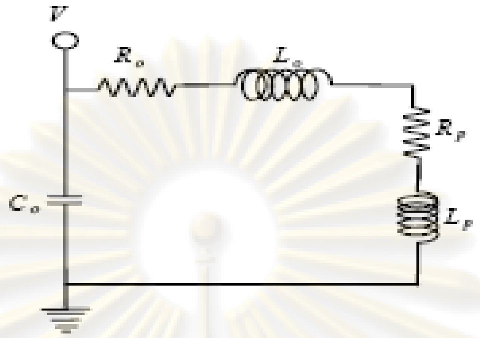
μ_o คือ ค่าความซาบซึมได้ของสุญญากาศ (magnetic permeability in vacuum)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการที่ 3.13 สามารถจัดรูปสมการเป็น

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{\left(\frac{\mu_o}{4\pi^2 \rho_1 (b^2 - a^2)} \frac{\Gamma}{\Gamma - 1} \ln\left(\frac{b}{a}\right)\right) I^2 - \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}{z} \tag{3.14}$$

พิจารณาวงจรของเครื่องพลาสมาโฟกัส ดังรูป



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงวงจรของเครื่องพลาสมาโฟกัส [17]

สำหรับกระแสภายในวงจรสามารถคำนวณโดยใช้ กฎของเคิร์ชฮอฟฟ์(Kirchoff's law) ซึ่งพิจารณาให้ผลรวมของความต่างศักย์ภายในวงจรมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น จากรูปที่ 3.5 จึงสามารถเขียนสมการได้ คือ

$$\frac{d}{dt}((L_o + L_p)I) + R_o I + R_p I = V_o - \int \frac{Idt}{C_o} \tag{3.15}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำหนดให้

L_o คือ ค่าความเหนี่ยวนำภายในวงจร

R_o คือ ค่าความต้านทานของวงจร

C_o คือ ค่าความจุไฟฟ้าของถังเก็บประจุภายในวงจร

V_o คือ ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวถังเก็บประจุ

I คือ กระแสภายในวงจร

R_P คือ ความต้านทานของพลาสมา

L_P คือ ค่าความเหนี่ยวนำของพลาสมาซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{\mu_o}{2\pi}\ln(\frac{b}{a})\frac{\Gamma-1}{\Gamma}z$

μ_o คือ ค่าความซาบซึมได้ของสุญญากาศ

จากสมการ ที่ 3.15 ซึ่งสมมติให้ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_o และ R_P มีค่าน้อยๆ เมื่อเทียบกับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_o และ L_P ดังนั้นจึงจัดรูปสมการที่ 3.15 ได้ดังนี้

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_o - \frac{\int Idt}{C_o} - \frac{\mu_o}{2\pi}\ln(\frac{b}{a})\frac{\Gamma-1}{\Gamma} I \frac{dz}{dt}}{L_o + \frac{\mu_o}{2\pi}\ln(\frac{b}{a})\frac{\Gamma-1}{\Gamma}z} \tag{3.16}$$

พิจารณาสมการที่ 3.14 และ 3.16 สามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปที่นอร์มัลไลซ์ (normalize) ได้เป็น

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} = \frac{\alpha^2 l^2 - (\frac{d\xi}{dt})^2}{\xi} \tag{3.17}$$

$$\frac{dl}{dt} = \frac{1 - \int l d\tau - \beta l \frac{d\xi}{d\tau}}{1 + \beta\xi} \tag{3.18}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำหนดให้

t คือ เวลาใด ๆ ที่ใช้สำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงของพลาสมาที่เกิดขึ้น

t_0 คือ เวลาลักษณะเฉพาะดิสชาร์จ(discharge characteristic time) มีค่าเป็น $\sqrt{L_o C_o}$

τ คือ ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างเวลากับเวลา t_0 มีค่าเป็น $\dfrac{t}{t_o}$

ξ คือ ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างการกระจัดที่ช็อคเคลื่อนที่กับความยาวของแท่งแอโนดที่ใช้สำหรับการทดลอง มีค่าเป็น $\dfrac{z}{z_o}$

$\dfrac{d\xi}{d\tau}$ คือ ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างความเร็วช็อคกับขนาดของความเร็ว $\dfrac{z_o}{t_o}$ มีค่าเป็น $\dfrac{dz}{dt}\Big/\dfrac{z_o}{t_o}$

$\dfrac{d^2\xi}{d\tau^2}$ คือ ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างความเร่งของช็อคกับขนาดของความเร่ง $\dfrac{z_o}{t_o^2}$ มีค่าเป็น $\dfrac{d^2z}{dt^2}\Big/\dfrac{z_o}{t_o^2}$

I_o คือ ค่ากระแสลัดวงจร (shot circuit current) ซึ่งมีค่าเป็น $V_o\sqrt{\dfrac{C_o}{L_o}}$

q คือ ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างประจุกับ $I_o t_o$ มีค่าเป็น $\dfrac{\int Idt \big/ C_o}{I_o t_o}$

l คือ ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างกระแสกับ I_o มีค่าเป็น $\dfrac{I}{I_o}$

$\dfrac{dl}{d\tau}$ คือ ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเทียบกับเวลากับ $\dfrac{I_o}{t_o}$ มีค่าเป็น $\dfrac{dI}{dt}\Big/\dfrac{I_o}{t_o}$

α มีค่าเท่ากับ $\dfrac{t_o}{t_a}$

β มีค่าเท่ากับ $\dfrac{L_a}{L_o}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาให้

t_a คือ เวลาลักษณะเฉพาะการขนส่งในแนวแกน (characteristic axial transit time)

L_a คือ ค่าความเหนี่ยวนำของเฟสตามแกน(inductance of the axial phase) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 3.19 และ 3.20 ตามลำดับ

$$t_a = \left(\frac{4\pi^2(b^2-a^2)}{\mu_o \ln(\frac{b}{a})}\frac{\Gamma-1}{\Gamma}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{z_o \rho_1^{\frac{1}{2}}}{I_o} \tag{3.19}$$

$$L_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\ln(\frac{b}{a})\frac{\Gamma-1}{\Gamma} z_o \tag{3.20}$$

สำหรับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างแอโนดและแคโทดภายในเครื่องพลาสมาโฟกัส คำนวณจากสมการ

$$V = L_p \frac{d}{dt}(I) + I\frac{d}{dt}(L_p) \tag{3.21}$$

เมื่อนอร์มัลไลซ์สมการที่ 3.21 สามารถจัดรูปสมการได้ใหม่คือ

$$v = \beta\xi \frac{dl}{dt} + \beta l \frac{d\xi}{dt} \tag{3.22}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับการคำนวณหาอุณหภูมิของพลาสมาในเฟสนี้ พบว่าค่าอุณหภูมิดังกล่าวแปรผันตรงกับความเร็วช็อค v_s [30] ดังนั้น อุณหภูมิของช็อคแสดงได้ดังสมการ คือ

$$T = \frac{M}{R}\frac{\gamma - 1}{(\gamma + 1)^2}\frac{v_s^2}{(1 + zeff)} \tag{3.23}$$

กำหนดให้

R คือ ค่าคงที่แก๊ส (gas constant)

M คือ มวลอะตอมของแก๊สที่ใช้สำหรับการแตกตัวเป็นพลาสมา

T คือ อุณหภูมิของพลาสมา (plasma temperature)

$zeff$ คือ ค่าประจุยังผลของไอออน (effective ionic charge)

สำหรับการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธดังกล่าว การสิ้นสุดเฟสนี้เกิดขึ้นเมื่อพลาสมาชีธเคลื่อนที่ถึงปลายแท่งแอโนดซึ่งเป็นการเริ่มต้นสู่เฟสถัดไป

แบบจำลองนี้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเฟสดังกล่าว สำหรับวิธีการคำนวณค่าต่างๆตามแบบจำลองขออธิบายในบทที่ 4

3.2.3 เฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี

หลังจากสิ้นสุดกระบวนการในเฟสตามแกน พลาสมาชีธดังกล่าวเคลื่อนที่เข้าสู่กึ่งกลางของแท่งแอโนด สำหรับแบบจำลองที่อธิบายการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสนี้ได้ใช้แบบจำลองสลัก

ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธเริ่มต้นด้วยการศึกษาความเร็วของผิวหน้าช็อคโดยการพิจารณาให้ความดันของแก๊สที่อยู่ด้านบนผิวของช็อคกระทำต่อผิวหน้าช็อคซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเร็วช็อค สามารถแสดงได้ตามสมการที่ 3.24 [30]

$$P = \frac{2}{\gamma + 1}\rho_1 v_s^2 \tag{3.24}$$

สำหรับความดันเนื่องจากแรงโลเรนตซ์ที่กระทำต่อกระแสของพลาสมา สามารถเขียนได้ดังสมการ คือ

$$P_m = \frac{B^2}{2\mu_o} = \frac{1}{2\mu_o}(\frac{\mu_o I}{2\pi r_p^2})^2(\frac{\Gamma - 1}{\Gamma}) \tag{3.25}$$

โดย r_p คือ รัศมีพิสตัน (piston radius) ซึ่งเป็นแผ่นกระแสของพลาสมาที่แสดงดังรูปที่ 3.7

แบบจำลองนี้สมมติให้ความดันของแก๊สด้านบนผิวช็อคกระทำต่อผิวหน้าช็อคมีค่าเท่ากับความดันเนื่องจากแรงโลเรนตซ์ที่กระทำต่อกระแสของพลาสมาดังนั้นความเร็วช็อคมีค่าตามสมการดังนี้

$$v_s = \frac{dr_s}{dt} = -(\frac{\mu_o(\gamma + 1)}{\rho_1})^{\frac{1}{2}}(\frac{\Gamma - 1}{\Gamma})^{\frac{1}{2}}\frac{I}{4\pi r_P} \tag{3.26}$$

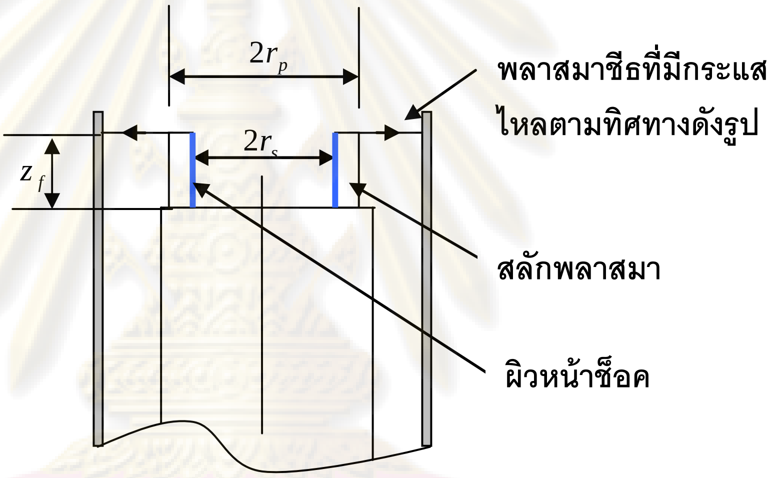
โดย r_s คือ รัศมีช็อค (shock radius) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาอัตราเร็วการยืดออกตามแนวแกน (axial elongation speed) ของพลาสมาซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วของช็อคตามสมการที่ 3.27 คือ

$$\frac{dz_f}{dt} = -\frac{2}{\gamma+1}\frac{dr_s}{dt} \tag{3.27}$$

โดย z_f คือ ความยาวของการบีบอัดเชิงรัศมี (length of radial compression)



รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี

พิจารณาความเร็วพิสตัน (piston velocity) คำนวณหาจากสมการดังต่อไปนี้ คือ

$$\frac{dr_P}{dt} = \frac{\frac{2}{\gamma+1}\frac{r_s}{r_P}\frac{dr_s}{dt} - \frac{r_P}{\gamma I}(1-\frac{r_s^2}{r_P^2})\frac{dI}{dt} - \frac{r_P}{z_f}(1-\frac{r_s^2}{r_P^2})\frac{dz_f}{dt}}{\frac{r-1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma}\frac{r_s^2}{r_P^2}} \tag{3.28}$$

สมการที่อธิบายการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสนี้ คือ สมการที่ 3.26 3.27 และ 3.28 ในส่วนถัดไปเป็นการพิจารณาสมการของวงจรเพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลภายในวงจร พบว่าค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในเฟสนี้ คือ

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi}\ln(\frac{b}{a})z_o + \frac{\mu_o}{2\pi}\ln(\frac{b}{r_P})z_f \tag{3.29}$$

จากกฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ สามารถแสดงสมการของวงจรได้ตามสมการดังนี้

$$\frac{d}{dt}((L_o + L)I) + R_o I + R_p I = V_o - \int\frac{Idt}{C_o} \tag{3.30}$$

สำหรับสมการที่ 3.30 กำหนดให้ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่ามากกว่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน ดังนั้น เมื่อแทนค่าสมการที่ 3.29 ลงในสมการที่ 3.30 แล้วจัดรูปจึงได้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเทียบกับเวลาตามสมการดังต่อไปนี้ คือ

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_o - \dfrac{\int Idt}{C_o} - \dfrac{\mu_o I}{2\pi}(\dfrac{\Gamma - 1}{\Gamma})\ln(\dfrac{b}{r_P})\dfrac{dz_f}{dt} + \dfrac{\mu_o I}{2\pi}(\dfrac{\Gamma - 1}{\Gamma})\dfrac{z_f}{r_P}\dfrac{dr_P}{dt}}{L_o + \dfrac{\mu_o}{2\pi}(\dfrac{\Gamma - 1}{\Gamma})\ln(\dfrac{b}{a})z_o + \dfrac{\mu_o}{2\pi}(\dfrac{\Gamma - 1}{\Gamma})\ln(\dfrac{b}{r_P})z_f} \tag{3.31}$$

ดังนั้น ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้วอิเล็กโทรดสามารถหาค่าตามสมการ คือ

$$V = \left[\left(\frac{\mu_o}{2\pi}\frac{\Gamma-1}{\Gamma}\right)\left(z_o\ln(\frac{b}{a}) + z_f\ln(\frac{b}{r_P})\right)\frac{dI}{dt}\right] + \left[\left(\frac{\mu_o}{2\pi}\frac{\Gamma-1}{\Gamma}\right)\left(\ln(\frac{b}{r_P})\frac{dz_f}{dt} - \frac{z_f}{r_P}\frac{dr_P}{dt}\right)I\right] \tag{3.32}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำหนดให้

$\frac{dr_s}{dt}$ คือ อัตราเร็วของช็อค (shock's speed)

$\frac{dr_P}{dt}$ คือ อัตราเร็วของพิสตัน (piston's speed)

$\frac{dz_f}{dt}$ คือ อัตราเร็วการยืดออกตามแนวแกน (axial elongation speed)

พิจารณาสมการที่ 3.26, 3.27, 3.28, 3.31 และ 3.32 สามารถนอร์มัลไลซ์แต่ละสมการได้ตามลำดับดังนี้

$$\frac{d\kappa_s}{dt} = -\frac{\alpha\alpha_1 l}{\kappa_P} \tag{3.33}$$

$$\frac{d\xi_f}{dt} = -\frac{2}{\gamma+1}\frac{d\kappa_s}{dt} \tag{3.34}$$

$$\frac{d\kappa_P}{dt} = \frac{\frac{2}{\gamma+1}\frac{\kappa_s}{\kappa_P}\frac{d\kappa_s}{dt} - \frac{\kappa_P}{\gamma l}(1-\frac{\kappa_s^2}{\kappa_P^2})\frac{dl}{dt} - \frac{\kappa_P}{\xi_f}(1-\frac{\kappa_s^2}{\kappa_P^2})\frac{d\xi_f}{dt}}{\frac{r-1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma}\frac{\kappa_s^2}{\kappa_P^2}} \tag{3.35}$$

$$\frac{dl}{dt} = \frac{1 - \int l d\tau - \beta_1 \ln(\frac{b/a}{\kappa_P}) l \frac{d\xi_f}{d\tau} + \beta_1 \frac{\xi_f l}{\kappa_P}\frac{d\kappa_P}{dt}}{1 + \beta + \beta_1 \ln(\frac{b/a}{\kappa_P})\xi_f} \tag{3.36}$$

$$v = \left[\left(\beta + \beta_1 \xi_f \ln(\frac{b/a}{\kappa_P})\right)\frac{dl}{d\tau}\right] + \left[\beta_1 l\left(\ln(\frac{b/a}{\kappa_P})\frac{d\xi_f}{d\tau} - \frac{\xi_f}{\kappa_P}\frac{d\kappa_p}{d\tau}\right)\right] \tag{3.37}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำหนดให้

k_s คือ ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างรัศมีช็อคกับรัศมีของแท่งแอโนดมีค่า เป็น r_s/a

k_P คือ ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างรัศมีพิสตันกับรัศมีของแท่งแอโนดมี ค่าเป็น r_p/a

ξ_f คือ ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างความยาวการบีบอัดเชิงรัศมีกับรัศมี ของแท่งแอโนดมีค่าเป็น z_f/a

$\frac{dk_s}{d\tau}$ คือ ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างอัตราเร็วของช็อคกับอัตราเร็ว $\frac{a}{t_o}$ มีค่าเป็น $\frac{dr_s}{dt}\Big/\frac{a}{t_o}$

$\frac{dk_P}{d\tau}$ คือ ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างอัตราเร็วพิสตันกับอัตราเร็ว $\frac{a}{t_o}$ มีค่าเป็น $\frac{dr_p}{dt}\Big/\frac{a}{t_o}$

$\frac{d\xi_f}{d\tau}$ คือ ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างอัตราเร็วการยืดออกตามแนวแกนกับ อัตราเร็ว $\frac{a}{t_o}$ มีค่าเป็น $\frac{dz_f}{dt}\Big/\frac{a}{t_o}$

α_1 มีค่าเป็น $\frac{t_a}{t_r}$

โดย t_r คือ เวลาลักษณะเฉพาะการขนส่งทางตามแนวรัศมี (characteristic radial transit time) ซึ่งมีค่าตามสมการที่ 3.38

$$t_r = \frac{z_o}{a}\left(\frac{(\gamma+1)((b^2/a^2)-1)}{4\ln(b/a)}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\Gamma-1}{\Gamma}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (3.38)$$

β_1 มีความสัมพันธ์กับ β ตามสมการดังนี้

$$\beta_1 = \beta\frac{a}{z_o\ln(\frac{b}{a})} \qquad (3.39)$$

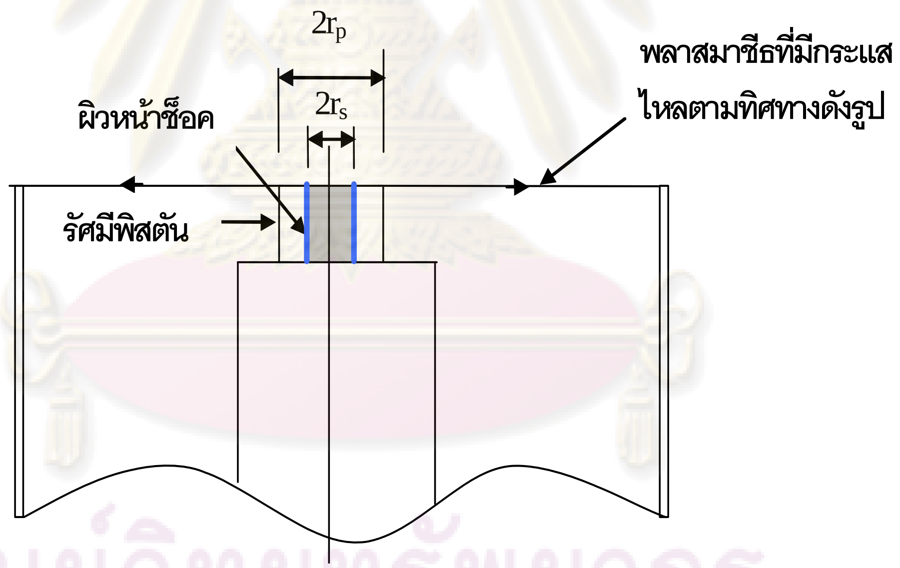
สำหรับการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสดังกล่าวสามารถแสดงแผนภาพดังรูปที่3.7

อุณหภูมิของพลาสมาในเฟสนี้สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.23 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

สำหรับการเคลื่อนที่ในเฟสนี้สิ้นสุดเมื่อผิวหน้าของช็อคซึ่งเคลื่อนที่เข้าในแนวรัศมีได้เคลื่อนที่ถึงกึ่งกลางของแท่งแอโนด

3.2.4 เฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมี

สำหรับการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสนี้เริ่มต้นโดยการให้ผิวหน้าช็อคสะท้อนออกจากกึ่งกลางของแท่งแอโนดแต่ให้กระแสของพลาสมาเคลื่อนที่เข้าหาผิวหน้าช็อคดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการที่ใช้ในการคำนวณซึ่งใช้แบบจำลองแบบเดียวกันเฟสเข้าหาภายในแนวรัศมีช็อค แต่พิจารณาให้ความเร็วของผิวหน้าช็อคขณะสะท้อนออกมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วของพิสตัน ดังนั้น สมการที่ 3.28 และ 3.35 จัดรูปใหม่ คือ

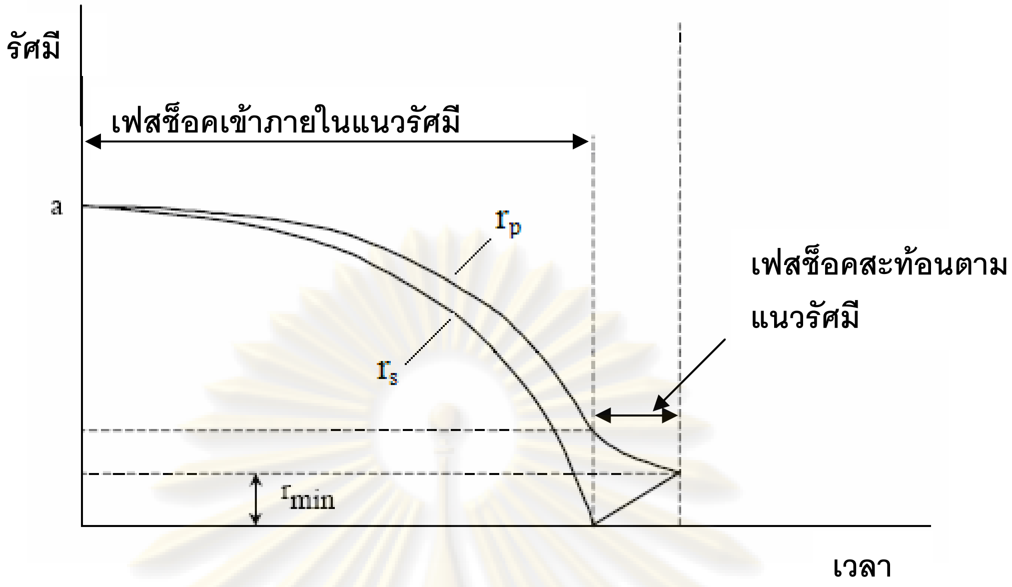
$$\frac{dr_P}{dt} = \frac{-\frac{r_P}{\gamma I}(1-\frac{r_s^2}{r_P^2})\frac{dI}{dt} - \frac{r_P}{z_f}(1-\frac{r_s^2}{r_P^2})\frac{dz_f}{dt}}{\frac{r-1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma}\frac{r_s^2}{r_P^2}} \tag{3.40}$$

$$\frac{d\kappa_P}{dt} = \frac{-\frac{\kappa_P}{\gamma l}(1-\frac{\kappa_s^2}{\kappa_P^2})\frac{dl}{dt} - \frac{\kappa_P}{\xi_f}(1-\frac{\kappa_s^2}{\kappa_P^2})\frac{d\xi_f}{dt}}{\frac{r-1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma}\frac{\kappa_s^2}{\kappa_P^2}} \tag{3.41}$$

สำหรับการคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้นภายในเฟสนี้สมการที่ 3.31และคำนวณศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดด้วยสมการที่ 3.32

สำหรับเฟสการเคลื่อนที่นี้สิ้นสุดเมื่อช็อคและพิสตันปะทะกันที่ตำแหน่งรัศมีมีค่าเท่ากับ $r_{\min}$ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.9 และเริ่มเข้าสู่กระบวนการในเฟสถัดไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง รัศมีพิสตัน, รัศมีช็อคที่เวลาตั้งแต่เริ่มต้นที่เฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมีจนสิ้นสุดเฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมี [29]

3.2.5 เฟสการแผ่รังสี

สำหรับการเคลื่อนที่ของพลาสชีธในเฟสนี้ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนตำแหน่งของพิสตัน[29] ในเฟสนี้พลาสมาได้ปลดปล่อยพลังงานและอนุภาคต่างๆออกมา

ในเฟสนี้ได้พิจารณาเฉพาะการเคลื่อนที่ของรัศมีพิสตัน สำหรับสมการที่อธิบายการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธในเฟสนี้แสดงได้ดังสมการที่ 3.42 [29]

$$\frac{dr_P}{dt} = \frac{\dfrac{-r_P}{\gamma I}\dfrac{dI}{dt} - \dfrac{1}{\gamma+1}\dfrac{r_P}{z_f}\dfrac{dz_f}{dt} + \dfrac{4\pi(\gamma-1)}{\mu\gamma z_f}\dfrac{r_P}{I^2}\dfrac{dQ}{dt}}{\dfrac{r-1}{\gamma}} \tag{3.42}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาผลรวมของกำลังที่ระบบได้รับ/สูญเสีย ซึ่งประกอบกำลังของการแผ่รังสีและกำลังความร้อนของพลาสมา โดยคำนวณตามสมการดังนี้

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_{joule}}{dt} + \frac{dQ_{rad}}{dt} \quad (3.43)$$

กำลังของการแผ่รังสีสามารถคำนวณได้จากการอินติเกรตผลรวมของความหนาแน่นกำลังในการแผ่รังสีซึ่งประกอบด้วย ความหนาแน่นกำลังของการแผ่รังสีแบบเบรมสตาลุง, รีคอมบิเนชัน และ แบบเส้น ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3.1, 3.2, 3.3 ภายในปริมาตรของพลาสมาโดย

$$\frac{dQ_{rad}}{dt} = -\int_{volume} (P_B + P_R + P_L) dV \quad (3.44)$$

สำหรับกำลังเนื่องจากความร้อนของพลาสมา แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{dQ_{joule}}{dt} = I^2 R \quad (3.45)$$

กำหนดให้

$\frac{dQ}{dt}$ คือ ผลรวมกำลังที่ระบบได้รับ/สูญเสีย

$\frac{dQ_{rad}}{dt}$ คือ กำลังเนื่องจากการแผ่รังสีของพลาสมา

$\frac{dQ_{joule}}{dt}$ คือ กำลังเนื่องจากความร้อนของพลาสมา

R คือ ความต้านทานของพลาสมาซึ่งคำนวณตามสมการ

$$R = \frac{1290(zeff)(z_f)}{\pi r_P^2 T^{\frac{3}{2}}} \quad (3.46)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราเร็วของการยืดออกตามแนวแกนซึ่งคำนวณดังสมการ คือ

$$\frac{dz_f}{dt} = \left[\frac{\mu_o}{4\pi^2(\gamma+1)\rho_1}\right]^{\frac{1}{2}} \frac{I}{r_P} \tag{3.47}$$

จากกฎเคิร์ชฮอฟฟ์สามารถหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเทียบกับเวลา ซึ่งแสดงตามสมการที่ 3.48 [29]

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_o - \frac{\int Idt}{C_o} - \frac{\mu_o I}{2\pi}\ln(\frac{b}{r_P})\frac{dz_f}{dt} + \frac{\mu I}{2\pi}\frac{z_f}{r_P}\frac{dr_P}{dt} - IR}{L_o + \frac{\mu}{2\pi}(z_o \ln(\frac{b}{a}) + z_f \ln(\frac{b}{r_P}))} \tag{3.48}$$

ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้วอิเล็กโทรดสามารถคำนวณตามสมการที่ 3.49 [29] โดย

$$V = \frac{\mu I}{2\pi}\left[\ln(\frac{b}{r_P})\frac{dZ_f}{dt} - \frac{Z_f}{r_P}\frac{dr_P}{dt}\right] + \frac{\mu I}{2\pi}\left[Z_f \ln(\frac{b}{r_P}) + z_o \ln(\frac{b}{a})\right]\frac{dI}{dt} + RI \tag{3.49}$$

พิจารณาให้พลาสมาเป็นระบบสมดุลเสมือน (quasi – equilibrium) และให้ความดันเนื่องจากแรงโลเรนตซ์เท่ากับความดันของพลาสมาแสดงตามสมการดังนี้[31]

$$N_e kT_e + N_i kT_i = \frac{\mu_o I^2}{8\pi^2 r_P^2} \tag{3.50}$$

กำหนดให้

N_e คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพลาสมา

N_i คือ ความหนาแน่นของไอออนในพลาสมา

T_e คือ อุณหภูมิของอิเล็กตรอนในหน่วยเคลวิน

T_i คือ อุณหภูมิของไอออนในหน่วยเคลวิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมมติให้พลาสมาในเฟสดังกล่าวมีความหนาแน่นสม่ำเสมอดังนั้น อุณหภูมิของอิเล็กตรอนเท่ากับอุณหภูมิของไอออนนั้นคือ $T_i = T_e$

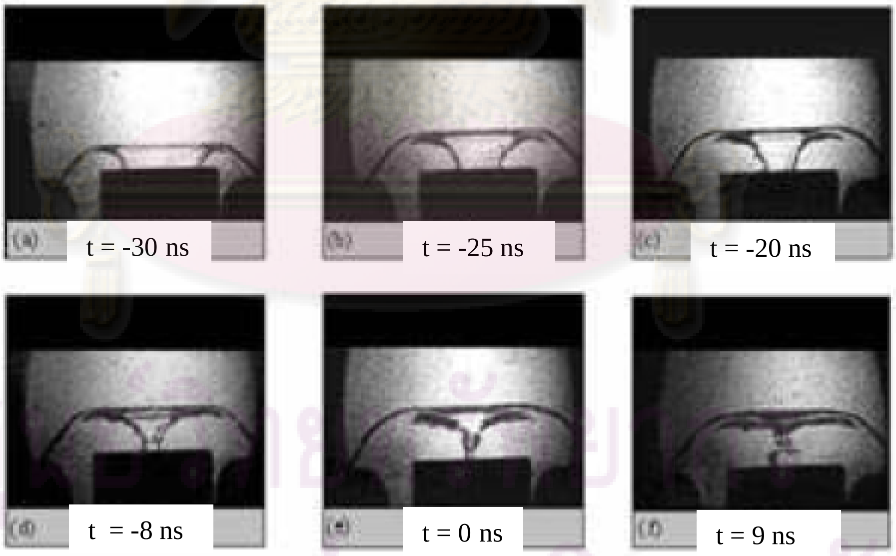
ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน N_e มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของไอออน N_i ตามสมการที่ 3.51[31]

$$N_e = (zeff)N_i \tag{3.51}$$

แทนค่าสมการที่ 3.50 ลงในสมการที่ 3.49 จัดรูปสมการเพื่อหาอุณหภูมิของพลาสมาจึงได้ดังสมการที่ 3.52

$$T = \frac{\mu_o I^2}{8\pi^2 k(1+zeff)N_i r_P^2} \tag{3.52}$$

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการทั้งหมด พลาสมาชีธเคลื่อนที่แผ่ขยายตามแนวแกนซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดในเฟสถัดไป



รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดงกระบวนการที่เกิดภายในเครื่องพลาสมาโฟกัสตั้งแต่เฟสการเคลื่อนที่เข้าหากันตามแนวรัศมีถึงเฟสการแผ่รังสี ของแก๊สดิวทีเรียมที่ความดัน 4 มิลลิบาร์ [32]

3.2.6 เฟสตามแกนแผ่ขยายคอลัมน์

การเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธในเฟสนี้ซึ่งพิจารณาให้เคลื่อนที่ไปตามแนวแกนและต่อเนื่องจากเฟสในหัวข้อที่ผ่านมา แบบจำลองที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของพลาสมาใช้แบบจำลองเดียวกับเฟสการเคลื่อนที่ตามแกน

แบบจำลองต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้นำมาใช้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสำหรับการดัดแปรให้กำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต สำหรับตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ความดันของแก๊สที่ใช้ในการทดลอง ความต่างศักย์ที่ให้แก่เครื่องพลาสมาโฟกัสและ ความยาวของแท่งแอโนด เป็นต้น

ในบทถัดไปขอกล่าวถึงวิธีการสำหรับจำลองปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับพลาสมาในเครื่องพลาสมาโฟกัสและวิธีการหาค่าตัวแปรต่างๆที่เหมาะแก่การกำเนิดรังสีชนิดนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ระบบของพลาสมาโฟกัส วิธีการจำลอง และอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์พลาสมา

บทนี้กล่าวถึง ระบบของพลาสมาโฟกัส (plasma focus system) วิธีการจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเครื่องพลาสมาโฟกัสเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสำหรับการกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตโดยนำค่าที่ได้จากการจำลองไปดัดแปรเพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากทฤษฎีกับผลที่ได้จากการทดลอง และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจวัดพลาสมาที่ได้จากการทดลอง

สำหรับหัวข้อแรกเป็นการอธิบายเกี่ยวกับเครื่องพลาสมาโฟกัสที่ใช้ในงานวิจัย โดยรายละเอียดต่างๆได้อธิบายดังต่อไปนี้

4.1 ระบบพลาสมาโฟกัส

งานวิจัยในครั้งนี้ได้ศึกษากระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นภายในเครื่องพลาสมาโฟกัส ดังนั้น จุดเริ่มต้นของงานวิจัยนี้ คือ การเข้าใจระบบปฏิบัติการของเครื่องพลาสมาโฟกัสที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับเครื่องพลาสมาโฟกัสชนิด ยูเอ็นยู/ไอซีทีพี เป็นเครื่องที่ใช้ในงานวิจัย โดยเครื่องดังกล่าวมีขนาดเล็ก สามารถประจุพลังงานได้ในช่วง 1-15 กิโลจูล [32]

พิจารณาส่วนประกอบต่างๆของระบบพลาสมาโฟกัสซึ่งแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆได้ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.1ระบบจ่ายพลังงาน

ในระบบนี้ประกอบด้วยกัน 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ทำหน้าที่ในการควบคุมให้สามารถจ่ายศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่ถังเก็บประจุขนาด 30 ไมโครฟารัด (microfarad: μF) สำหรับศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของระบบที่สามารถจ่ายเข้าสู่เครื่องพลาสมาโฟกัสมีค่าเท่ากับ 15 กิโลโวลต์ และส่วนที่ทำหน้าที่ในการแปลงไฟฟ้าซึ่งแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับที่มีศักย์ต่ำไปสู่ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีศักย์สูงเพื่อส่งพลังงานไปยังถังเก็บประจุ

4.1.2 ระบบแก๊สและสุญญากาศ

สำหรับระบบนี้ทำหน้าที่ควบคุมความดันของแก๊สที่ไหลเข้าสู่เครื่องพลาสมาซึ่งประกอบด้วย ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) มานอมิเตอร์ (manometer) วาวล์ควบคุมความดัน (valves working) และถังบรรจุแก๊ส (gas container) เป็นต้น

4.1.3 ระบบประจุพลังงาน

สำหรับระบบนี้ ประกอบด้วยถังเก็บประจุขนาด 30 ไมโครฟารัด ซึ่งสามารถทนต่อความต่างศักย์ได้สูงสุดถึง 20 กิโลโวลต์

4.1.4 ระบบดิสชาร์จ

การแตกตัวของแก๊สภายในภาชนะสุญญากาศต้องอาศัยพลังงานที่สะสมในถังเก็บประจุและถ่ายโอนพลังงานดังกล่าวเข้าสู่ภายในภาชนะสุญญากาศ ดังนั้น จึงอาศัยหน่วยทริกเกอร์ (trigger units) ซึ่งทำหน้าที่จุดระเบิดในช่องว่างประกาย (spark gap) เพื่อถ่ายโอนพลังงานเข้าสู่ระบบ สำหรับช่องว่างประกายที่ใช้ในระบบปฏิบัติการ คือ ช่องว่างประกายสุญญากาศ (vacuum spark gap) โดยรายละเอียดดังกล่าวได้ อธิบายไว้ในภาคผนวก ข.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.5 ระบบตรวจวัด

สำหรับระบบนี้ทำหน้าที่ตรวจจับผลที่ได้จากการทดลอง โดยในงานวิจัยได้ใช้อุปกรณ์ตรวจวัด ได้แก่ โรว์โกว์สกีคอยล์ (Rowgowski coil) โพรบวัดความต่างศักย์สูง (High voltage probe) และอุปกรณ์ตรวจจับรังสีซึ่งประกอบด้วย ซิลิคอนพินไดโอด BPX 65 และ โฟโตไดโอด SXUV100 สำหรับรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ตรวจวัดได้อธิบายในหัวข้อการตรวจวิเคราะห์พลาสมา

4.1.6 ระบบแสดงผล

การแสดงผลที่ได้จากการทดลองได้ใช้เครื่องออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ซึ่งเป็น เครื่องเทกโทรนิกส์ (Tektronix) รุ่น TDS 3034 และ TDS 3054 ซึ่งแสดง ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ตรวจจับกับเวลา

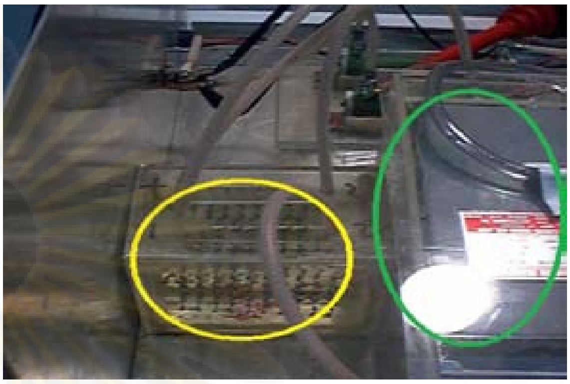
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.1 ระบบของเครื่องพลาสมาโฟกัสที่มีช่องว่างประกาย
แบบสุญญากาศซึ่งอยู่ในกรอบวงกลมสีเหลือง

จากรูปที่ 4.1 ระบบดังกล่าวประกอบด้วยถังเก็บประจุสีฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งวางอยู่ด้านล่างภาชนะสุญญากาศโดยขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายในภาชนะดังกล่าวได้เชื่อมต่อกับถังเก็บประจุโดยผ่านทางช่องว่างประกายแบบสุญญากาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับระบบจ่ายพลังงานซึ่งได้อธิบายดังหัวข้อที่ 4.1.1 สามารถแสดงดังรูปที่ 4.2



ก ข

รูปที่ 4.2 ก ส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ถังเก็บประจุ

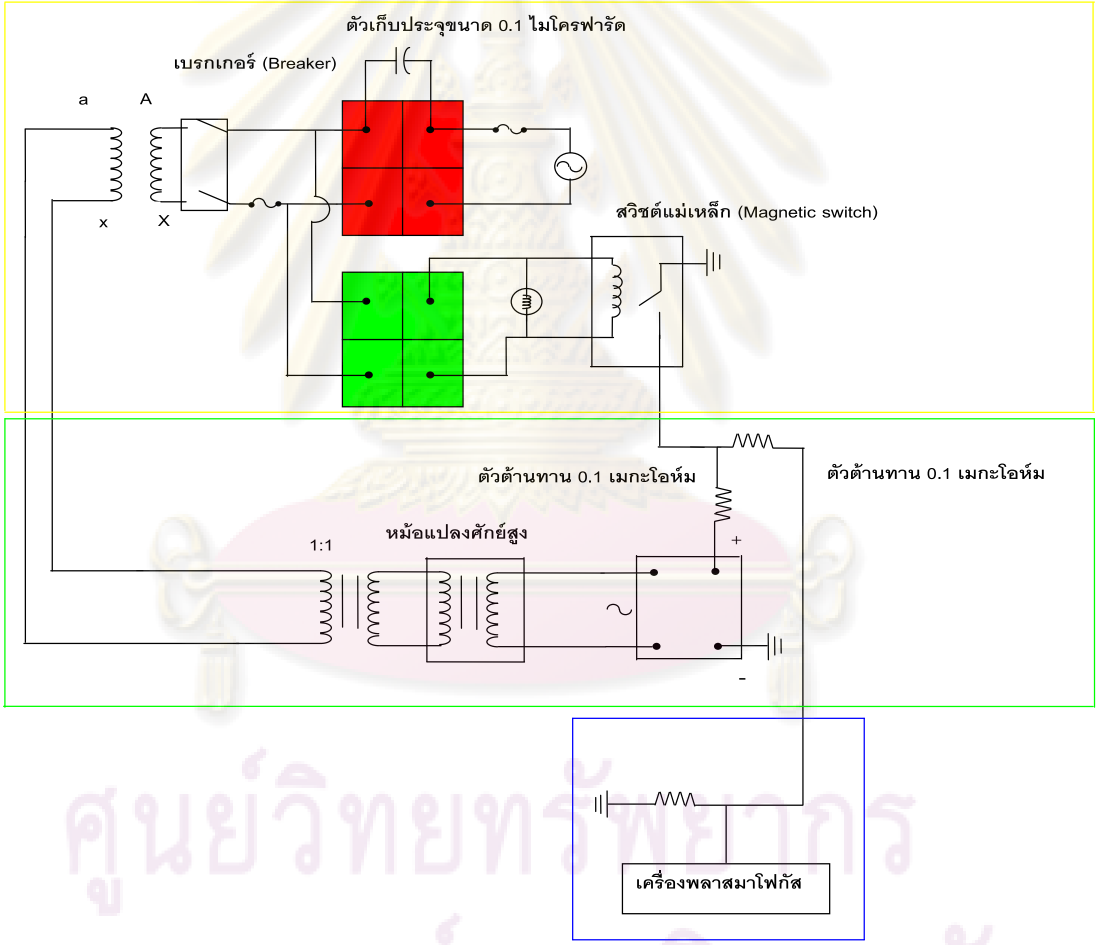
ข ส่วนที่ทำหน้าที่ในการแปลงไฟฟ้าซึ่งแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีศักย์สูงเพื่อส่งไปเก็บสะสมที่ถังเก็บประจุ

พิจารณาส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าดังรูปที่ 4.2 ก สำหรับการปฏิบัติการ เริ่มต้นด้วยการเปิดสวิตซ์สีแดงสวิตซ์เพื่อทำให้วงจรทั้งหมดเริ่มทำงาน สำหรับสวิตซ์สีเขียวทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างระบบจ่ายพลังงานกับถังเก็บประจุ ถ้าปิดสวิตซ์สีเขียวแล้วกระแสไฟฟ้าจะไม่สามารถไหลผ่านไปยังถังเก็บประจุ หลังจากที่วงจรควบคุมเริ่มทำงานขั้นตอนต่อมาคือ ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ถังเก็บประจุให้ได้ตามต้องการโดยทำการปรับค่าที่อุปกรณ์ตัวปรับค่ากระแสสลับ (vary alternating current: variac) ซึ่งแสดงด้วยปุ่มหมุนสีดำดังรูป ก ทำการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์จนได้ค่าศักย์ที่ตกคร่อมถังเก็บประจุตามที่ต้องการ จากนั้นจึงดิสชาร์จด้วยการกระตุ้นช่องว่างประกายเพื่อให้พลังงานทั้งหมดที่ถูกเก็บไว้ส่งไปยังเครื่องพลาสมาโฟกัส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

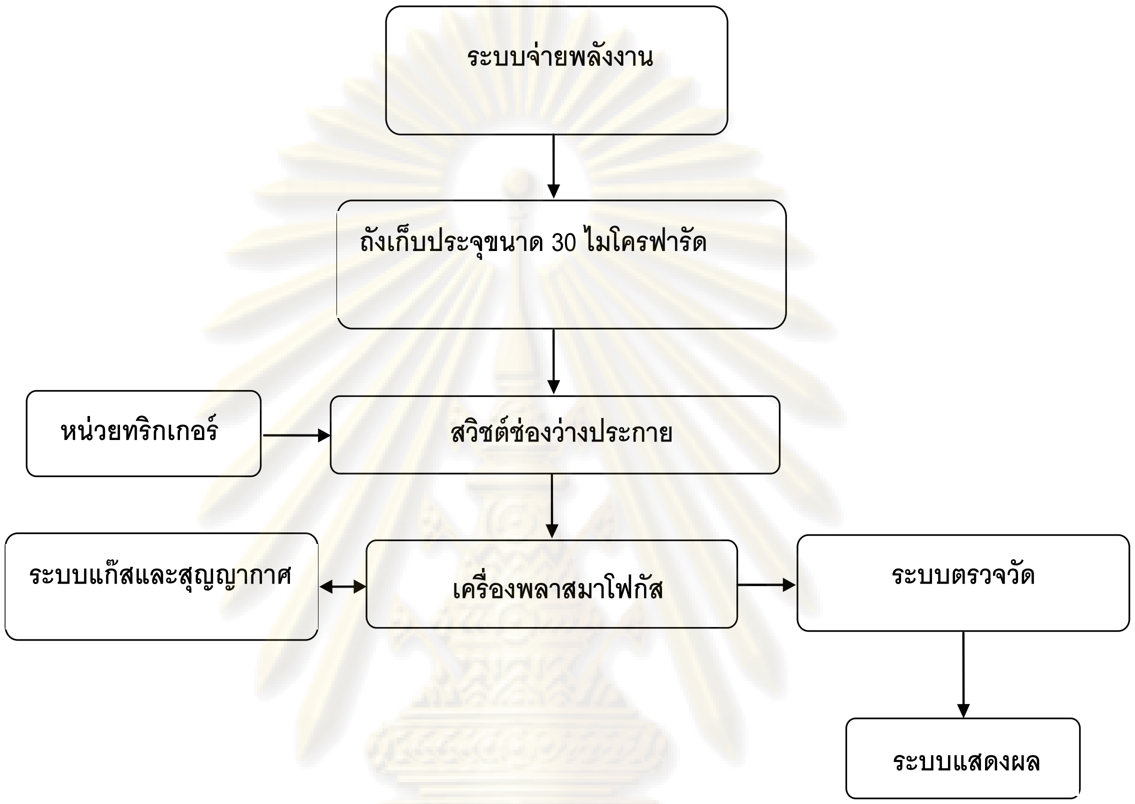
พิจารณารูปที่ 4.2 ข คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ในการแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยหม้อแปลงศักย์สูง (high voltage transformer) ซึ่งแสดงด้วยวงกลมสีเขียว โดยทำหน้าที่แปลงศักย์ไฟฟ้าจากศักย์ต่ำให้มีศักย์ไฟฟ้าที่สูง ก่อนผ่านวงจรไดโอดซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อไปสะสมยังถังเก็บประจุ โดยแสดงรูปดังกล่าวด้วยวงกลมสีเหลือง

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อทำการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันสามารถแสดงแผนผังวงจรดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนผังวงจรระบบจ่ายพลังงานซึ่งต่อเข้ากับเครื่องพลาสมาโฟกัส โดยกรอบสีเหลือง คือ ส่วนควบคุมการจ่ายไฟฟ้า กรอบสีเขียว คือ ส่วนที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้า สุดท้ายกรอบสีน้ำเงินคือ เครื่องพลาสมาโฟกัส

พิจารณาระบบทั้งหมดของพลาสมาโฟกัส สามารถแสดงการทำงานเชื่อมโยงกันได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพแสดงโครงสร้างของระบบเครื่องพลาสมาโฟกัส

จากรูปที่ 4.4 สามารถอธิบายโดย เริ่มจาก ระบบแก๊สและสุญญากาศได้ควบคุมความดันภายในเครื่องพลาสมาโฟกัสจนได้ความดันที่ใช้สำหรับปฏิบัติการ ขั้นตอนถัดไป คือ ทำการจ่ายพลังงานจากระบบจ่ายพลังงานไปยังถังเก็บประจุจนได้ค่าความต่างศักย์ตามที่ต้องการ แล้วทำการกระตุ้นสวิตช์ช่องว่างประกายด้วยหน่วยทริกเกอร์เพื่อทำให้พลังงานที่ถูกสะสมดังกล่าวสามารถจ่ายเข้าสู่เครื่องพลาสมาโฟกัส สำหรับปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นภายในเครื่องพลาสมาโฟกัสสามารถตรวจวัดด้วยระบบตรวจวัดและสามารถแสดงผลที่เกิดขึ้นภายในเครื่องพลาสมาได้โดยระบบแสดงผล

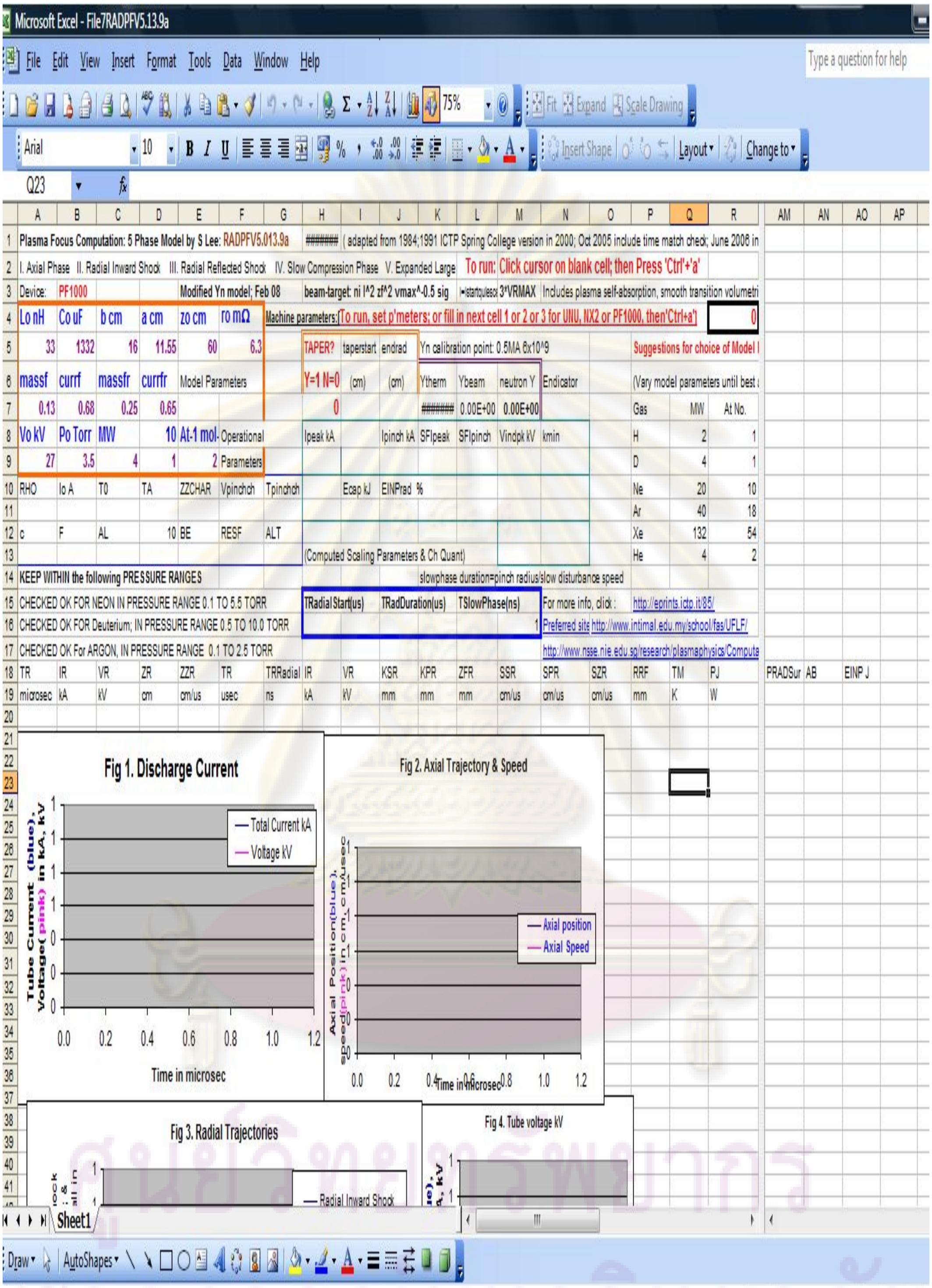
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับหัวข้อถัดไปคือ การศึกษาแบบจำลองของพลาสมาด้วยโปรแกรมปัจจุบันที่สร้างขึ้นโดย ศาสตราจารย์ ซิง ลี (Prof Sing Lee)

4.2 ระเบียบวิธีการจำลองโดยใช้โปรแกรม RADPF05.13.9b (Simulation Method with RADPF05.13.9b)

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจำลองปรากฏการณ์ของเครื่องพลาสมาโฟกัสซึ่งปัจจุบันได้มีโปรแกรมสำเร็จรูปที่สามารถนำมาใช้ โดยสามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ต้องการและแสดงผลออกมาทางโปรแกรมเอกซ์เซล (Excel) สำหรับโปรแกรมการจำลองดังกล่าวได้รับการพัฒนาจากศาสตราจารย์ ซิง ลี[33] โดยสามารถแสดงดังรูปที่ 4.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 แผนภาพแสดงระบบปฏิบัติการ การจำลองตามแบบจำลองที่ใช้ในเครื่องพลาสมาโฟกัสซึ่งพัฒนาโดย ศาสตราจารย์ ซิง ลี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาโปรแกรมการจำลองของเครื่องพลาสมาโฟกัสซึ่งประกอบด้วยตัวแปรต่างๆ ดังนี้ 1. ตัวแปรของเครื่องพลาสมาโฟกัส ประกอบด้วย ค่าความจุไฟฟ้าของถังเก็บประจุ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจร ค่าความต้านทานภายในวงจร ระยะห่างจากกึ่งกลางของแท่งแอโนดไปยังขอบในของแท่งแคโทด ความยาวของแท่งแอโนดและรัศมีของแท่งแอโนด เป็นต้น 2. ตัวแปรที่ใช้สำหรับปรับค่าให้ผลจากการทดลองมีความสอดคล้องกับโปรแกรมซึ่งมีดังต่อไปนี้

f_m คือ เศษส่วนของมวลที่เคลื่อนที่กวาดตามแนวแกน
(fraction of mass swept down the tube in the axial direction)

f_c คือ เศษส่วนของกระแสไหลในพลาสมา
(fraction of current flowing in plasma)

f_{mr} คือ เศษส่วนของมวลในเฟสรัศมี
(fraction of mass in radial phase)

จากแบบจำลองดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของพลาสมาภายในเครื่องพลาสมาโฟกัส ได้แก่ อุณหภูมิพลาสมา พลังงานของรังสีที่มาจากแหล่งกำเนิด ความเข้มของนิวตรอน เป็นต้น

วิธีการจำลองเพื่อหาสมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นโดยการนำผลการทดลองที่ได้จากการตรวจจับสัญญาณระหว่างกระแส กับ เวลา ซึ่งเป็นสัญญาณที่นำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ เพื่อทำให้สัญญาณของกระแสที่ได้จากการทดลองกับสัญญาณของกระแสที่ได้จากการคำนวณตรงกัน จากนั้นจึงทราบปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดโฟกัสของพลาสมาได้

พิจารณาแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรมของ ศาสตราจารย์ ซิง ลี แบ่งการจำลองดังกล่าวเป็น 5 เฟส ซึ่งได้กล่าวไว้ที่หัวข้อการเคลื่อนที่ของพลาสมาโดยให้ค่าต่างๆ มีความสัมพันธ์กับ เศษส่วนของมวลที่เคลื่อนที่กวาดตามแนวแกน, เศษส่วนของกระแสไหลในพลาสมา, เศษส่วนของมวลในเฟศรัศมี [29] ตามสมการที่ 4.1, 4.2, 4.3

$$t_a = \left(\frac{4\pi^2 f_m (b^2 - a^2)}{\mu_o \ln(\frac{b}{a})}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{z_o \rho_1^{\frac{1}{2}}}{I_o f_c} \tag{4.1}$$

$$L_a = \frac{\mu_o f_c}{2\pi} \ln(\frac{b}{a}) z_o \tag{4.2}$$

$$t_r = \frac{z_o}{a} \left(\frac{(\gamma+1)((b^2/a^2)-1)}{4\ln(b/a)}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{f_m}{f_{mr}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{4.3}$$

โดยตัวแปรต่างที่อยู่ในสมการที่ 4.1, 4.2, 4.3 ได้ถูกอ้างอิงไว้ในบทที่ 3

กระแสของพลาสมา I_P ที่ไหลภายในภาชนะสุญญากาศซึ่งแปรผันตรงกับกระแสของวงจร มีค่าตามสมการดังนี้

$$I_P = f_c I \tag{4.4}$$

สำหรับการใช้โปรแกรมดังกล่าวสามารถปรับเปลี่ยนค่าเศษส่วนต่างๆ ให้สัญญาณที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองตรงกัน หลังจากปรับค่าได้ตามที่ต้องการจึงสามารถหาผลต่างๆที่ได้จากพลาสมา

ในการจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยโปรแกรมดังกล่าว มีข้อจำกัดที่ถูกควบคุมด้วยเงื่อนไขเนื่องจากเวลาที่แสดงสมบัติเฉพาะของเฟสตามแกนกับเฟสตามแนวรัศมีซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
485 If ALT > 0.68 Then GoTo 500

Stop
Rem WARNING! Total TRANSIT TIME (axial + radial) MAY BE TOO LONG COMPARED TO effective DISCHARGE Drive TIME
Rem  FOLLOWING ACTION RECOMMENDED:
Rem                              REDUCE FILL PRESSURE  OR
Rem                              INCREASE CHARGE VOLTAGE  OR
Rem                              SHORTEN AXIAL LENGTH
Rem  It may also be necessary to check that you have not unreasonably reduced the value of C or L or
Rem  unreasonably increased the value of radius or length
Rem You may attempt to OVER-RIDE this stop; go to run; continue

Rem  or Click on red cross on top right hand corner to get back to spread sheet
Rem You may attempt to OVER-RIDE this stop; go to run; continue

488 If ALT > 0.65 Then GoTo 500

Stop
Rem WARNING! Total TRANSIT TIME (axial + radial) MAY BE TOO LONG COMPARED TO effective DISCHARGE Drive TIME
Rem  FOLLOWING ACTION RECOMMENDED:
Rem                              REDUCE FILL PRESSURE  OR
Rem                              INCREASE CHARGE VOLTAGE  or
Rem                              SHORTEN AXIAL LENGTH
Rem  It may also be necessary to check that you have not unreasonably reduced the value of C or L or
Rem  unreasonably increased the value of radius or length
Rem You may attempt to OVER-RIDE this stop; go to run; continue
Rem  or Click on red cross on top right hand corner to get back to spread sheet
```

รูปที่ 4.6 แผนภาพที่แสดงขีดจำกัดของการดำเนินการซึ่งโปรแกรมดังกล่าวต้องการลดความดันหรือเพิ่มศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุหรือลดขนาดความยาวของแท่งแอโนด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนสำหรับหาค่าตัวแปรเศษส่วนต่างๆ มีดังนี้

1. กำหนดให้ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ V_o และความยาวของแท่งแอโนด z_o และความดันที่ใช้ปฏิบัติการในหน่วย มิลลิบาร์ นำค่าดังกล่าวใส่ในโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณ

2. พิจารณาหาค่าความเหนี่ยวนำ L_o ในหน่วยนาโนเฮนรี (nano Henry: nH) และเศษส่วนต่างๆเพื่อทำให้ผลการทดลองกับโปรแกรม

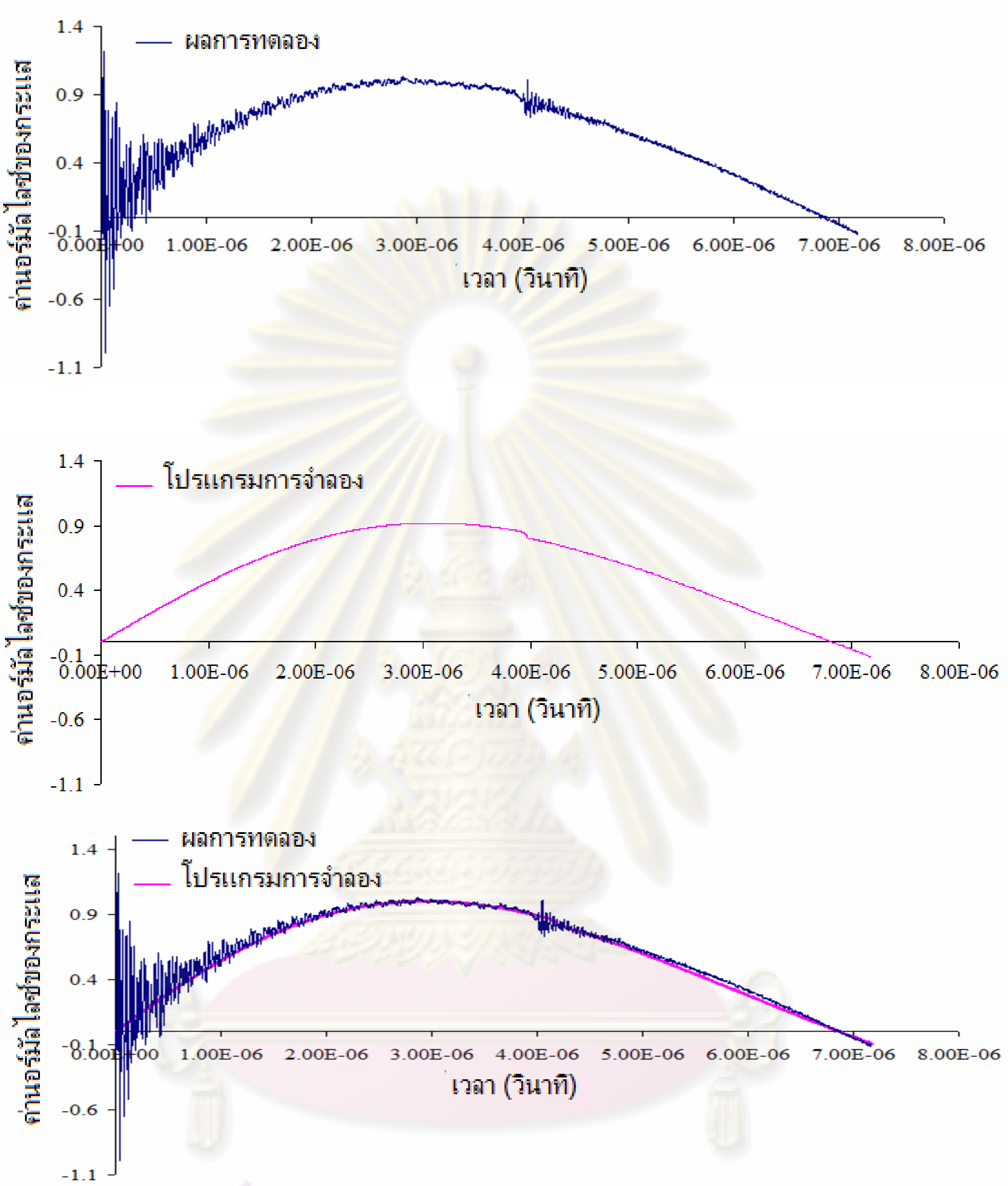
สำหรับค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมดังกล่าวสามารถแสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งได้ทำการฟิตกราฟระหว่างกระแสกับเวลาที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงดังกราฟที่ 4.5 และ กราฟที่ภาคผนวก ค.1, ค.2, ค.3

ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองที่ได้โดยการปรับค่าตัวแปรต่างๆและแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาแล้วนำไปเปรียบเทียบกับการทดลอง

ความดัน	z_o = 7.5 เซนติเมตร V_o = 6.5 กิโลโวลต์				z_o = 9.0 เซนติเมตร V_o = 8.0 กิโลโวลต์				z_o =16.0 เซนติเมตร V_o =12.5 กิโลโวลต์			
	L_o	f_m	f_c	f_{mr}	L_o	f_m	f_c	f_{mr}	L_o	f_m	f_c	f_{mr}
0.5	140	0.090	0.480	0.15	140	0.091	0.550	0.150	140	0.100	0.560	0.150
1.0	140	0.093	0.600	0.15	140	0.091	0.660	0.150	140	0.100	0.700	0.200
1.5	140	0.095	0.651	0.15	140	0.066	0.690	0.150	140	0.100	0.770	0.150
2.0	-	-	-	-	140	0.065	0.61	0.15	140	0.100	0.850	0.150
2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

เมื่อได้ค่าต่างๆแล้วพบว่ากราฟที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมของ ซิง ลี และกราฟที่ได้จากการทดลองสามารถฟิตให้ตรงกันซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาที่ได้จากโปรแกรมการจำลองของศาสตราจารย์ ซิง ลี กับผลการทดลองที่ความดัน 0.5 มิลลิบาร์ ความต่างศักย์ 12.5 กิโลโวลต์ และความยาวของแท่งแอโนดเป็น 16 เซนติเมตร ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการจำลองด้วยโปรแกรมดังกล่าวพบว่าสามารถทำการเทียบผลได้บางความดันเนื่องจากที่ความดันดังกล่าวมีผลต่อการเกิดโฟกัสของพลาสมา

เมื่อพิจารณาถึงโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองพบว่าโปรแกรมดังกล่าวมีทั้งข้อดีและข้อเสียซึ่งแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของโปรแกรมที่พัฒนาจากศาสตราจารย์ ซิง ลี

ข้อดี	ข้อเสีย
1.สามารถปรับเปลี่ยนค่าเศษส่วนต่างๆซึ่งทำให้สอดคล้องกับผลการทดลอง	1. โปรแกรมดังกล่าวไม่สามารถทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นก่อนทำการทดลองได้เนื่องจาก ต้องรู้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาเพื่อนำมาใช้เทียบค่าให้ผลดังกล่าวตรงกัน
2. สามารถทราบถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของพลาสมาดังกล่าวได้ เช่น อุณหภูมิพลาสมา พลังงานจากการแผ่รังสีของพลาสมา เป็นต้น	2. ในการทดลองจริงพบว่าที่บางความดันมีการเกิดโฟกัส แต่จากโปรแกรมพบว่าที่ความดันดังกล่าวไม่สามารถดำเนินการได้เนื่องจากไม่เกิดโฟกัสของพลาสมา
3. โปรแกรมดังกล่าวสะดวกต่อการใช้งาน	

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมดังกล่าวสามารถใช้งานกับการจำลองปรากฏการณ์ของพลาสมาได้ แต่โปรแกรมดังกล่าวไม่สามารถทำนายผลที่เกิดขึ้นก่อนทำการทดลองได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้โปรแกรมดังกล่าวหาจุดเหมาะสมเพื่อดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสให้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตของเครื่องพลาสมาโฟกัส

ปัญหาที่เกิดขึ้นจึงนำไปสู่การปรับเปลี่ยนแบบจำลองและทำการเขียนโปรแกรมการคำนวณเพื่อใช้ทำนายหาค่าที่เหมาะสมและนำไปดัดแปรเพื่อทำให้เครื่องพลาสมาโฟกัสขนาดเล็กสามารถแผ่รังสีดังกล่าวซึ่งอธิบายในหัวข้อถัดไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 วิธีการจำลอง (Simulation Method)

ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ดัดแปรเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตซึ่งถูกอธิบายในบทที่ 3 สำหรับหัวข้อนี้ขอกล่าวถึงวิธีการจำลองของพลาสมาในเฟสต่างๆ โดย พิจารณาเฉพาะเฟสที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของพลาสมา ได้แก่ 1.เฟสตามแกน 2.เฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี 3.เฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมี 4.เฟสการแผ่รังสี 5. เฟสตามแกนแผ่ขยายตามคอลัมน์ รายละเอียดสำหรับการจำลองในเฟสต่างๆซึ่งอธิบายดังต่อไปนี้

4.3.1 เฟสตามแกน

สำหรับการจำลองที่เกิดขึ้นในเฟสนี้เริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบ (boundary condition) ซึ่งมาจากทฤษฎีการเคลื่อนที่ของพลาสมา [29,30] โดย

$$\tau = 0,\ \xi = 0,\ \frac{d\xi}{d\tau} = 0,\ q = 0,\ l = 0,\ \frac{dl}{d\tau} = 1 \text{ และ } \frac{d^2\xi}{d\tau^2} = \alpha\sqrt{2/3}$$

พิจารณาค่าต่างๆซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 สำหรับการเคลื่อนที่ของพลาสมาที่เวลาเริ่มต้นให้มีค่าเป็นศูนย์ซึ่งพบว่าพลาสมาชีธดังกล่าวเริ่มต้นอยู่ที่ตำแหน่งฐานระหว่างขั้วอิเล็กโทรดซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5 ในบทที่ 3 และพบว่าความเร็วของพลาสมาที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์ พิจารณาเริ่มต้นพบว่าประจุดังที่สะสมในถังเก็บประจุไม่ได้ไหลเข้าสู่วงจรจึงส่งผลทำให้กระแสภายในวงจรมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น ค่านอร์มัลไลซ์ของเวลา τ ค่านอร์มัลไลซ์ของการกระจัด ξ ค่านอร์มัลไลซ์ความเร็ว $\frac{d\xi}{d\tau}$ ค่านอร์มัลไลซ์ของประจุ q และค่านอร์มัลไลซ์กระแส l มีค่าเป็นเป็นศูนย์

อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเทียบกับเวลาในเฟสนี้สามารถแสดงดังสมการที่ 3.18 พบว่าเมื่อแทนค่าต่างลงในสมการพบว่าที่เวลาเริ่มต้น ค่านอร์มัลไลซ์อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแส $\frac{dl}{d\tau}$ มีค่าเป็น 1

ความเร่งที่จุดเริ่มต้นเกิดจากแรงโลเรนตซ์กระทำกับพลาสมาชีธส่งผลให้ เมื่อแทนต่างๆ ลงในสมการที่ 3.17 พบว่า ค่านอร์มัลไลซ์ของความเร่ง $\frac{d^2\xi}{d\tau^2}$ มีค่าเป็น $\alpha\sqrt{2/3}$

พิจารณาค่า α ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างเวลาลักษณะเฉพาะของการดิสชาร์จ t_o ต่อเวลาลักษณะเฉพาะการขนส่งในแนวแกน t_a พบว่า α แปรผกผันกับ $\frac{\Gamma - 1}{\Gamma}$ โดย Γ คือ อัตราส่วนมวล

เมื่อแทนค่า t_a ตามสมการที่ 3.19 พบว่า

$$\alpha = \frac{t_o}{t_a} = (\frac{\Gamma}{\Gamma - 1})^{\frac{1}{2}} \left[\frac{t_o}{z_o (4\pi^2 (\frac{b^2}{a^2} - 1))^{\frac{1}{2}}} \right] \frac{I_o}{a} \mu_o \ln(\frac{b}{a}) \frac{1}{\sqrt{\rho_1}} \qquad 4.5$$

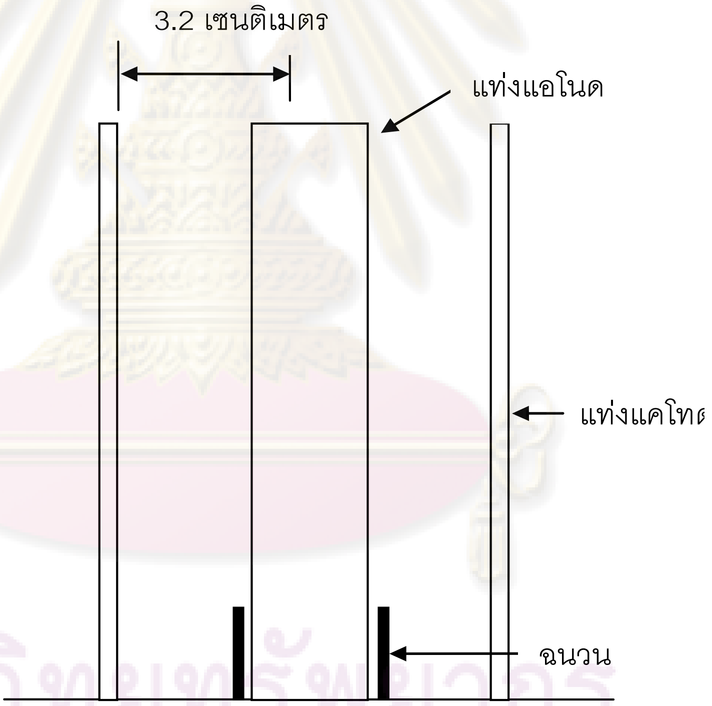
จากสมการที่ 4.5 พบว่าเมื่อความดันของแก๊สที่ใช้สำหรับกำเนิดพลาสมาเปลี่ยนแปลง ค่าอัตราส่วนมวลมีการเปลี่ยนแปลงตามความดันซึ่งพิจารณาโดยการสร้างเส้นกราฟของกระแสที่นอร์มัลไลซ์ ณ เวลาต่างๆ แล้วนำเส้นกราฟนั้นมาเทียบกับเส้นกราฟของกระแสที่ได้จากการทดลองซึ่งกราฟดังกล่าวต้องถูกนอร์มัลไลซ์เช่นกัน โดยปรับค่าอัตราส่วนมวลซึ่งทำให้กราฟระหว่างการคำนวณกับการทดลองทับเป็นเส้นเดียวกันจึงได้ค่าดังกล่าว แต่วิธีการดังกล่าว มีความยุ่งยากเพราะต้องทำการพิจารณาเส้นกราฟทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการพิจารณาสร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าอัตราส่วนมวล

จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มความดันของแก๊สภายในภาชนะสุญญากาศ ค่าของกระแสที่นอร์มัลไลซ์ซึ่งได้จากการทดลองดังรูปที่ 4.7 มีค่าน้อยลง และตำแหน่งของการเกิดโฟกัสซึ่งดูได้จากการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับกระแสที่นอร์มัลไลซ์มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงพิจารณาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่นอร์มัลไลซ์กับความดันในระบบปฏิบัติการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

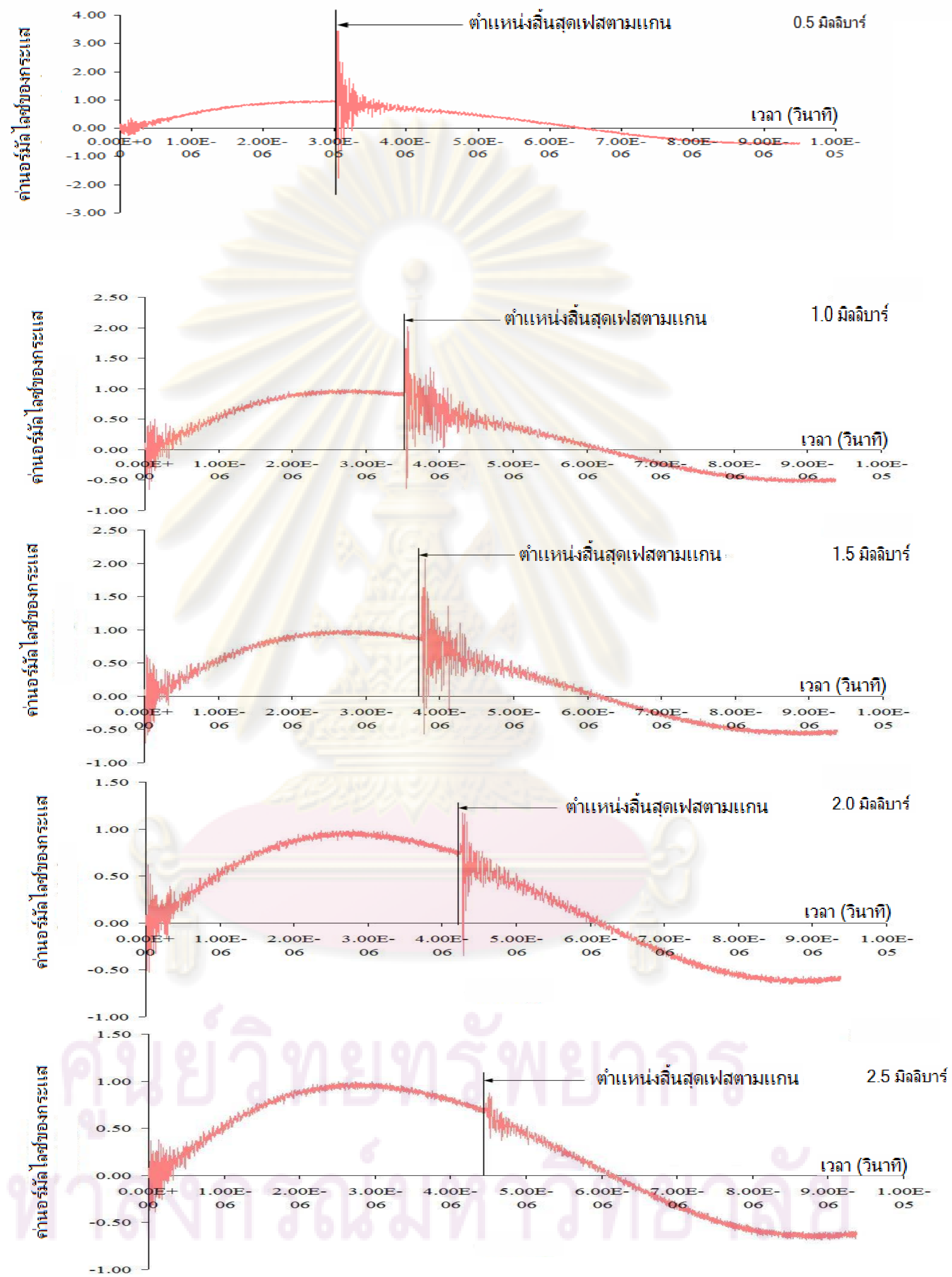
สำหรับการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความดันซึ่งพิจารณาให้อยู่ในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณากราฟระหว่างกระแสที่นอร์มัลไลซ์กับเวลาในแต่ละความดัน

พิจารณากระแสกับเวลาในแต่ละความดันซึ่งนำมาใช้สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความดันในระบบปฏิบัติการ พิจารณาการตรวจจับสัญญาณระหว่างกระแสกับเวลาจากเครื่องพลาสมาโฟกัสชนิด ยูเอ็นยู/ไอซีทีพี ดังรูปที่ 4.1 ก โดยกำหนดให้ความยาวของแท่งแอโนดมีค่าเป็น 16 เซนติเมตร รัศมีของแท่งแอโนดเป็น 0.95 เซนติเมตร และระยะห่างจากกึ่งกลางของแท่งแอโนดถึงแท่งแคโทดมีค่าเป็น 3.2 เซนติเมตร ดังแผนภาพที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แผนภาพแสดงเครื่องพลาสมาโฟกัสชนิด UNU/ICTP

สำหรับกระแสของพลาสมาที่เวลาต่างๆภายใต้การเปลี่ยนแปลงความดันตั้งแต่ 0.5 ถึง 2.5 มิลลิบาร์ และ ความต่างศักย์ให้แก่ตัวเก็บประจุ 30 ไมโครฟารัด มีค่าเป็น 12.5 กิโลโวลต์ ต้องทำการนอร์มัลไลซ์เทียบกับค่ากระแส ณ ตำแหน่งที่ความชันของกราฟมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งแสดงดังกราฟรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของพลาสมาที่
นอร์มัลไลซ์กับเวลาที่เปลี่ยนไปในแต่ละความดันที่
ระบบปฏิบัติการ โดยใช้ความต่างศักย์ขนาด 12.5 กิโลโวลต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

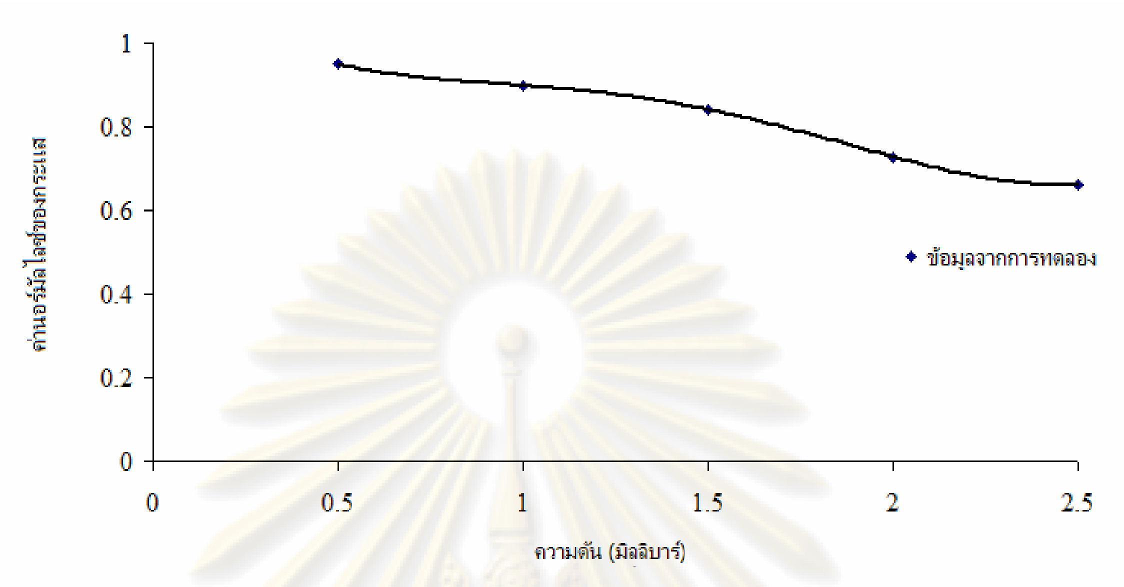
จากรูปที่ 4.9 พิจารณาให้ตำแหน่งกระแสของพลาสมาในช่วงสิ้นสุดเฟสการเคลื่อนที่ตามแนวแกนแสดงด้วยเส้นสีดำ เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเกิดโฟกัสตั้งแต่เริ่มต้นช่วงเฟสการเคลื่อนที่เข้าหากันตามแนวรัศมีจนสิ้นสุดเฟสการแผ่รังสีนั้นจะใช้เวลาประมาณ 10-200 นาโนวินาที [34] พิจารณาค่ากระแสที่ถูกนอร์มัลไลซ์ ณ จุดสิ้นสุดเฟสการเคลื่อนที่ตามแนวแกนภายใต้ความดันที่แตกต่างกัน สามารถแสดงความสัมพันธ์ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน สัญญาณของกระแส และ เวลา ณ จุดสิ้นสุดเฟสการตามแกน

ความดัน (มิลลิบาร์)	สัญญาณของกระแสที่ถูกนอร์มัลไลซ์ที่จุดสิ้นสุดเฟสการเคลื่อนที่ตามแนวแกน	เวลา ณ จุดสิ้นสุดเฟสการเคลื่อนที่ตามแนวแกน (ไมโครวินาที)
0.5	0.950	3.01
1	0.898	3.55
1.5	0.841	3.75
2	0.728	4.25
2.5	0.663	4.47

จากตารางพบว่าเมื่อความดันสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธตั้งแต่เริ่มต้นถึงจุดสิ้นของเฟสตามแกนมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่ากระแสที่ถูกนอร์มัลไลซ์มีค่าน้อยลงเช่นกันซึ่งสังเกตจากตารางที่ 4.3 ดังนั้น การสร้างแบบจำลองเพื่อหาการเคลื่อนที่ในเฟสนี้เริ่มจากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับสัญญาณของกระแส โดยใช้วิธีการประมาณค่าในช่วง (interpolation) เพื่อหาสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาตามตารางที่ 4.3 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านอร์มัลไลซ์ของกระแส พลาสมากับความดัน

จากรูปที่ 4.10 พบว่าสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านอร์มัลไลซ์ของกระแสกับความดัน คือ

$$y = 0.1025x^4 - 0.5803x^3 + 1.090x^2 - 0.9157x + 1.2015 \quad (4.6)$$

เมื่อได้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับกระแส จากนั้นทำการเขียนโปรแกรมด้วย ภาษา C++ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับกระแสที่นอร์มัลไลซ์ดังสมการที่ 4.6 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ทำนายหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ โดยที่สมการดังกล่าวใช้สำหรับคำนวณหาค่าอัตราส่วนมวลของพลาสมาในเฟสนี้

กำหนดให้

y คือ ค่ากระแสที่ถูกนอร์มัลไลซ์ ณ ตำแหน่งที่สุดของเฟสตามแกน

x คือ ความดันที่ใช้ในการปฏิบัติการ

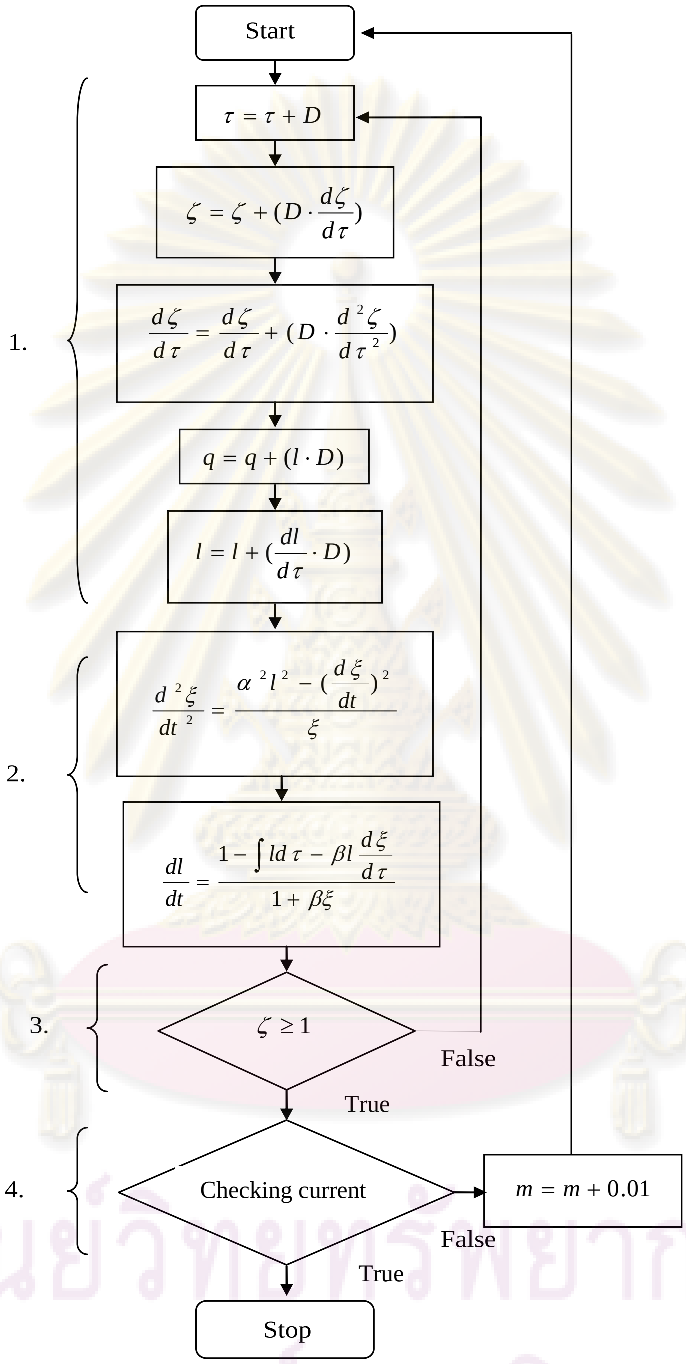
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาซึ่งกำหนดให้ $m = \frac{\Gamma - 1}{\Gamma}$ โดยที่ m เป็นค่าที่ถูกเก็บไว้เพื่อใช้คำนวณหาอัตราส่วนมวล เนื่องจากการเก็บค่าด้วยตัวแปรดังกล่าวทำให้โปรแกรมที่เขียนไว้มีความง่ายต่อการจำลอง โดยกำหนดค่าเริ่มต้นให้ m มีค่าเป็น 0.0001

สำหรับการอธิบายแบบจำลองในแต่ละเฟสซึ่งขอแสดงขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้การจำลองการเคลื่อนของพลาสมาด้วยแผนภูมิสายงาน (flow chart)

การจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสนี้ทำการคำนวณหาค่า อัตราส่วนมวลและกระแสที่นอร์มัลไลซ์ ณ จุดสิ้นสุดเฟสตามแกนซึ่งแสดงดังแผนภูมิสายงานในรูปที่ 4.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 แผนภูมิสายงานการจำลองเพื่อคำนวณค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะของพลาสมาที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สอาร์กอน

พิจารณาลำดับขั้นตอนของแผนภูมิสายงานดังรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงตามลำดับดังนี้

1. ขั้นตอนนี้ทำการจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสตามแกน กำหนดให้ช่วงเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนตำแหน่งของพลาสมาชีธ แทนด้วย D มีค่าเป็น 0.005 ดังนั้น การกระจัดของพลาสมาชีธที่นอร์มัลไลซ์ ξ ความเร็วของพลาสมาชีธที่นอร์มัลไลซ์ $\frac{d\xi}{d\tau}$ กระแสที่นอร์มัลไลซ์ l และประจุที่นอร์มัลไลซ์ q นั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา

2. ลำดับนี้เป็นการคำนวณความเร่งที่นอร์มัลไลซ์ $\frac{d^2\xi}{d\tau^2}$ และอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสที่นอร์มัลไลซ์ $\frac{dl}{d\tau}$ ของพลาสมาชีธเพื่อนำการกระจัดของพลาสมาชีธที่นอร์มัลไลซ์ ξ ความเร็วของพลาสมาชีธที่นอร์มัลไลซ์ $\frac{d\xi}{d\tau}$ กระแสที่นอร์มัลไลซ์ l และประจุที่นอร์มัลไลซ์ q ไปคำนวณซ้ำในขั้นตอนที่ 1 โดยพิจารณาจากขั้นตอนที่ 3

3. สำหรับขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ใช้ตรวจสอบการกระจัดของพลาสมาชีธที่นอร์มัลไลซ์ ξ ซึ่งเคลื่อนที่ในเวลาต่างๆ โดยพิจารณาว่า ถ้าพลาสมาชีธเคลื่อนที่ถึงปลายแท่งแอโนด นั่นคือการกระจัดที่ถูกนอร์มัลไลซ์ดังกล่าวมีค่าเป็น 1 แล้วถือว่าสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสนี้ซึ่งนำไปการพิจารณาในขั้นตอนถัดไป แต่ถ้าการกระจัดของพลาสมาชีธที่นอร์มัลไลซ์ มีค่าน้อยกว่า 1 แล้วให้ย้อนกลับไปยังขั้นตอนที่ 1

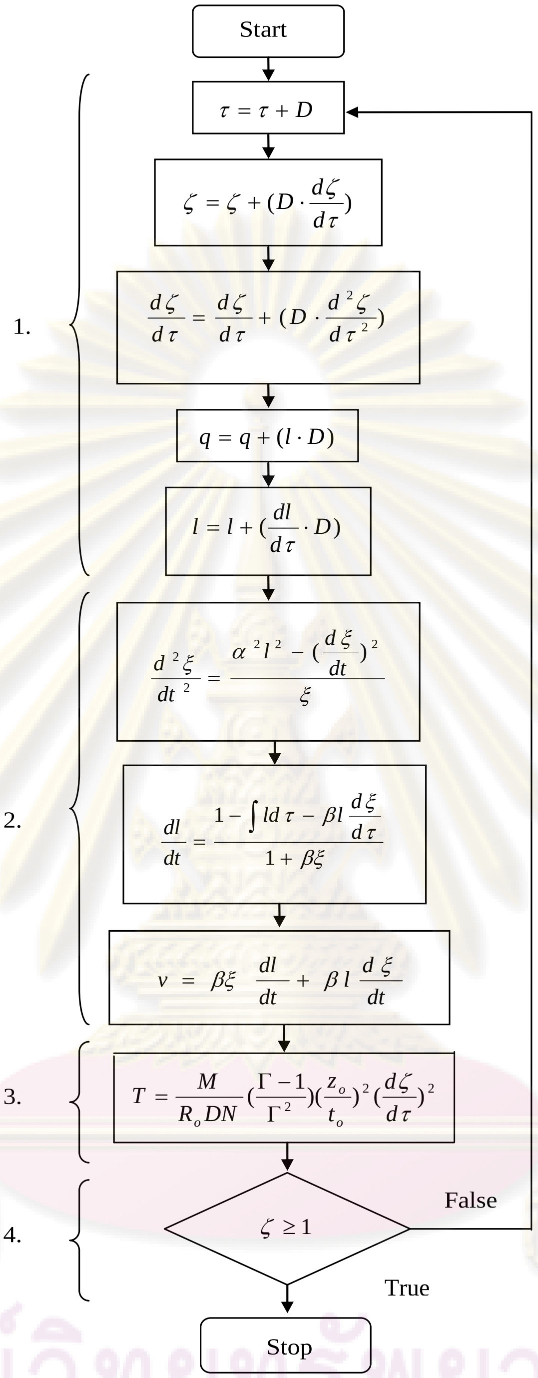
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. สำหรับขั้นตอนสุดท้ายใช้ตรวจสอบค่ากระแสที่นอร์มัลไลซ์ l ที่จุดสิ้นเฟสตามแกน ซึ่งค่าของกระแสที่ได้นั้น ต้องเป็นความสัมพันธ์ของกระแสกับความดัน ดังสมการที่ 4.6 โดย ถ้าค่ากระแสที่ได้ดังกล่าวไม่สอดคล้องกับสมการที่ 4.6 ให้ทำการเพิ่มค่า m ทีละ 0.001 แล้วย้อยกลับไปคำนวณในขั้นตอนที่ 1 จนได้ค่า m ซึ่งทำให้กระแสที่ได้ที่จุดสิ้นสุดเฟสนี้สอดคล้องตามสมการที่ 4.6 โดย $m = \dfrac{\Gamma - 1}{\Gamma}$

เมื่อได้ค่า m แล้ว นำค่าที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาอัตราส่วนมวลและอัตราส่วนความร้อนจำเพาะซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนมวลและอัตราส่วนความร้อนจำเพาะได้แสดงไว้ในบทที่ 3

สำหรับค่าอัตราส่วนมวล Γ และอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ γ ที่ได้จากแผนภูมิสายงานในรูปที่ 4.11 ถูกนำไปใช้เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาและคำนวณหาอุณหภูมิพลาสมาที่เปลี่ยนไปกับเวลาในเฟสตามแกนอีกครั้ง โดยวิธีการจำลองดังกล่าวสามารถแสดงดังแผนภูมิสายงานรูปที่ 4.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.12 แผนภูมิสายงานจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง
กระแสที่นอร์มัลไลซ์ l ความต่างศักย์ที่นอร์มัลไลซ์ v
และอุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยเคลวิน ที่เวลาต่างๆ
T ในเฟสตามแกน

ลำดับขั้นตอนแผนภูมิสายงานในลำดับที่ 1 และลำดับที่ 2 คือการจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธในเครื่องพลาสมาโฟกัสโดยได้เพิ่มการคำนวณความต่างศักย์ที่นอร์มัลไลซ์ v ซึ่งตกคร่อมระหว่างขั้วอิเล็กโทรดภายในเครื่องพลาสมา ในลำดับที่ 3 เป็นขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยเคลวิน T โดยอุณหภูมิดังกล่าวสามารถหาค่าได้ตามสมการที่ 3.23 สำหรับลำดับที่ 4 คือการตรวจสอบการกระจัดของพลาสมาชีธที่นอร์มัลไลซ์ ζ ซึ่งเปลี่ยนไปกับเวลา โดยพลาสมาชีธเคลื่อนที่ถึงปลายแท่งแอโนดนั้นคือ $\zeta = 1$ จึงสิ้นสุดเฟสตามแนวแกน

4.3.2 เฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี

สำหรับการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสนี้จะเคลื่อนที่เข้าสู่กึ่งกลางของแท่งแอโนดตามแนวรัศมีสามารถอธิบายตามทฤษฎีในบทที่ 3 สำหรับเงื่อนไขขอบของการเคลื่อนที่ในเฟสนี้คือ เวลาที่นอร์มัลไลซ์ τ กระแสที่นอร์มัลไลซ์ l และประจุที่นอร์มัลไลซ์ q เป็นค่าที่ได้ ณ ตำแหน่งสิ้นสุดของเฟสตามแกน โดยนำค่าดังกล่าวมาเป็นเงื่อนไขขอบสำหรับเฟสนี้

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสนี้ซึ่งถูกอธิบายในบทที่ 3 แต่พิจารณาเงื่อนไขขอบเพิ่มเติมสำหรับการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธซึ่งกำหนดให้

$$\kappa_s = 1,\ \kappa_p = 1 \text{ และ } \xi_f = 0.0001$$

พิจารณาในเฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี พลาสมาชีธดังกล่าวจะอยู่ที่ขอบของแท่งแอโนด ดังนั้นเมื่อวัดระยะจากกึ่งกลางของแท่งแอโนดตามแนวรัศมีไปยังผิวหน้าช็อคและพิสตัน พบว่าระยะห่างจากกึ่งกลางของแท่งแอโนดไปถึงพลาสมาชีธ มีค่าเท่ากับรัศมีของแท่งแอโนดดังนั้น ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างรัศมีช็อคกับรัศมีของแท่งแอโนด κ_s และค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างรัศมีพิสตันกับรัศมีของแท่งแอโนด κ_p จึงเท่ากับ 1 สำหรับค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างความยาวการบีบอัดเชิงรัศมีกับรัศมี ξ_f เริ่มต้นเฟสนี้พบว่าพลาสมาชีธดังกล่าวได้ยกตัวห่างจากปลายแอโนดน้อยๆจึงพิจารณาให้ค่าดังกล่าวมีค่าน้อยๆ

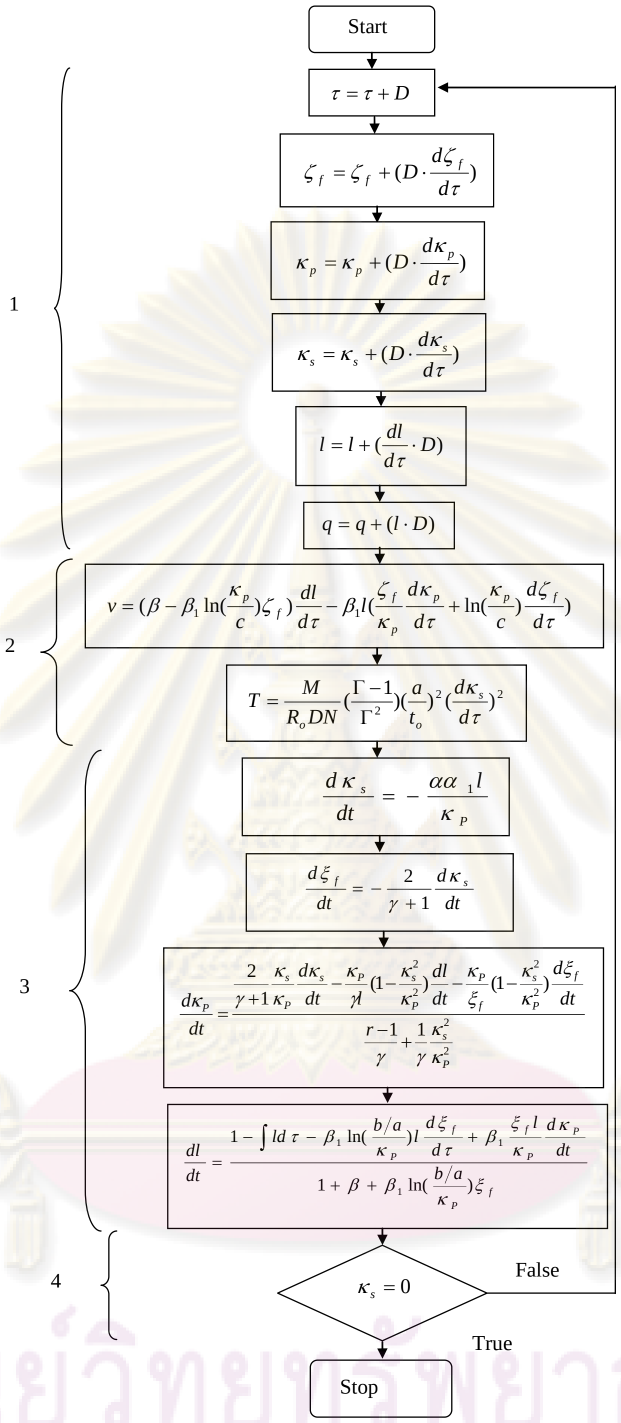
สำหรับการวัดรัศมีของช็อค r_s รัศมีพิศตัน r_P และความยาวการบีบอัดเชิงรัศมี z_f ได้แสดงดังรูปที่ 3.7

เงื่อนไขขอบความเร็วของพลาสมาชีธซึ่งประกอบด้วยความเร็วของช็อค ความเร็วของพิสตัน อัตราเร็วของการยืดออกตามแนวแกนและอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเทียบกับเวลา สามารถหาค่าได้โดยการแทนค่าที่เกี่ยวข้องลงในสมการที่ 3.33, 3.34, 3.35 และ 3.36

สำหรับวิธีการจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสกำหนดให้ช่วงของระยะเวลาที่ใช้สำหรับการจำลอง D มีค่า 0.00001 เนื่องจากการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสนี้ใช้ระยะเวลาจากจุดเริ่มต้นถึงจุดสิ้นสุดน้อยกว่าระยะเวลาทั้งหมดในเฟสการเคลื่อนที่ตามแนวแกน ดังนั้น จึงใช้ค่าช่วงเวลาที่น้อยๆเพื่อให้สอดคล้องกับผลการทดลอง

สำหรับแผนผังที่อธิบายปรากฏการณ์ในเฟสการเคลื่อนที่เข้าหากันตามแนวรัศมีซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.13

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 แผนภูมิสายงานจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสที่นอร์มัลไลซ์ l ความต่างศักย์ที่นอร์มัลไลซ์ v และอุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยเคลวิน ที่เวลาต่างๆ T ในเฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาลำดับการทำงานของแผนภูมิสายงานดังนี้

1. ในลำดับนี้จำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธซึ่งเปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลา โดยกำหนดให้ช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลง D มีค่า 0.00001 สำหรับการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธในเฟสนี้เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวรัศมี

2. สำหรับลำดับนี้คำนวณหาค่าอุณหภูมิพลาสมา T และความต่างศักย์ที่นอร์มัลไลซ์ v

3. ในลำดับนี้ได้คำนวณหาค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส $\frac{dl}{d\tau}$ ค่านอร์มัลไลซ์อัตราเร็วของช็อค $\frac{dk_s}{d\tau}$ ค่านอร์มัลไลซ์ระหว่างอัตราเร็วพิสตัน $\frac{dk_P}{d\tau}$ และค่านอร์มัลไลซ์อัตราเร็วการยืดออกตามแนวแกน $\frac{d\xi_f}{d\tau}$ เพื่อใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาในลำดับที่ 1

4. สำหรับลำดับสุดท้ายเป็นการตรวจสอบค่านอร์มัลไลซ์รัศมีช็อค k_s ซึ่งกำหนดให้เฟสนี้สิ้นสุดเมื่อส่วนผิวหน้าช็อคเคลื่อนที่เข้าตามแนวรัศมีจนถึงกึ่งกลางของแท่งแอโนด

เมื่อสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสนี้ ค่าที่ได้ต่างๆในช่วงสุดท้ายของเฟสนี้ถูกนำไปใช้เป็นค่าเงื่อนไขขอบในเฟสถัดไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

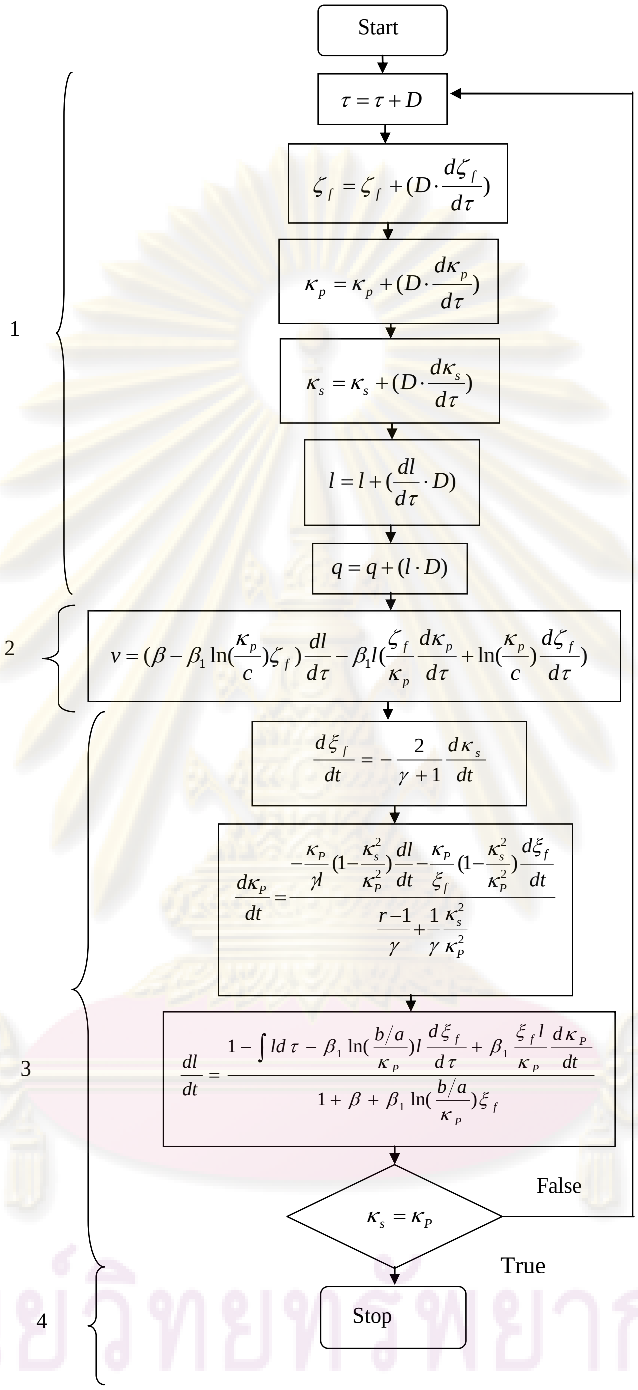
4.3.3 เฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมี

สำหรับการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสนี้เกิดขึ้นหลังจากที่ผิวหน้าช็อคเกิดการชนกันที่กึ่งกลางแท่งแอโนด ผิวหน้าช็อคดังกล่าวถูกสะท้อนจากกึ่งกลางของแท่งแอโนด แต่ในส่วนพิศตันนั้นได้เคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับผิวหน้าช็อค สำหรับเฟสดังกล่าวสิ้นสุดเมื่อเมื่อพิศตันเกิดการชนกับผิวหน้าช็อคซึ่งนำไปสู่กระบวนการในเฟสถัดไป

แบบจำลองที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเฟสนี้ ใช้สมการชุดเดียวกับแบบจำลองที่ใช้ในเฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี แต่ทั้งสองเฟสมีความแตกต่างกันโดยที่ความเร็วของผิวหน้าช็อคในเฟสนี้มีค่าเป็น 2 เท่าของความเร็วช็อค ณ ตำแหน่งสิ้นสุดเข้าหาเฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี สำหรับวิธีการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นซึ่งกำหนดให้ช่วงระยะเวลา D มีค่าเท่ากับช่วงระยะเวลาในเฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี

สำหรับแผนภูมิสายงานที่อธิบายปรากฏการณ์ในเฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมีซึ่งสามารถอธิบายตามแผนภูมิสายงานรูปที่ 4.14 สำหรับค่านอร์มัลไลซ์ความเร็ว $\frac{dk_P}{d\tau}$ ของพิสตันสามารถแสดงดังสมการที่ 3.40 และ 3.41 ดังนั้น ในเฟสนี้สามารถแสดงการคำนวณตามแผนภูมิสายงานดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 แผนภูมิสายงานจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่นอร์มัลไลซ์ l ความต่างศักย์ที่นอร์มัลไลซ์ v และอุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยเคลวิน ที่เวลาต่างๆ T ในเฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาลำดับขั้นตอนสำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสนี้ซึ่งประกอบด้วย

1. ในลำดับนี้จะจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธซึ่งเปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลา โดยกำหนดให้ช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลง D ใช้ค่าเดียวกับช่วงเวลาในเฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมี

2. สำหรับลำดับนี้คำนวณหาความต่างศักย์ที่นอร์มัลไลซ์ v โดยอุณหภูมิของพลาสมาในเฟสนี้มีค่าเป็นสองเท่าของอุณหภูมิพลาสมาที่ตำแหน่งสิ้นสุดเฟสช็อคเคลื่อนที่เข้าภายในแนวรัศมี [29]

3. ในลำดับนี้ได้คำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่นอร์มัลไลซ์ $\frac{dl}{d\tau}$ ค่านอร์มัลไลซ์อัตราเร็วพิสตัน $\frac{dk_P}{d\tau}$ และค่านอร์มัลไลซ์อัตราเร็วการยืดออกตามแนวแกน $\frac{d\xi_f}{d\tau}$ เพื่อนำไปใช้จำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาในลำดับที่ 1 โดยกำหนดให้ค่านอร์มัลไลซ์อัตราเร็วของช็อค $\frac{dk_s}{d\tau}$ คงที่

4. สำหรับลำดับสุดท้ายเป็นการตรวจสอบ โดยให้ค่านอร์มัลไลซ์รัศมีช็อค k_s และค่านอร์มัลไลซ์รัศมีพิสตัน k_P เท่ากัน นั้นคือผิวหน้าช็อกและพิสตันเกิดการชนกัน

เมื่อสิ้นสุดเฟสการเคลื่อนที่ของนี้ พลาสมาจะเกิดการบีบอัดซึ่งพลาสมาดังกล่าวปลดปล่อยรังสีและอนุภาคต่างๆออกมา สำหรับหัวข้อถัดไปเป็นการอธิบายวิธีการจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสการแผ่รังสี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.4 เฟสการแผ่รังสี

หลังจากที่พลาสมาชีธซึ่งประกอบด้วยส่วนรัศมีของช็อคและส่วนรัศมีของพิศตันชนกันซึ่งเป็นจุดสิ้นสุดของเฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมี การเคลื่อนที่ของพลาสมาในเฟสนี้ถูกอธิบายด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งของรัศมีพิศตันเพียงอย่างเดียว โดยพลาสมาเคลื่อนที่เข้าสู่กึ่งกลางของแท่งแอโนด

สำหรับกระบวนการที่เกิดขึ้นนั้น คือ การปลดปล่อยรังสีและอนุภาคต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3

การจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเฟสนี้ กำหนดให้สมการที่ใช้ในการจำลองอยู่ในรูปของสมการที่ไม่นอร์มัลไลซ์

พิจารณาตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธซึ่งมีดังนี้

t คือ เวลาในการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธ

z_f คือ ความยาวของการบีบอัดเชิงรัศมี

r_p คือ รัศมีของพิสตัน

$\frac{dr_p}{dt}$ คือ อัตราเร็วของรัศมีพิศตัน

$\frac{dz_f}{dt}$ คือ ความเร็วของพลาสมาที่เปลี่ยนตามแนวแกน

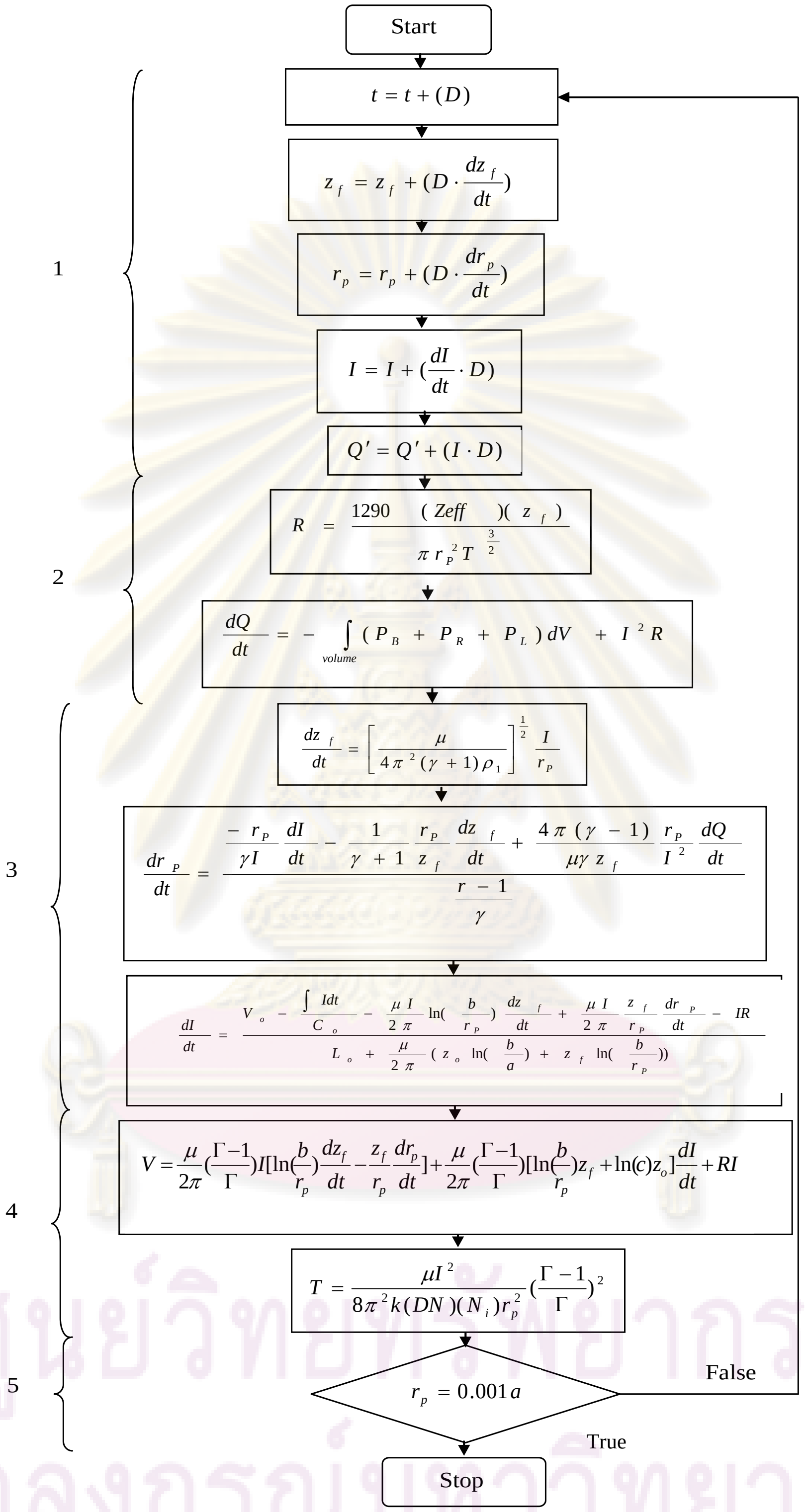
$\frac{dI}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเทียบกับเวลา

I คือ กระแสที่เปลี่ยนแปลงภายในวงจร

Q' คือ ประจุภายในวงจรซึ่งมีค่าเท่ากับ $\int Idt$

V คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในวงจร

แผนผังที่อธิบายปรากฏการณ์ในเฟสการแผ่รังสีซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แผนภูมิสายงานจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I ความต่างศักย์ V และ อุณหภูมิของพลาสมา T ที่เวลาต่างๆ ในเฟสการแผ่รังสี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับแผนภูมิสายงานดังรูปที่ 4.15 ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ในขั้นตอนนี้คือการคำนวณการเพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาชีธที่เวลาต่างๆ สำหรับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพลาสมาชีธสามารถอธิบายด้วยตัวแปร รัศมีพิสตัน r_p และความยาวของการบีบอัดเชิงรัศมี z_f

2. สำหรับขั้นตอนนี้เป็นการคำนวณกำลังการแผ่รังสีของพลาสมา $\frac{dQ_{rad}}{dt}$ และกำลังเนื่องจากความร้อนของพลาสมา $\frac{dQ_{joule}}{dt}$ ค่าที่ได้จากการคำนวณถูกนำไปใช้หาอัตราเร็วของรัศมีพิสตัน $\frac{dr_p}{dt}$ ซึ่งอยู่ในลำดับที่ 3

3. สำหรับการคำนวณในขั้นตอนนี้ เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ของพลาสมาซึ่งดูจากอัตราเร็วของพิสตัน $\frac{dr_p}{dt}$ ที่เปลี่ยนแปลงและในขั้นตอนนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเทียบกับเวลา $\frac{dI}{dt}$ มีค่ามาก ดังนั้น กราฟของกระแสที่เกิดขึ้นจะมีความชันสูงสุด

4. สำหรับขั้นตอนนี้คำนวณหาอุณหภูมิของพลาสมา T และความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้วอิเล็กโทรด V

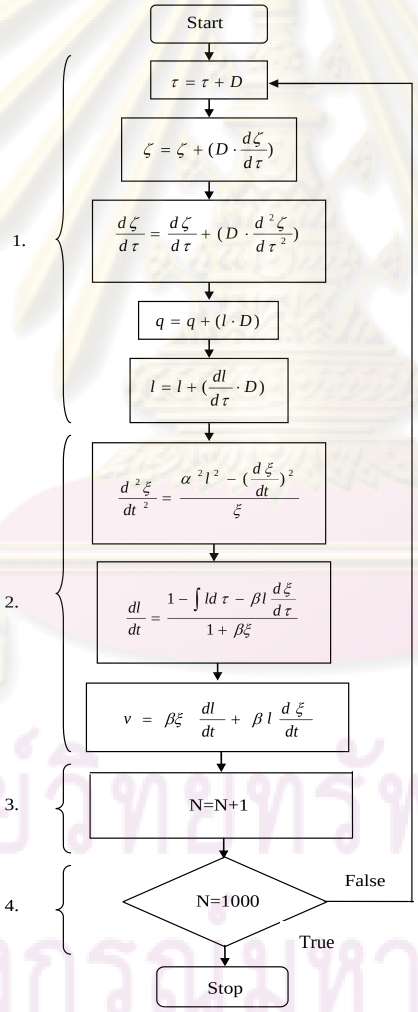
5. ขั้นตอนสุดท้ายพิจารณา รัศมีพิสตัน r_p ซึ่งการจำลองดังกล่าวหยุดการทำงานเมื่อพลาสมาเกิดการควบแน่นจนเล็กๆมาก นั่นคือ รัศมีพิสตัน r_p มีค่าเข้าใกล้ศูนย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.5 เฟสตามแกนแผ่ขยายคอลัมน์

แบบจำลองที่อธิบายปรากฏการณ์ในเฟสนี้ซึ่งใช้สมการและวิธีการเดียวกันกับเฟสตามแกนโดยกำหนดให้คำนวณแบบวนซ้ำตั้งแต่ N มีค่าเป็นหนึ่งจนถึงเงื่อนไขที่กำหนดสำหรับช่วงเวลาที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ D มีค่าเป็น 0.001และค่าเงื่อนไขขอบเริ่มต้นในเฟสนี้ได้จากค่าต่างๆที่จุดสิ้นสุดของเฟสการแผ่รังสี

แผนภูมิสายงานสำหรับการจำลองการเคลื่อนสามารถแสดงได้รูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แผนภูมิสายงานจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่นอร์มัลไลซ์ l ความต่างศักย์ที่นอร์มัลไลซ์ v ในเฟสตามแกนแผ่ขยายตามคอลัมน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาลำดับขั้นตอนของแผนภูมิสายงานซึ่งประกอบด้วยลำดับขั้นดังต่อไปนี้

1. สำหรับขั้นตอนนี้ทำการจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาที่เปลี่ยนไปกับเวลา สำหรับตัวแปรที่ทำการพิจารณาในเฟสนี้ได้แก่ กระแสที่นอร์มัลไลซ์ l และ ความต่างศักย์ที่นอร์มัลไลซ์ v ที่เวลาต่างๆ

2. ในขั้นตอนนี้คำนวณหาค่านอร์มัลไลซ์ของความเร่ง $\frac{d^2\xi}{d\tau^2}$ และหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่านอร์มัลไลซ์ของกระแสเทียบกับเวลา $\frac{dl}{d\tau}$ สำหรับค่าที่ได้นำไปสู่การจำลองการเคลื่อนที่ในขั้นตอนที่ 1

3. สำหรับขั้นตอนนี้คือการเพิ่มจำนวนครั้งที่ใช้สำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมา

4. ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ใช้ตรวจสอบการจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมา สำหรับการจำลองในเฟสนี้กำหนดให้สิ้นสุดเมื่อจำนวนครั้งที่ใช้สำหรับการจำลองมีค่าครบ 1000 ครั้ง

หัวข้อถัดไปกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจวัดผลต่างๆที่ได้จากการทดลองเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

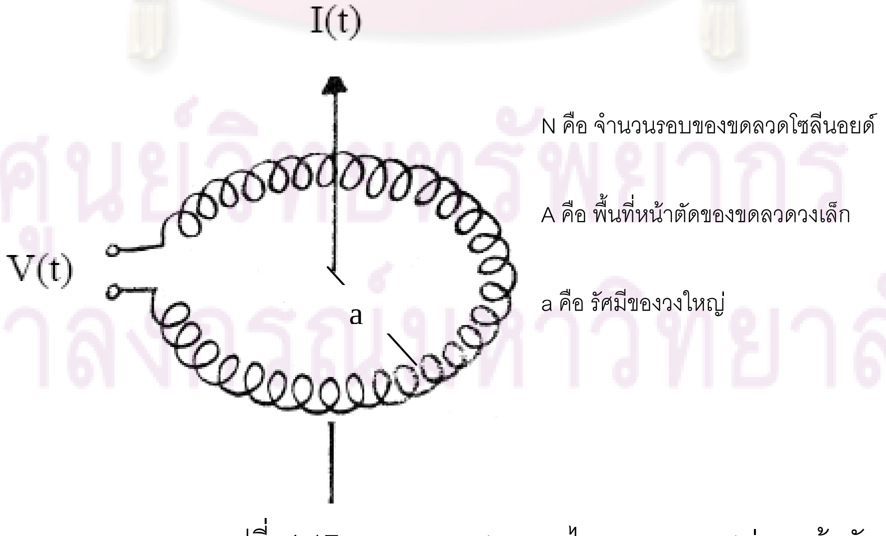
4.4 การตรวจวิเคราะห์พลาสมา (plasma diagnostics)

การทดลองที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบด้วย การตรวจวัดสัญญาณของกระแส การตรวจวัดสัญญาณความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและการตรวจจับสัญญาณของรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต สำหรับการทดลองดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ที่ใช้เฉพาะกับงานแต่ละชนิด อุปกรณ์ที่ใช้งานวิจัยนี้ได้แก่ โรว์โกว์สกีคอยล์ โพรบวัดความต่างศักย์สูง และอุปกรณ์ตรวจจับรังสีซึ่งประกอบด้วย ซิลิคอนพินไดโอด BPX 65 และ โฟโตไดโอด SXUV100 สำหรับอุปกรณ์การวัดแต่ละชนิดถูกอธิบายในแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

4.4.1 โรว์โกว์สกีคอยล์

โรว์โกว์สกีคอยล์ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดสัญญาณของกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นขดลวดโซลีนอยด์ (solenoid) ที่พันรอบแกนเป็นวงหลายๆรอบและแกนดังกล่าวถูกทำให้โค้งงอเป็นวง ตรงปลายของโรว์โกว์สกีคอยล์ที่ต่อเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป โดยมีตัวต้านทานที่มีขนาด
ต่ำต่อเข้ากับขดลวด

หลักการของโรโกว์สกีคอยล์ คือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านหน้าตัดของลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นตามกฎของแอมแปร์ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แผนภาพแสดงการไหลของกระแสผ่านหน้าตัดของขดลวดซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กภายในขดลวดโซลีนอยด์ [28]

สำหรับสนามแม่เหล็กที่เกิดเนื่องจากกระแส $I(t)$ สามารถเขียนได้ตามสมการดังนี้

$$B(t) = \frac{\mu_o I(t)}{2\pi a} \tag{4.7}$$

ฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กที่ไหลภายในขดลวดโรว์โกว์สกีคอยล์มีค่าตามสมการดังนี้

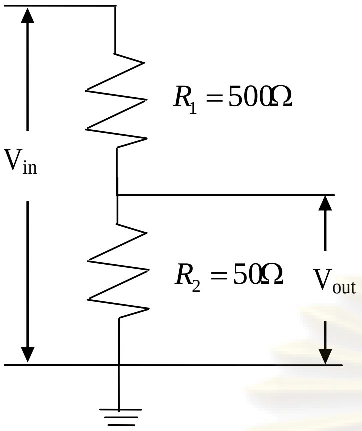
$$\phi(t) = \frac{\mu_o A}{2\pi a} I(t) \tag{4.8}$$

ดังนั้น ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขดลวดโรว์โกว์สกีคอยล์มีค่าตามสมการ คือ

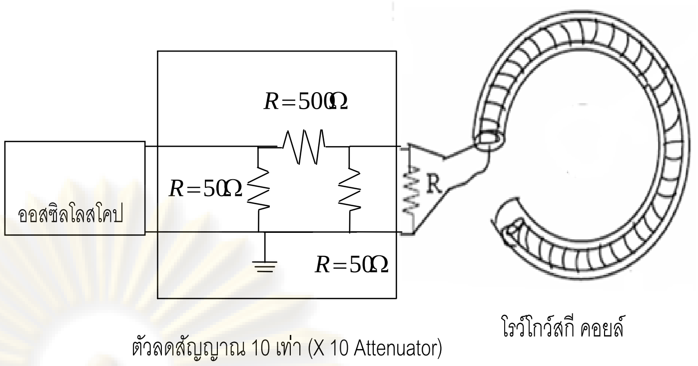
$$V(t) = \frac{\mu_o NA}{2\pi a}\frac{dI}{dt} \tag{4.9}$$

การตรวจจับสัญญาณของกระแสที่ได้นั้นต้องลดขนาดของสัญญาณลง 10 เท่าก่อนต่อเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป เนื่องจากเครื่องดังกล่าวไม่สามารถวัดสัญญาณที่มีค่าสูงมากได้ วงจรที่ใช้ในการกรองสัญญาณ คือ วงจรตัวแบ่งศักย์ไฟฟ้า (voltage divider) โดยแสดงดังรูปที่ 4.18

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก



ข

รูปที่ 4.18 ก. แผนภาพแสดงวงจรแบ่งความต่างศักย์

ข. แผนภาพแสดงวงจรการใช้งานวงจรบังความต่างศักย์ซึ่งด้านขาเข้าต่อกับโรว์โกว์สกีคอยล์และด้านขาออกต่อเข้ากับออสซิลโลสโคป [17]

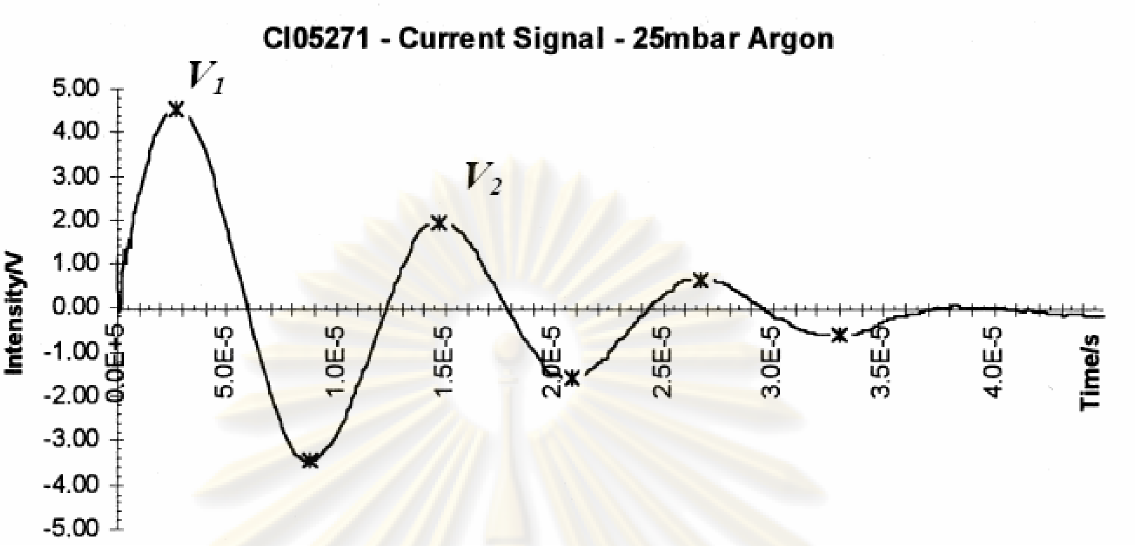
พิจารณารูปที่ 4.18 ก. ความต่างศักย์ที่มาจากด้านขาเข้าซึ่งมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ที่ตกคร่อม R_1 และ R_2 สำหรับความต่างศักย์ด้านขาออกมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างตัวต้านทาน R_2 กับกระแสที่ไหลผ่าน R_1 และ R_2 กำหนดให้กระแสดังกล่าวมีสัญลักษณ์ คือ I ดังนั้น ความต่างศักย์ด้านขาออกสามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$V_{out} = R_2 I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \tag{4.10}$$

สำหรับการใช้งานโรว์โกว์สกีคอยล์ ก่อนอื่นต้องทำการเทียบมาตรฐาน (calibration) โดยใช้วงจรอาร์แอลซี (RLC circuit) ที่ทราบค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่ระบบและค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกระแสที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.19

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากโรโกว์สกีคอยล์ กับเวลา โดยใช้แก๊สอาร์กอนที่ความดัน 25 มิลลิบาร์ [28]

จากกราฟดังกล่าว พิจารณาลักษณะของสัญญาณพบว่าเป็นกราฟฟังก์ชันไซน์ที่มีสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาดังนี้ [28]

$$I(t) = I_o e^{-\alpha t} \sin(\omega t) \qquad (4.11)$$

โดย

$$I_o = V_o\sqrt{\frac{C_o}{L_o}} \text{ , } \alpha = \frac{R}{2L_o} \text{ และ } \omega = \frac{1}{\sqrt{L_o C_o}}$$

กำหนดให้

V_o คือ ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

L_o คือ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรในระบบเครื่องพลาสมาโฟกัส

C_o คือ ค่าความจุไฟฟ้าของถังเก็บประจุ

R คือ ค่าความต้านทานของวงจรในระบบเครื่องพลาสมาโฟกัส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาค่าที่วัดได้ V_1 และ V_2 เมื่อ เชื่อมโยงผ่านสมการที่ 4.11 พบว่า

$$\alpha = -\frac{\ln(V_2/V_1)}{T} \tag{4.12}$$

โดย

T คือ คาบของกระแสที่วัดได้ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.19

สำหรับกระแสที่วัดได้เมื่อเวลาเป็นหนึ่งในสี่ของคาบทั้งหมดพบว่า

$$I_1 = I_o e^{-\alpha\frac{T}{4}} \tag{4.13}$$

ดังนั้น ค่าแฟคเตอร์การเทียบมาตรฐานสำหรับโรโกว์สกีคอยล์ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_1 และความต่างศักย์ V_1 มีค่าตามสมการที่ 4.14

$$K = \frac{I_1}{V_1} = \frac{2\pi C_o V_o}{TV_1}\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{4.14}$$

สาเหตุที่คำนวณหาค่าแฟคเตอร์การเทียบมาตรฐาน เนื่องจากการตรวจจับสัญญาณจากโรว์โกว์สกีคอยล์ที่วัดจากออสซิลโลสโคป เป็นสัญญาณของความต่างศักย์ ดังนั้น ในการหาค่ากระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมาก็จะต้องนำค่าดังกล่าวมาคูณกับความต่างศักย์ที่วัดได้ จึงได้ค่ากระแสรวมที่ไหลผ่านพลาสมา

ในส่วนถัดไปกล่าวถึงการวัดความต่างศักย์สูง สำหรับอุปกรณ์ดังกล่าวขออธิบายรายละเอียดในหัวข้อโพรบวัดความต่างศักย์สูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.2 โพรบวัดความต่างศักย์ที่สูง

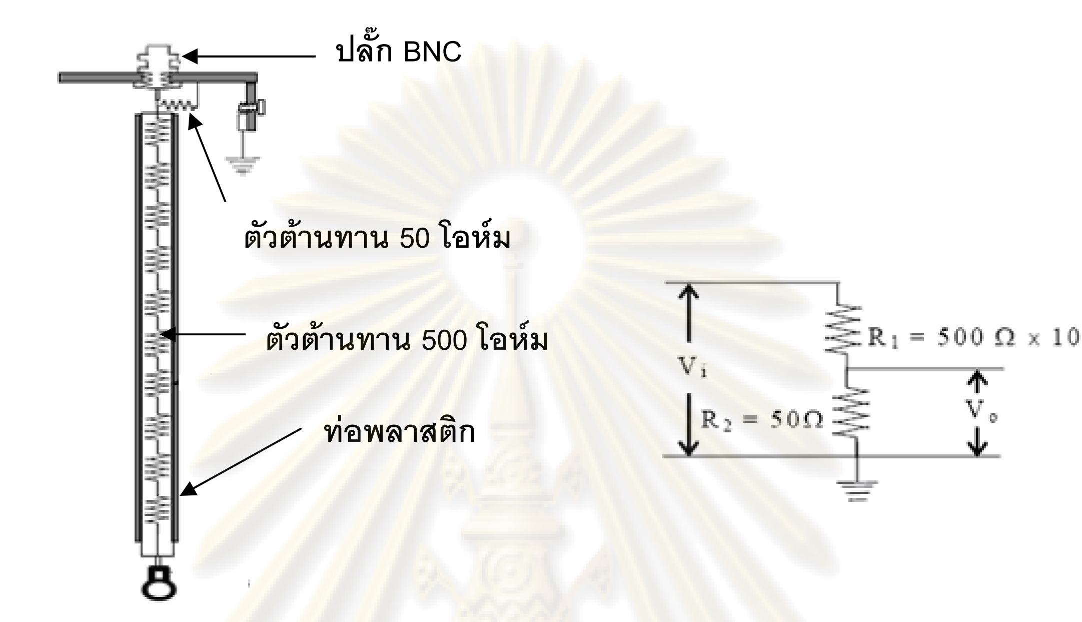
การวัดความต่างศักย์ซึ่งตกคร่อมระหว่างขั้วอิเล็กโทรดสามารถวัดได้โดยใช้โพรบวัดความต่างศักย์ที่สูง สำหรับโพรบวัดดังกล่าวสามารถทำได้โดยการนำตัวต้านทานขนาด 500 โอห์ม จำนวน 10 ตัว และความต้านทานขนาด 50 โอห์ม จำนวน 1 ตัว ต่อแบบอนุกรม

โพรบวัดความต่างศักย์ประกอบด้วยกันสองส่วน ได้แก่ ส่วนที่ใช้ต่อกับขั้วของแอโนด และ ส่วนที่เชื่อมต่อกับ บีเอ็นซี (BNC) ต่อเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคปซึ่งทำหน้าที่แสดงผล

สำหรับหลักการของโพรบวัดความต่างศักย์สูง คือ การทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งศักย์ก่อนทำการต่อเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป สมการที่ใช้อธิบายการแบ่งศักย์ของโพรบวัดความต่างศักย์สูงสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 4.10 โดยกำหนดให้ ความต้านทาน R_1 มีค่าเท่ากับ 500 โอห์ม x 10 และความต้านทาน R_2 มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้น ความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าเป็น $V_{out} = \frac{50}{5000+50} V_{in}$ ซึ่งมีค่าประมาณ 0.01 เท่าของความต่างศักย์ที่ได้จากขั้วอิเล็กโทรด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โพรบวัดความต่างศักย์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.20 [17]

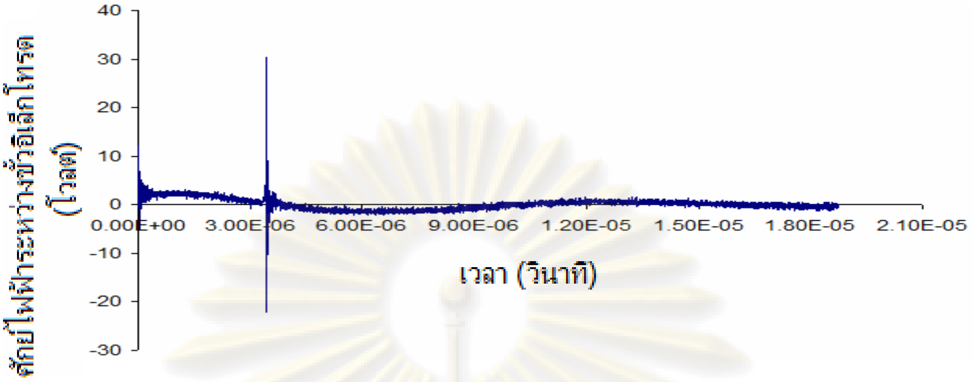


ก. ข.

รูปที่ 4.20 ก. แผนภาพแสดงโพรบวัดความต่างศักย์
ข. แผนภาพแสดงวงจรตัวแบ่งศักย์ของโพรบ

เมื่อทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเครื่องพลาสมาโฟกัส จะต้องต่อกับวงจรแบ่งศักย์ที่แสดงดังรูป 4.20 ก เพื่อลดทอนสัญญาณที่เข้าสู่เครื่องออสซิลโลสโคป 100 เท่า จึงสามารถบันทึกค่าได้ สำหรับสัญญาณของความต่างศักย์แสดงดังรูปที่ 4.21

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความต่างศักย์ที่ตรวจจับได้จากเครื่องพลาสมาโฟกัส ซึ่งใช้แก๊สอาร์กอนที่ความดัน1 มิลลิบาร์ และความต่างศักย์ที่ชาร์จให้แก่ตัวเก็บประจุมีขนาด 12.5 กิโลโวลต์ [17]

4.4.3 **ซิลิคอนพินไดโอดชนิด** BPX 65

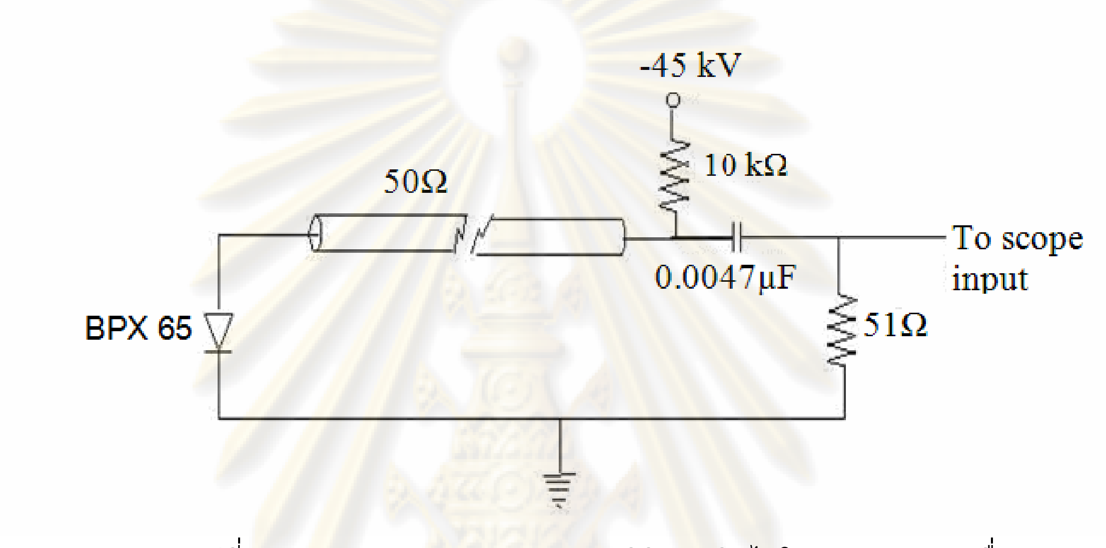
ซิลิคอนพินไดโอดชนิด BPX 65 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดรังสีเอกซ์ เนื่องจากสภาพไว (sensitivity) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.01-4.00 นาโนเมตร โดยงานวิจัยในครั้งนี้เกี่ยวข้องกับการตรวจจับรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกับรังสีเอกซ์อย่างอ่อน ดังนั้น จึงใช้อุปกรณ์ดังกล่าวเพื่อตัดตัวแปรรังสีเอกซ์ออกจากผลการทดลอง

รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายซิลิคอนพินไดโอดรุ่น BPX65

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การใช้งานอุปกรณ์ดังกล่าวเริ่มต้นโดยการนำควอตซ์ (quartz) ที่อยู่ด้านหน้าซิลิคอนพินไดโอดออกก่อน เนื่องจากแผ่นดังกล่าวทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีที่อยู่ในย่านของรังสีเอกซ์ จากนั้นนำแผ่นไมลาร์อะลูมิเนียม (aluminum mylar) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกรองให้ย่านรังสีเอกซ์สามารถผ่านเข้ามายังตัวตรวจจับได้

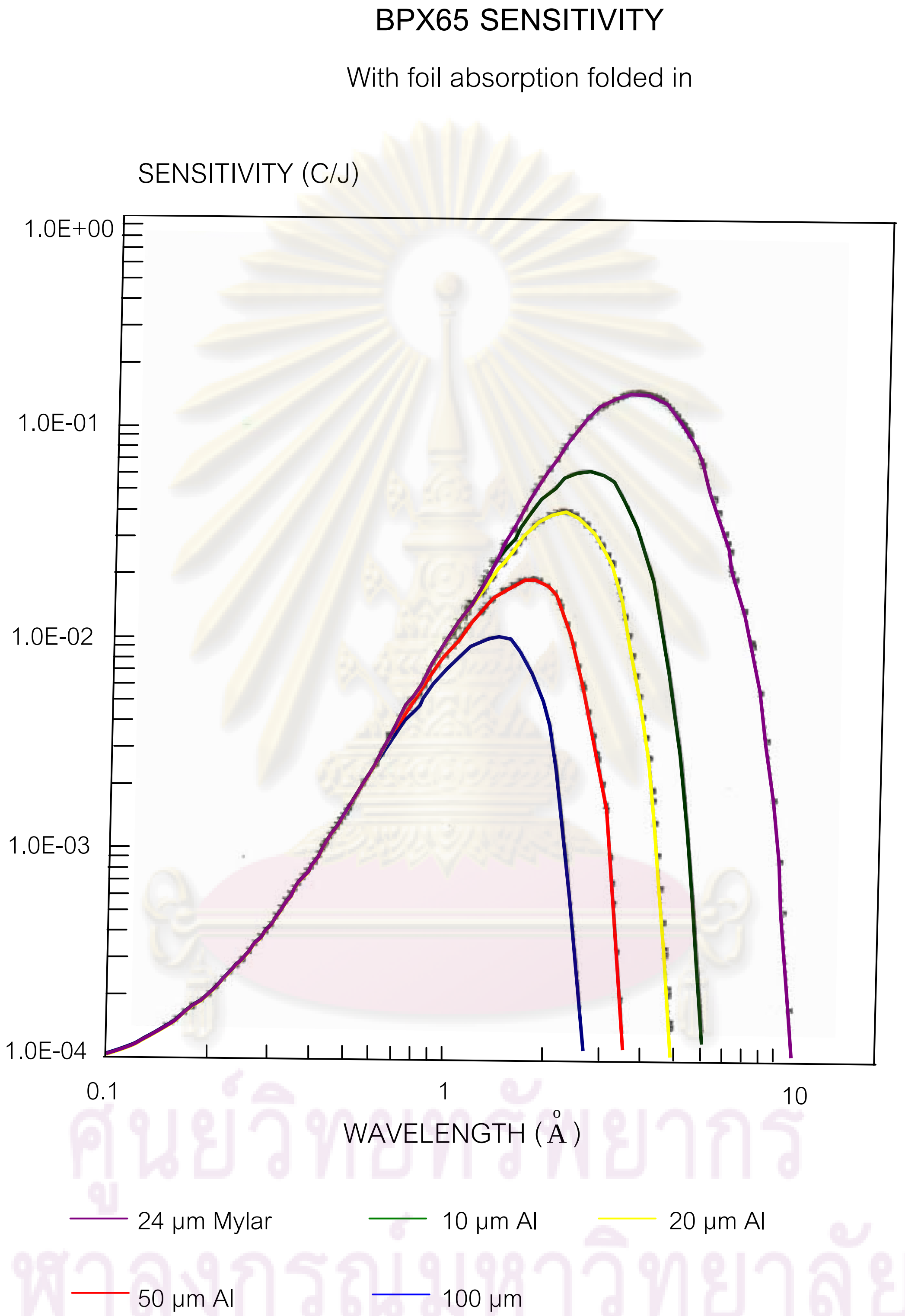
จากนั้นทำการต่ออุปกรณ์ตรวจจับเข้ากับวงจรไบแอสผันกลับ (reverse bias) ซึ่งใช้ไฟขนาด 45 โวลต์ เมื่อรังสีดังกล่าวตกกระทบกับซิลิคอนพินไดโอดรุ่น BPX 65 ผลที่ได้คือความต่างศักย์ที่วัดได้โดยใช้เครื่องออสซิลโลสโคปเกิดการเปลี่ยนแปลง สำหรับวงจรดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แผนภาพแสดงวงจรการต่อซิลิคอนพินไดโอดรุ่น BPX 65 เพื่อตรวจวัดรังสีเอกซ์ [28]

พิจารณาสภาพไวของซิลิคอนพินไดโอดซึ่งผ่านตัวกรองแผ่นไมลาร์อะลูมิเนียมที่ความหนาต่างๆโดยพิจารณาในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.01 – 1.00 นาโนเมตร สามารถแสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพไวกับความยาวคลื่นที่ความหนาของตัวกรองแผ่นอะลูมิเนียมที่แตกต่างกัน [28]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการที่อธิบายสภาพไวของซิลิคอนพินไดโอด คือ สมการดังต่อไปนี้

$$S(\lambda) = 0.28\exp(-\mu x_1)(1-\exp(-\mu x_2)) \tag{4.15}$$

กำหนดให้

$S(\lambda)$ คือ ค่าตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัด

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่ทำการตรวจจับ

x_1 คือ ความหนาของสารกึ่งตัวนำในชั้น n-type

x_2 คือ ความหนาของสารกึ่งตัวนำจากชั้นผิวภายในชั้น (intrinsic layer)

μ คือ สัมประสิทธิการดูดกลืนมวลของซิลิกอน (mass absorption coeffient of silicon)

จากสมการที่ 4.15 นำไปสู่การคำนวณหากระแสที่ได้จากการตกกระทบของรังสีบนตัวตรวจจับสัญญาณซึ่งคำนวณหาได้ดังสมการที่ 4.16

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\frac{dQ}{dt} = V_{plasma} \int P(\lambda, T_e) \frac{A}{4\pi d^2} \exp(-\mu_a x) S(\lambda) d\lambda \qquad (4.16)$$

โดย

V_{plasma} คือ ปริมาตรของพลาสมาทั้งหมด

$P(\lambda, T_e)$ คือ ผลรวมความหนาแน่นของกำลังการแผ่รังสีของพลาสมาต่อความยาวคลื่น

A คือ พื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์ตรวจวัด

μ_a คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเชิงเส้น (linear absorption coefficient) สำหรับในงานวิจัยนี้ คือ แผ่นไมลาร์อะลูมิเนียม

$\frac{dQ}{dt}$ คือ กระแสที่ได้จากการตอบสนองต่อรังสีของอุปกรณ์ตรวจจับ

T_e คือ อุณหภูมิของพลาสมา

d คือ ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดถึงอุปกรณ์ตรวจจับรังสี

x คือ ความหนาของแผ่นกรองรังสี โดยแผ่นที่ใช้กรองรังสีเอกซ์ ได้แก่ แผ่นอะลูมิเนียม

ดังนั้น ความเข้มของรังสีที่ปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดในแต่ละเงื่อนไขจึงสามารถเปรียบเทียบได้โดยการคำนวณหากระแสที่ได้จากการตกกระทบของรังสีที่ส่งผลต่อตัวตรวจจับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

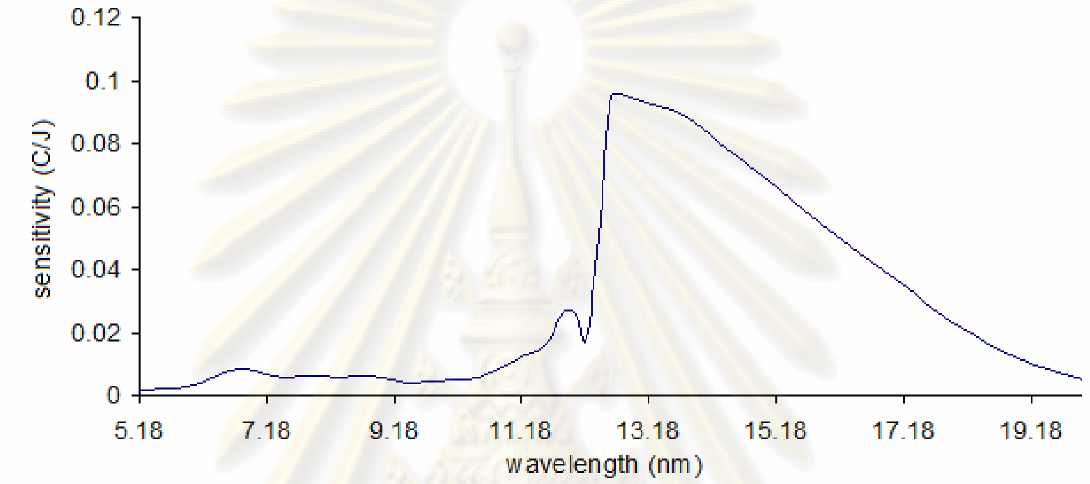
4.4.4 **โฟโตไดโอดชนิด** SXUV 100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โฟโตไดโอดชนิด SXUV100 สามารถตรวจจับรังสีที่มีความยาวคลื่นในช่วง 11–18 นาโนเมตร [8] ซึ่ง ดังนั้น อุปกรณ์ดังกล่าวจึงสามารถตรวจจับรังสีที่ครอบคลุมความยาวคลื่นในช่วง 13.5 นาโนเมตร ได้

สำหรับการใช้งานซึ่งใช้หลักการเดียวกันกับการต่อวงจรของซิลิคอนพินไดโอด แบบ BPX 65 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.23

พิจารณาสภาพไวของโฟโตไดโอดชนิด SXUV100 โดยพิจารณากราฟรูปที่ 4.25 ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 5.18 - 20.00 นาโนเมตร



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพไวกับ
ความยาวคลื่นของโฟโตไดโอดชนิด SXUV 100 [35]

สำหรับสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากโฟโตไดโอดชนิด SXUV 100 เมื่อทำการคำนวณหาจำนวนประจุตามสมการที่ 4.16 จะสามารถบอกได้แหล่งกำเนิดดังกล่าวสามารถปลดปล่อยรังสีที่ตอบสนองต่อสภาพไวของอุปกรณ์ตรวจจับว่าความเข้มของรังสีดังกล่าวเท่าใด

ในบทถัดมากล่าวถึงการทดลองและผลที่ได้จากการทดลอง ดังนั้น รายละเอียดเกี่ยวกับการทดลองขออธิบายในบทถัดไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ผลการจำลองหาค่าพารามิเตอร์ที่ให้กำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต

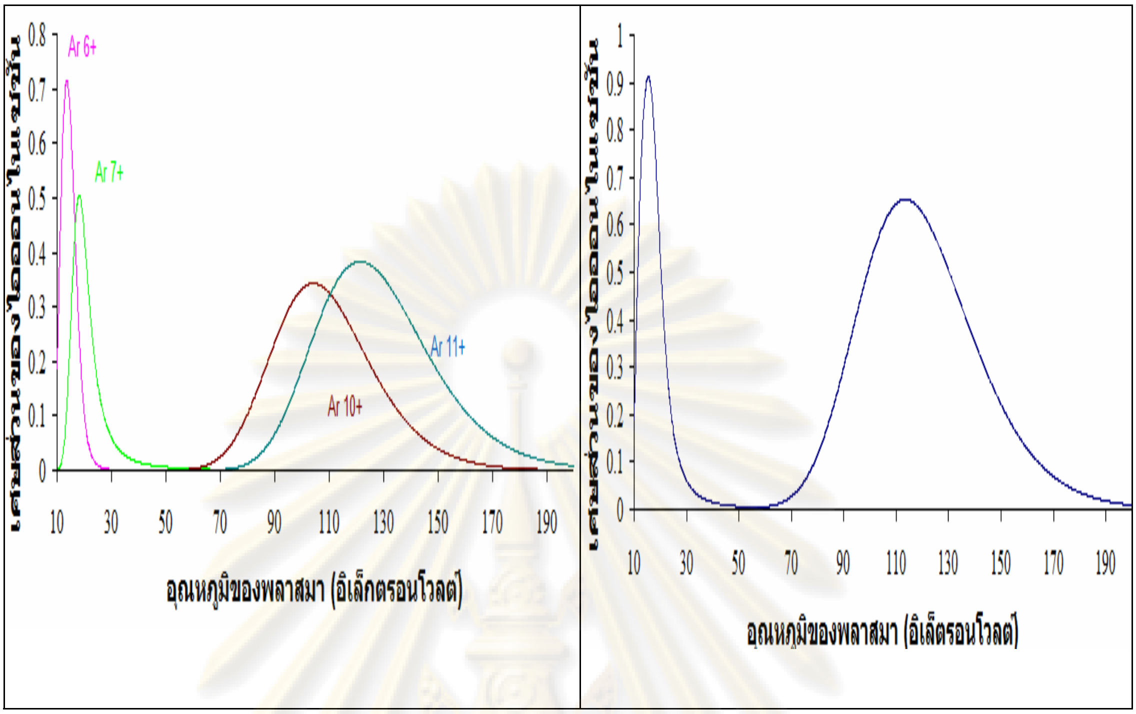
การจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของพลาสมาในเครื่องพลาสมาโฟกัสโดยใช้แบบจำลองสมดุลคอโรนาเพื่อหาอุณหภูมิของพลาสมาที่ให้เกิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตสำหรับกระบวนการแผ่รังสีของพลาสมาที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์คือ การแผ่รังสีแบบเส้น

ในงานวิจัยนี้ศึกษาพลาสมาที่เกิดจากแก๊สอาร์กอนซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพลาสมากับเศษส่วนของไอออไนเซชันของอาร์กอนที่สถานะต่างๆ ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวได้จากการคำนวณหาเศษส่วนของไอออไนเซชันด้วยแบบจำลองสมดุลคอโรนา

สำหรับไอออนของอาร์กอนที่ให้รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต ได้แก่ Ar 6+ ,Ar 7+ ,Ar 10+ และAr 11+ ตามลำดับ [35]

จากรูปที่ 3.2 สามารถเลือกไอออนของอาร์กอนในสถานะที่ทำให้ปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.1 ก โดยกราฟแต่ละเส้นแทนด้วยไอออนของอาร์กอนที่สถานะแตกต่างกันออกไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. ข.

รูปที่ 5.1 ก. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพลาสมากับเศษส่วนของไอออไนเซชันของอาร์กอนที่สถานะ Ar 6+ ,Ar 7+ ,Ar 10+ ,Ar 11+

ข. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพลาสมากับผลรวมเศษส่วนไอออไนเซชันของอาร์กอนที่สถานะ Ar 6+ ,Ar 7+ ,Ar 10+ ,Ar 11+

พิจารณารูปที่ 5.1 ข คือกราฟที่เกิดจากผลรวมเศษส่วนของไอออไนเซชันของอาร์กอนในสถานะที่ปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต สำหรับการหาผลรวมของเศษส่วนของไอออไนเซชันของอาร์กอนซึ่งเป็นการพิจารณาหาอุณหภูมิที่ทำให้ได้จำนวนไอออนที่สามารถแผ่รังสีดังกล่าวมากที่สุด

จากรูปที่ 5.1 ข พบว่าตำแหน่งยอดของกราฟดังกล่าวมี 2 จุด ได้แก่ จุดที่อุณหภูมิพลาสมามีค่าเท่ากับ 15.5 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 113.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาอุณหภูมิของพลาสมาที่เหมาะสมสำหรับการจำลองในงานวิจัยนี้ คือ 113.5 อิเล็กตรอนโวลต์ เนื่องจากอุณหภูมิของพลาสมาดังกล่าวมีค่ามากซึ่งสอดคล้องกับระบบปฏิบัติการซึ่งเป็นระบบพลาสมาพลังงานสูง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการจำลองให้พลาสมามีอุณหภูมิตามค่าที่หาได้

จากนั้นทำการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องพลาสมาโฟกัสเพื่อหาพารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิพลาสมาที่หาได้จากแบบจำลองสมดุลคอโรนา กำหนดให้ตัวแปรควบคุมของการจำลอง คือ ค่าความจุไฟฟ้าของถังเก็บประจุ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจร ระยะห่างจากกึ่งกลางของแท่งแอโนดไปยังขอบในของแท่งแคโทดซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5 รัศมีของแท่งแอโนดและชนิดของแก๊สที่ใช้ในการทดลองซึ่งเลือกใช้แก๊สอาร์กอน

สำหรับตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงได้แก่ ค่าความต่างศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุ ความยาวของแท่งแอโนด และ จำนวนของแก๊สที่ให้แก่เครื่องพลาสมาโฟกัสซึ่งปฏิบัติการตั้งแต่ความดัน 1.0 – 2.5 มิลลิบาร์

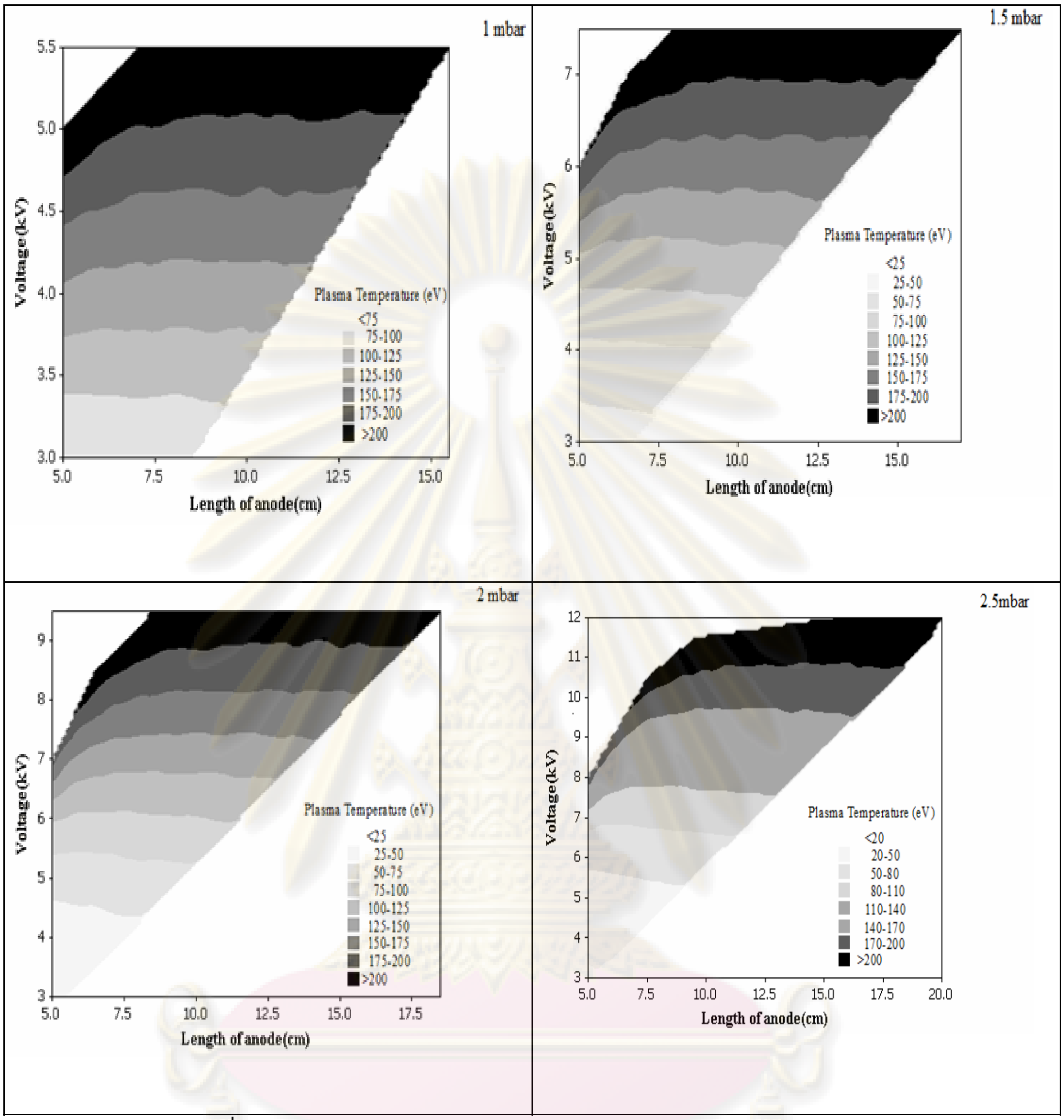
การคำนวณหาอุณหภูมิของพลาสมาได้ใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาซึ่งได้อธิบายในบทที่ 3

จากแบบจำลองการเคลื่อนที่ของพลาสมาได้ทำการคำนวณหาอุณหภูมิพลาสมาในแต่ละเฟส ตั้งแต่เฟสตามแกนจนถึงเฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมี พบว่าอุณหภูมิดังกล่าวแปรผันตรงกับอัตราเร็วช็อค

สำหรับอุณหภูมิของพลาสมาที่นำมาพิจารณานั้น เป็นอุณหภูมิที่คำนวณได้จากการจำลองในเฟสช็อคสะท้อนตามแนวรัศมี เนื่องจากที่เฟสดังกล่าวพลาสมาเกิดการบีบอัด ส่งผลให้พลาสมาเกิดการปลดปล่อยรังสีและอนุภาคต่างๆ

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของแท่งแอโนด, ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและอุณหภูมิของพลาสมาที่ความดันต่างๆ สามารถแสดงดังรูปที่ 5.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของแท่งแอโนด, ค่าความต่างศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุกับอุณหภูมิของพลาสมาที่ความดันตั้งแต่ 1.0 – 2.5 มิลลิบาร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 5.2 เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ให้แก่ตัวเก็บประจุโดยกำหนดให้ความยาวแอโนดคงที่ พบว่าอุณหภูมิของพลาสมามีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าเพิ่มความยาวแอโนดโดยกำหนดให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดคงที่ ส่งผลให้อุณภูมิของพลาสมาลดลง

พิจารณารูปที่ 5.2 อุณภูมิของพลาสมาที่นำมาพิจารณานั้นอยู่ในช่วง 100 – 125 อิเล็กตรอนโวลต์ แต่ค่าที่เหมาะสมซึ่งทำให้ได้ไอออนที่แผ่รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตสูงสุดนั้น คือ อุณภูมิของพลาสมามีค่าเท่ากับ 113.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน, ความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด, ความยาวของแท่งแอโนดและอุณหภูมิพลาสมา

ความดัน (mbar)	ความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (kV)	ความยาวแท่งแอโนด (cm)	อุณหภูมิของพลาสมา (eV)
1.0	3.5	9	113.5307
1.5	5	7.5	113.4089
2.0	6.5	7.5	113.5690
2.5	8	9	114.2799

จากตารางที่ 5.1 พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ตัวเก็บประจุเพื่อใช้ในการดำเนินการมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน

สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่นำมาดัดแปรเพื่อกำเนิดรังสีดังกล่าว ซึ่งพิจารณาที่เงื่อนไขที่ความดัน 2.0 และ 2.5 มิลลิบาร์ ตามลำดับ เนื่องจากที่เงื่อนไขดังกล่าวสามารถดำเนินการได้ง่ายกว่าเงื่อนไขอื่นๆในห้องปฏิบัติการที่ใช้ทำการทดลองเพราะเครื่องพลาสมาโฟกัสที่ใช้ในห้องปฏิบัติการนั้นเป็นระบบที่ใช้ความต่างศักย์สูง ดังนั้น เงื่อนไขดังกล่าวจึงเหมาะสมต่อการดัดแปร

หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปดัดแปรกับเครื่องพลาสมาโฟกัสแล้วทำการทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นซึ่งได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ผลการทดลองตรวจจับความต่างศักย์ที่วัดได้ในเงื่อนไขทั่วไปและเงื่อนไขที่ได้จากการจำลอง

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการวัดความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของเครื่องพลาสมาโฟกัสที่สภาวะต่างๆ ดังนี้

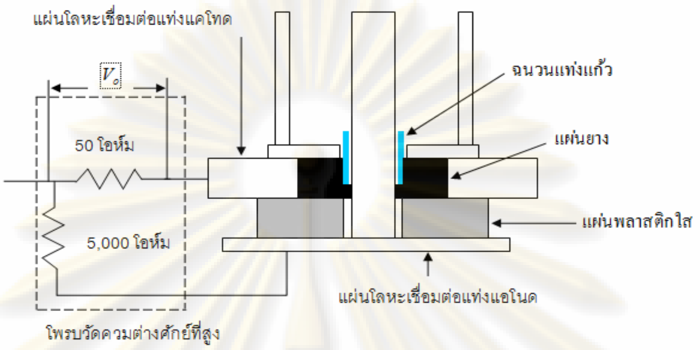
ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลอง

เงื่อนไขปฏิบัติการ	ความต่างศักย์ที่ประจุแก่ตัวเก็บประจุ (kV)	ความยาวของแท่งแอโนด (cm)
1	6.5	7.5
2	8.0	9.0
3	12.5	16.0

สำหรับการวัดความต่างศักย์ดังกล่าวทำได้โดยนำเครื่องออสซิลโลสโคปต่อเข้ากับโพรบวัดความต่างศักย์สูง โดยวัดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอโนดซึ่งออสซิลโลสโคปดังกล่าวได้วัดความต่างศักย์ V_o ซึ่งตกคร่อมความต้านทาน 50 โอห์ม เพื่อลดขนาดของสัญญาณลง 100 เท่า ก่อนเข้าสู่ออสซิลโลสโคปเพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณที่ได้มีค่ามากจนเกินขอบเขตของการวัดของออสซิลโลสโคปดังกล่าว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

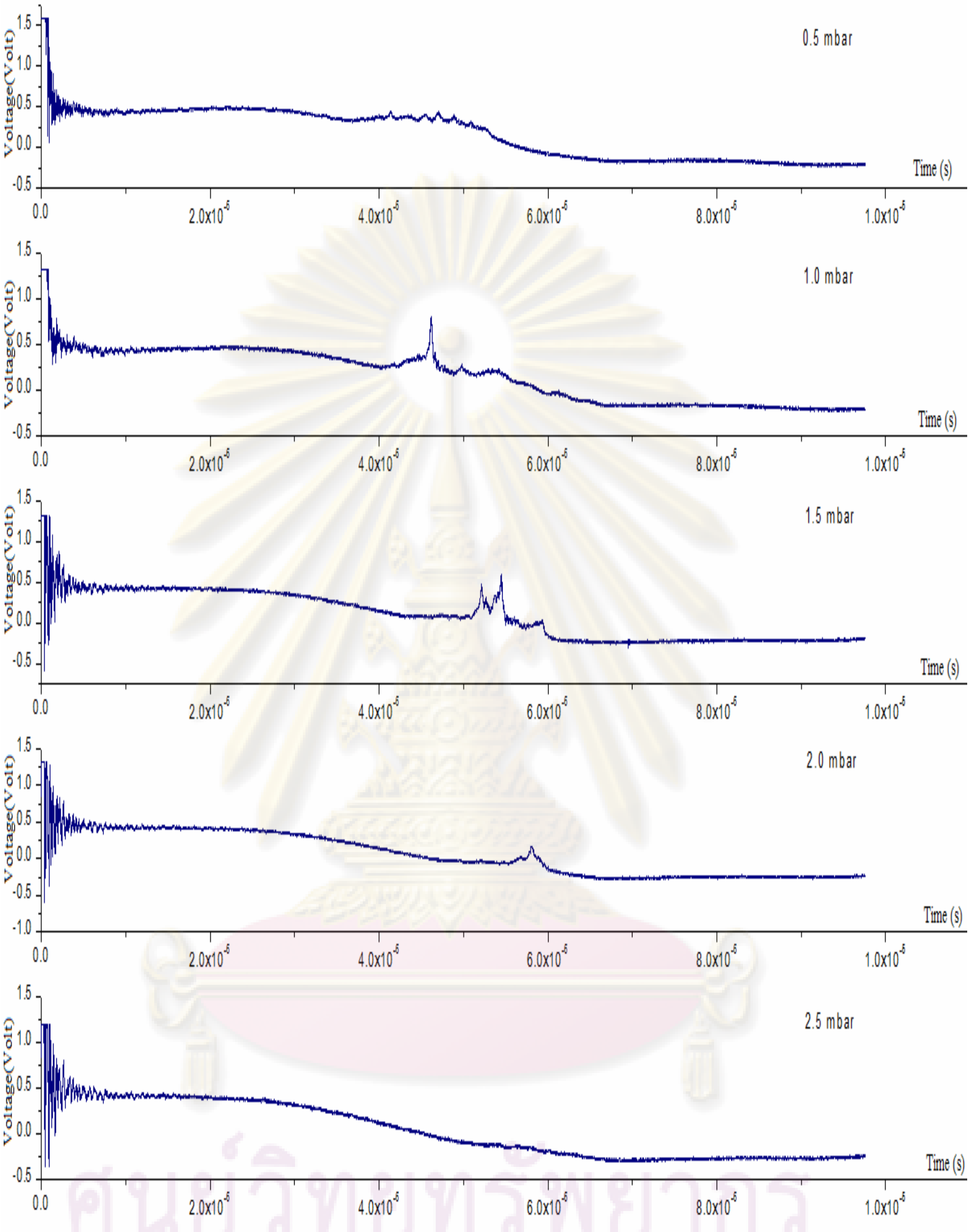
พิจารณาแผนภาพการต่ออุปกรณ์โพรบวัดความต่างศักย์ที่สูงซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.3 โดยติดตั้งโพรบดังกล่าวกับเครื่องพลาสมาโฟกัสซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 5.3 แผนภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์โพรบวัดความต่างศักย์ที่สูง เพื่อตรวจจับสัญญาณความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทด

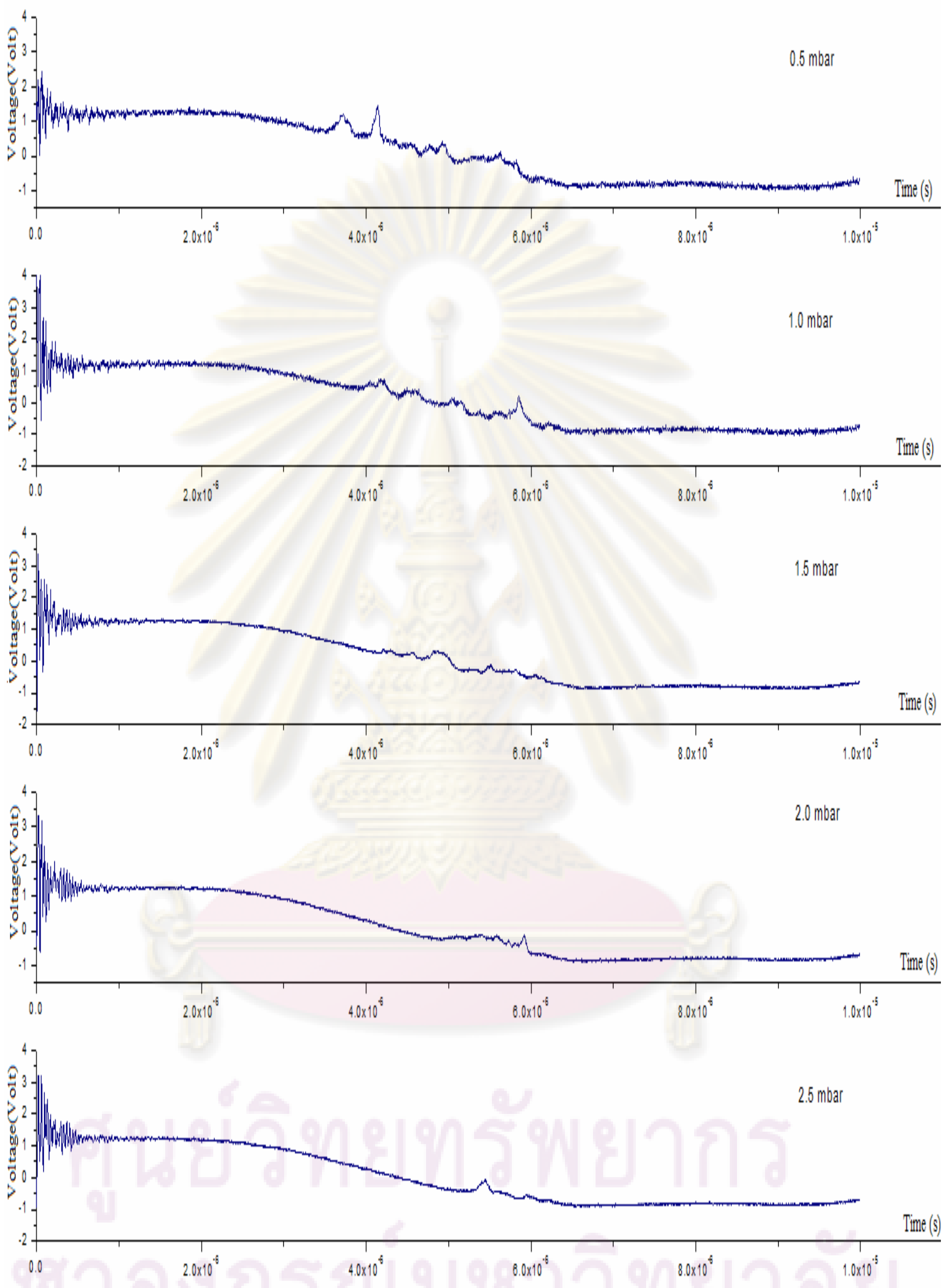
สำหรับผลการทดลองการตรวจจับสัญญาณความต่างศักย์ที่ได้ในแต่ละเงื่อนไข ซึ่งแสดงดังกราฟการทดลองตามรูปที่ 5.4, 5.5, 5.6 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



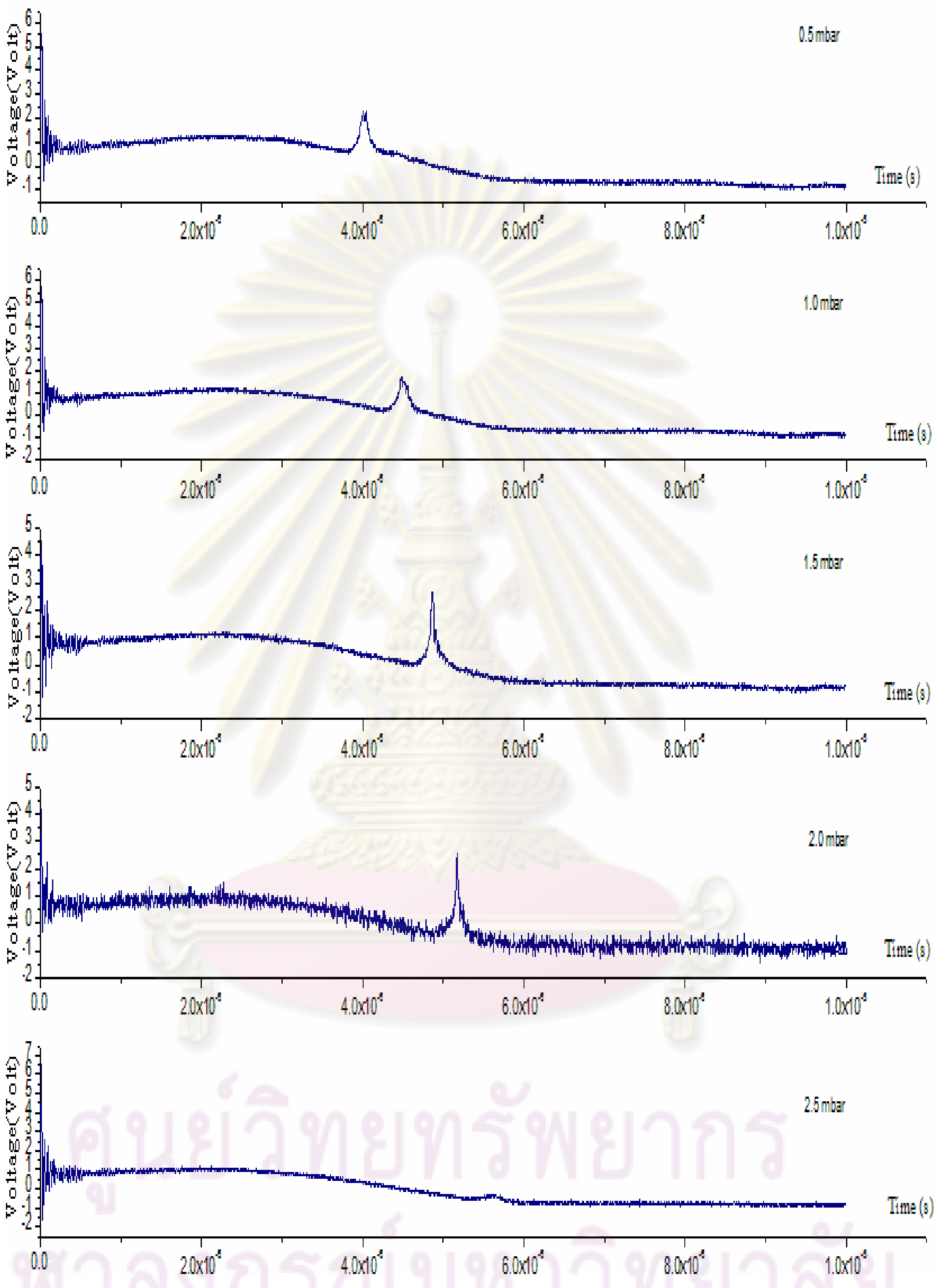
รูปที่ 5.4 ผลการทดลองวัดความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรดซึ่งประจุไฟฟ้าแก่ตัวเก็บประจุด้วยศักย์ 6.5 กิโลโวลต์ และแท่งแอโนดยาว 7.5 เซนติเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.5 ผลการทดลองวัดความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรดซึ่งประจุไฟฟ้าแก่ตัวเก็บประจุด้วยศักย์ 8.0 กิโลโวลต์ และแท่งแอโนดยาว 9.0 เซนติเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.6 ผลการทดลองวัดความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรดซึ่งประจุไฟฟ้าแก่ตัวเก็บประจุด้วยศักย์ 12.5 กิโลโวลต์ และแท่งแอโนดยาว 16.0 เซนติเมตร

จากการทดลองตรวจจับสัญญาณความต่างศักย์ที่เงื่อนไขต่างๆภายใต้การปฏิบัติการที่ความดันตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ พบว่าเวลาตั้งแต่พลาสมาแตกตัวจนถึงช่วงที่พลาสมาเกิดการโฟกัส โดยในช่วงดังกล่าวจะพบยอดของความต่างศักย์ซึ่งแสดงดังกราฟรูปที่ 5.4, 5.5, 5.6 และช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการเกิดโฟกัสของพลาสมาจะอยู่ในช่วงเวลาระหว่าง $3 \times 10^{-6} – 6 \times 10^{-6}$ วินาที และพบว่าช่วงเวลาตั้งแต่ช่วงแตกตัวถึงช่วงโฟกัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งดูได้จากการเลื่อนตำแหน่งของยอดที่เกิดขึ้นในแต่ละกราฟ

พิจารณาสัญญาณของความต่างศักย์ที่ได้ในเงื่อนไขที่กำหนดให้ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้วยศักย์ขนาด 6.5 กิโลโวลต์ และให้แท่งแอโนดยาว 7.5 เซนติเมตร กับเงื่อนไขที่กำหนดให้ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้วยศักย์ขนาด 8.0 กิโลโวลต์ และให้แท่งแอโนดยาว 9.0 เซนติเมตร ตามลำดับ ลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ที่ได้ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.4, 5.5 พบว่าสัญญาณดังกล่าวในช่วงเวลาที่เกิดการโฟกัสของพลาสมานั้นมีความกว้างและพบว่าความสูงของยอดสัญญาณที่ได้ในช่วงโฟกัสนั้นมีน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่ให้ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้วยขนาด 12.5 กิโลโวลต์ และให้แท่งแอโนดยาว 16 เซนติเมตร โดยเงื่อนไขดังกล่าวเป็นเงื่อนที่ใช้ในการปฏิบัติการทั่วไปเพื่อให้เครื่องพลาสมาโฟกัสเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ พบว่าที่เงื่อนไขดังกล่าวยอดของสัญญาณที่วัดได้จากการเกิดโฟกัสของพลาสมานั้นมีความสูงกว่ายอดของสัญญาณที่วัดได้จากเงื่อนไขที่ถูกดัดแปร และความกว้างสัญญาณของความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในช่วงโฟกัสจะแคบซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.6 และสัญญาณโฟกัสที่ได้ในเงื่อนไขนี้เป็นสัญญาณที่มีเพียง 1 ยอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับลักษณะของสัญญาณที่พบตามเงื่อนไขที่กำหนดให้แท่งแอโนดยาว 7.5 เซนติเมตร และ 9.0 เซนติเมตร นั้นเนื่องจากพลาสมาในเงื่อนไขดังกล่าวมีพลังงานเริ่มต้นน้อย ส่งผลให้ความเร็วของพลาสมามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่ให้ความต่างศักย์เริ่มต้นแก่ตัวเก็บประจุตามเงื่อนไขที่กำหนดให้แท่งแอโนดยาว 16.0 เซนติเมตร ซึ่งมีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขที่ได้จากการดัดแปร ดังนั้น แรงโลเรนตซ์ที่ใช้เร่งพลาสมาให้เคลื่อนที่มีค่ามากทำให้ความเร็วของพลาสมาในเฟสตามแกนและเฟสช็อคเข้าภายในแนวรัศมีมีค่ามาก ส่งผลให้การเกิดโฟกัสของพลาสมาจะใช้เวลาสั้นๆ โดยพิจารณาจากความกว้างของยอดพลาสมา แต่สำหรับเงื่อนไขที่ได้จากการดัดแปร พบว่าความต่างศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุเพื่อใช้ในการแตกตัวของพลาสมามีค่าน้อย แรงโลเรนตซ์ที่ใช้เร่งพลาสมามีค่าน้อย ส่งผลให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของพลาสมามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกรณีแท่งแอโนดยาว 16.0 เซนติเมตร จึงเป็นสาเหตุให้สัญญาณความต่างศักย์ที่ในช่วงการเกิดโฟกัสมียอดต่ำและความกว้างของสัญญาณในช่วงโฟกัสมีค่ามากกว่าในเงื่อนไขที่กำหนดให้แท่งแอโนดยาว 16.0 เซนติเมตร

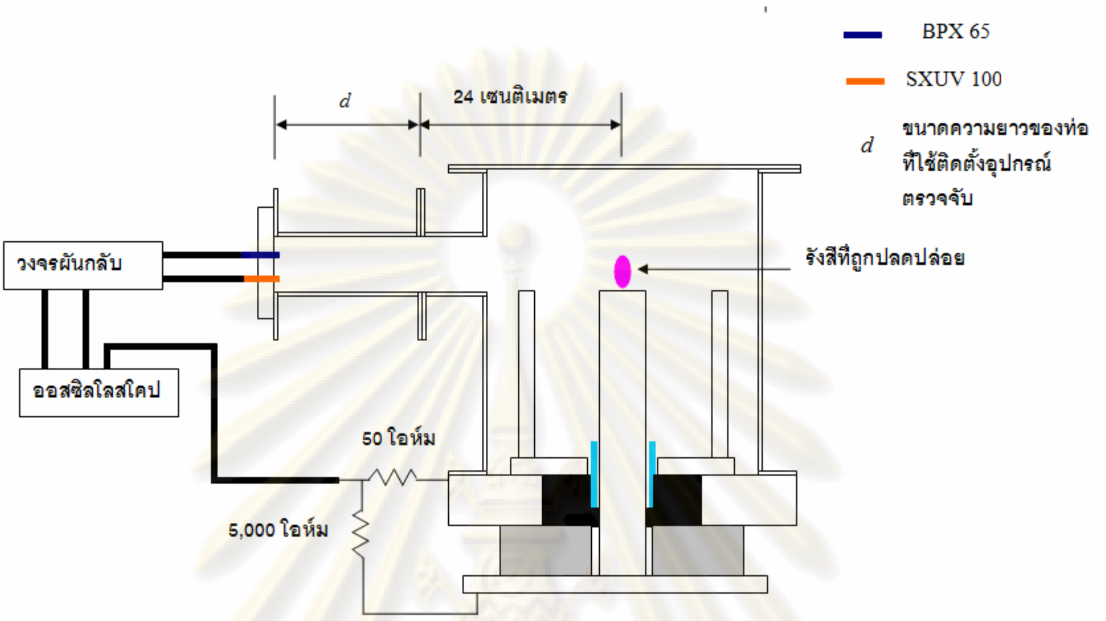
ดังนั้น ถ้าต้องการให้สัญญาณความต่างศักย์ที่ได้ในช่วงโฟกัสมียอดสูงและสัญญาณดังกล่าวเกิดการโฟกัสที่ดี คือ ความกว้างของสัญญาณในช่วงโฟกัสมีค่าน้อยและมียอดของสัญญาณ 1 ยอด จำเป็นต้องประจุพลังงานให้แก่ตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นเพิ่มไปเร่งพลาสมาให้มีความเร็วมากซึ่งจะทำให้เวลาที่ใช้ในการเกิดโฟกัสมีค่าน้อยลง

5.3 ผลการทดลองตรวจจับรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตและผลที่ได้จากการจำลองในเครื่องพลาสมาโฟกัส

การนำเสนอผลการทดลองส่วนนี้ คือ การตรวจจับรังสีที่ได้จากแหล่งกำเนิดเครื่องพลาสมาโฟกัส โดยสัญญาณที่ได้จากการวัดอยู่ในรูปของสัญญาณศักย์ไฟฟ้า สำหรับผลที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย พื้นที่ใต้กราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลา และตำแหน่งยอดของสัญญาณที่เกิดขึ้น

สำหรับการทดลองตรวจจับรังสีที่ปลดปล่อยจากเครื่องพลาสมาโฟกัสซึ่งใช้อุปกรณ์ตรวจจับรังสี ได้แก่ SXUV 100 และ BPX 65 โดยรายละเอียดที่เกี่ยวกับอุปกรณ์ดังกล่าวอยู่ในเนื้อหาของบทที่ 4

การทดลองในหัวข้อนี้ได้ทำการตรวจจับสัญญาณความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด สัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับรังสีต่างๆซึ่งสามารถแสดงวิธีการติดตั้งดังรูปที่ 5.4

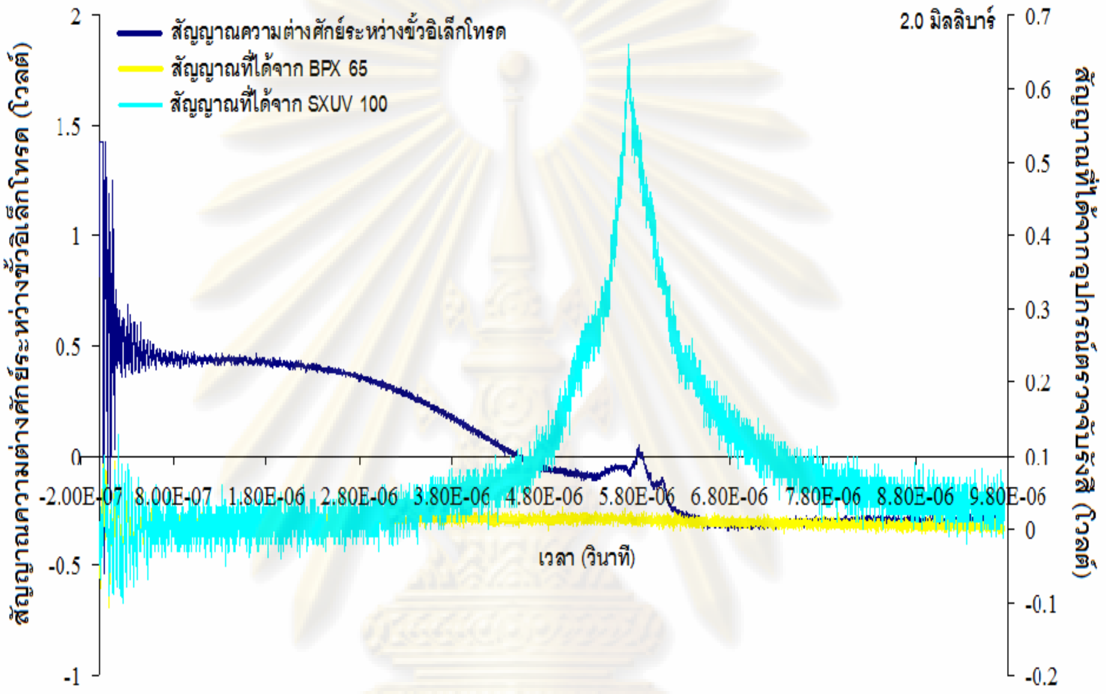


รูปที่ 5.7 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองตรวจจับรังสีและความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรด

จากรูปที่ 5.7 ความยาวของท่อ d ที่ใช้ในการทดลองมีด้วยกัน 2 ค่า ได้แก่ ความยาวของท่อขนาด 10 เซนติเมตร และขนาด 30 เซนติเมตร สำหรับวงจรผันกลับที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ใช้ความต่างศักย์ผันกลับ 45 โวลต์ เพื่อให้อุปกรณ์ตรวจจับดังกล่าวส่งสัญญาณไปยังออสซิลโลสโคปเมื่อมีรังสีที่ตอบสนองต่อสภาพไวของอุปกรณ์ตรวจจับดังกล่าวมากระทำกับอุปกรณ์ตรวจจับ

การตรวจจับรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตซึ่งมีช่วงความยาวคลื่นครอบคลุมความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตร จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจจับเฉพาะรังสีที่มีความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าว โดยได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 สำหรับกราฟที่แสดงสัญญาณที่ได้จากการทดลองซึ่งประกอบด้วยสัญญาณที่ได้จาก BPX 65 ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับรังสีในช่วงความยาวคลื่น 0.01-4.00 นาโนเมตร และสัญญาณที่วัดได้จาก SXUV 100 สามารถตรวจจับรังสีในช่วงความยาวคลื่นครอบคลุมความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตร

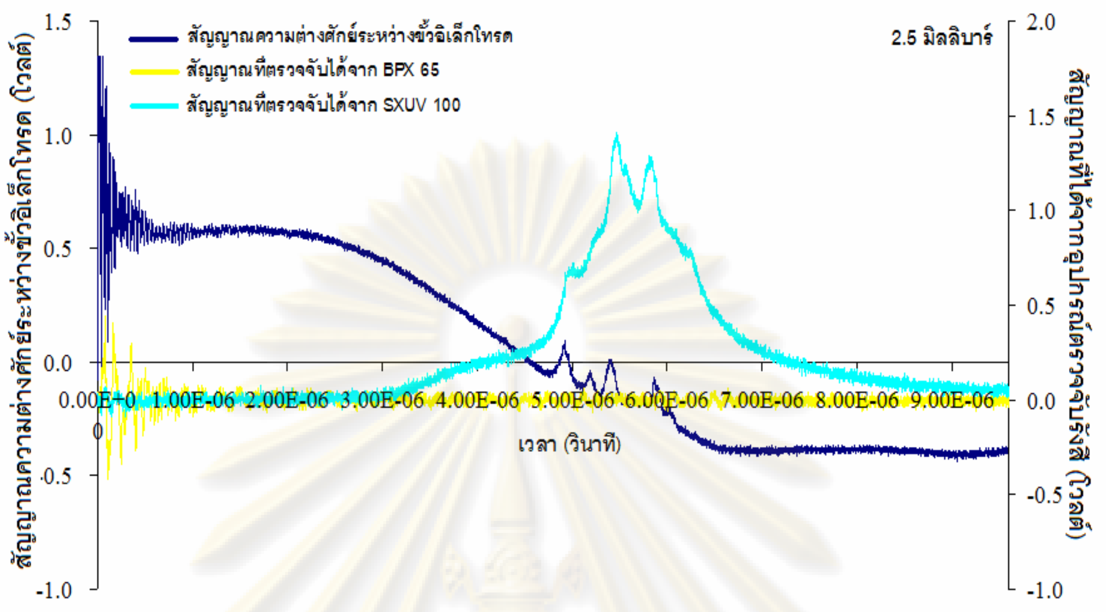
พิจารณารูปที่ 5.8 เมื่อทำการดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสให้มีความยาวเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร และชาร์จประจุเข้าสู่ถังเก็บประจุจนได้ความต่างศักย์ ขนาด 6.5 กิโลโวลต์ และปฏิบัติการที่ความดัน 2.0 มิลลิบาร์ พบสัญญาณที่มาจาก SXUV 100 แต่ไม่พบสัญญาณที่มาจาก BPX 65



รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการทดลองซึ่งประกอบด้วยความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเครื่องพลาสมา สัญญาณที่ได้จาก BPX 65 และ สัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 กับ เวลา ที่ความดัน 2.0 มิลลิบาร์ ความยาวของแท่งแอโนด 7.5 เซนติเมตร และ ความต่างศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุเป็น 6.5 กิโลโวลต์ ซึ่งวัดห่างจากแหล่งกำเนิด 34 เซนติเมตร

พิจารณารูปที่ 5.9 เมื่อทำการดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสให้มีความยาวเท่ากับ 9.0 เซนติเมตร และชาร์จประจุเข้าสู่ถังเก็บประจุจนได้ความต่างศักย์ ขนาด 8.0 กิโลโวลต์ และปฏิบัติการที่ความดัน 2.5 มิลลิบาร์ พบสัญญาณที่มาจาก SXUV 100 แต่ไม่พบสัญญาณที่มาจาก BPX 65 เช่นเดียวกับรูปที่ 5.8

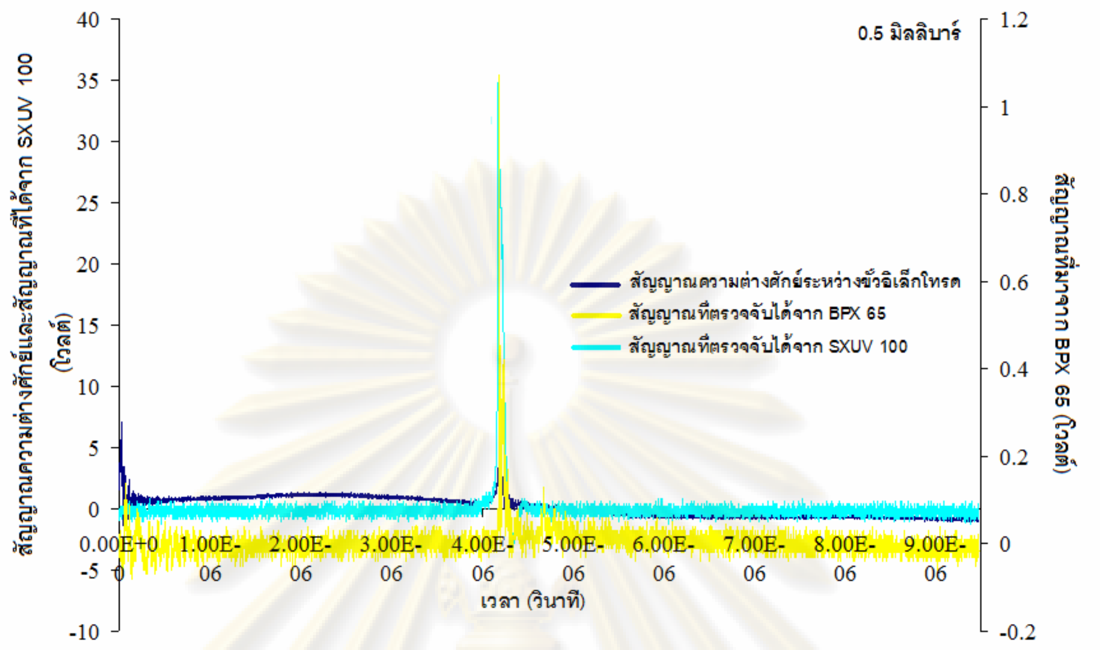
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการทดลองซึ่งประกอบด้วยความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเครื่องพลาสมาสัญญาณที่ได้จาก BPX 65 และสัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 กับ เวลา ที่ความดัน 2.5 มิลลิบาร์ ความยาวของแท่งแอโนด 9.0 เซนติเมตร และ ความต่างศักย์ให้แก่ตัวเก็บประจุเป็น 8.0 กิโลโวลต์ ซึ่งวัดห่างจากแหล่งกำเนิด 34 เซนติเมตร

พิจารณารูปที่ 5.10 เมื่อทำการทดลองที่เงื่อนไขในการปฏิบัติโดยเงื่อนไขดังกล่าวทำให้เครื่องพลาสมาโฟกัสสามารถปลดปล่อยรังสีเอกซ์ซึ่งกำหนดให้ความยาวของแท่งแอโนดมีค่าเป็น 16 เซนติเมตร และชาร์จประจุเข้าสู่ถังเก็บประจุจนได้ความต่างศักย์ 12.5 กิโลโวลต์ [26] พบสัญญาณที่มาจาก BPX 65 และสัญญาณมาจาก SXUV 100 มีตำแหน่งยอดตรงกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการทดลองซึ่งประกอบด้วยความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเครื่องพลาสมาสัญญาณที่ได้จากBPX 65 และสัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 กับ เวลา ที่ความดัน 0.5 มิลลิบาร์ ความยาวของแท่งแอโนด 16.0 เซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุเป็น 12.5 กิโลโวลต์ ซึ่งวัดห่างจากแหล่งกำเนิด 34 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.8 และ 5.9 พบสัญญาณที่มาจากอุปกรณ์ตรวจจับรังสี SXUV 100 แต่ไม่พบสัญญาณที่มาจากอุปกรณ์ตรวจจับรังสี BPX 65 แต่เมื่อทำการพิจารณารูปที่ 5.10 พบว่าปรากฏสัญญาณที่มาจากอุปกรณ์ตรวจจับรังสี BPX 65 และ SXUV 100 ที่เวลาเดียวกันซึ่งมียอดตรงกับยอดของสัญญาณที่ได้จากการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรด

สำหรับสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับรังสีซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.10 พบว่าสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับทั้งสองมีตำแหน่งยอดที่ตรงกันและพบสัญญาณที่ได้จาก BPX 65 โดยในการทดลองทั้งหมดได้ใช้แผ่นไมลาร์อะลูมิเนียมเพื่อทำหน้าตัดสัญญาณของรังสีที่มีความยาวคลื่นมากกว่ารังสีเอกซ์และยอมให้เฉพาะรังสีเอกซ์ผ่านเข้าไปยัง BPX 65 ดังนั้นสัญญาณที่ได้จาก BPX 65 จึงเป็นสัญญาณของรังสีเอกซ์ จากรูปที่ 5.10 รังสีที่ปลดปล่อยจากเครื่องพลาสมาโฟกัสจึงเป็นรังสีเอกซ์

ดังนั้น จากรูปที่ 5.8 และ 5.9 ซึ่งพบเฉพาะสัญญาณที่มาจากอุปกรณ์ตรวจจับ SXUV 100 แต่ไม่พบสัญญาณที่มาจาก BPX 65 ดังนั้น สัญญาณที่มาจากอุปกรณ์ตรวจจับรังสี SXUV 100 จึงเป็นสัญญาณที่ได้จากรังสีที่ครอบคลุมช่วงรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต

สำหรับปริมาณของรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ตกกระทบยังอุปกรณ์ตรวจจับรังสี SXUV 100 สามารถดูจากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างสัญญาณที่ได้กับเวลาซึ่งมาจากตัวตรวจจับด้วยอุปกรณ์ SXUV 100 จากการทดลองพบว่าเมื่อให้ความต่างศักย์แก่ตัวเก็บประจุ 12.5 กิโลโวลต์ ความยาวของแท่งแอโนด 16 เซนติเมตร จะพบแต่สัญญาณของรังสีเอกซ์เท่านั้น ดังนั้นจึงกล่าวว่าความเข้มของรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตในเงื่อนไขนี้เป็นศูนย์

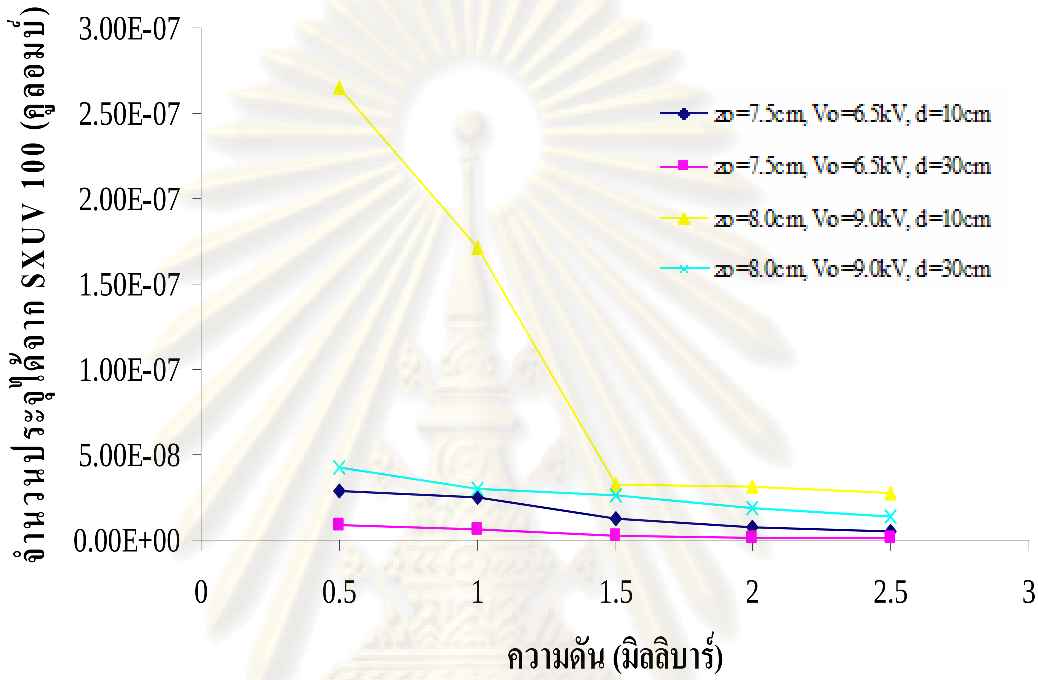
การทดลองที่เกี่ยวกับการตรวจจับรังสีชนิดนี้ ได้ปรับเปลี่ยนขนาดความยาวของท่อ d ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.4 มีขนาดเป็น 10 เซนติเมตรและ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับผลการทดลองดังกล่าวสามารถแสดงตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ตารางผลการทดลองหาจำนวนประจุซึ่งได้จากการตรวจจับรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ความดันตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ โดยปรับเปลี่ยนขนาดของท่อ d ให้มีขนาดเป็น 10 เซนติเมตรและ 30 เซนติเมตร ตามลำดับที่ได้จากการจำลอง โดยกำหนดให้ z_o คือ ความยาวของแท่งแอโนด และ V_o คือ ความต่างศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุ

ความดัน	จำนวนประจุ x 10^{-9} (คูลอมบ์)			
	z_o = 7.5 เซนติเมตร V_o = 6.5 กิโลโวลต์		z_o = 9.0 เซนติเมตร V_o = 8.0 กิโลโวลต์	
	ขนาดของท่อ d (เซนติเมตร)		ขนาดของท่อ d (เซนติเมตร)	
	10	30	10	30
0.5	28.20	8.92	264.8	43.00
1.0	24.98	6.33	171.2	29.60
1.5	12.84	2.60	31.96	26.60
2.0	7.94	1.69	31.62	18.26
2.5	4.58	1.07	26.94	13.50

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 5.3 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับประจุที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด SXUV 100 ซึ่งแสดงตามกราฟดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประจุที่ตรวจวัดได้จาก SXUV 100 กับความดันที่เปลี่ยนแปลงในเงื่อนไขต่างๆ กำหนดให้ z_o คือ ความยาวของแท่งแอโนด V_o คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ตัวเก็บประจุ และ d คือความยาวของท่อที่เชื่อมต่อออกจากภาชนะสุญญากาศเพื่อทำหน้าที่ส่งผ่านรังสีไปยังอุปกรณ์ตรวจจับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากกราฟที่ 5.11 เมื่อเพิ่มความดันของแก๊สอาร์กอนภายในภาชนะสุญญากาศ พบว่าจำนวนประจุที่คำนวณได้จากอุปกรณ์ตรวจจับ SXUV 100 มีแนวโน้มที่ลดลง และเมื่อเพิ่มระยะตัวตรวจจับออกจากแหล่งกำเนิดพบว่าจำนวนประจุที่ได้มีค่าลดลง สำหรับกรณีที่เปลี่ยนแปลงความดันของแก๊สแล้วส่งผลกระทบต่อจำนวนประจุ เนื่องจากพลังงานที่ให้แก่แก๊สเพื่อใช้แตกตัวเป็นพลาสมาถูกกระจายไปยังอะตอมต่างๆที่อยู่ภายในแก๊ส ดังนั้นพลังงานต่ออะตอมของอาร์กอนจึงมีค่าลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้จำนวนของไอออนในสถานะที่ปลดปล่อยรังสีในช่วงที่ตอบสนองต่ออุปกรณ์ตรวจวัดน้อยลง เป็นสาเหตุให้รังสีดังกล่าวมีความเข้มลดลง และในกรณีที่เพิ่มระยะห่างจากแหล่งกำเนิดของอุปกรณ์ตรวจจับซึ่งทำให้ความเข้มของรังสีที่ส่งไปถึงอุปกรณ์มีค่าลดลงเนื่องจากความเข้มของรังสีหรือแสงแปรผันแบบผกผันกับระยะทางกำลังสอง

พิจารณาผลการทดลองการตรวจจับรังสีด้วยอุปกรณ์ตรวจจับ SXUV 100 ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.3 พบว่าจำนวนประจุที่ได้จากสัญญาณของ SXUV 100 ในกรณีที่ทำการดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสให้แท่งแอโนดมีความยาวเท่ากับ 9 เซนติเมตร และให้ความต่างศักย์แก่ตัวเก็บประจุเท่ากับ 8 กิโลโวลต์ จะมีจำนวนประจุมากกว่ากรณีที่ทำการดัดแปรให้เครื่องพลาสมาโฟกัสให้แท่งแอโนดมีความยาว 7.5 เซนติเมตร และให้ความต่างศักย์แก่ตัวเก็บประจุเป็น 6.5 กิโลโวลต์ แต่เมื่อทำการชาร์จให้ตัวเก็บประจุมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 12.5 กิโลโวลต์ จะพบแต่สัญญาณของรังสีเอกซ์เท่านั้น

พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุสามารถคำนวณตามสมการที่ 5.1

$$E = \frac{1}{2} C V^2 \tag{5.1}$$

กำหนดให้ C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

V คือ ความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

E คือ พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แทนค่า C ด้วยความจุไฟฟ้าขนาด 30 ไมโครฟารัด และแทนค่า V เท่ากับ 8 กิโลโวลต์จะได้พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุเท่ากับ 960 จูล แต่เมื่อแทนค่า V เท่ากับ 6.5 กิโลโวลต์จะได้พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุเท่ากับ 640 จูล ดังนั้นเมื่อจ่ายศักย์ไฟฟ้าขนาด 8 กิโลโวลต์ ให้แก่ตัวเก็บประจุซึ่งทำให้แก๊สอาร์กอนแตกตัวแล้วให้จำนวนไอออนที่สามารถแผ่รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตได้มากกว่าในกรณีที่จ่ายศักย์ไฟฟ้าขนาด 6.5 กิโลโวลต์ ซึ่งให้พลังงานน้อยกว่าจึงส่งผลให้พลังงานที่ทำให้แก๊สอาร์กอนแตกตัวแล้วให้ไอออนในสถานะที่ทำให้เกิดรังสีดังกล่าวมีน้อย ดังนั้น จำนวนประจุที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับรังสี SXUV 100 เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าขนาด 8 กิโลโวลต์ จึงมีมากกว่าจำนวนประจุที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับเมื่อจ่ายศักย์ไฟฟ้าขนาด 6.5 กิโลโวลต์

เมื่อพิจารณาในกรณีที่ให้ความต่างศักย์แก่ตัวเก็บประจุเป็น 12.5 กิโลโวลต์ จะพบแต่สัญญาณของรังสีเอกซ์เนื่องจาก พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุขนาด 30 ไมโครฟารัด มีค่าเท่ากับ 2343.75 จูล ซึ่งมีค่ามากกว่ากรณีที่ให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ตัวเก็บประจุด้วยขนาด 6.5 กิโลโวลต์ และ 8 กิโลโวลต์ ตามลำดับ จึงส่งผลทำให้แก๊สอาร์กอนได้รับพลังงานแล้วแตกตัวให้ไอออนในสถานะที่ปลดปล่อยรังสีเอกซ์

สำหรับการคำนวนหาจำนวนประจุที่ได้จากการจำลองใน 2 เงื่อนไขได้แก่ เงื่อนไขที่ 1 กำหนดให้ความยาวของแอโนดเป็น 7.5 เซนติเมตรและความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็น 6.5 กิโลโวลต์ เงื่อนไขที่ 2 กำหนดให้ความยาวของแอโนดเป็น 9.0 เซนติเมตรและความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็น 8.0 กิโลโวลต์ สามารถแสดงดังตารางที่ 5.4

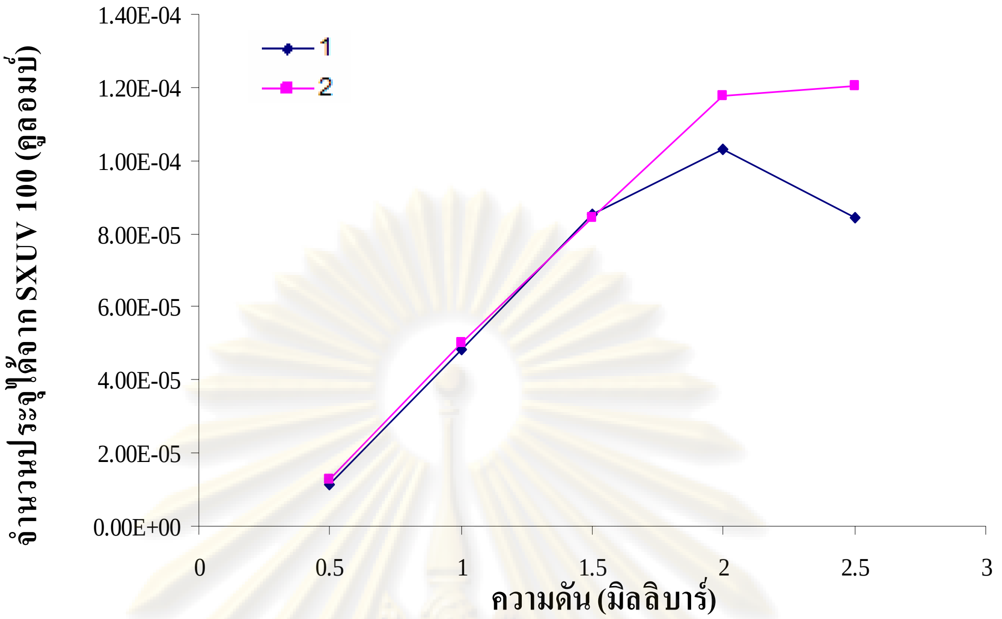
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณตามแบบจำลองเพื่อหาจำนวนประจุเนื่องจากการแผ่รังสีของแหล่งกำเนิดซึ่งไปตกกระทบอุปกรณ์ตรวจจับโดยกำหนดให้ z_o คือ ความยาวของแท่งแอโนด และ V_o คือ ความศักย์ต่างที่ให้แก่ตัวเก็บประจุ

ความดัน (mbar)	จำนวนประจุ x 10^{-5}(คูลอมบ์)	
	z_o = 7.5 เซนติเมตร V_o = 6.5 กิโลโวลต์	z_o = 9.0 เซนติเมตร V_o = 8.0 กิโลโวลต์
0.5	1.15	1.27
1.0	4.83	5.00
1.5	8.54	8.44
2.0	10.3	11.8
2.5	8.45	12.0

นำค่าที่ได้จากการคำนวนดังกล่าวมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันในระบบปฏิบัติการกับจำนวนประจุดังรูปที่ 5.12 โดย เงื่อนไขที่ 1 กำหนดให้ความยาวของแอโนดเป็น 7.5 เซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็น 6.5 กิโลโวลต์ เงื่อนไขที่ 2 กำหนดให้ความยาวของแอโนดเป็น 9.0 เซนติเมตรและความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็น 8.0 กิโลโวลต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประจุที่ได้จากการจำลองกับความดันที่เปลี่ยนแปลงในเงื่อนไขที่ 1 และ เงื่อนไขที่ 2

จากตารางที่ 5.4 พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ที่เงื่อนไขที่ 2 ที่ความดัน 2.5 มิลลิบาร์ จะให้ค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตสูงสุดเนื่องจากที่จุดดังกล่าวให้อุณหภูมิของพลาสมาซึ่งให้ไอออนในสถานะที่ปลดปล่อยรังสีดังกล่าวสูงสุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 5.12 พบว่าแนวโน้มของประจุที่คำนวณได้จากการแบบจำลองจะมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุดซึ่งเป็นจุดที่เหมาะสม โดยจุดดังกล่าวคือจุดที่ทำให้แก๊สอาร์กอนเกิดการแตกตัวแล้วให้จำนวนไอออนในสถานะที่ปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตมากสุดหลังจากที่ผ่านจุดดังกล่าวแล้วจำนวนประจุจะลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวพิจารณาให้แก๊สอาร์กอนที่อยู่ภายในภาชนะสุญญกาศได้รับพลังงานแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในสถานะที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ความดันต่ำจะพบว่าจำนวนของแก๊สที่อยู่ภายในภาชนะดังกล่าวมีน้อยส่งผลให้พลาสมาที่อยู่ภายในภาชนะดังกล่าวเคลื่อนที่ได้เร็วเนื่องจากแรงต้านการเคลื่อนของพลาสมาซึ่งเกิดจากความดันของแก๊สที่ไม่ได้แตกตัวซึ่งอยู่ด้านบนของพลาสมาชีธมีน้อย จึงทำให้พลาสมาชีธเคลื่อนที่ได้เร็ว โดยแรงดังกล่าวแปรผันตรงกับจำนวนของแก๊สที่อยู่บนพลาสมาชีธ แต่เมื่อเพิ่มความดันภายในภาชนะสุญญากาศ ทำให้แรงต้านการเคลื่อนที่ของพลาสมามีเพิ่มขึ้นส่งผลให้พลังงานของพลาสมาที่แปรผันตรงกับเร็วของพลาสมามีค่าลดลง จึงทำให้แก๊สอาร์กอนได้รับพลังงานเพื่อนำไปใช้แตกตัวเป็นไอออนลดลง ส่งผลทำแก๊สอาร์กอนแตกตัวเป็นไอออนในสถานะที่ต่ำ ดังนั้น ที่ความดันต่ำๆ จะได้ไอออนที่มีสถานะสูงซึ่งให้รังสีที่มีพลังงานมากกว่ารังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต แต่เมื่อเพิ่มความดันจนถึงจุดเหมาะสมพบว่าพลังงานที่แก๊สอาร์กอนได้รับเป็นพลังงานที่ให้แก๊สดังกล่าวแตกตัวแล้วให้จำนวนไอออนในสถานะที่ปลดปล่อยรังสีดังกล่าวได้มากสุด แต่เมื่อเพิ่มความดัน พลังงานของพลาสมามีน้อยลงทำให้แก๊สอาร์กอนที่ได้รับพลังงานดังกล่าวแล้วแตกตัวเป็นไอออนในสถานะที่ต่ำกว่าสถานะที่ให้รังสีเอกซ์ทรีมมอัลตราไวโอเลต ซึ่งมีจำนวนเพิ่มขึ้นจึงทำให้จำนวนประจุที่ได้จากการตรวจจับของ SXUV 100 มีค่าลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดลองซึ่งแสดงดังกราฟที่ 5.11 พบว่าเมื่อทำการดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสให้สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองในแต่ละเงื่อนไข ได้แก่ 1 กำหนดให้ความยาวของแอโนดเป็น 7.5 เซนติเมตรและความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็น 6.5 กิโลโวลต์ 2 กำหนดให้ความยาวของแอโนดเป็น 9.0 เซนติเมตรและความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็น 8.0 กิโลโวลต์ ตามลำดับ แล้วทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนค่าความดันตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ พบว่าจำนวนประจุที่ได้จากการตรวจจับรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตด้วยอุปกรณ์ตรวจจับรังสี SXUV 100 มีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้นซึ่งสวนทางกับการคำนวณตามแบบจำลองซึ่งแสดงแนวโน้มดังรูปที่ 5.8 เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับ SXUV 100 มีการตอบสนองต่อรังสีในช่วงความยาวคลื่น 12 – 17 นาโนเมตร และพลังงานต่ออะตอมของอาร์กอนมีค่าลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงดังตารางในภาคผนวก ก.2 ซึ่งส่งผลต่อการแตกตัวของอาร์กอน

ดังนั้น จึงทำให้จำนวนประจุที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับ SXUV 100 มีค่าลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น พิจารณาที่ความดันต่ำพบว่ารังเอกซ์ทรีมอัลตราไวเลตส่วนใหญ่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 13.5 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากที่แตกของอาร์กอนในสถานะที่สูงกว่าแต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะมีการแตกตัวของอาร์กอนซึ่งให้จำนวนไอออนอยู่ในสถานะที่สามารถปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตร มากขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาแบบจำลองพลาสมาในเครื่องพลาสมาโฟกัสและจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเพื่อหาพารามิเตอร์ที่ทำให้เครื่องดังกล่าวสามารถแผ่รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่มีความเข้มสูงสุดภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม สำหรับการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ใช้แบบจำลองของ ศาสตราจารย์ ซิง ลี [29] และการประมาณค่าในช่วงเพื่อนำไปใช้ในการหาค่าที่พารามิเตอร์ที่ทำให้เครื่องพลาสมาโฟกัสสามารถแผ่รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตได้มากสุด พิจารณาโปรแกรมการจำลองที่พัฒนาขึ้นโดย ศาสตราจารย์ ซิง ลี พบว่าโปรแกรมดังกล่าวไม่สะดวกต่อการนำไปใช้ทำนายหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เนื่องจากต้องทำการปรับค่าตัวแปรที่ใช้ในการฟิตเทียบกับกระแสทุกครั้งให้สอดคล้องกับผลการทดลองจึงสามารถศึกษาสมบัติต่างๆของพลาสมาได้ สำหรับตัวอย่างการนำโปรแกรมดังกล่าวไปใช้ ได้แก่ การหาอุณหภูมิของพลาสมา กำลังที่ได้จากการแผ่รังสีของพลาสมา เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้เขียนโปรแกรมโดยใช้แบบจำลองของพลาสมาเพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์ที่ทำให้ได้ปริมาณรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ครอบคลุมความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตร มากที่สุด จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิของพลาสมาเป็นปัจจัยที่ทำให้แก๊สอาร์กอนแตกตัวแล้วให้จำนวนไอออนในสถานะที่สามารถปลดปล่อยรังสีดังกล่าว ดังนั้นการคำนวณอุณหภูมิพลาสมาที่ทำให้ได้จำนวนไอออนในสถานะดังกล่าวได้ใช้แบบจำลองสมดุลคอโรนา จากแบบจำลองพบว่าอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 15.5 และ 113.5 อิเล็กตรอนโวลต์ แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกให้อุณหภูมิอิเล็กตรอนมีค่าเป็น 113.5 อิเล็กตรอนโวลต์ เนื่องจาก เครื่องพลาสมาโฟกัสที่ใช้ในระบบปฏิบัติการเป็นเครื่องพลาสมาที่ใช้พลังงานสูง ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิของพลาสมาที่มีค่ามากที่สุด หลังจากที่ได้ค่าอุณหภูมิดังกล่าวขั้นต่อไปคือหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้เครื่องพลาสมาโฟกัสสามารถเร่งพลังงานแล้วทำให้อุณหภูมิของพลาสมามีค่าเท่ากับ 113.5 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับพารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้ คือ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ความยาวของแท่งแอโนด และความดันที่ใช้ปฏิบัติการ จากการจำลองของพลาสมาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งได้แสดงดังกราฟที่ 5.2 พบว่าความดันที่ใช้ในการให้กำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตของเครื่องพลาสมาโฟกัสอยู่ในช่วง 1.0 – 2.5 มิลลิบาร์

จากตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในระบบปฏิบัติการ ได้แก่ ความยาวแท่งแอโนด 7.5 เซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 6.5 กิโลโวลต์ กับ ความยาวแท่งแอโนด 9.0 เซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 8.0 กิโลโวลต์ เนื่องจากค่าดังกล่าวได้ใช้ความต่างศักย์ที่เหมาะสมต่อระบบปฏิบัติการของเครื่องพลาสมาโฟกัสที่ต้องใช้ความต่างศักย์สูง

สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยการตรวจจับสัญญาณของความต่างศักย์ตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรดและตรวจจับรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ได้จากเครื่องพลาสมาโฟกัสในเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

1. ความยาวแท่งแอโนด 7.5 เซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 6.5 กิโลโวลต์
2. ความยาวแท่งแอโนด 9.0 เซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 8.0 กิโลโวลต์
3. ความยาวแท่งแอโนด 16.0 เซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุขนาด 12.5 กิโลโวลต์

พิจารณาเงื่อนไขที่ 1 และ 2 เป็นเงื่อนไขที่ได้จากการคำนวณตามแบบจำลองจำลอง สำหรับเงื่อนที่ 3 เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในระบบปฏิบัติการที่ทำให้เครื่องพลาสมาโฟกัสสามารถปลดปล่อยรังสีเอกซ์ได้ [26]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรด พบว่าเวลาที่ใช้ตั้งแต่พลาสมาเริ่มแตกตัวจนถึงช่วงที่พลาสมาเกิดโฟกัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันของแก๊สภายในภาชนะสุญญากาศ สาเหตุดังกล่าวมาจากเมื่อความดันของแก๊สภายในภาชนะสุญญากาศเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้จำนวนของแก๊สมีมากขึ้นซึ่งแก๊สดังกล่าวได้กระทำกับพลาสมาชีธซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยต้านการเคลื่อนที่ของพลาสมา ดังนั้น ความเร็วของพลาสมาชีธจึงลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจึงทำให้เวลาที่ใช้ในการเกิดโฟกัสเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาสัญญาณความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้วอิเล็กโทรดพบว่าสัญญาณที่ได้จากการทดลองตามเงื่อนไขที่ 1 และ 2 ในช่วงที่เกิดโฟกัสซึ่งดูจากยอดของสัญญาณที่แสดงดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 พบว่าสัญญาณโฟกัสที่เกิดขึ้นมีฐานที่กว้างแต่ยอดที่พบจากสัญญาณนั้นมีค่าน้อยและพบหลายยอดแต่สัญญาณความต่างศักย์ที่ได้ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งจ่ายศักย์ตกคร่อมแก่ถังเก็บประจุขนาด 30 ไมโครฟารัด ด้วยศักย์ขนาด 12.5 กิโลโวลต์ พบว่าสัญญาณที่ได้ในช่วงโฟกัสมีฐานแคบกว่าเงื่อนไขที่ 1 และ 2 และยอดของสัญญาณที่ได้เป็นยอดเดียวและยอดดังกล่าวมีความสูงกว่ายอดของสัญญาณที่พบในเงื่อนไขที่ 1 และ 2 ซึ่งแสดงว่าการเกิดโฟกัสในเงื่อนไขที่ 3 มีความรุนแรงมากกว่าเงื่อนไขที่ 1 และ 2 สำหรับสาเหตุดังกล่าวมาจากการที่พลาสมาในเงื่อนไขที่ 3 ได้รับพลังงานมากกว่าเงื่อนไขที่ 1 และ 2 ส่งผลให้ความเร็วของพลาสมามีค่ามาก ดังนั้น จึงทำให้พลาสมาชีธเกิดการโฟกัสที่รุนแรง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับการตรวจวัดรังสีรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต ได้ใช้อุปกรณ์ตรวจจับ SXUV 100 ซึ่งตอบสนองได้ดีในช่วงความยาวคลื่น ตั้งแต่ 12.00 – 17.00 นาโนเมตร จากการทดลองตามเงื่อนไขที่ 1, 2, และ 3 ซึ่งพบสัญญาณที่มาจากอุปกรณ์ตรวจจับดังกล่าว แสดงว่ารังสีที่ได้ในแต่ละเงื่อนไขได้ปลดปล่อยรังสีที่ตอบสนองต่ออุปกรณ์ตรวจจับ SXUV 100 พิจารณาอุปกรณ์ตรวจจับรังสี BPX 65 ซึ่งตอบสนองต่อความยาวคลื่นในช่วงรังสีเอกซ์ เมื่อนำอุปกรณ์ทั้งสองมาตรวจจับรังสีที่มาจากแหล่งกำเนิดพบว่า ที่เงื่อนไข 1 และ 2 ไม่พบสัญญาณที่มาจาก BPX 65 แต่พบสัญญาณที่มาจาก SXUV 100 เท่านั้น แต่สำหรับเงื่อนไขที่ 3 พบสัญญาณที่มาจากอุปกรณ์ทั้งสองในเวลาเดียวกันซึ่งดูจากยอดของสัญญาณที่ตรงกัน ดังนั้นในเงื่อนไขที่ 3 จึงสรุปว่ารังสีที่ตรวจวัดได้จากแหล่งกำเนิด คือ รังสีเอกซ์และรังสีที่ตรวจวัดได้จากเงื่อนไขที่ 1และ 2 คือ รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต พิจารณาปริมาณของรังสีที่ได้จากแหล่งกำเนิดซึ่งวิเคราะห์ได้โดยการคำนวณหาจำนวนประจุที่ได้จากพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณที่ตรวจวัดได้กับเวลา จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความดันของแก๊สภายในภาชนะสุญญากาศจะส่งผลต่อปริมาณของรังสีซึ่งมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แต่จากการจำลองพบว่าปริมาณของประจุมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดัน สำหรับผลที่ได้เกิดจากพลังงานเฉลี่ยต่ออะตอมของอาร์กอน (ตารางที่ ก.2) ที่มีค่าลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อจำนวนไอออนในสถานะที่สามารถปลดปล่อยรังสีดังกล่าว แต่เมื่อพิจารณาที่ความดันต่ำๆจะพบว่ารังสีที่ตอบสนองต่ออุปกรณ์ตรวจวัดดังกล่าว เป็นรังที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 13.5 นาโนเมตร ซึ่งมาจากการที่แก๊สอาร์กอนได้แตกตัวเป็นไอออนซึ่งอยู่ในสถานะที่สูงกว่าสถานะที่ปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นครอบคลุม 13.5 นาโนเมตร และปริมาณไอออนที่พบในแก๊สอาร์กอนซึ่งสามารถปลดปล่อยรังสีต่างๆมีจำนวนมากที่ความดันต่ำ แต่ที่ความดันสูงพบว่าปริมาณของไอออนดังกล่าวมีน้อยเนื่องจากพลังงานที่แก๊สได้รับไม่สามารถทำให้อะตอมที่อยู่ภายในแตกตัวเป็นไอออนได้หมด ดังนั้นจำนวนประจุที่วัดได้จากการทดลองจึงปริมาณลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาปริมาณของรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ครอบคลุมความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตร พบว่าจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นเนื่องจากพลังงานเฉลี่ยต่ออะตอมที่อาร์กอนได้รับซึ่งมีค่าลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้นนั้นส่งผลต่อการแตกตัวของอาร์กอนซึ่งจะแตกตัวเป็นไอออนในสถานะที่ให้รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตซึ่งมีความยาวคลื่นครอบคลุมความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตร นั่นคืออุณหภูมิของพลาสมามีค่าเข้าสู่ 113.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ให้จำนวนได้จำนวนไอออนในสถานะที่ปลดปล่อยรังสีชนิดนี้มากที่สุดจะส่งผลให้แหล่งกำเนิดรังสีดังกล่าวสามารถปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตมากที่สุด

จากบทต่างๆที่ผ่านมาของวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาแบบจำลองของพลาสมาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่นำไปใช้ในดัดแปรเครื่องพลาสมาโฟกัสให้สามารถกำเนิดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ให้ปริมาณมากที่สุดภายใต้สภาวะที่เหมาะสมซึ่งผลที่ได้จากการทดลองตามสมมติฐานพบว่ารังสีที่ตรวจจับได้นั้น เป็นรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต โดยที่ความดันต่ำรังสีดังกล่าวมีความยาวคลื่นที่น้อยกว่า 13.5 นาโนเมตร แต่เมื่อเพิ่มความดันรังสีดังกล่าวจะมีค่าใกล้เคียงความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตร แต่อย่างไรก็ตาม การทดลองดังกล่าวสามารถบอกได้ว่ารังสีที่มาจากแหล่งกำเนิดเป็นรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตแต่ไม่สามารถระบุความยาวคลื่นที่แน่นอนได้ เนื่องจากในการพิจารณาความยาวคลื่นของรังสีดังกล่าว จำเป็นต้องใช้กระจก Si/Mo ซึ่งสามารถสะท้อนแต่รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นครอบคุลมความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตร

ดังนั้น ในการวิจัยขั้นถัดไป คือ การยืนยังรังสีที่มาจากแหล่งกำเนิดดังกล่าวเป็นรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นครอบคุลมความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตร ด้วยการใช้กระจก Si/Mo เป็นตัวคัดกรองรังสีและสะท้อนรังสีดังกล่าวไปยังอุปกรณ์ตรวจจับ SXUV 100 และพัฒนาแบบจำลองให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องพลาสมาโฟกัสได้ตรงตามความเป็นจริง เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้อยู่ได้พิจารณาของพลาสมาชีธในเครื่องพลาสมาโฟกัสเป็นแผ่นตรงซึ่งไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง ประกอบกับการพิจารณาพลาสมาที่เกิดขึ้นเป็นระบบมหภาคจึงทำให้ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด ดังนั้น จำเป็นต้องพัฒนาโปรแกรมการจำลองโดยอาศัยหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์และการพิจารณาพลาสมาในระดับอะตอมเพื่อทำให้แบบจำลองสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ตรงกับการทดลองจริงและสามารถนำไปประยุกต์กับงานด้านอุตสหกรรมและด้านอื่นๆได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

(1) Fomenkov, I. V., et.al. EUV discharge light source based on a dense plasma focus operated with positive and negative polarity. J.Phys.D: Appl. Phys. 37(2004): 3266-3276.

(2) SEMATECH Inc. Extreme Ultraviolet Lithography. Available from: http://www.sematech.org/research/lithography.htm [2009, January 12].

(3) Singh, R. N., et.al. High-numerical-aperture optical designs. IBM Journal of Research and development. 41(1997): 39-48.

(4) Akira Endo. High-Average Power EUV Light Source for the Next-Generation Lithography by Laser-Produced Plasma. IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS. 10(2004): 1298-1306.

(5) Banine, V., and Moors, R. Plasma source for EUV lithography exposure tools J.Phys.D: Appl. Phys. 37(2004): 3207-3212.

(6) Lee, S. Y., Kim, T. G., and Ahn, J. Enhancement of Extreme Ultraviolet Reflective Multilayer Properties by the Insertion of Ru Barrier Layer. Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003): 3792-3795.

(7) Wikipedia. Rang of spectrum. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum [2008, November 14].

(8) Hesch, K., et.al. Extreme Ultraviolet(EUV) sources based on synchrotron radiation. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator conference, pp. 654-656. USA, 2001.

(9) Jonkers, J. High power extreme ultra-violet(EUV) light source for future lithography. Plasma Sources Sci.Technol. 15 (2006): S8-S16.

(10) Lee, H. L., et.al. Extreme-Ultraviolet lensless Fourier-transform holography monitoring. Applied Optics. 40 (2001): 2655-2661.

(11) Izawa, Y., et.al, Development of EUV light source by laser- produced plasma. J. Phys. IV France. 133 (2006): 1161–1165.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(12) Sunahara, A., et.al. Optimization of Extreme Ultraviolet Emission from Laser-Produced Tin Plasmas Based on Radiation Hydrodynamics Simulations. Plasma and Fusion Research Regular Articles. 3 (2008): 043-1 – 043-5.

(13) Kieft, E.R., et.al. Sub-ns Thomson scattering applied to an EUV emitting vacuum arc discharge in tin vapor. XXVIIth ICPIG, pp. 8-12. Netherland, 2005.

(14) Juschkin, L., et.al. EUV emission from Kr and Xe capillary discharge plasmas. J.Phys. D: Appl. Phys 35 (2002): 219-227.

(15) Akiyama, H., et.al. Ultraviolet Radiation from Z-pinch Plasmas for Next Generation Lithography. Conference Record of the 2006 Twenty-Seventh International, pp 356-359. USA, 2006.

(16) Hassan, S. M., et.al. Compact Plasma Focus EUV Source for Lithography. Proceeding of 14th International Symposium on High-Current Electronics, pp 221-224. Rusia, 2006.

(17) Dusit Ngamrungroj. OPTIMIZATION OF A MODIFIED PLASMA FOCUS FOR ION BEAM GENERATION. Doctoral dissertation, Department of Physics, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2007.

(18) Mahe, L., et.al. Soft X-Ray Yield Measurement in a Small Plasma Focus Operated in Neon. IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE 26 (1998): 135-140.

(19) Mohammadi, M. A., et.al. Neon soft x-ray emission studies from the UNU-ICTP plasma focus operated with longer than optimal anode length. Plasma Sources Sci. Technol 16 (2007): 758-790.

(20) Mongkolnavin, R., et.al. A Plasma Focus Application for Enhancing Lamination Process of polypropylene/Polyester/Cotton Composites. Jurnal Fizik Malaysia 28 (2007): 111-114.

(21) Springham, S.V., et.al. Fusion reactions in a plasma focus operated with 3He-D2 and 4He-D2 gas mixtures. Phys. Scr T123 (2006): 124–130.

(22) Shang Bing. COMPARATIVE STUDY OF DYNAMICS AND X-RAY EMISSION OF SERVERAL PLASMA FOCUS DEVICE. Doctoral dissertation, Physics Division, School of Science, Nangyang Technology University, 2000.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(23) Fridman, A., and Kennedy, L. A. Plasma Physics and Engineering. United state: Taylor & Francis Group Press, 2004.

(24) GRIEM, H. R. Principles of Plasma Spectroscopy. 2nd ed. United Kingdom: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1997.

(25) Huddlestone, R.H. and Leonard, S. L. Plasma Diagnostics Techniques United State: Academic Press, 1965.

(26) ฐิติศักดิ์ กูลเกล้าปราการณ์. การตรวจสอบการแผ่รังสีเอกซ์จากเครื่องพลาสมาโฟกัสขนาดเล็ก. ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

(27) McWhirter, R. P. in. Plasma Diagnostics Techniques. United state: Academic Press, 1965.

(28) Wong, C. S. Elements of Plasma Technology. Physics Department, Malaysia, University of Malaya, 2002.

(29) Lee, S. Radiative Dense Plasma Focus Model Computation Package RADPFV5.008. NTU/NIE NSSE Plasma Radiation Source Laboratory, Singapore, 2005.

(30) Lee, S. Laser and plasma technology. Proceedings of the First Tropical College on Applied Physics. Malaysia, 1983.

(31) Mahe, L. Soft X-rays from Compact Plasma focus. Doctoral dissertation,Physics Division, School of Science, Nanyang Technological University, 1996.

(32) AAAPT. TWELVE YEARS OF UNU/ICTP PFF-A REVIEW. The United Nation University, 1963.

(33) Universal Plasma Focus Laboratory Facility at INTI-UC. Description of Radiative Dense Plasma Focus Computation Package RADPFV 5.15b and Downloads-Lee model code. Available from: http://www.intimal.edu.my/school/fas/UFLF/File1RADPF.htm[2008, August 8].

(34) Filippov, N.V., et.al. Dense high-temperature plasma within region of non-cylindrical compression," Nuclear Fusions supply 2 (1962): 577-587.

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(35) International Radiation Detectors, Inc. QE SXUV. Available from:

http://www.ird-inc.com/sxuvwdd/xls/sxuv_mo_si_dat.xls

[2008, October 20].

(36) ISTC. ATOMIC DATABASE Spectr-W^3 FOR PLASMA SPECTROSCOPY AND OTHER APPLICATIONS. Available from:

http://spectr-w3.snz.ru./splines.phtml[2007, October 25].

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

พลังงานไอออไนซ์ของแก๊สอาร์กอนและพลังงานต่ออะตอมของอาร์กอน

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงพลังงานในการแตกตัวของอะตอมที่สถานะต่างๆ

สถานะที่แตกตัว	พลังงานไอออไนเซชัน (อิเล็กตรอนโวลต์)
1	15.78
2	27.67
3	40.18
4	59.91
5	75.14
6	91.16
7	124.53
8	143.70
9	423.17
10	504.67
11	539.88
12	619.32
13	687.28
14	757.03
15	856.23
16	919.60
17	4127.95
18	4423.82

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงพลังงานอะตอมของอาร์กอน

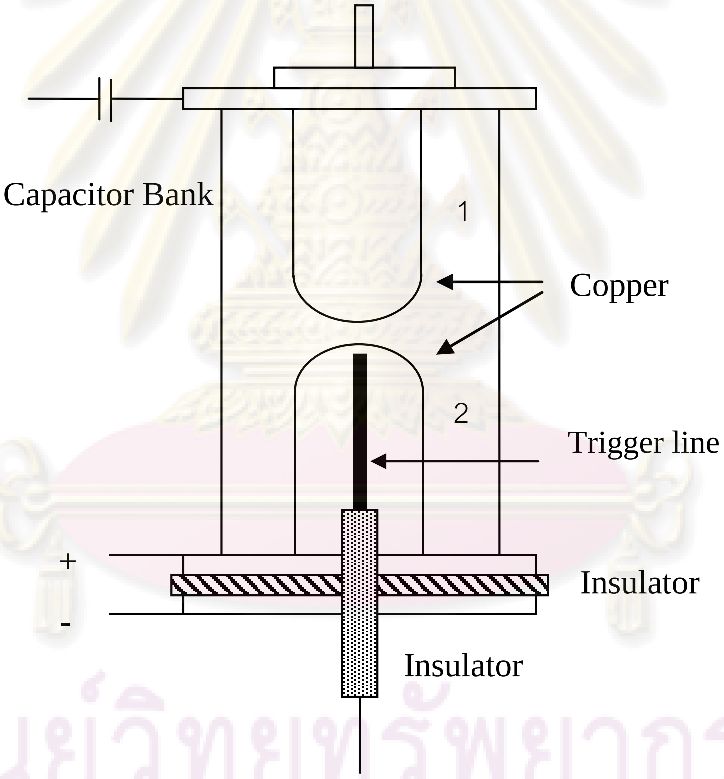
ความดัน (มิลลิบาร์)	พลังงานต่ออะตอมของอาร์กอน (อิเล็กตรอนโวลต์/อะตอม) z_o คือ ความยาวแอโนด (เซนติเมตร), V_o ความต่างศักย์ที่ให้ตัวเก็บประจุ (กิโลโวลต์)		
	z_o = 7.5 เซนติเมตร V_o = 6.5 กิโลโวลต์	z_o = 9.0 เซนติเมตร V_o = 8.0 กิโลโวลต์	z_o = 16.0 เซนติเมตร V_o =12.5 กิโลโวลต์
0.5	1.477	1.864	2.561
1.0	0.739	0.932	1.280
1.5	0.492	0.622	0.853
2.0	0.369	0.466	0.640
2.5	0.295	0.373	0.512

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

ช่องว่างประกายสุญญากาศ

หลักการทำงานของช่องว่างประกายสุญญากาศ คือ เมื่อมีการปล่อยสัญญาณจากสายทริกเกอร์ (Trigger line) จะทำให้เกิดการจุดประกายระหว่างสายทริเกอร์กับแท่งทองแดงหมายเลข 2 ทำให้ประจุบางส่วนกระโดดไปยังแท่งทองแดงหมายเลข 1 ดังนั้น จึงเกิดการคายประจุจากถังเก็บประจุไปสู่เครื่องพลาสมาโฟกัส

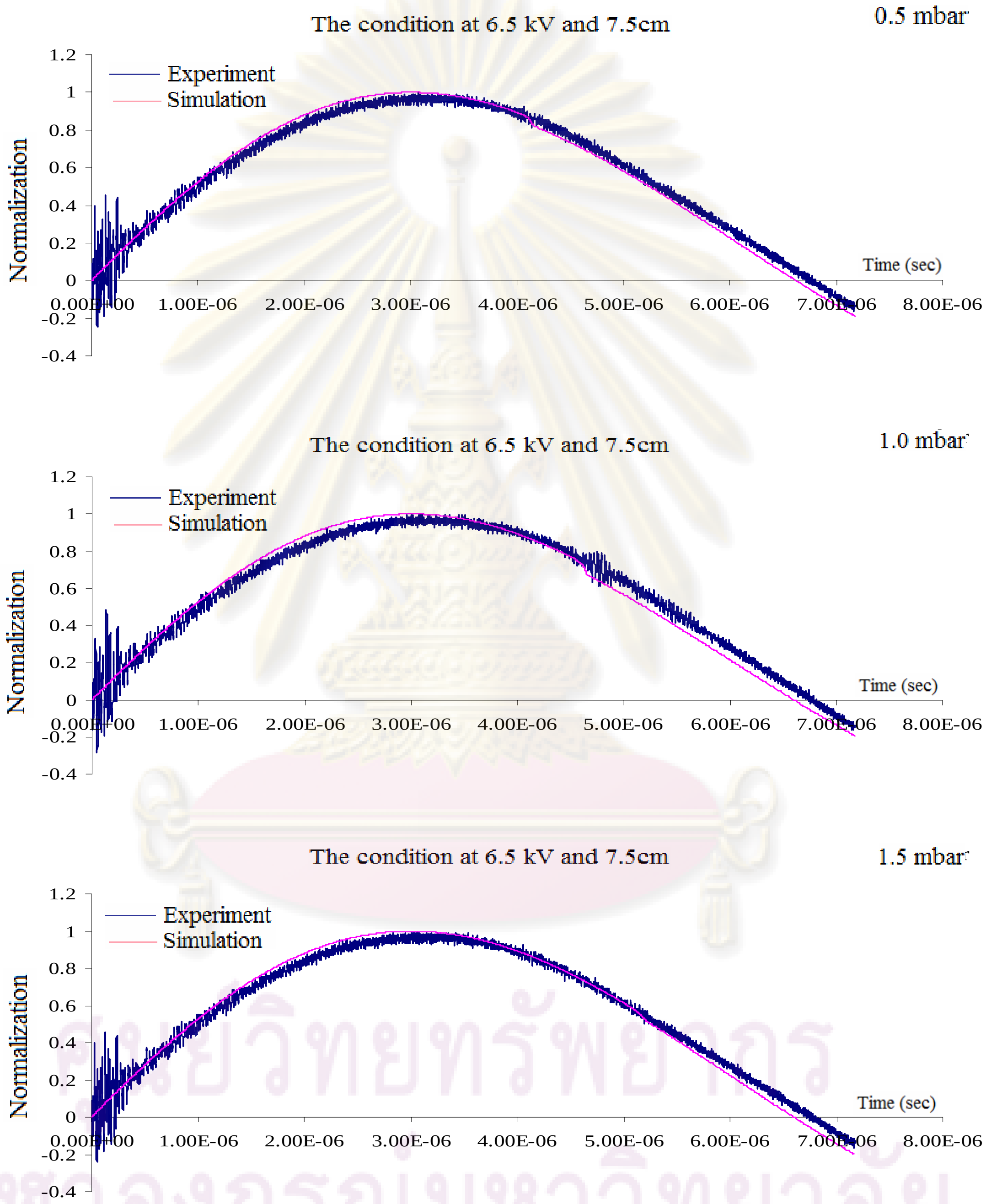


รูปที่ ข.1 แผนภาพลักษณะโครงสร้างภายในของช่องว่างประกายสุญญากาศ [26]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

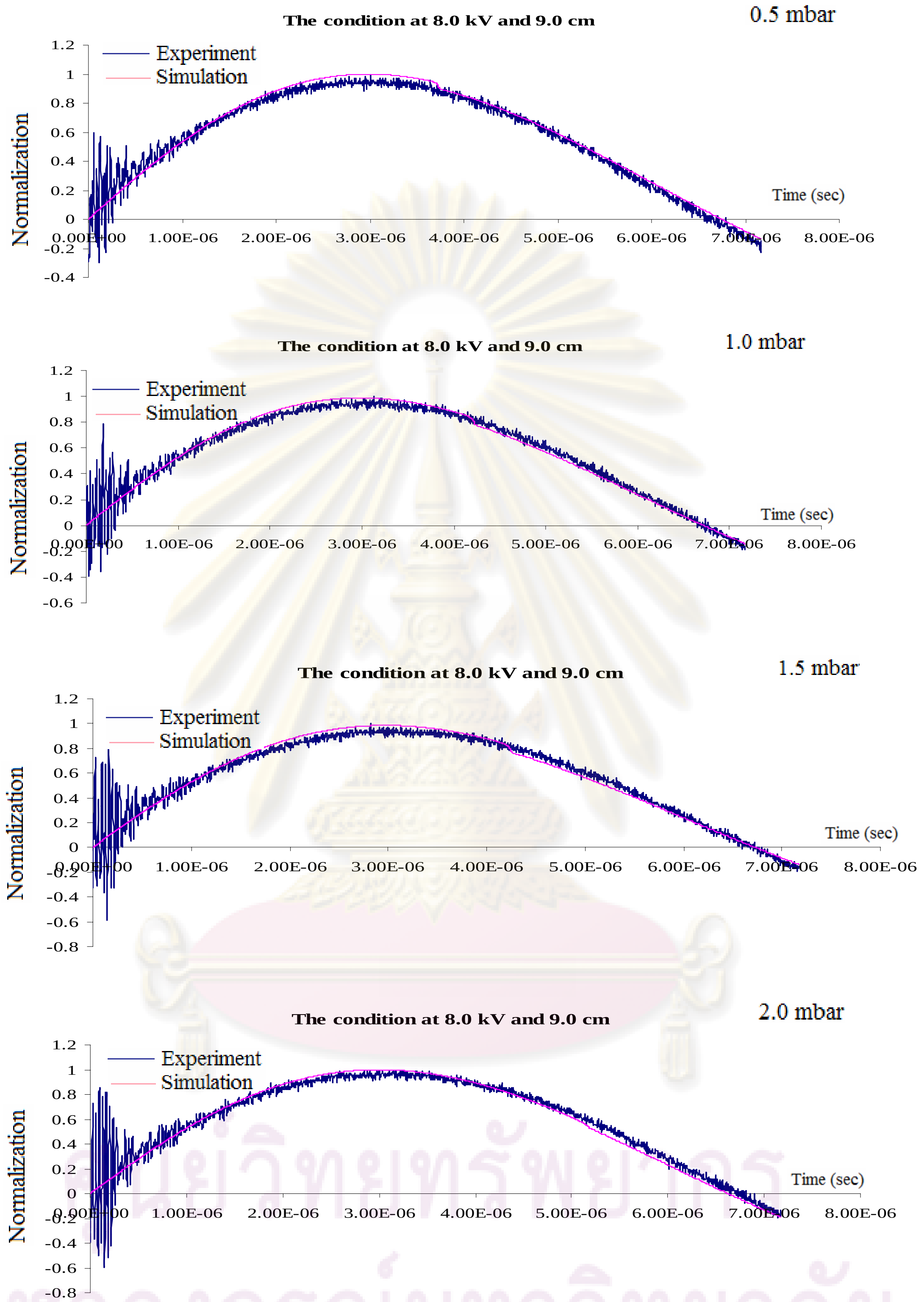
ภาคผนวก ค.

กราฟผลการทดลอง



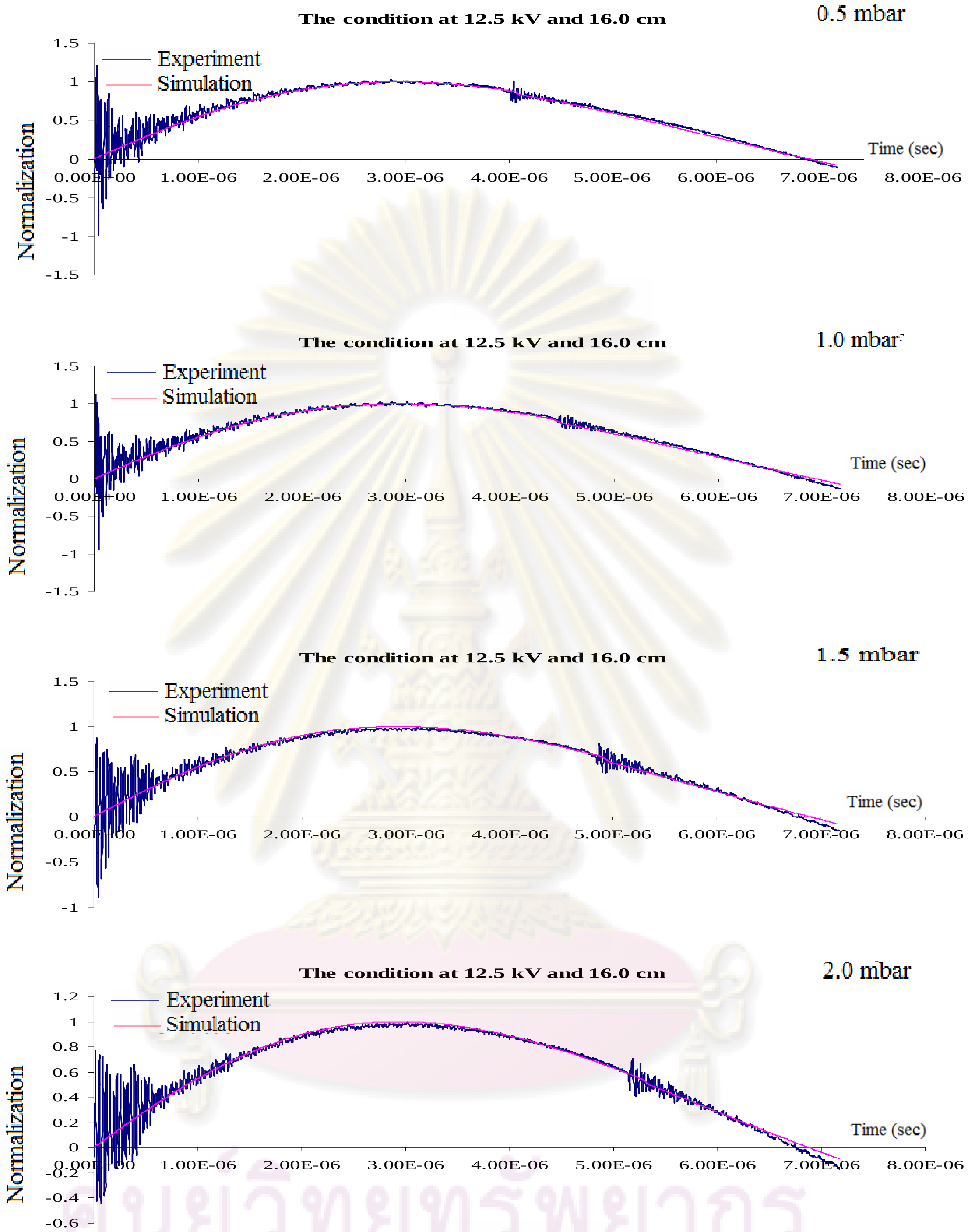
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ค.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลองซึ่งใช้โปรแกรมที่เขียนโดย ศาสตราจารย์ ซิง ลี ที่ความยาวแอโนด 7.5 เซนติเมตร ศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุขนาด 6.5 กิโลโวลต์



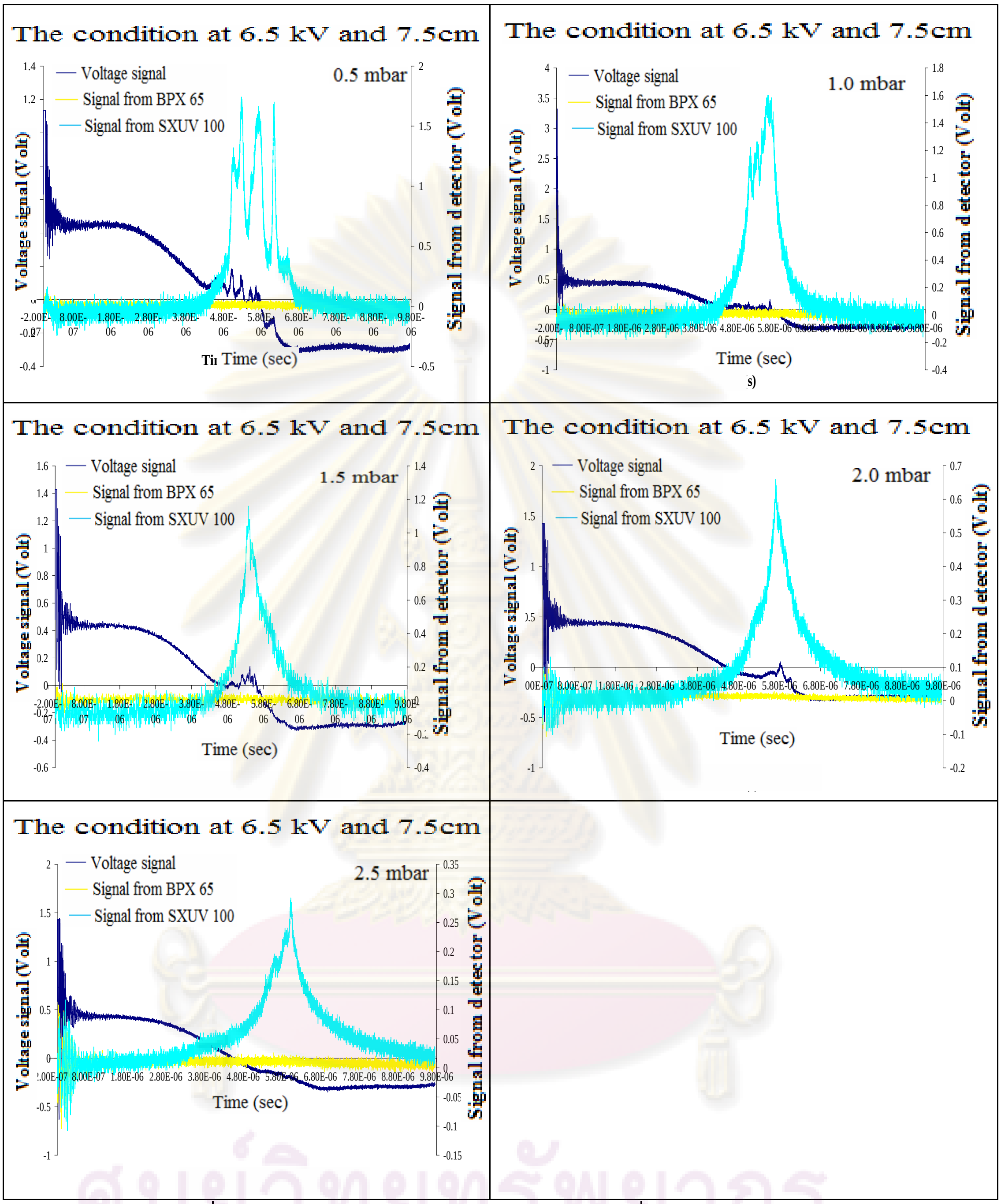
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ค.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลองซึ่งใช้โปรแกรมที่เขียนโดย ศาสตราจารย์ ซิง ลี ที่ความยาวแอโนด 9.0 เซนติเมตร ศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุขนาด 8.0 กิโลโวลต์



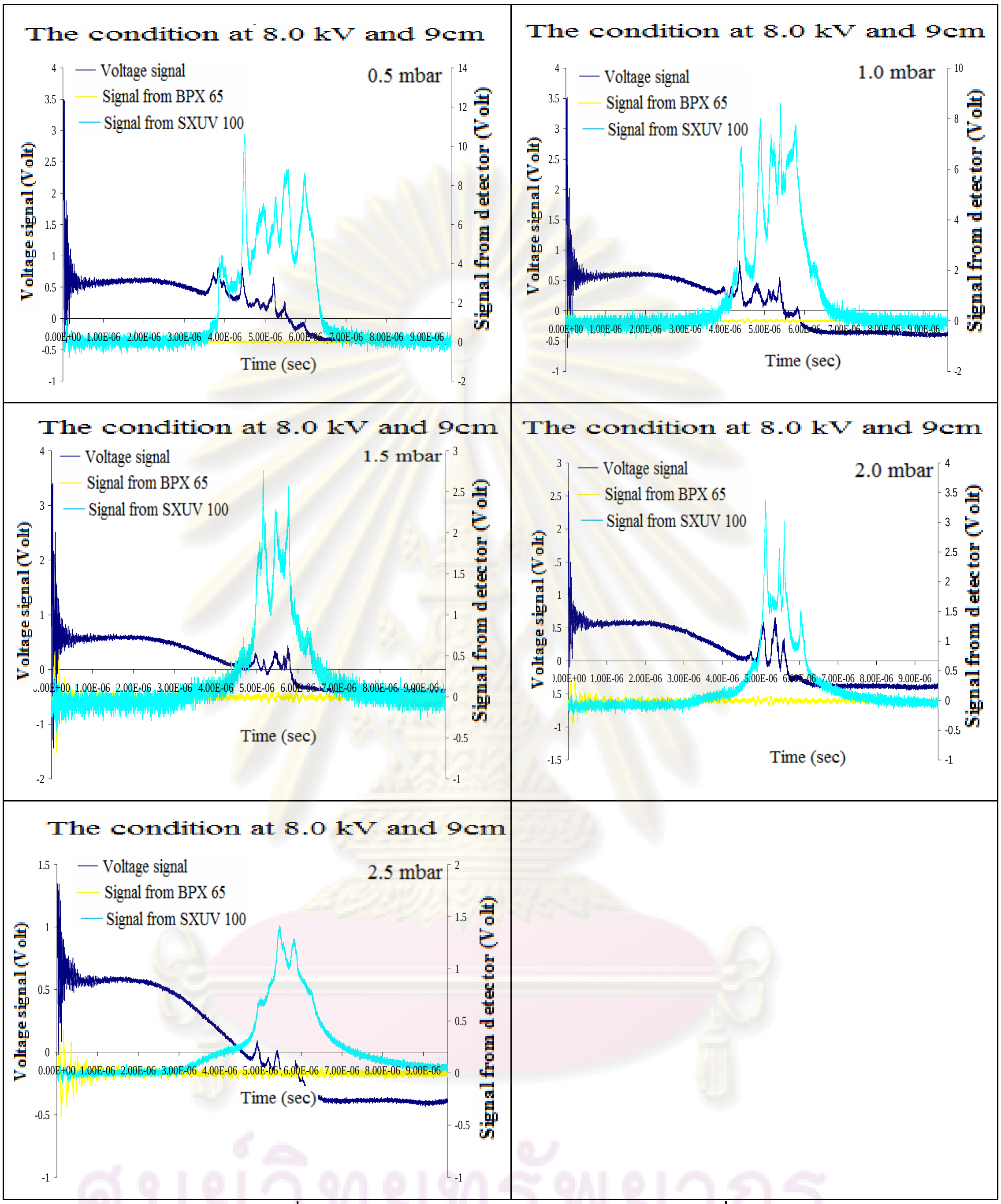
รูปที่ ค.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลองซึ่งใช้โปรแกรมที่เขียนโดย ศาสตราจารย์ ซิง ลี ความยาวแอโนด 16.0 เซนติเมตร ศักย์ที่ให้แก่ตัวเก็บประจุขนาด 12.5 กิโลโวลต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



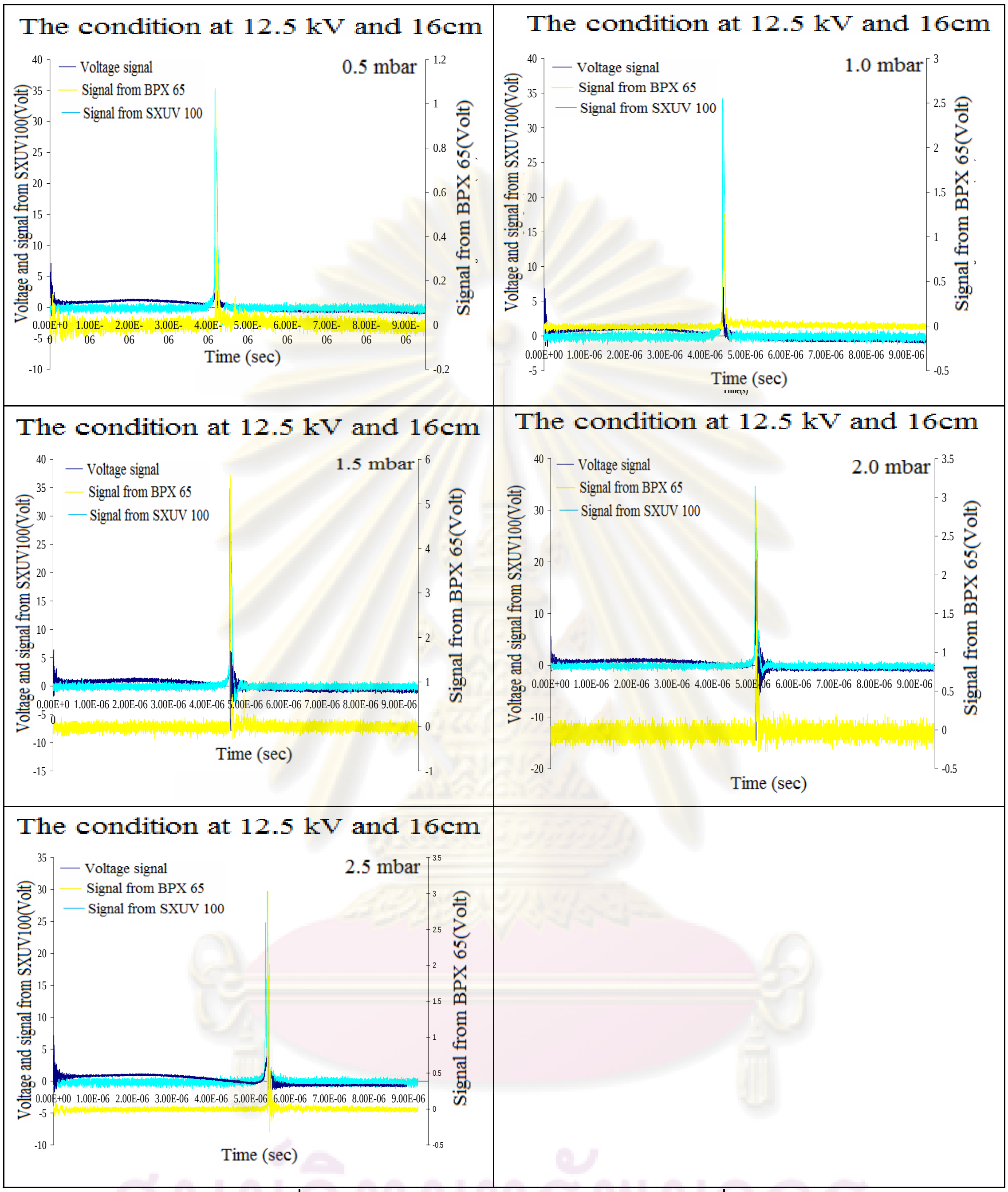
รูปที่ ค.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากทดลองกับเวลา โดยเส้นสีน้ำเงิน คือ สัญญาณความต่างศักย์ เส้นสีฟ้า คือ สัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 และเส้นสีเหลือง คือ สัญญาณที่ได้จาก BPX65 ซึ่งปฏิบัติการณ์ที่ความยาวของแท่งแอโนดมีขนาด 7.5 เซนติเมตร ศักย์ที่ประจุแก่ให้ถังเก็บประจุขนาด 6.5 กิโลโวลต์ ในช่วงความดันตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับรังสีห่างจากแหล่งกำเนิด 34 เซนติเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



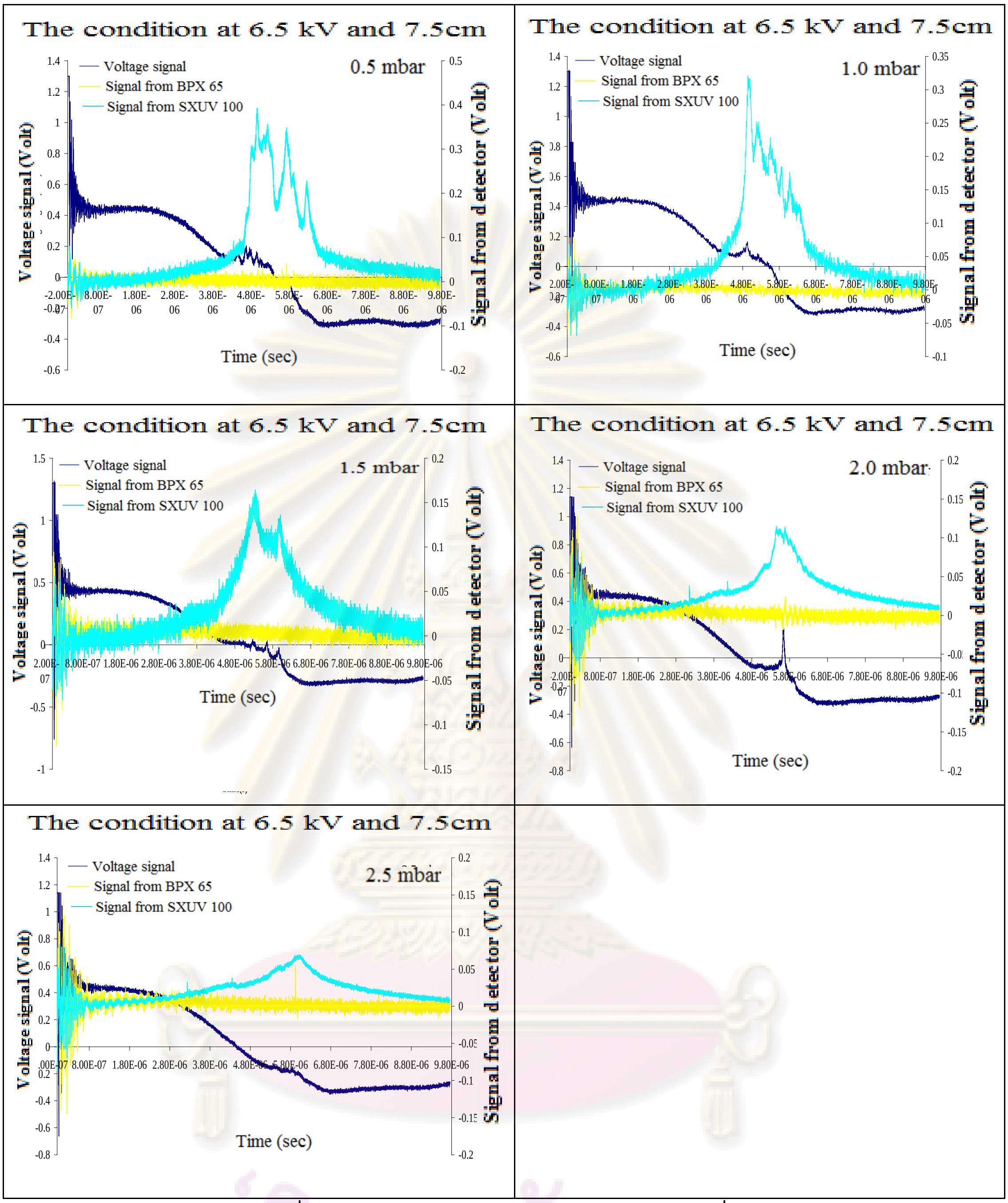
รูปที่ ค.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากทดลองกับเวลา โดยเส้นสีน้ำเงิน คือ สัญญาณความต่างศักย์ เส้นสีฟ้า คือ สัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 และเส้นสีเหลือง คือ สัญญาณที่ได้จาก BPX65 ซึ่งปฏิบัติการณ์ที่ความยาวของแท่งแอโนดมีขนาด 9.0 เซนติเมตร ศักย์ที่ประจุแก่ให้ถังเก็บประจุขนาด 8.0 กิโลโวลต์ ในช่วงความดัน ตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับรังสีห่างจากแหล่งกำเนิด 34 เซนติเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



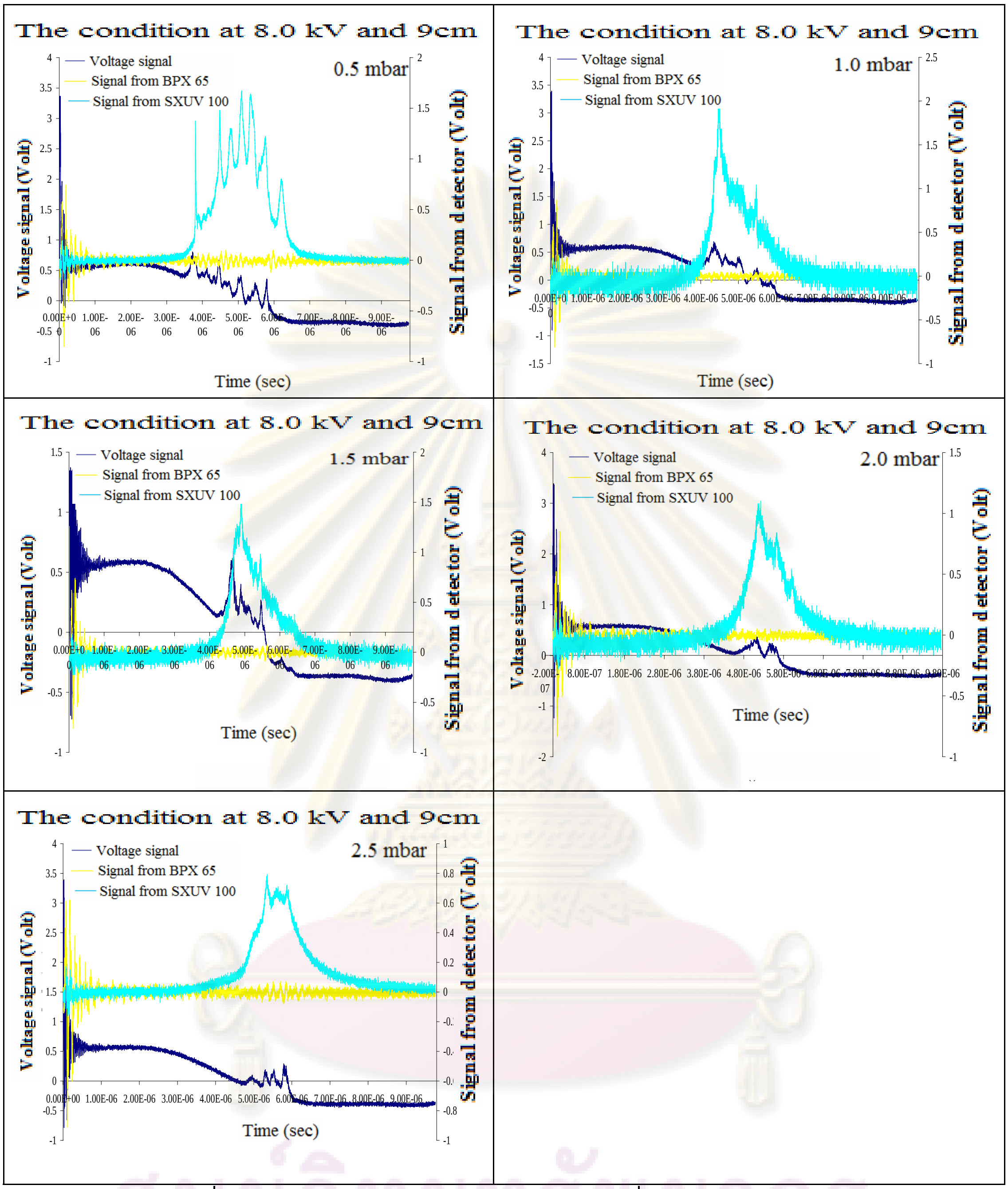
รูปที่ ค.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากทดลองกับเวลา โดยเส้นสีน้ำเงิน คือ สัญญาณความต่างศักย์ เส้นสีฟ้า คือ สัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 และเส้นสีเหลือง คือ สัญญาณที่ได้จาก BPX65 ซึ่งปฏิบัติการณ์ที่ความยาวของแท่งแอโนดมีขนาด 16.0 เซนติเมตร ศักย์ที่ประจุแก่ให้ถังเก็บประจุขนาด 2.5 กิโลโวลต์ในช่วงความดันตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับรังสีห่างจากแหล่งกำเนิด 34 เซนติเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



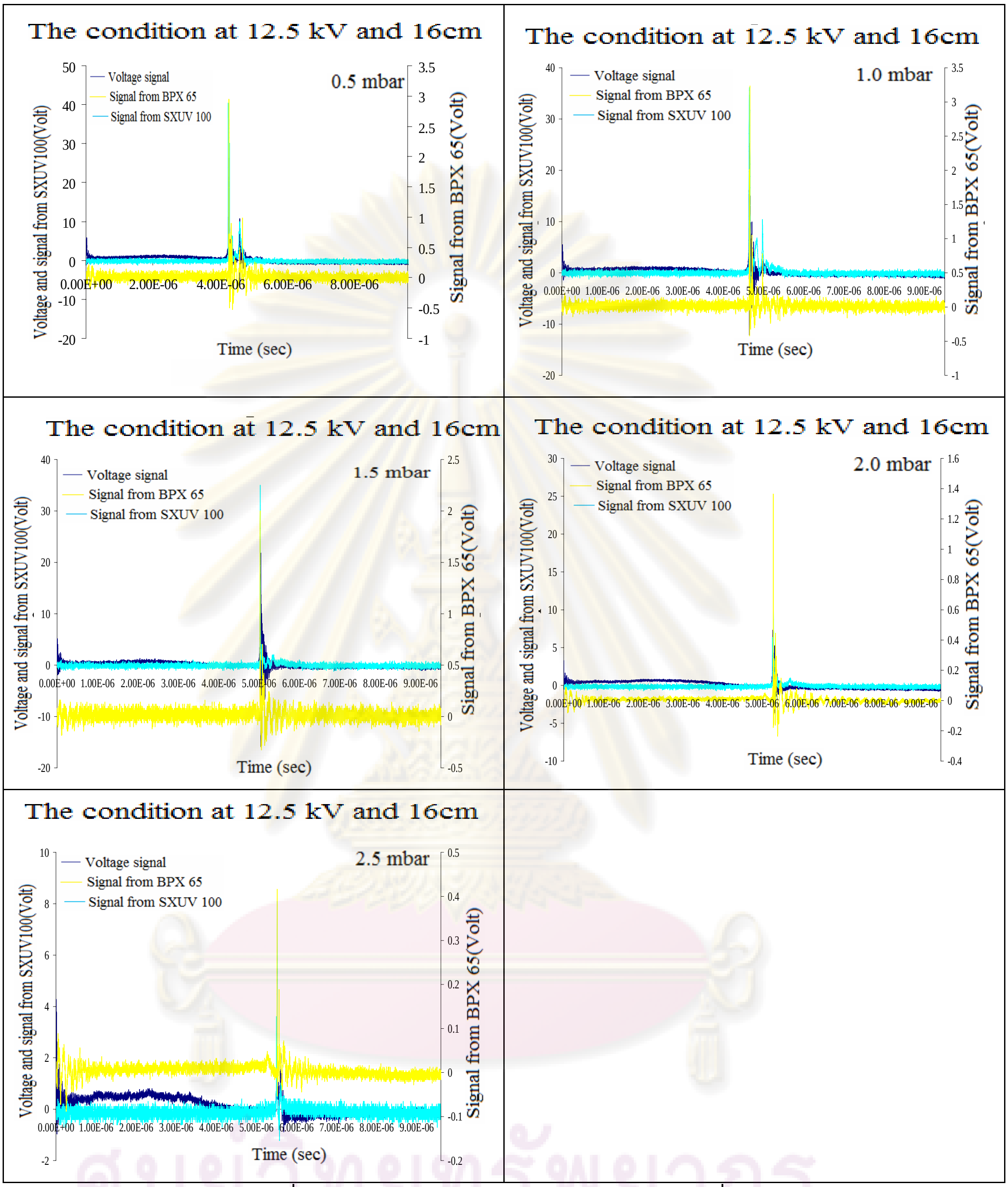
รูปที่ ค.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากทดลองกับเวลา โดยเส้นสีน้ำเงิน คือ สัญญาณความต่างศักย์ เส้นสีฟ้า คือ สัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 และเส้นสีเหลือง คือ สัญญาณที่ได้จาก BPX65 ซึ่งปฏิบัติการณ์ที่ความยาวของแท่งแอโนดมีขนาด 7.5 เซนติเมตร ศักย์ที่ประจุแก่ให้ถังเก็บประจุขนาด 6.5 กิโลโวลต์ ในช่วงความดันตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับรังสีห่างจากแหล่งกำเนิด 54 เซนติเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากทดลองกับเวลา โดยเส้นสีน้ำเงิน คือ สัญญาณความต่างศักย์ เส้นสีฟ้า คือ สัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 และเส้นสีเหลือง คือ สัญญาณที่ได้จาก BPX65 ซึ่งปฏิบัติการณ์ที่ความยาวของแท่งแอโนดมีขนาด 9.0 เซนติเมตร ศักย์ที่ประจุแก่ให้ถังเก็บประจุขนาด 8.0 กิโลโวลต์ ในช่วงความดันตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับรังสีห่างจากแหล่งกำเนิด 54 เซนติเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากทดลองกับเวลา โดยเส้นสีน้ำเงิน คือ สัญญาณความต่างศักย์ เส้นสีฟ้า คือ สัญญาณที่ได้จาก SXUV 100 และเส้นสีเหลือง คือ สัญญาณที่ได้จาก BPX65 ซึ่งปฏิบัติการณ์ที่ความยาวของแท่งแอโนดมีขนาด 16.0 เซนติเมตร ศักย์ที่ประจุแก่ให้ถังเก็บประจุขนาด 12.5 กิโลโวลต์ ในช่วงความดันตั้งแต่ 0.5 – 2.5 มิลลิบาร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับรังสีห่างจากแหล่งกำเนิด 54 เซนติเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นาย ปรัชญา นามสกุล ตั้งจิตสมบูรณ์

เกิด วันที่ 22 เดือน ตุลาคม พุทธศักราชที่ 2525

การศึกษา ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ) สาขาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงาน

- นำเสนอโปสเตอร์ในงานประชุมวิชาการ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2550
- สัมนาในงาน 3rd MPSGC ที่ ประเทศ มาเลเซีย ปี พ.ศ. 2551
- นำเสนอโปสเตอร์ในงานประชุมวิชาการ 3rd international conference on the frontiers of plasma physics and technology ปี พ.ศ. 2550
- เข้ารับการอบรม Internet Workshop on Numerical Plasma Focus Experiments ปี พ.ศ 2551
- ตีพิมพ์: Proceeding of 3rd International conference on the frontiers of plasma physics and technology.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย