

ลักษณะเฉพาะของอาร์กอนโกลว์ดิสชาร์จพลาสมาผลิตโดยใช้แหล่งไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHARACTERISTICS OF ARGON GLOW DISCHARGE PLASMA PRODUCED BY AC POWER
SUPPLIES OPERATING AT LOW FREQUENCY

Mr. Watcharapon Kongpibookkid



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 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ลักษณะเฉพาะของอาร์กอนโกลว์ดิสชาร์จพลาสมาผลิต โดยใช้แหล่งไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ
โดย	นายวัชรพล คงพิบูลย์กิจ
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.วรากร เฮ้งปัญญา)

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

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์)

วัชรพล คงพิบูลย์กิจ : ลักษณะเฉพาะของอาร์กอนโกลว์ดิสชาร์จพลาสมาผลิตโดยใช้แหล่งไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ (CHARACTERISTICS OF ARGON GLOW DISCHARGE PLASMA PRODUCED BY AC POWER SUPPLIES OPERATING AT LOW FREQUENCY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน, 88 หน้า.

สมบัติของพลาสมาอาร์กอนโกลว์ดิสชาร์จผลิตที่ความดันต่างๆถูกวัดและนำเสนอในงานวิจัยนี้ พลาสมาอาร์กอนสร้างจากแผ่นตัวนำคู่ขนานซึ่งแหล่งกำเนิดพลาสมาคือแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าสามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่ปรับความถี่ไฟฟ้าค่าต่างๆโดยระบบสามารถสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนาน ลักษณะเฉพาะของพลาสมาถูกวัดด้วยอุปกรณ์วัดทางแสง ซึ่งอุณหภูมิของอิเล็กตรอนสามารถหาได้จากระเบียบวิธีอัตราส่วนความเข้มแสงและวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์ ส่วนความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสามารถหาได้จากสมการของซาฮา-โบลต์ซมันน์ ผลที่ได้แสดงค่าจำนวนความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนในช่วง 10^{15} - 10^{17} ตัวต่อลูกบาศก์เมตร ขณะที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง 1.00-1.50 อิเล็กตรอนโวลต์สำหรับสัญญาณสามเหลี่ยมในการปรับความถี่ในช่วง 500 - 8,000 เฮิรตซ์ ผลที่ได้มีค่าในช่วงที่ยอมรับได้เหมือนกับงานวิจัยก่อนหน้านี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา ฟิสิกส์

สาขาวิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5672083923 : MAJOR PHYSICS

KEYWORDS: PLASMA ARGON GLOW DISCHARGE / ELECTRON TEMPERATURE /
ELECTRON NUMBER DENSITY / LOW FREQUENCY

WATCHARAPON KONGPIBOOLKID: CHARACTERISTICS OF ARGON GLOW
DISCHARGE PLASMA PRODUCED BY AC POWER SUPPLIES OPERATING AT LOW
FREQUENCY. ADVISOR: RATTACHAT MONGKOLNAVIN, 88 pp.

Properties of plasma argon glow discharge operating with various operating pressure are measured and presented in this work. The argon plasma is produced by a parallel conducting electrodes coupling with high voltage AC power supply. The power supply can generate high AC voltage at various frequencies. The frequencies for the operation are in the range of a few kHz. The system is capable of generating electric field between the two metal electrodes discharge system. The characteristics of the plasma produced are measured by optical emission spectroscopy (OES) technique where electron temperature ($k_B T_e$) can be determined by line intensity ratio method and the Boltzmann graph. The value of electron number density (n_e) is then determined from Saha-Boltzmann equation. Our results show that the electron number density of the discharge obtained is of the order of $10^{15} - 10^{17} \text{ m}^{-3}$ where the electron temperature is between 1.00 - 1.50 eV for triangle signal various operating frequencies between 500 - 8,000 Hz used which are in good agreement with similar results published earlier.

Department: Physics

Student's Signature

Field of Study: Physics

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ข้าพเจ้าขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน อาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้าที่คอยให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำที่ดีเยี่ยมตลอดเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิทธิ์ ภูริกษ์เกียรติ อาจารย์ ดร.วรากร เอ็งปัญญา และ อาจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งยังช่วยให้คำแนะนำ และช่วยแก้ไขข้อบกพร่องด้านการเขียนวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้ดีขึ้น

ขอขอบคุณทุนที่ให้เงินสนับสนุน ที่ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” จากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน และภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่คอยมอบความรู้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณคุณเอกลักษณ์ จันเทร์มะ ที่คอยสอนเทคนิคและคำแนะนำต่างๆเกี่ยวกับเครื่องมือ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณมารดา พี่ชายและพี่สาวที่คอยให้กำลังใจตลอดเวลาจนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญตาราง.....	ต
รายชื่อสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น	4
2.1 ความหมายของพลาสมาและพลาสมาโกลด์ดิสชาร์จ.....	4
2.2 นิยามอนุกรมของอิเล็กตรอน อนุกรมของไอออน และอนุกรมพลาสมา	5
2.3 ความยาวคลื่นเดอบาย	8
2.4 จำนวนอนุภาคในทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ ความยาวคลื่นเดอบาย	8
2.5 ความถี่พลาสมา.....	9
2.6 ระบบดิสชาร์จแบบกระแสสลับ	10
2.7 สมการซาฮา-โบลต์ซมันน์	11
บทที่ 3 การทดลอง.....	15

3.1 ขั้นตอนการทดลอง	15
3.2 การวัดหาค่าอุณหภูมิและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนของพลาสมา	18
3.2.1 การหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจากวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง	19
3.2.2 วิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์ในการหาอุณหภูมิอิเล็กตรอน	21
3.3 การจำลองการทดลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (COMSOL)	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	23
4.1 ผลของการทดลอง	23
4.1.1 ผลของการสร้างเครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่าย	23
4.1.2 ผลของความดันที่ส่งผลต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นจำนวน อิเล็กตรอน	28
4.1.3 ผลของความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีต่ออุณหภูมิอิเล็กตรอนและความหนาแน่น จำนวนอิเล็กตรอน	33
4.2 ผลจากการจำลองการทดลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	35
4.2.1 ผลของความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนและอุณหภูมิของอิเล็กตรอน กับ ระยะทางของระบบระหว่างด้านบนและด้านล่าง	36
4.2.2 ผลของเวลาที่มีผลต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน ..	37
4.2.3 ผลของเวลาต่อความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนเทียบกับความหนาแน่นของ Ar^+	40
4.2.4 ผลของความดันที่มีต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นจำนวน อิเล็กตรอน	43
4.2.5 ผลของความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีต่ออุณหภูมิอิเล็กตรอนและความหนาแน่น จำนวนอิเล็กตรอน	45
4.2.6 ผลของความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอนสัมพัทธ์และความ หนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสัมพัทธ์ที่ความดัน 25 พาสคัล	48
4.2.7 ผลการจำลองพลาสมาที่กำเนิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ที่ความดัน 29 พาสคัล	49

4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์เทียบกับทฤษฎี.....	52
4.4 ผลจากการจำลองแสดงผลจากความถี่และความดันที่มีต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอน และ ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน.....	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	56
5.1 สรุปผลการทดลอง	56
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต.....	57
รายการอ้างอิง	58
ภาคผนวก.ก แบบส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่าย	61
ภาคผนวก.ข พลังงานไอออนไนเซชันของก๊าซอาร์กอน	64
ภาคผนวก.ค ระบบดิสชาร์จแบบกระแสสลับ.....	66
ภาคผนวก.ง สมการซาฮา-โบลต์ซมันน์	69
ภาคผนวก.จ การแก้สมการเชิงอนุพันธ์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	75
ภาคผนวก.ฉ สมการที่ใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์	78
ภาคผนวก.ช ขั้นตอนการจำลองพลาสมาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์อย่างง่าย	81
ภาคผนวก.ซ ความสัมพันธ์ของโบลต์ซมันน์.....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	88

สารบัญญภาพ

รูปที่ 1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ต่างๆ	1
รูปที่ 2.1 สถานะทั้งสี่ของสสาร.....	5
รูปที่ 2.2 การแจกแจงความเร็วของแมกเวลล์ที่อุณหภูมิต่างๆ	6
รูปที่ 2.3 การกำบังเดอบาย	8
รูปที่ 2.4 พลาสมาดิสชาร์จโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	10
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการทดลอง	16
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วย 1.ก๊าซอาร์กอน 2.แผ่นโลหะ คู่ขนาน 3.พลาสมา 4.แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า 5.สเปกโตรมิเตอร์ 6.ปั๊ม.....	17
รูปที่ 3.3 การทดลองสำหรับวิธีการวัดทางแสง	17
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงจากสเปกตรัมของอาร์กอน	19
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์ และค่า R_1 / R_2	20
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์สำหรับคำนวณหาอุณหภูมิ อิเล็กทรอนิกส์.....	21
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเวลา.....	23
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเวลาจากเครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่าย ที่สร้างขึ้น	24
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของพลาสมากับความยาวคลื่นจากเครื่องเดิม	25
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของพลาสมากับความยาวคลื่นจากเครื่องกำเนิด พลาสมาอย่างง่ายที่สร้างขึ้น	25
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของพลาสมากับความยาวคลื่น ที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ความดัน 23 พาสคัล.....	26
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของพลาสมากับความยาวคลื่น ที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ความดัน 25 พาสคัล.....	26

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของพลาสมากับความยาวคลื่น ที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ความดัน 27 พาสคัล.....	27
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของพลาสมากับความยาวคลื่น ที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ความดัน 29 พาสคัล.....	27
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความดัน โดยวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง	31
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความดัน โดยวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง	31
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความดัน โดยวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์.....	32
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความดัน โดยวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์.....	32
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความถี่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า กระแสสลับ โดยวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง	33
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความถี่ของ แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง.....	34
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความถี่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า กระแสสลับ โดยวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์.....	34
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความถี่ของ แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์	35
รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ และความดัน 29 พาสคัล ...	36
รูปที่ 4.18 ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับระยะทางที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ และความดัน 29 พาสคัล.....	36
รูปที่ 4.19 อุณหภูมิอิเล็กตรอนกับระยะทางที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ และความดัน 29 พาสคัล...	37
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับเวลาที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ และ ความดัน 29 พาสคัล.....	38

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับเวลา
ที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ และความดัน 29 พาสคัล 38

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลาในช่วงเวลาคาบ..... 39

รูปที่ 4.23 ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์
และความดัน 29 พาสคัล 39

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับเวลา
ที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ และความดัน 29 พาสคัล 40

รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ Ar⁺ กับเวลา ที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์
และความดัน 29 พาสคัล 40

รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับระยะ
ที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์และความดัน 29 พาสคัล 41

รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ Ar⁺ กับระยะ ที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ และ
ความดัน 29 พาสคัล 41

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความดันที่ใช้ 43

รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความดันที่ใช้ 44

รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความดันที่ใช้ 44

รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนกับความดันที่ใช้ 45

รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความถี่ที่ความดัน 29 พาสคัล 45

รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความถี่
ที่ความดัน 29 พาสคัล 46

รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความถี่ที่ใช้ 46

รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความถี่ที่ใช้ 47

รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสัมพันธ์กับความถี่ 48

รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนสัมพันธ์กับความถี่ 48

รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับเวลา
ในช่วงเวลาระหว่าง 0.00 – 0.01 วินาที 49

รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์กับเวลา ในช่วงเวลาระหว่าง 0.005 – 0.0085 วินาที.....	50
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กทรอนิกส์กับเวลา ในช่วงเวลาระหว่าง 0.00 – 0.01 วินาที.....	50
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กทรอนิกส์กับเวลา ในช่วงเวลาระหว่าง 0.005 – 0.0085 วินาที.....	51
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์กับความถี่ที่ใช้.....	52
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กทรอนิกส์กับความถี่ที่ใช้.....	52
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กทรอนิกส์กับความถี่และความดัน.....	54
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กทรอนิกส์กับความถี่และความดัน.....	55
รูปที่ ก.1 ภาคตัดขวางเครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่ายที่วาดโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	61
รูปที่ ก.2 รูปสามมิติของเครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่ายที่วาดโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	62
รูปที่ ก.3 ส่วนประกอบของอุปกรณ์เครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่าย.....	62
รูปที่ ก.4 เครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่าย.....	63
รูปที่ ข.1 กระบวนการแตกตัวและรวมตัวของอะตอม.....	64
รูปที่ ค.1 พลาสมาดีสชาร์จโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ.....	66
รูปที่ ง.1 การคายพลังงานในรูปของแสง.....	73
รูปที่ จ.1 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	75
รูปที่ จ.2 การแบ่งเอลิเมนต์.....	76
รูปที่ จ.3 การเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์.....	76
รูปที่ ข.1 ขั้นตอนเลือกรูปแบบของพลาสมา.....	81
รูปที่ ข.2 โครงสร้างระบบพลาสมาที่กำเนิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ.....	82
รูปที่ ข.3 การนำค่าคงที่ต่างๆซึ่งเกี่ยวกับอาร์กอนระบบ.....	82
รูปที่ ข.4 ขั้นตอนเลือกบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาต่างๆในระบบนี้.....	83
รูปที่ ข.5 ขั้นตอนการป้อนข้อมูลเงื่อนไขขอบและเงื่อนไขเริ่มต้น.....	83

รูปที่ ข.6 การสร้างmesh ให้กับระบบ	84
รูปที่ ข.7 ขั้นตอนการคำนวณ.....	84
รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์พลังงานกระตุ้นจากระดับพื้นไประดับ i และระดับ j	85



สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1	ค่าในการคำนวณอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์	28
ตารางที่ 4.2	ค่าในการคำนวณความหนาแน่นจำนวนอิเล็กทรอนิกส์	28
ตารางที่ 4.3	ผลการทดลองจากวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง	29
ตารางที่ 4.4	ผลการทดลองจากวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์	30
ตารางที่ 4.5	ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์	42
ตารางที่ ข.1	พลังงานในการแตกตัวของอะตอมที่สถานะต่างๆ	65
ตารางที่ ฉ.1	ปฏิกิริยาของก๊าซอาร์กอน	79



รายชื่อสัญลักษณ์

$k_B T_e$	=	อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (eV)
$k_B T_i$	=	อุณหภูมิของไอออน (eV)
n_e	=	ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน (m^{-3})
m_e	=	มวลของอิเล็กตรอน (kg)
k_B	=	ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ (J/K)
\bar{v}	=	ความเร็ว (m/s)
E_{av}	=	พลังงานเฉลี่ย (J)
L	=	ความยาวของพลาสมา (m)
λ_D	=	ความยาวคลื่นของเดอบาย (m)
e	=	ประจุของอิเล็กตรอน (C)
ϵ_0	=	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (F/m)
V_D	=	ปริมาตรภายในทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับความยาวคลื่นของเดอบาย (m^3)
N_D	=	จำนวนอนุภาคในทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ ความยาวคลื่นของเดอบาย (อนุภาค)
ω_P	=	ความถี่การสั่นของพลาสมา (rad/s)
τ	=	คาบเวลา (s)

E_0	=	อำพนของสนามไฟฟ้า (N/C)
B	=	สนามแม่เหล็ก (T)
\bar{p}	=	กำลังดูดกลืนรวมโดยอิเล็กตรอนเดี่ยวจากสนามไฟฟ้ากระแสสลับ (eV/s)
\bar{P}	=	กำลังดูดกลืนรวมโดยพลาสมาระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนาน (W/m ³)
v_c	=	ความถี่จากการชนแบบโลเรนตซ์
s_Z	=	ไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z
s_{Z-1}	=	ไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z-1
N_e	=	จำนวนของอิเล็กตรอน (ตัว)
N_Z	=	จำนวนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z (ตัว)
N_{Z-1}	=	จำนวนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z-1 (ตัว)
F	=	พลังงานอิสระเฮล์มโฮลตซ์ (J)
U_e	=	ฟังก์ชันแบ่งส่วนของอิเล็กตรอน (ตัว)
U_Z	=	ฟังก์ชันแบ่งส่วนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z
U_{Z-1}	=	ฟังก์ชันแบ่งส่วนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z -1
U	=	ฟังก์ชันแบ่งส่วนอะตอมชนิด s
$g_{k,Z}$	=	แฟกเตอร์สภาพเสื่อมคลายของไอออนชนิด s ที่ระดับ k ที่มีประจุบวก Z
$g_{k,Z-1}$	=	แฟกเตอร์สภาพเสื่อมคลายของไอออนชนิด s ที่ระดับ k ที่มีประจุบวก Z-1

g_e	=	แฟกเตอร์สภาพเสื่อมคลายของอิเล็กตรอน
$E_{k,Z}$	=	พลังงานของไอออนชนิด s ที่ระดับ k ที่มีประจุบวก Z
$E_{k,Z-1}$	=	พลังงานของไอออนชนิด s ที่ระดับ k ที่มีประจุบวก $Z-1$
$N_{k,Z}$	=	จำนวนของไอออนชนิด s ที่ระดับ k ที่มีประจุบวก Z
N_Z	=	จำนวนของไอออนชนิด s ของทุกระดับ ที่มีประจุบวก Z
V	=	ปริมาตร (m^3)
I_Z	=	ความเข้มแสงของไอออนชนิด s ของทุกระดับ ที่มีประจุบวก Z (a.u.)
I_{Z-1}	=	ความเข้มแสงของไอออนชนิด s ของทุกระดับ ที่มีประจุบวก $Z-1$ (a.u.)
$A_{ki,Z}$	=	ความน่าจะเป็นการเปลี่ยนพลังงานจากระดับ k ไป i ของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z
$A_{ki,Z-1}$	=	ความน่าจะเป็นการเปลี่ยนพลังงานจากระดับ k ไป i ของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$
$\lambda_{ki,Z}$	=	ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยเนื่องจากการเปลี่ยนพลังงานจากระดับ k ไป i ของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z
$\lambda_{ki,Z-1}$	=	ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยเนื่องจากการเปลี่ยนพลังงานจากระดับ k ไป i ของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$
E^{ion}	=	พลังงานไอออนไนเซชัน
E_{int}	=	พลังงานภายใน (J)

S_{sys}	=	เอนโทรปีของระบบ
P_n	=	ความน่าจะเป็นในการพบที่ระดับ n
f	=	ความถี่ (Hz)
$n_{\mathcal{E}}$	=	ความหนาแน่นพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน (J/m^3)
μ_e	=	ค่าสภาพเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน
$\mu_{\mathcal{E}}$	=	ค่าสภาพเคลื่อนที่ของพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน
Γ_e	=	ฟลักซ์ของอิเล็กตรอน ($1/m^2s$)
$\Gamma_{\mathcal{E}}$	=	ฟลักซ์ของพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน (J/m^2s)
R_e	=	แหล่งกำเนิดของอิเล็กตรอน ($1/m^3s$)
$R_{\mathcal{E}}$	=	พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (J/m^3s)
x_j	=	สัมประสิทธิ์โมลของสปีชีส์เป้าหมายสำหรับปฏิกิริยา j
k_j	=	สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา j
N_n	=	จำนวนของอะตอมชนิด s ที่เป็นกลาง (ตัว)
\mathcal{E}	=	พลังงาน (eV)
$\Delta\mathcal{E}_i$	=	พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยา i (eV)
\mathcal{E}_r	=	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
\bar{a}	=	ความเร่ง (m/s^2)

W = งาน (J)

p = กำลัง (W)

c = ความเร็วแสง (m/s)

h = ค่าคงที่พลังค์

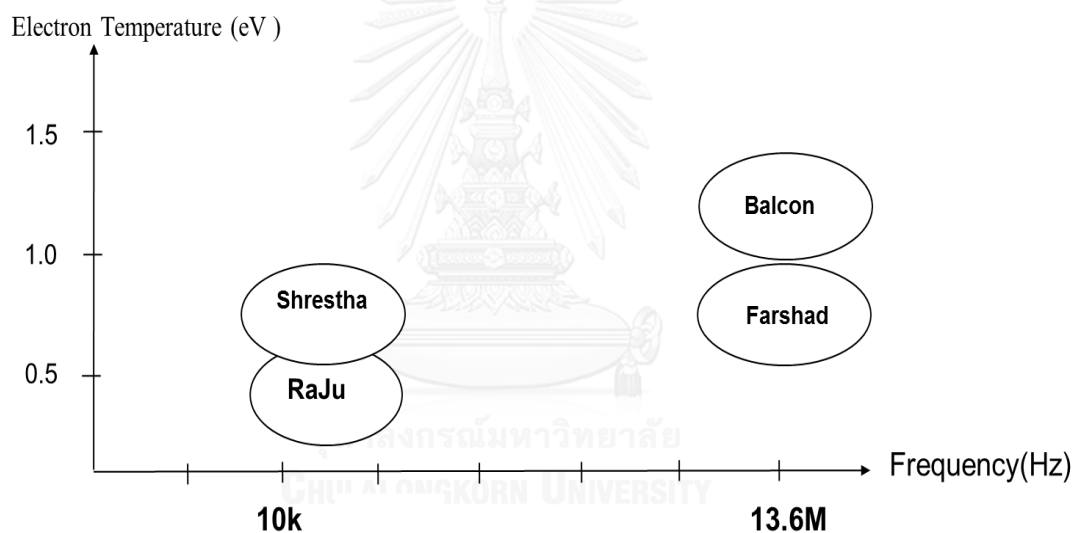


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในธรรมชาติมีปรากฏการณ์ที่เกิดจากพลาสมาอยู่มากมาย อาทิเช่น เนบิวลา พระอาทิตย์ เปลวไฟ แสงเหนือแสงใต้ และอื่นๆ ซึ่งมนุษย์ได้สร้างระบบพลาสมาขึ้น ได้แก่ ระบบดิสชาร์จ (Discharge system) ระบบคลื่นไมโครเวฟพลาสมา (Plasma microwave system) เป็นต้น ระบบพลาสมาถูกนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆมากมาย เช่น ใช้ในการปรับสภาพผิววัสดุ ใช้ในการทำฟิล์มบาง และเคลือบผิวหน้าวัสดุ เพื่อให้วัสดุมีสมบัติที่ดีขึ้น โดยนำไปใช้ประโยชน์ด้านอุตสาหกรรมต่างๆ ทั้งฟ้านาโน ไทโอไต อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยพลาสมาในระบบต่างชนิดกันจะมีสมบัติเฉพาะต่างกัน



รูปที่ 1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่ความถี่ต่างๆ

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาสมบัติเฉพาะของพลาสมาอาร์กอนโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ ในย่านความถี่ต่างๆ อาทิในงานวิจัยของราเจนดรา ชรีสต้า (R. Shrestha 2012) และทาตา ราจู ไบย์ (T. Bhai 2013) ได้ศึกษาสมบัติเฉพาะของพลาสมาอาร์กอนโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ไฟฟ้าอยู่ในย่าน 10 ถึง 30 กิโลเฮิร์ตซ์ในงานวิจัยของนิโคลัส เบคอน (N. Balcon 2007) และฟาร์ชาส โซบาซาเดส (F. Sohbatzadeh 2012) ได้ศึกษาพลาสมาอาร์กอนที่ความถี่ไฟฟ้าสูงถึง 13.6 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ย่านที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ

จะเห็นได้ว่าที่ผ่านมา ยังไม่มีงานวิจัยใดศึกษาสมบัติเฉพาะของพลาสมาที่ความถี่ต่ำกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์เกี่ยวกับผลของความถี่ที่มีต่อสมบัติเฉพาะของพลาสมา และการใช้คลื่นความถี่สูง บางคลื่นความถี่จะไปรบกวนการสื่อสาร และอีกเหตุผลคือแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำที่ปรับความถี่ไฟฟ้าได้หา

ยากและมีราคาแพง ในงานวิจัยนี้จึงอยากศึกษาสมบัติของพลาสมาที่ความถี่ต่ำในช่วง 500 ถึง 8000 เฮิรตซ์ โดยวิธีการวัดทางแสง เพื่อหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนด้วยวิธีอัตราส่วนความเข้มแสงวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์และหาความหนาแน่นอิเล็กตรอน โดยใช้สมการซาฮา-โบลต์ซมันน์ ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบกับจากการคำนวณและทฤษฎีของพลาสมาต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเฉพาะของพลาสมาอาร์กอนในระบบโกลว์ดิสชาร์จด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำในช่วง 500 – 8000 เฮิรตซ์ โดยนำองค์ความรู้ที่ได้ไปพัฒนาเพื่อประโยชน์เกี่ยวกับข้อมูลด้านวิทยาศาสตร์ และด้านอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอาร์กอนโกลว์ดิสชาร์จพลาสมาผลิตโดยใช้แหล่งไฟฟ้ากระแสสลับ อุณหภูมิของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน
- 1.3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ความถี่แหล่งไฟฟ้ากระแสสลับช่วง 500 – 8000 เฮิรตซ์ ความดันของระบบ 23 - 29 พาสคัล
- 1.3.3 วิธีการวัดอุณหภูมิ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน โดยวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง วิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์
- 1.3.4 สร้างระบบกำเนิดพลาสมาโกลว์ดิสชาร์จ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ความรู้และทักษะด้านต่างๆในงานด้านการออกแบบและสร้างระบบโกลว์ดิสชาร์จด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับอย่างง่ายเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมาเพื่อใช้ศึกษาสมบัติต่างๆ
- 1.4.2 ได้เทคนิคและทักษะในการวัดค่าและวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน

1.4.3 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปต่อยอดพัฒนาด้านวิจัยและด้านอุตสาหกรรม เช่น สามารถประหยัดไฟในการผลิตแหล่งกำเนิดพลาสมาในอุตสาหกรรมที่มีการนำพลาสมาไปใช้ประโยชน์

1.4.4 ได้พัฒนาการขององค์ความรู้

1.5 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยเนื้อหาจำนวน 5 บท โดยเหตุจูงใจ และวิธีการดำเนินงานวิจัยได้กล่าวถึงในบทที่ 1 ต่อมาบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย เช่นระบบพลาสมาที่เกิดจากระบบดิสชาร์จ การคำนวณหาอุณหภูมิและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนโดยวิธีการวัดทางแสง ความสัมพันธ์ของควมถี่ต่ออุณหภูมิและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน ในบทที่ 3 กล่าวถึงระบบทดลองที่ใช้ และการเทคนิคในการวัด และการจำลองพลาสมาโดยคอมพิวเตอร์ บทที่ 4 กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของพลาสมาที่วัดได้ และอภิปรายผลการทดลอง โดยที่การสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะจะกล่าวไว้ในบทที่ 5

บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น

พลาสมาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับมีลักษณะเฉพาะของพลาสมาต่างกับพลาสมาแหล่งกำเนิดกระแสตรงซึ่งพลาสมาทั้งสองแบบมีข้อดีที่แตกต่างกันไปโดยในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาถึงลักษณะเฉพาะของพลาสมาในระบบกระแสสลับที่มีความถี่ต่ำ

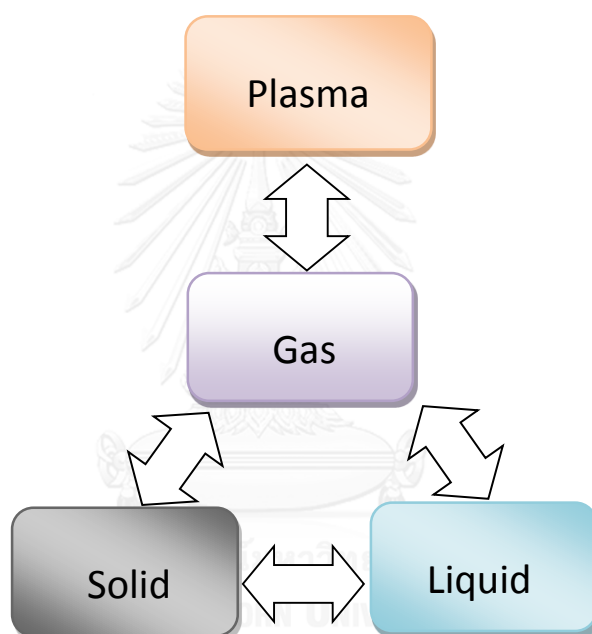
การศึกษาลักษณะเฉพาะของพลาสมาที่เกิดจากการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ต่ำ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีความรู้ ความเข้าใจในสมบัติต่างๆของพลาสมา และวิธีการวัดพารามิเตอร์ทั้งอุณหภูมิของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน เพื่อสามารถศึกษาลักษณะเฉพาะของพลาสมา โดยในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็นในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ลักษณะทั่วไปของพลาสมา เงื่อนไขการเกิดพลาสมา พลาสมาในระบบดิสชาร์จ

2.1 ความหมายของพลาสมาและพลาสมาโกลว์ดิสชาร์จ

โดยทั่วไปสถานะมี 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ ต่อมาในปี ค.ศ. 1879 เซอร์วิลเลียม กรูเลส (Sir William Crookes) ได้ให้ความหมายของพลาสมา จำแนกตามสถานะของสสาร โดยให้พลาสมาเป็นสถานะที่ 4 ของสสารดังแสดงในรูปที่ 2.1 เนื่องจากสถานะที่ 4 มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากสถานะอื่นอย่างชัดเจน โดยถ้าให้พลังงานกับสสาร สสารจะเปลี่ยนสถานะ เริ่มจากสสารในสถานะของแข็งเมื่อได้รับพลังงานจะสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว และของเหลวกลายเป็นก๊าซ แต่หากให้พลังงานเพิ่มขึ้นก๊าซจะแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนและไอออนกลายเป็นพลาสมา จึงเป็นที่มาของสถานะที่ 4 ของสสาร ต่อมาปี ค.ศ. 1928 เออิวิง ลางมัวร์ (Irving Langmuir) และ เลวี ทร็องซ์ (Lewi Tonks) ได้ทำการทดลองทางไฟฟ้าแล้วสังเกตเห็นว่าการที่ก๊าซแตกตัวและมีการไหลของกระแสไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายคลึงกับการไหลเวียนของเลือดที่ประกอบด้วยเม็ดเลือดแดง และเม็ดเลือดขาว จึงได้นิยามก๊าซที่แตกตัวนี้ว่า พลาสมา และปี ค.ศ. 1974 ฟรานซิส เซเรน (Francis 1974) ได้นิยามความหมายของพลาสมา ดังนี้พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุทั้งประจุบวก และประจุลบในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ การอยู่รวมกันของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง (Quasineutral) ซึ่งหมายความว่าประจุบวกและประจุลบในบริเวณนั้นโดยรวมมีปริมาณใกล้เคียงกัน และแสดงพฤติกรรมรวม (Collective behavior)

พลาสมาโกลว์ดิสชาร์จเป็นพลาสมาที่เกิดได้โดยการให้พลังงานไฟฟ้าแก่ก๊าซที่เป็นกลาง เมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในอากาศมากพอ ส่งผลให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับ

อิเล็กตรอนและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอมกระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการการแตกตัวของไอออน (ionization process) กระบวนการนี้เกิดขึ้นในเวลารวดเร็ว ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้ เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมากซึ่งทำให้ก๊าซแตกตัว และกลายเป็นพลาสมาในที่สุด ในระดับมหภาคจะเห็นว่าพลาสมาแสดงความเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่ถ้าพิจารณาในระดับจุลภาคจะเห็นว่าภายในพลาสมาประกอบด้วยอิเล็กตรอน และไอออนที่เคลื่อนที่ อนุภาคเหล่านี้จะให้ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน และ ความหนาแน่นจำนวนไอออนในบริเวณหนึ่งๆ ซึ่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ดังนั้นพลาสมาจึงมีอันตรกิริยากับสนามต่างๆ



รูปที่ 2.1 สถานะทั้งสี่ของสสาร

2.2 นิยามอุณหภูมิของอิเล็กตรอน อุณหภูมิของไอออน และอุณหภูมิพลาสมา

อุณหภูมิสามารถนิยามจากค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์ของอนุภาคในสสารใดๆ ซึ่งสอดคล้องกับความร้อนหรือความเย็นของสสารนั้น ก๊าซในสมดุลความร้อนทุกอนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างๆ และโอกาสการแจกแจงของความเร็วเหล่านี้เป็นที่รู้จักในชื่อ การแจกแจงแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwellian distribution) หากพิจารณาก๊าซที่เคลื่อนที่แค่หนึ่งมิติ การแจกแจงแบบแมกซ์เวลล์ในหนึ่งมิติคือ

$$f(u) = A \exp\left(\frac{-1/2mu^2}{k_B T}\right) \quad (2.1)$$

ในทางกลศาสตร์สถิติ การแจกแจงความเร็วแบบแมกซ์เวลล์อธิบายความเร็วของอนุภาคก๊าซในอุดมคติ โดยอนุภาคเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระภายในภาชนะหนึ่ง โดยไม่ต้องมีปฏิสัมพันธ์กับอนุภาคอื่น ยกเว้นการชนกันในลักษณะใกล้เคียงกันมากๆ อนุภาคทั้งหลายสามารถแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัม กับสภาพแวดล้อม อนุภาคในบริบทนี้หมายถึงก๊าซของอะตอมหรือโมเลกุลและระบบการทำงานของอนุภาคจะถือว่าอยู่ในลักษณะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์

$f(u)du$ คือจำนวนอนุภาคต่อปริมาตรสำหรับความเร็วในช่วง u ถึง $u + du$, $1/2mu^2$ คือพลังงานจลน์ของอนุภาค และ k_B คือค่าคงที่โบลต์ซมันน์ ($k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$) และความหนาแน่น (n) คือจำนวนอนุภาคต่อปริมาตร

$$n = \int_{-\infty}^{+\infty} f(u) du \quad (2.2)$$

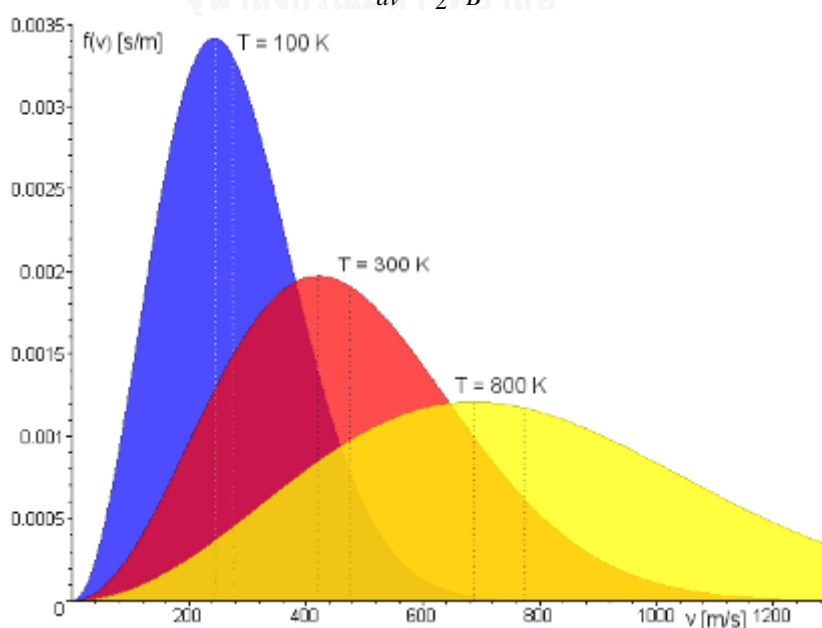
โดยค่าคงที่ A สัมพันธ์กับความหนาแน่นดังนี้

$$A = n \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

ความกว้างของการแจกแจงเป็นลักษณะเฉพาะโดยมีค่าคงที่คือ T เรียกค่าคงที่นี้ว่าอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 2.2 สามารถหาค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์ของอนุภาคในการแจกแจงตัวนี้

$$E_{av} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} mu^2 f(u) du}{\int_{-\infty}^{+\infty} f(u) du} \quad (2.4)$$

$$E_{av} = \frac{1}{2} k_B T \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.2 การแจกแจงความเร็วของแมกซ์เวลล์ที่อุณหภูมิต่างๆ

กรณีสามมิติ

$$f(u, v, w) = A \exp\left(\frac{-1/2m(u^2+v^2+w^2)}{k_B T}\right) \quad (2.6)$$

$$E_{av} = \frac{3}{2} k_B T \quad (2.7)$$

ค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์ของอนุภาคคือ $1/2 k_B T$ ต่อดีกรีความเป็นอิสระ

ในการศึกษาพลาสมา จะนิยามอุณหภูมิของอิเล็กตรอนคือ

$$k_B T_e = \frac{2}{3} E_{av,e} \quad (2.8)$$

โดย $k_B T_e$ คืออุณหภูมิของไอออนในหน่วย อิเล็กตรอนโวลต์ $E_{av,e}$ คือพลังงานจลน์เฉลี่ยของอิเล็กตรอน อุณหภูมิของไอออนคือ $k_B T_i = \frac{2}{3} E_{av,i}$ ซึ่ง $k_B T_i$ คืออุณหภูมิของไอออนในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ $E_{av,i}$ คือพลังงานจลน์เฉลี่ยของไอออน กรณีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนเท่ากับอุณหภูมิของไอออน $k_B T_e = k_B T_i = k_B T$ จะเรียกอุณหภูมิในกรณีว่าอุณหภูมิพลาสมา ($k_B T$)

สำหรับงานวิจัยนี้ $k_B T_e = 2$ อิเล็กตรอนโวลต์ หมายถึง อุณหภูมิของอิเล็กตรอน 2 อิเล็กตรอนโวลต์ หรือพลังงานจลน์เฉลี่ยของอิเล็กตรอน 3 อิเล็กตรอนโวลต์ การพิจารณาอุณหภูมิในพลาสมา เช่น หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์มีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนประมาณ 2×10^4 เคลวิน แต่หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ไม่ร้อน เพราะต้องพิจารณาความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนควบคู่กัน ซึ่งจะพบว่าความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนภายในหลอดไฟ มีค่าน้อยกว่าก๊าซภายนอกหลอดไฟ (ภายนอกเป็นความดันบรรยากาศ) มากๆ ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านไปที่ผนังโดยการชนของอิเล็กตรอนจึงมีค่าน้อย การแปลงหน่วยหน่วย $1 \text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{J}$

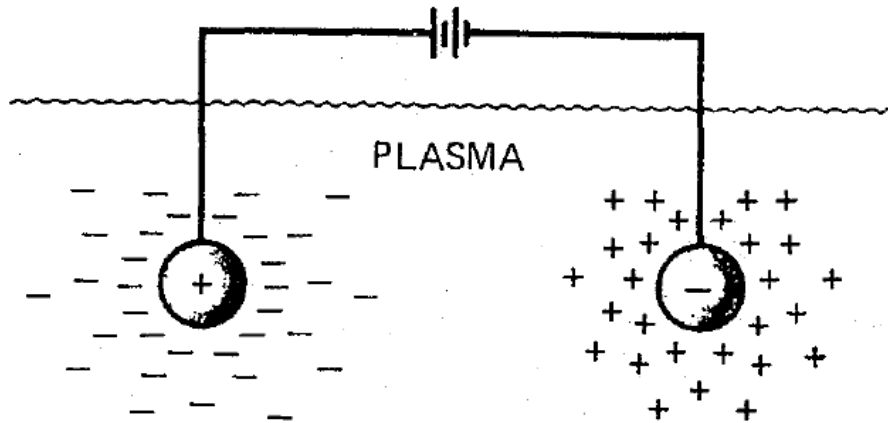
$$T = \frac{1.602 \times 10^{-19}}{k_B} = \frac{1.602 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23}} = 1.16 \times 10^4 \text{ K}$$

ดังนั้น

$$1 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} = 1.16 \times 10^4 \text{ เคลวิน}$$

พลาสมาจะเกิดขึ้นได้ ไม่เพียงแต่ให้พลังงานจนทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออนเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ความยาวคลื่นเดอบายจำนวนอนุภาคในทรงกลมที่รัศมีเท่ากับ ความยาวคลื่นเดอบาย และความถี่ของพลาสมา

2.3 ความยาวคลื่นเดอบาย



รูปที่ 2.3 การกำบังเดอบาย

จากรูปที่ 2.3 เมื่อมีการรบกวนระบบ โดยการสมมติว่ามีประจุมาอยู่ในพลาสมา พลาสมา จะทำการต่อต้านการรบกวนดังกล่าว กล่าวคือ ประจุตรงกันข้ามจะเคลื่อนที่มาล้อมรอบประจุ ดังกล่าวนี้อาจมองเป็นทรงกลมรัศมีชื่อว่า ความยาวคลื่นเดอบาย (λ_D) ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า การกำบังของเดอบาย ซึ่งรัศมีของทรงกลมเดอบายนี้มีค่าเป็นศูนย์ หากมองจากระยะไกลมากๆ เปรียบเสมือนไม่มีการรบกวนระบบ จะได้ว่าเงื่อนไขในการเกิดพลาสมาคือ ความยาวของพลาสมาต้องมีค่ามากกว่าความยาวคลื่นเดอบายจึงจะไม่เป็นการรบกวนระบบเมื่อมีหัววัดเข้าไปในพลาสมา

$$L \gg \lambda_D \quad (2.9)$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{e^2 n_e}} \quad (2.10)$$

โดย L คือความยาวของแฮมเบอร์ มีหน่วยเป็นเมตร ซึ่ง e คือประจุของอิเล็กตรอนหนึ่งตัว ในหน่วย คูลอมป์ $k_B T_e$ คืออุณหภูมิของอิเล็กตรอนในหน่วย อิเล็กตรอนโวลต์ n_e คือความหนาแน่น จำนวนอิเล็กตรอนในหน่วย ตัวต่อลูกบาศก์เมตร และ ϵ_0 คือค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (permittivity of free space, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m)

2.4 จำนวนอนุภาคในทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับความยาวคลื่นเดอบาย

จากรูปการกำบังเดอบายนั้นจะเห็นว่า มีอนุภาคประจุมาล้อมรอบจำนวนมาก แต่หากมีประจุมาล้อมรอบแค่หนึ่งหรือสองตัวก็จะไม่เกิดเงื่อนไขตามสมการเดอบายสามารถใช้ $\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{e^2 n_e}}$ คำนวณหาจำนวนอนุภาคในทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับความยาวคลื่นเดอบาย (N_D)

$$V_D = \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 \quad (2.11)$$

$$N_D = \frac{4}{3} n_e \pi \lambda_D^3 \quad (2.12)$$

โดยพลาสมาจะเกิดได้ เมื่อจำนวนอนุภาคในทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับความยาวคลื่นเดอบาย ต้องมีจำนวนมาๆดังแสดงในสมการที่ (2.13)

$$N_D \gg 1 \quad (2.13)$$

2.5 ความถี่พลาสมา

ความถี่พลาสมา (ω_p) ต้องมีค่ามากเมื่อเทียบกับความถี่ระหว่างการชนระหว่างอนุภาค ประจุกับอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (ω_a)

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{m \epsilon_0}} \quad (2.14)$$

$$\omega_p \gg \omega \quad (2.15)$$

$$\frac{\omega_p}{\omega_a} \gg 1 \quad (2.16)$$

อาจพิจารณาคาบของพลาสมา (τ_p) ต้องมีค่าน้อยกว่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนระหว่างอนุภาคประจุกับอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (τ_a) ซึ่งถูกเรียกว่าพฤติกรรมร่วม

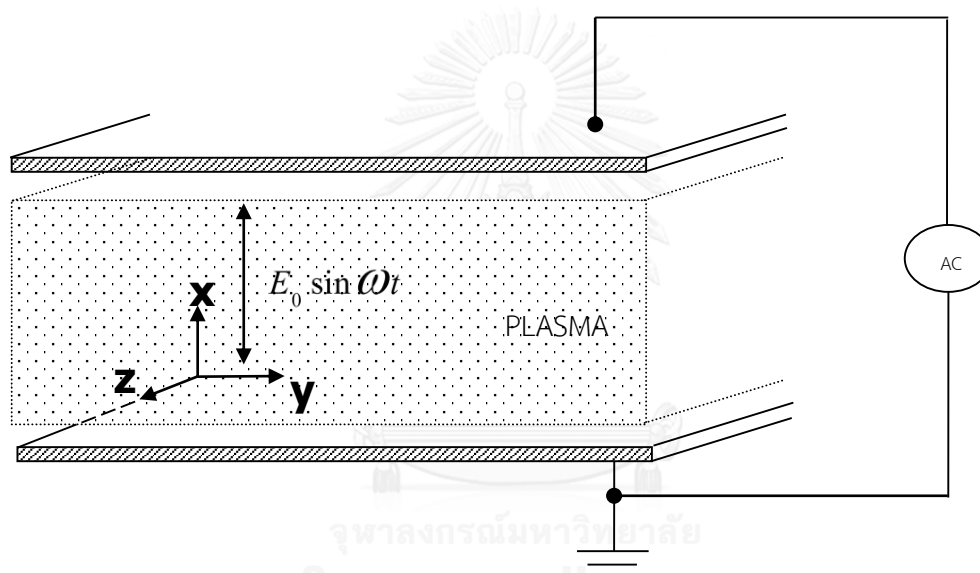
$$\tau_p \ll \tau_a \quad (2.17)$$

ดังนั้นพลาสมาเกิดจากการให้พลังงานแก่อากาศที่เป็นกลางทางไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในอากาศเกิดการเคลื่อนที่ไปชนอะตอมของก๊าซ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเรียกว่าการแตกตัวของไอออน ถ้าพลังงานที่ให้มามีค่ามากพอทำให้เกิดการแตกตัวอย่างรวดเร็วและมีอิเล็กตรอนหลุดออกมามากก็จะเกิดพลาสมาตามเงื่อนไขทั้งสามคือ

1. $L \gg \lambda_D$
2. $N_D \gg 1$
3. $\frac{\omega_p}{\omega} \gg 1$

2.6 ระบบดิสชาร์จแบบกระแสสลับ

ในงานวิจัยนี้มีการสร้างระบบกำเนิดพลาสมาอาร์กอนในระบบโกลว์ดิสชาร์จด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับอย่างง่ายเพื่อนำไปใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของพลาสมา โดยมีอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับสร้างระบบพลาสมาโกลว์ดิสชาร์จอย่างง่ายดังนี้ 1.ภาชนะสุญญากาศ (Chamber) หรืออุปกรณ์สำหรับบรรจุก๊าซและเป็นแหล่งกำเนิดพลาสมาที่ความดันต่างๆ 2.แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับให้พลังงานแก่ระบบ 3.ขั้วอิเล็กโทรดหรือเรียกว่าแผ่นโลหะคู่ขนานสำหรับเป็นบริเวณที่สร้างสนามไฟฟ้าซึ่งนำไปสู่การเกิดพลาสมา 4.ปั๊มสำหรับทำให้เกิดภาวะสุญญากาศซึ่งงานวิจัยนี้จะมีการปรับค่าความถี่ไฟฟ้าในช่วงระหว่าง 500 - 8000 เฮิรตซ์



รูปที่ 2.4 พลาสมาดิสชาร์จโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

โดยหลักการการเกิดพลาสมาคือการให้พลังงานไฟฟ้าไปที่แผ่นโลหะคู่ขนานเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างโลหะคู่ขนาน การให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซที่เป็นกลาง จนเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน จะทำให้ก๊าซแตกตัวและกลายเป็นพลาสมาในที่สุด

ลักษณะเฉพาะของระบบดิสชาร์จแบบกระแสสลับโดยให้พลังงานไฟฟ้าสู่แผ่นโลหะคู่ขนานเพื่อสร้างพลาสมาดังรูปที่ 2.4 โดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีความถี่เชิงมุม ω สนามไฟฟ้าที่มีอัมพลิจูดคือ E_0 อยู่ในแนวแกน x พิจารณา

$$\vec{E} = (E_0 \sin \omega t, 0, 0) \quad (2.18)$$

และสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์

$$\vec{B} = (0, 0, 0) \quad (2.19)$$

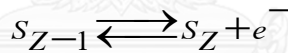
กำลังดูดกลืนรวมเฉลี่ยโดยพลาสมาระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนานรวม (\bar{P}) ในหน่วยวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร โดยรายละเอียดเพิ่มเติมอยู่ในภาคผนวก.ค

$$\bar{P} = n_e \bar{p} = \frac{n_e e^2 E_0^2}{2m_e} \frac{v_c}{(\omega^2 + v_c^2)} = \frac{1}{4} E_0^2 \frac{e^2 n_e}{m_e} \frac{2v_c}{(4\pi^2 f^2 + v_c^2)} \quad (2.20)$$

เมื่อ n_e คือความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน \bar{p} กำลังดูดกลืนรวมเฉลี่ยโดยอิเล็กตรอนเดี่ยวจากสนามไฟฟ้ากระแสสลับ e คือประจุของอิเล็กตรอนหนึ่งตัว v_c คือความถี่จากการชนแบบโลเรนตซ์ m_e คือมวลของอิเล็กตรอนหนึ่งตัว และ f ความถี่ของสนามไฟฟ้าเนื่องจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า

2.7 สมการซาฮา-โบลต์ซมันน์

หากพิจารณาพลาสมาโดยแบ่งพลาสมาเป็นปริมาตรเล็กๆและสมมติว่า พลาสมาีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอและมีสมดุลอุณหพลศาสตร์ ข้อพิสูจน์ของอุณหพลศาสตร์สามารถประยุกต์ใช้กับกระบวนการการผันกลับได้ในระบบโดดเดี่ยว (Isolated system) สำหรับพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูง กระบวนการการแผ่รังสีถูกละเลยเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการการชน ระบบจะเข้าสู่สมดุลที่เรียกว่า สมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่



กำหนดให้ s_Z คือไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z s_{Z-1} คือไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$ และ e^- คืออิเล็กตรอน (ในงานวิจัยนี้ไอออนชนิด s คืออาร์กอน)

จากปฏิกิริยาข้างต้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ของจำนวนไอออนได้ดังนี้

$$-\delta N_{Z-1} = \delta N_Z = \delta N_e \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.21) อธิบายว่าการลดลงของจำนวนอนุภาคด้านซ้ายของปฏิกิริยาเท่ากับการเพิ่มของจำนวนอนุภาคด้านขวาของปฏิกิริยา โดย δN_{Z-1} คือการเปลี่ยนแปลงของจำนวนไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$ (ตัว) δN_Z คือการเปลี่ยนแปลงของจำนวนไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z (ตัว) และ δN_e คือการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอน (ตัว)

หากเราพิจารณาระบบย่อยสองระบบแลกเปลี่ยนพลังงานกันเพียงอย่างเดียว การแลกเปลี่ยนจะสิ้นสุดลงเมื่ออุณหภูมิของทั้งสองเท่ากันและหากพิจารณาระบบที่อุณหภูมิและปริมาตรคงที่ ระบบจะเข้าสู่สมดุลได้พลังงานอิสระเฮล์มโฮลตซ์มีค่าน้อยที่สุด

$$\delta F=0 \quad (2.22)$$

โดย $F = -k_B T \ln U$ และ U คือฟังก์ชันแบ่งส่วน (Partition function) ของระบบคือ

$$U = \frac{U_e^{N_e} U_Z^{N_Z} U_{Z-1}^{N_{Z-1}}}{N_e! N_Z! N_{Z-1}!} \quad (2.22)$$

ฟังก์ชันแบ่งส่วนของระบบ ในปฏิกริยาข้างต้นสัมพันธ์กับฟังก์ชันแบ่งส่วนของอิเล็กตรอนและไอออน ได้แก่ U_e คือฟังก์ชันแบ่งส่วนของอิเล็กตรอน, U_Z คือฟังก์ชันแบ่งส่วนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z และ U_{Z-1} คือฟังก์ชันแบ่งส่วนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$

จากความสัมพันธ์สมการแสดงการเปลี่ยนแปลงจำนวนไอออน และพลังงานอิสระเฮล์มโฮลตซ์มีค่าน้อยที่สุดข้างต้น จำนวนไอออนมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันแบ่งส่วนดังสมการ

$$\frac{N_e N_Z}{N_{Z-1}} = \frac{U_e U_Z}{U_{Z-1}} \quad (2.23)$$

ฟังก์ชันแบ่งส่วนของอิเล็กตรอนดังแสดง

$$U_e = \frac{g_e V (2m_e \pi k_B T)^{3/2}}{h^3} \quad (2.24)$$

ความเข้มแสงที่เกิดขึ้นของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก (I_Z) ดังแสดง

$$I_Z = \frac{hc}{4\pi \lambda_{ki,Z}} N_{k,Z} A_{ki,Z} L \quad (2.25)$$

โดย $\lambda_{ki,Z}$ คือความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยเนื่องจากเปลี่ยนพลังงานจากระดับ k ไป i ของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$, $A_{ki,Z}$ คือความน่าจะเป็นการเปลี่ยนพลังงานจากระดับ k ไป i ของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z , $N_{k,Z}$ คือจำนวนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ที่ระดับ k , c คือความเร็วแสง, h คือค่าคงที่พลังค์ และ L ความยาวของแหล่งกำเนิดแสง

ความสัมพันธ์โบลต์ซมันน์ได้แก่

$$\frac{N_{k,Z}}{N_Z} = \frac{g_{k,Z}}{U_Z} \exp\left(\frac{-E_{k,Z} + E_Z}{k_B T}\right) \quad (2.26)$$

โดย N_Z คือจำนวนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ในทุกระดับ, $g_{k,Z}$ คือแฟกเตอร์สภาพเสื่อมคล้ายของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ที่ระดับ k , U_Z คือฟังก์ชันแบ่งส่วนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z , E_Z คือพลังงานของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ในทุกระดับ, $E_{k,Z}$ คือพลังงานของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ที่ระดับ k , $g_{k,Z}$ คือพลังงานของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ที่ระดับ k และ $k_B T$ คืออุณหภูมิพลาสมา

สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มแสงกับอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้ดังสมการ

$$I_Z = \frac{L}{4\pi} hc \frac{NZ}{UZ} \frac{A_{ki,Z} g_{k,Z}}{\lambda_{ki,Z}} \exp\left(-\frac{E_{k,Z} + E_Z}{k_B T}\right) \quad (2.27)$$

เมื่อพิจารณาจำนวนไอออนมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันแบ่งส่วนดังสมการ (2.23) และสมการ ความเข้มแสง สมการ (2.27) จะได้ สมการซาฮา-โบลต์ซมันน์

$$n_e = 2 \left(\frac{2\pi m_e k_B T_e}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{I_{Z-1} \lambda_{k'i',Z-1} A_{ki,Z} g_{k,Z}}{I_Z \lambda_{ki,Z} A_{k'i',Z-1} g_{k',Z-1}} \exp\left(-\frac{E^{ion} + E_{k,Z} - E_{k',Z-1}}{k_B T}\right) \quad (2.28)$$

สำหรับสมการซาฮา-โบลต์ซมันน์ กรณีอุณหพลศาสตร์แบบเฉพาะที่ ดังสมการที่ (2.28) จะพิจารณาการแตกตัวของก๊าซว่าแตกตัวหมด จะได้ว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของ ไอออนและอุณหภูมิของก๊าซ ($k_B T_e = k_B T_i = k_B T$) โดย U_{z-1} คือฟังก์ชันแบ่งส่วนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$, I_{Z-1} คือความเข้มแสงของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$, $\lambda_{k'i',Z-1}$ คือความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยเนื่องจากเปลี่ยนพลังงานจากระดับ k' ไป i' ของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$, $A_{k'i',Z-1}$ คือความน่าจะเป็นการเปลี่ยนพลังงานจากระดับ k' ไป i' ของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$, $g_{k',Z-1}$ คือแฟกเตอร์สภาพเสื่อมคลายของไอออนชนิด s ที่ระดับ k' ที่มีประจุบวก $Z-1$, $N_{k',Z-1}$ คือจำนวนของไอออนชนิด s ที่ระดับ k' ที่มีประจุบวก $Z-1$, E^{ion} คือพลังงานไอออนไนเซชัน และ $E_{k',Z-1}$ คือพลังงานของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$ ที่ระดับ k' (รายละเอียดเพิ่มเติมอยู่ในภาคผนวก.ง)

สำหรับกรณีที่ไม่ใช่สมดุลอุณหพลศาสตร์แบบเฉพาะที่ คือ มวลของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่ามวลของไอออน ส่งผลให้ความเร็วของอิเล็กตรอนต้องมากกว่าความเร็วของไอออนมาก เมื่อเปรียบเทียบความเร็วของทั้งสอง จะเห็นว่า ความเร็วของไอออนเปรียบเป็นแบบหยุดนิ่ง เมื่อเทียบกับความเร็วของอิเล็กตรอน ส่งผลให้การพิจารณาระบบจะมีค่าเป็นค่าประมาณเท่ากับพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน

$$\frac{1}{2} m_e v_e^2 \gg \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (2.29)$$

$$k_B T_e \gg k_B T_i \quad (2.30)$$

กรณีที่ไม่ใช่สมดุลอุณหพลศาสตร์แบบเฉพาะที่ คือกรณีที่มีสมดุลของอิเล็กตรอน และมีสมดุลของไอออน แต่ $k_B T_i \ll k_B T_e$ ดังนั้น $k_B T = k_B T_e$ สมการซาฮา-โบลต์ซมันน์สามารถเขียนใหม่ คือ

$$n_e = 2 \left(\frac{2\pi m_e k_B T_e}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{I_{Z-1} \lambda_{k'i',Z-1} A_{ki,Z} g_{k,Z}}{I_Z \lambda_{ki,Z} A_{k'i',Z-1} g_{k',Z-1}} \exp\left(-\frac{E^{ion} + E_{k,Z} - E_{k',Z-1}}{k_B T_e}\right) \quad (2.31)$$

จากสมการที่ (2.20) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$n_e = \frac{2m_e \bar{P}}{v_c e^2 E_0^2} (4\pi^2 f^2 + v_c^2) \quad (2.32)$$

จากสมการซาฮา-โบลต์ซมันน์ (2.31) สามารถใช้การประมาณอุณหภูมิอิเล็กตรอน

$$n_e \propto f^2 \quad (2.33)$$

$$n_e \propto \exp\left(\frac{-1}{k_B T_e}\right) \quad (2.34)$$

ดังนั้น

$$f^2 \propto \exp\left(\frac{-1}{k_B T_e}\right) \quad (2.35)$$

$$\ln(f^2) \propto \left(\frac{-1}{k_B T_e}\right) \quad (2.36)$$

$$k_B T_e \propto \left(\frac{-1}{\ln(f^2)}\right) \quad (2.37)$$

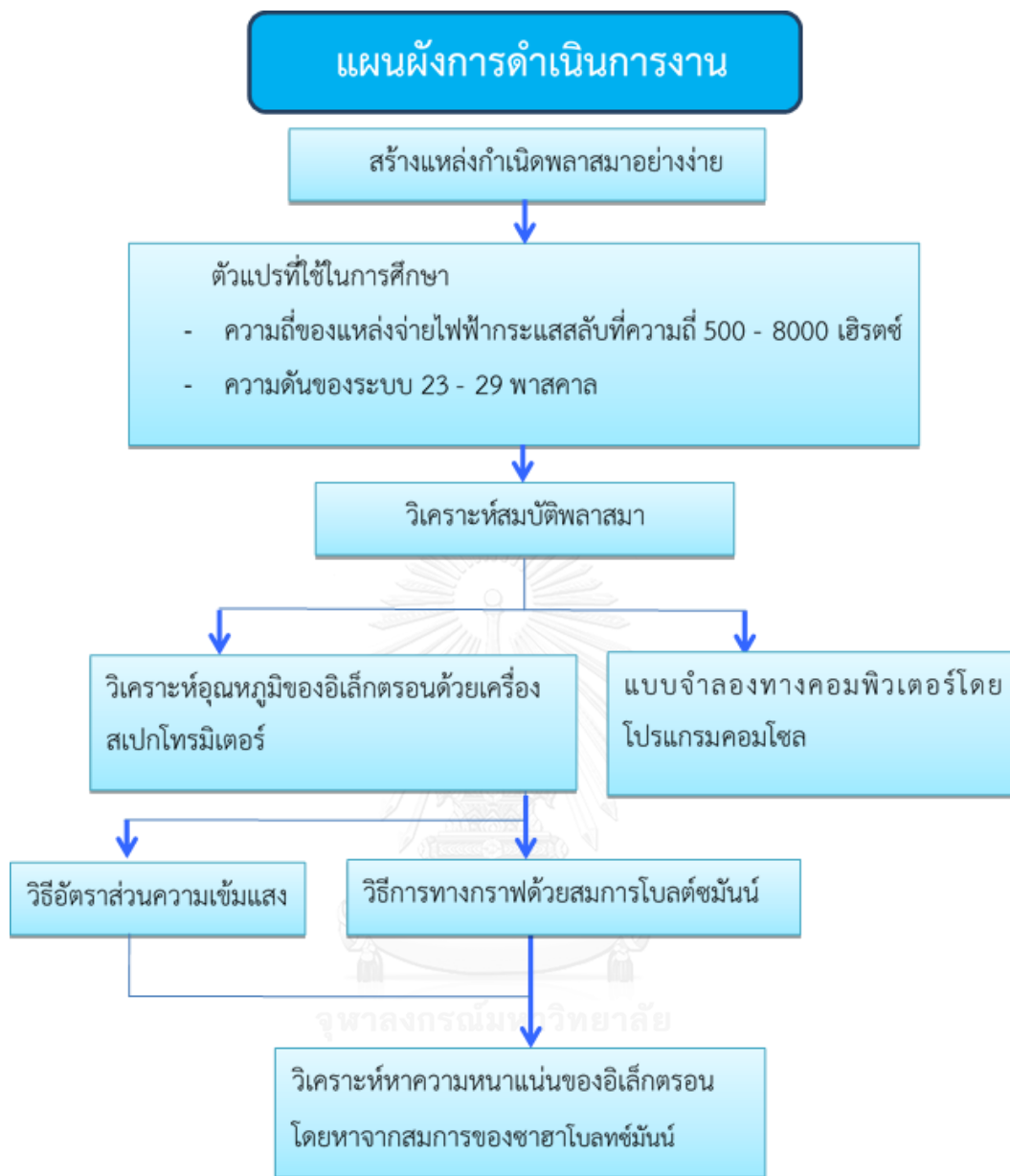
จากทฤษฎีข้างต้นจะเห็นได้ถึงความถี่ส่งผลต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอน และความหนาแน่น
จำนวนอิเล็กตรอน

บทที่ 3

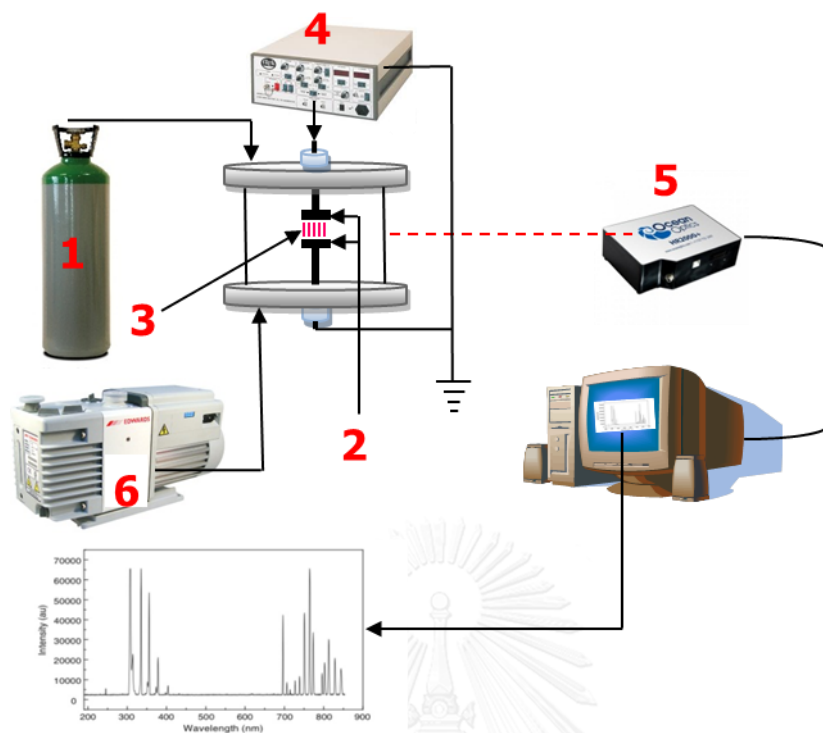
การทดลอง

3.1 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองนี้ต้องการศึกษาลักษณะเฉพาะของพลาสมาอาร์กอนโดยแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อสร้างพลาสมาอย่างง่ายในระบบดิสชาร์จ ได้แก่ อุปกรณ์สำหรับบรรจุก๊าซ ซึ่งภายในมีแผ่นโลหะคู่ขนานสำหรับสร้างพลาสมาขึ้นภายในโดยแหล่งกำเนิดพลังงานที่ใส่ให้กับแผ่นโลหะคู่ขนานนั้นคือแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับความถี่ของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าได้ ยี่ห้อเทร็ค รุ่น 615-10 (Trek, Model 615-10) แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้านี้สามารถปรับความถี่ไฟฟ้าได้ในช่วง 100 ถึง 10000 เฮิร์ตซ์ และปรับลักษณะของคลื่นเป็นคลื่นไซน์ คลื่นสามเหลี่ยม และคลื่นสี่เหลี่ยมได้ โดยในการทดลองนี้เลือกใช้คลื่นสามเหลี่ยม สามารถปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง 10 กิโลโวลต์ และป้อนเป็นทำให้เกิดภาวะสุญญากาศ โดยออกแบบและสร้างระบบพลาสมาดิสชาร์จด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับอย่างง่ายแล้วทำการทดสอบความเสถียรของเครื่องกำเนิดพลาสมาที่ได้สร้างขึ้นเพื่อได้เครื่องกำเนิดพลาสมาสำหรับศึกษาสมบัติเฉพาะของพลาสมา โดยสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ยี่ห้อไอเซียน ออปติก รุ่นเฮคอาร์ 4000 (Ocean optics, HR4000) เป็นสเปกโตรมิเตอร์ซึ่งก็คืออุปกรณ์สำหรับวัดทางแสงสเปกโตรมิเตอร์นี้สามารถวัดแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 200 ถึง 1100 นาโนเมตร โดยสามารถนำข้อมูลที่วัดได้มาวิเคราะห์หาอนุกรมของอิเล็กตรอน โดยวัดจากวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง และวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์วิเคราะห์หาความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนจากสมการของซาฮา-โบลต์ซมันน์โดยผลที่วิเคราะห์ได้นี้ถูกเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณกับทฤษฎีของพลาสมาต่างๆที่เกี่ยวข้อง และแบบจำลองเพื่ออธิบายและสรุปผลการทดลอง



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการทดลอง



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วย 1.ก๊าซอาร์กอน 2.แผ่นโลหะคู่ขนาน 3.พลาสมา 4.แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า 5.สเปกโตรมิเตอร์ 6.ปัด



รูปที่ 3.3 การทดลองสำหรับวิธีการวัดทางแสง

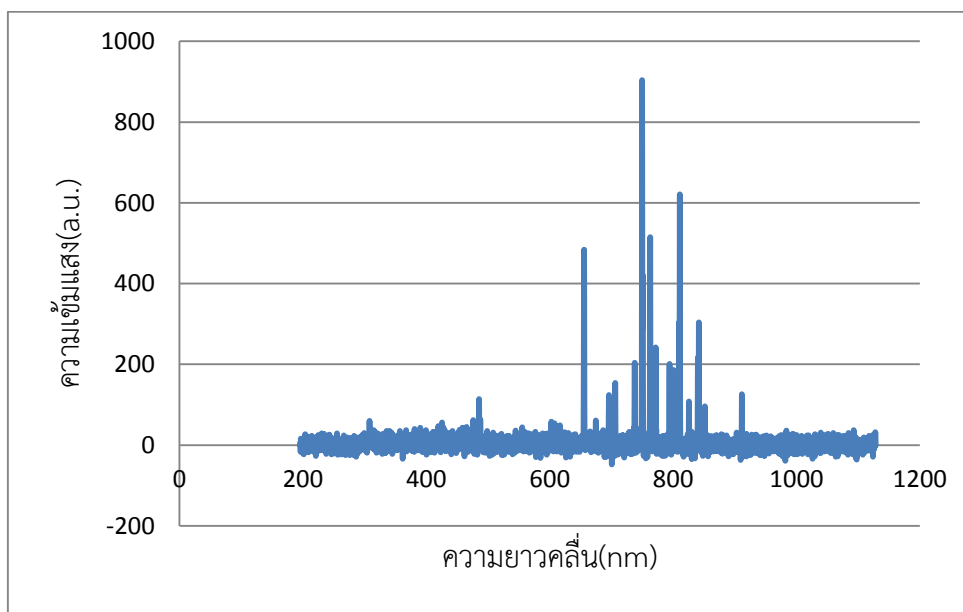
3.2 การวัดค่าอุณหภูมิและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนของพลาสมา

การวัดค่าพารามิเตอร์ของพลาสมาสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันออกไป การวิเคราะห์หาอุณหภูมิและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนของพลาสมาที่ได้ โดยใช้วิธีวัดทางแสง วิธีนี้เป็นการวัดที่ไม่มีการรบกวนระบบพลาสมา ซึ่งสามารถนำสเปกตรัมที่วัดได้มาคำนวณหาอุณหภูมิอิเล็กตรอน ($k_B T_e$) โดยวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง และวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์ สำหรับหาความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน (n_e) ใช้ความสัมพันธ์ของสมการซาฮา-โบลต์ซมันน์

การหาอุณหภูมิและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนของพลาสมาที่ได้ โดยใช้เครื่องสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสงเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังเช่น ในงานของ ราเจนครา ชรีสตา (R. Shrestha 2012) ใช้วิธีอัตราส่วนความเข้มแสงสามารถหาค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนเท่ากับ 0.9 อิเล็กตรอนโวลต์ และในงานชิ้นหนึ่งของ ทาดา ราจู ไบย์ (T. Bhai 2013) ใช้วิธีอัตราส่วนความเข้มแสงสามารถหาค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนเท่ากับ 0.65 อิเล็กตรอนโวลต์ และใช้ความสัมพันธ์ของสมการซาฮา-โบลต์ซมันน์ในการหาความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนของพลาสมา โดยสามารถหาได้ในช่วง 10^{16} ตัวต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและตัวอย่างอีกชิ้นหนึ่งทำโดยกัญจัญชญา หงส์เลิศคงสกุล (K. Honglertkongsakul) ใช้วิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์ในการหาอุณหภูมิอิเล็กตรอนของพลาสมาของก๊าซไนโตรเจน วัดค่าได้น้อยกว่า 0.8 อิเล็กตรอนโวลต์

จะเห็นได้ว่าการวัดอุณหภูมิและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนของพลาสมาในหลายๆ งานวิจัยดังที่กล่าวข้างต้น เลือกใช้วิธีวัดทางแสงทั้งสิ้น ซึ่งหมายความว่า การใช้วิธีดังกล่าวเป็นที่ยอมรับในระดับสากล

3.2.1 การหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจากวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงจากสเปกตรัมของอาร์กอน

การหาพารามิเตอร์ของพลาสมาด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์นั้นอาศัยหลักการแยกสเปกตรัมของแสงจากพลาสมาที่ทำการวัดซึ่งมีความยาวคลื่นต่างกันภายในเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ สัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันจะถูกรับด้วยไดโอดรับแสง แสดงผลออกมาในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงของความยาวคลื่น โดยขั้นตอนการวัดเริ่มจากการกำจัดแสงพื้นหลัง แล้ววัดเฉพาะแสงที่แผ่ออกจากพลาสมาดังรูปที่ 3.4

สัญญาณที่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์วัดได้แสดงให้เห็นว่าแสงที่แผ่ออกมามีสเปกตรัมไม่ต่อเนื่อง สเปกตรัมที่แผ่ออกมาจากพลาสมาเป็นลักษณะของการแผ่รังสีแบบเส้นโดยความเข้มแสงนั้นสำหรับการแผ่รังสีแบบเส้นคือ

$$I_Z = \frac{L}{4\pi} hc \frac{n_Z}{U_Z} \frac{A_{ki,Z} g_{k,Z}}{\lambda_{ki,Z}} \exp\left(\frac{-E_{k,Z}}{k_B T}\right) \quad (3.1)$$

ต่อมาทำการเลือกสเปกตรัมเป็น λ_1 และ λ_2 ที่มีความเข้ม I_1 และ I_2 จากสเปกตรัมทั้งหมดโดยจะต้องเลือกสเปกตรัมที่มีสถานะไอออนต่างกันหนึ่งสถานะ ถ้าเลือกสเปกตรัมแรกที่มาจากไอออนสถานะ $i-1$ อีกสเปกตรัมต่อมาต้องมาจากไอออนสถานะ i โดย L , A และ g คือความยาวของพลาสมา, โอกาสที่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน และคือค่าถ่วงน้ำหนักทางสถิติหรือเรียกอีกชื่อว่า แฟกเตอร์สภาพเสื่อมคลาย (degeneracy factor) โดยค่าต่างๆสามารถสืบค้นได้จากเว็บไซต์ของ

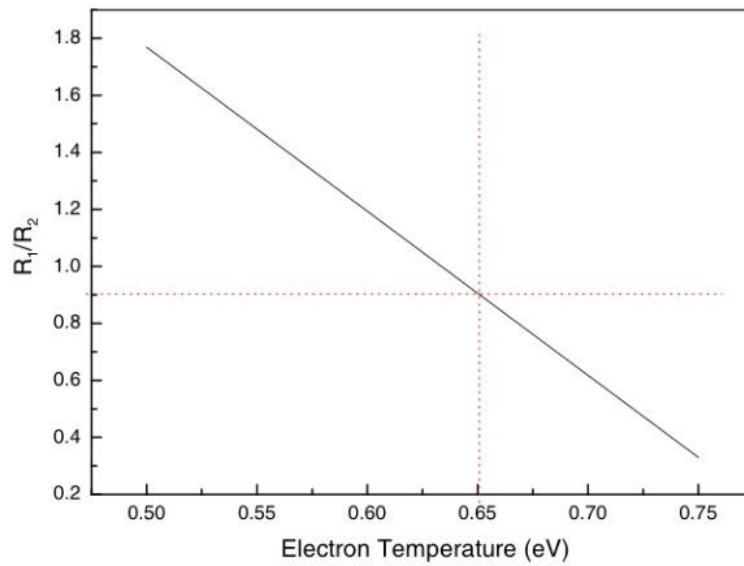
National Institute of Standards and Technology โดย U คือฟังก์ชันการแบ่งส่วน ซึ่งสามารถใช้สมการการแบ่งส่วนสำหรับหาฟังก์ชันแบ่งส่วน แต่หากทำโดยวิธีนี้หาค่าได้ยากจึงใช้วิธีการกำจัดฟังก์ชันบังแบ่งส่วน จากการเลือกสเปกตรัมอีกสองเส้นเป็น λ_3 และ λ_4 ที่มีความเข้มของแสง I_3 และ I_4 ที่มีสถานะไอออนต่างกันหนึ่งสถานะเป็น $i-1$ และ i อัตราส่วนความเข้มของแสงเป็นดังนี้

$$R_1 = \frac{I_1}{I_2} \quad (3.2)$$

$$R_2 = \frac{I_3}{I_4} \quad (3.3)$$

$$R = \frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{A_1 A_4}{A_2 A_3} \right) \left(\frac{g_1 g_4}{g_2 g_3} \right) \left(\frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1 \lambda_4} \right) \exp\left(\frac{-(E_1 + E_4 - E_2 - E_3)}{kT_e} \right) \quad (3.4)$$

สมการที่ (3.4) สามารถคำนวณค่าอุณหภูมิโดยเริ่มจากการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R_1/R_2 และ $k_B T_e$ แสดงดังรูปที่ 3.5 ต่อมาใช้อัตราส่วน R_1/R_2 ที่ได้จากสเปกตรัมที่เลือกมาหาค่าเพื่อหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอน



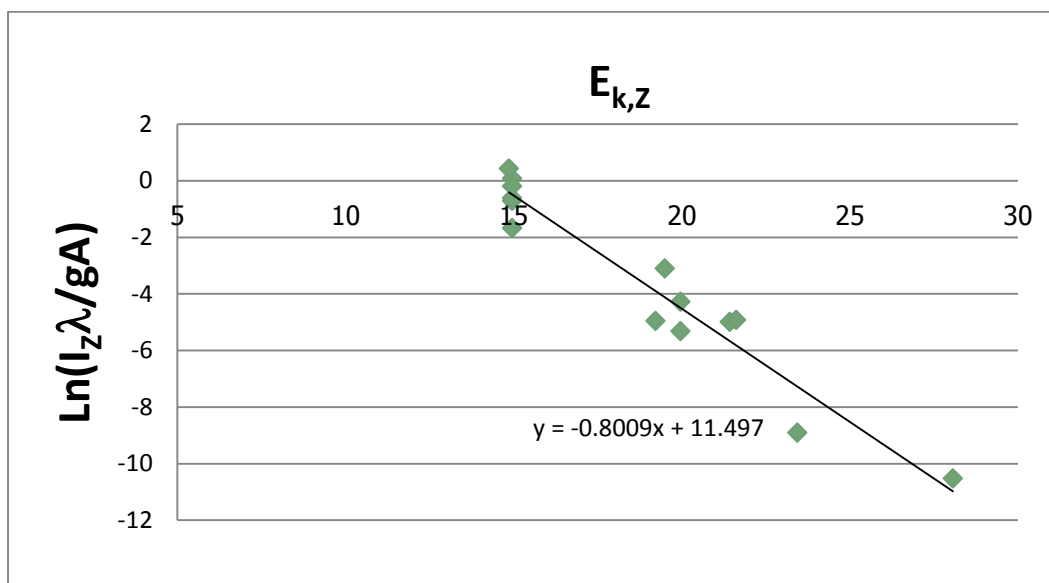
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอน และค่า R_1/R_2

ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสามารถหาได้จากการนำอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่ได้จากสมการที่ (3.4) แทนในสมการที่ (3.5)

$$n_e = 2 \left(\frac{2\pi m_e k_B T_e}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{I_{Z-1} \lambda_{Z-1}^{A_Z} g_Z}{I_Z \lambda_Z^{A_{Z-1}} g_{Z-1}} \exp\left(- \frac{E^{ion} + E_Z - E_{Z-1}}{k_B T_e} \right) \quad (3.5)$$

โดย E^{ion} คือพลังงานไอออนไนเซชันของไอออน

3.2.2 วิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์ในการหาอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์สำหรับคำนวณหาอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์

การหาอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์อาศัยผลการวัดสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสงกับการคำนวณด้วยวิธีการวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์จากความสัมพันธ์ ซึ่งก็คือสมการที่ (3.1) แปลงรูปสมการเป็นสมการที่ (3.6) แล้วนำมาสร้างกราฟเส้นตรงดังรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln\left(\frac{I_Z \lambda_{ki,Z}}{g_{k,Z} A_{ki,Z}}\right) = \frac{-E_{k,Z}}{k_B T_e} + \ln\left(\frac{hc \ln Z}{4\pi U_{k,Z}}\right) \quad (3.6)$$

$$\text{Slope} = \frac{-1}{k_B T_e} \quad (3.7)$$

3.3 การจำลองการทดลองผ่านโปรแกรมคอมโซล (COMSOL)

เหตุผลในการสร้างแบบในการจำลองทางคอมพิวเตอร์คือพลาสมาอุณหภูมิต่ำเสนออยู่ในรูปแบบกลศาสตร์ของไหล การจำลองนี้สามารถพิจารณาได้ทั้งกรณีพลาสมาดีสชาร์จแบบสมดุลและแบบไม่อยู่ในสมดุลได้ และสามารถให้เห็นพฤติกรรมของพลาสมาได้อย่างชัดเจน สำหรับโปรแกรมคอมโซลเป็นการคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงในภาคผนวก.จ โดยขั้นตอนรายละเอียดการใช้โปรแกรมอยู่ในภาคผนวก.ช

ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน (n_e) และความหนาแน่นพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน (n_ε) จะคำนวณโดยการแก้คู่ของสมการดริฟท์-ดิฟฟิวชัน (Drift diffusion equation) สำหรับความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน สมการ (3.8) และสมการดริฟท์-ดิฟฟิวชันสำหรับพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน สมการ (3.9)

สำหรับความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนและพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน โดยการพาความร้อนของอิเล็กตรอนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของไหลถูกเฉลยทิ้งไปได้สมการดริฟท์-ดิฟฟิวชันคือ

$$\frac{\partial(n_e)}{\partial t} + \nabla \cdot [-n_e(\mu_e \cdot E) - D_e \nabla \cdot n_e] = R_e \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial(n_\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot [-n_\varepsilon(\mu_\varepsilon \cdot E) - D_\varepsilon \nabla \cdot n_\varepsilon] + E \cdot \Gamma_e = R_\varepsilon \quad (3.9)$$

โดย Γ_e คือฟลักซ์ของอิเล็กตรอน ($1/m^2s$) และ Γ_ε คือฟลักซ์พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน (J/m^2s)

$$\Gamma_e = -n_e(\mu_e \cdot E) - D_e \nabla \cdot n_e \quad (3.10)$$

R_e คือแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ($1/m^3s$) และ R_ε คือพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (J/m^3s) ถูกนิยามภายหลังสภาพแพร่ของอิเล็กตรอน (D_e) ค่าสภาพการเคลื่อนที่ของพลังงาน (μ_ε) และพลังงานเนื่องจากสภาพแพร่ (D_ε) ถูกคำนวณจากค่าสภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (μ_e) โดย $k_B T_e$ คืออุณหภูมิของอิเล็กตรอน

$$D_e = \mu_e k_B T_e, \quad \mu_\varepsilon = \left(\frac{5}{3}\right) \mu_e, \quad D_\varepsilon = \mu_\varepsilon k_B T_e \quad (3.11)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของแหล่งกำเนิดในสมการข้างต้นถูกหาค่าจากเคมีของพลาสมาโดยใช้สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา สมการนี้แสดงผลรวมของทั้งการเพิ่มและการสลายของความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมด M ปฏิกิริยา

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_{jk} N_n n_e \quad (3.12)$$

โดย x_j คือสัมประสิทธิ์โมลของสปีชีส์เป้าหมายสำหรับปฏิกิริยา j , k_j คือสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา j และ N_n คือความหนาแน่นจำนวนอะตอมทั้งหมดที่เป็นกลาง

พลังงานที่สูญเสียของอิเล็กตรอนได้รับจากการรวมพลังงานที่สูญเสียจากการชนของทุกปฏิกิริยา

$$R_\varepsilon = \sum_{j=1}^P x_{jk} N_n n_e \Delta \varepsilon_j \quad (3.13)$$

โดย $\Delta \varepsilon_j$ คือพลังงานการสูญเสียจากปฏิกิริยา j (eV) รายละเอียดเพิ่มเติมอยู่ในภาคผนวก.ฉ

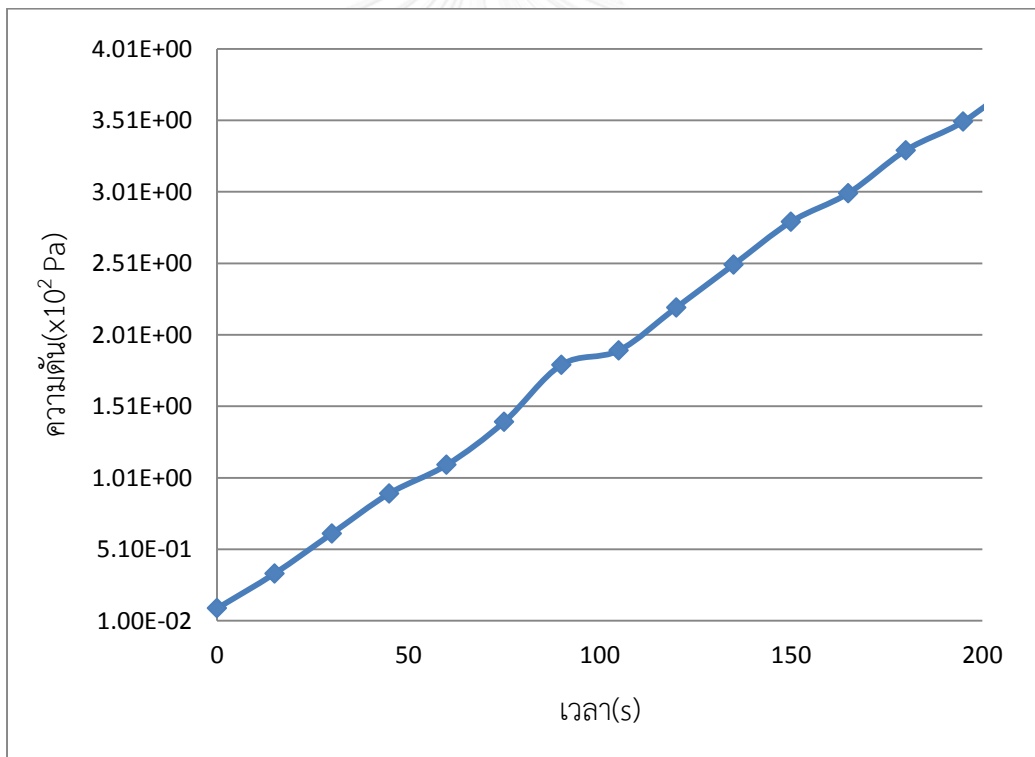
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

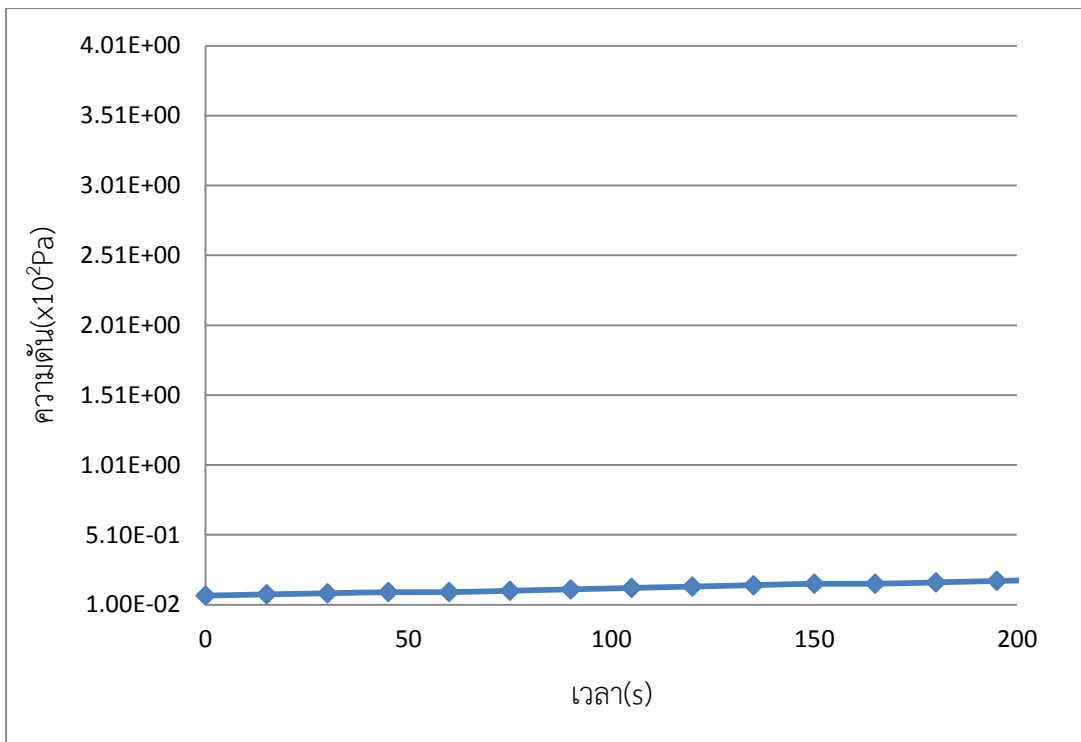
4.1 ผลของการทดลอง

4.1.1 ผลของการสร้างเครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่าย

ในงานวิจัยนี้เริ่มจากการทดสอบระบบจากอุปกรณ์บรรจุก๊าซในระบบที่เป็นสุญญากาศที่มีอยู่โดยเริ่มจากการวัดความดันกับเวลาเพื่อดูความเสถียรของอุปกรณ์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.1 ได้พบว่าอุปกรณ์บรรจุก๊าซในระบบที่เป็นสุญญากาศที่มีอยู่เหมาะสมแก่การใช้กับระบบที่มีการไหลของก๊าซ แต่ในการทดลองนี้ต้องการศึกษาพลาสมาที่ความดันต่างๆ โดยไม่มีการไหลของก๊าซจึงได้ออกแบบตัวเครื่องบรรจุก๊าซในระบบที่เป็นสุญญากาศที่เสถียรแสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งรายละเอียดการสร้างอยู่ในภาคผนวก.ก



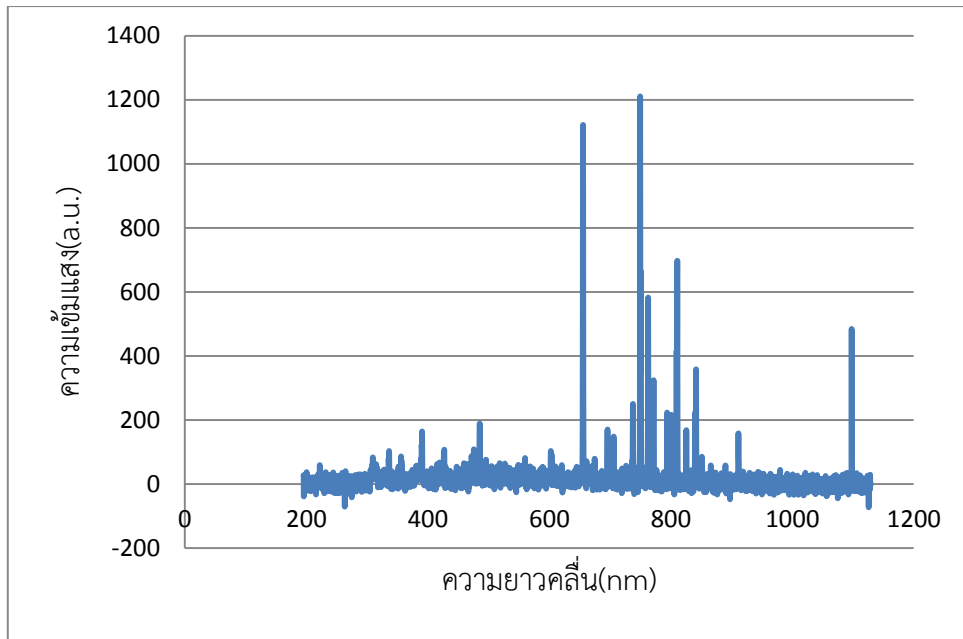
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเวลา



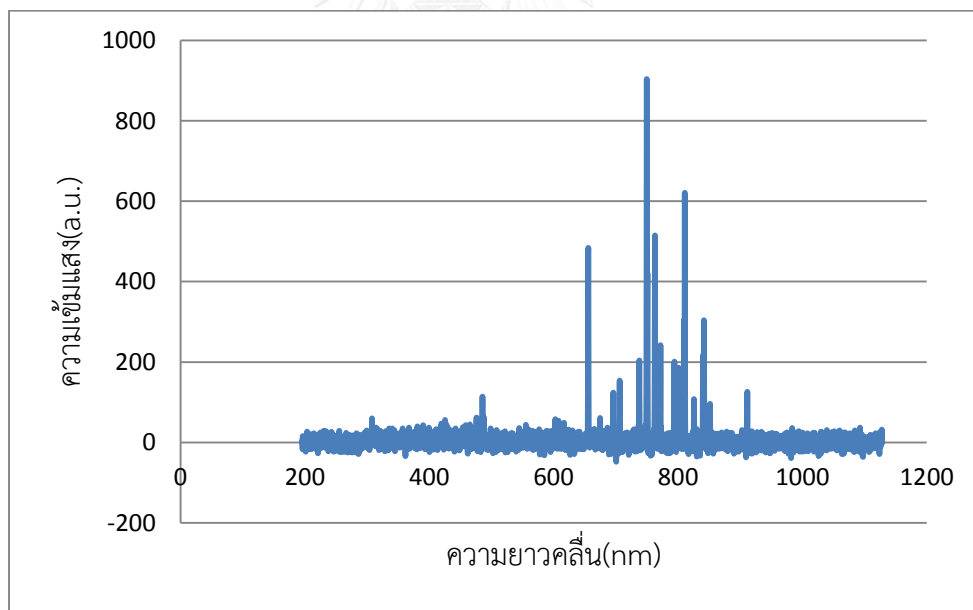
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเวลาจากเครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่ายที่สร้างขึ้น

จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์บรรจุก๊าซในระบบที่เป็นสุญญากาศที่ปรับปรุงสามารถลดอัตราการรั่ว เราสามารถพิจารณาในระบบในสถานะที่เสมือนก๊าซไม่รั่วเมื่อพิจารณาในช่วงเวลาสั้นๆ

จากการใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์วัดสเปกตรัมพลาสมาอาร์กอนดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่าลักษณะกราฟเปลี่ยนแปลงไปโดยสเปกตรัมบางสเปกตรัมหายไป

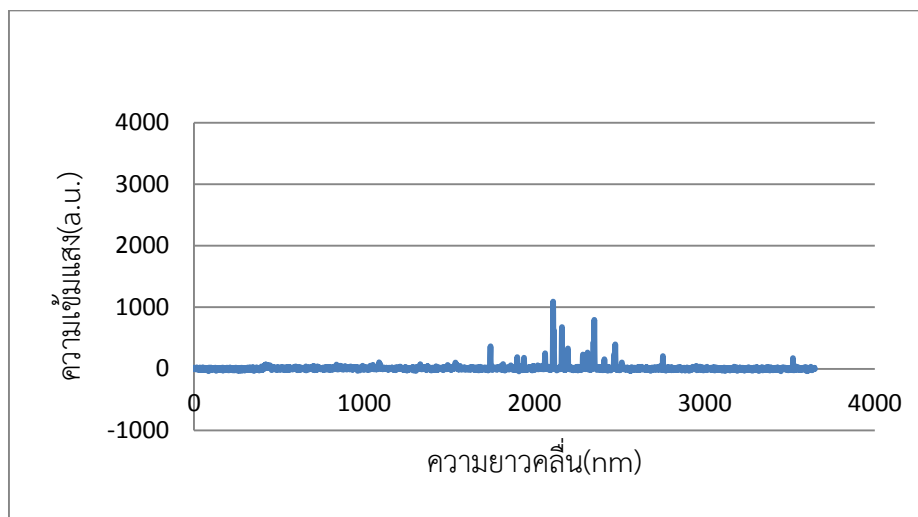


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของพลาสมากับความยาวคลื่นจากเครื่องเดิม

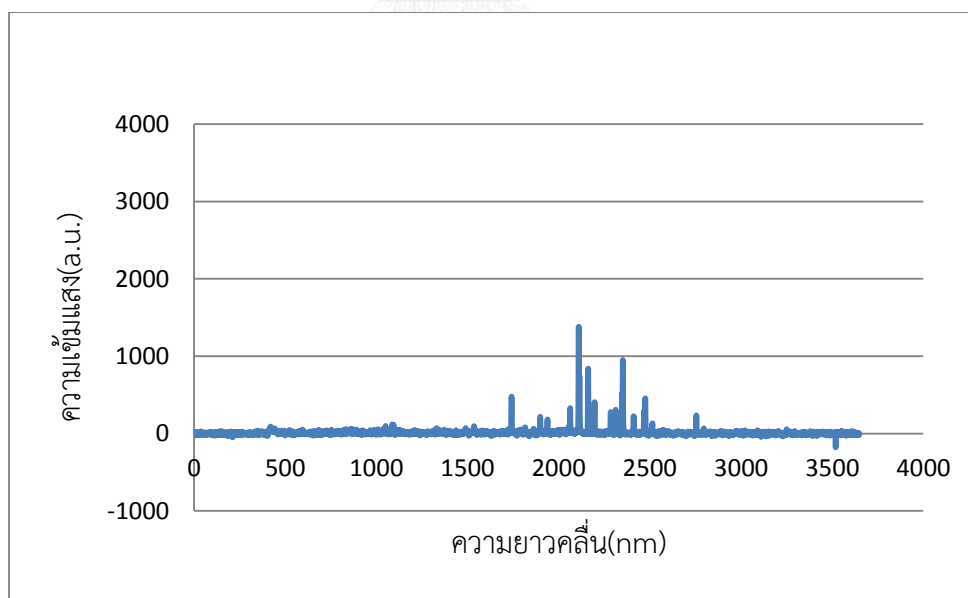


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของพลาสมากับความยาวคลื่นจากเครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่ายที่สร้างขึ้น

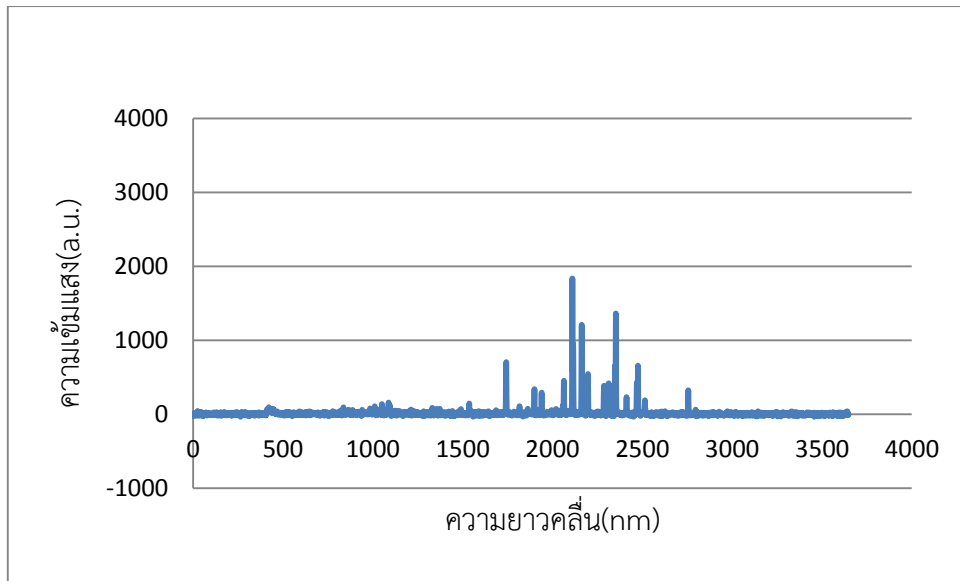
จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมที่หายไปเป็นสเปกตรัมของก๊าซอื่นที่ไม่ใช่ก๊าซอาร์กอน (H, C I, C II, O I, O II) ดังนั้นผลจากการปรับปรุงอุปกรณ์จึงทำให้การทดลองนี้สามารถศึกษาเฉพาะระบบที่มีแต่ก๊าซอาร์กอนได้โดยเมื่อเพิ่มความดันจะพบว่าสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.5 – 4.8



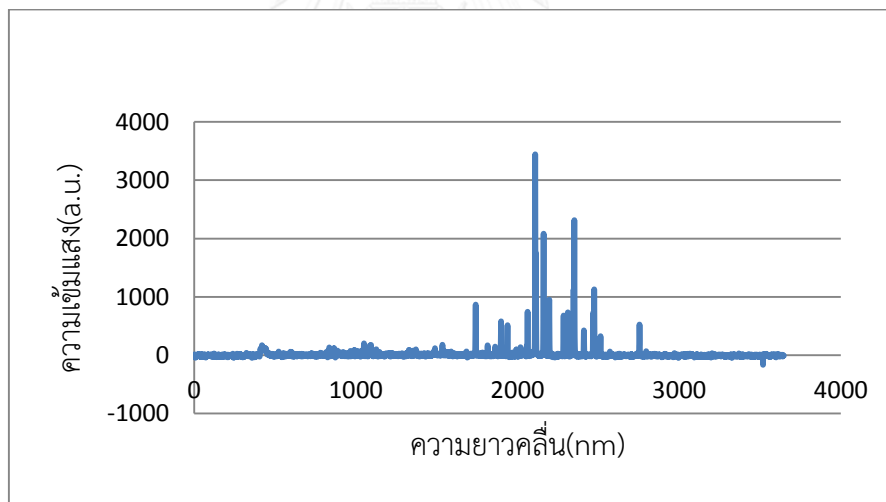
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของพลาสมากับความยาวคลื่นที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ความดัน 23 พาสคัล



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของพลาสมากับความยาวคลื่นที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ความดัน 25 พาสคัล



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของพลาสมากับความยาวคลื่นที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ความดัน 27 พาสคัล



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของพลาสมากับความยาวคลื่นที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ความดัน 29 พาสคัล

4.1.2 ผลของความดันที่ส่งผลต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน

สำหรับการหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนซึ่งหาโดยใช้สเปกโทรมิเตอร์ แสดงรายละเอียดวิธีการวัดในบทที่ 3 สำหรับสเปกตรัมที่เลือกในการหาอุณหภูมิอิเล็กตรอนและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนแสดงในตารางที่ 4.1 - 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าในการคำนวณอุณหภูมิอิเล็กตรอน

	ชนิด	λ (nm)	$A(s^{-1})$	E(eV)	g
1	ArI	840.31	2.23×10^7	13.3022	5
2	ArII	737.88	5.60×10^6	19.9675	4
3	ArI	750.32	4.45×10^7	13.4799	1
4	ArII	825.52	1.53×10^7	24.3121	6

ตารางที่ 4.2 ค่าในการคำนวณความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน

	ชนิด	λ (nm)	A (s^{-1})	E (eV)	g
1	ArI	800.63	4.90×10^6	13.17178	5
2	ArII	655.32	1.10×10^5	25.44082	4

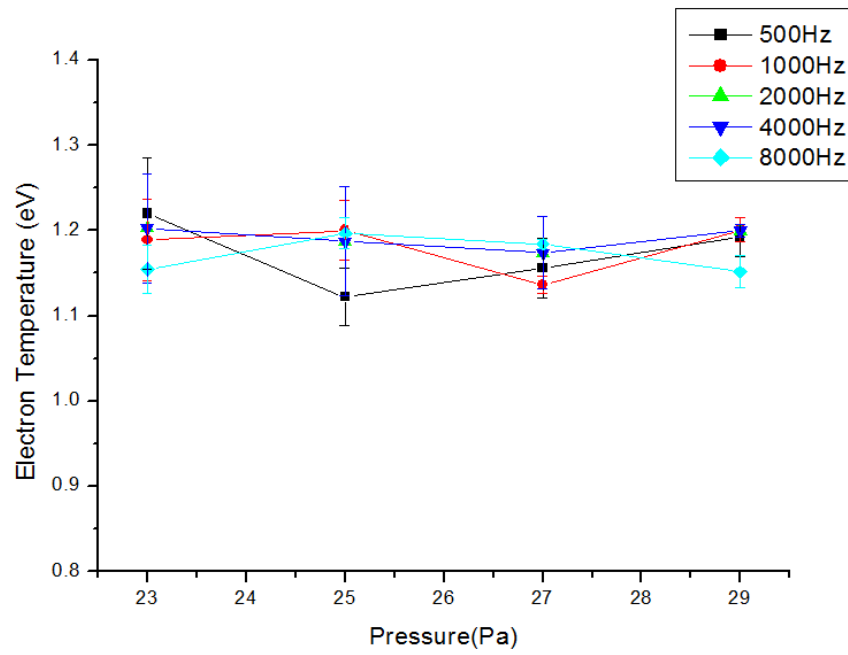
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองจากวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง

ความดัน (พาสคัล)	ความถี่(Hz)	อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (อิเล็กตรอนโวลต์)	ความหนาแน่นจำนวน อิเล็กตรอน (ตัวต่อลูกบาศก์เมตร)
23	500	1.22 ± 0.07	$3.25 \pm 3.56 \times 10^{16}$
	1000	1.19 ± 0.05	$1.22 \pm 0.96 \times 10^{16}$
	2000	1.20 ± 0.06	$2.52 \pm 2.75 \times 10^{16}$
	4000	1.21 ± 0.06	$3.62 \pm 4.39 \times 10^{16}$
	8000	1.15 ± 0.03	$0.50 \pm 0.27 \times 10^{16}$
25	500	1.12 ± 0.03	$0.19 \pm 0.15 \times 10^{16}$
	1000	1.20 ± 0.04	$1.07 \pm 0.66 \times 10^{16}$
	2000	1.19 ± 0.06	$1.65 \pm 1.38 \times 10^{16}$
	4000	1.15 ± 0.04	$0.58 \pm 0.65 \times 10^{16}$
	8000	1.20 ± 0.02	$0.88 \pm 0.29 \times 10^{16}$
27	500	1.16 ± 0.03	$0.37 \pm 0.25 \times 10^{16}$
	1000	1.14 ± 0.01	$2.07 \pm 0.53 \times 10^{15}$
	2000	1.17 ± 0.04	$0.49 \pm 0.26 \times 10^{16}$
	4000	1.15 ± 0.05	$0.49 \pm 0.46 \times 10^{16}$
	8000	1.18 ± 0.01	$0.82 \pm 0.07 \times 10^{16}$
29	500	1.19 ± 0.02	$1.15 \pm 0.59 \times 10^{16}$
	1000	1.20 ± 0.01	$1.36 \pm 0.32 \times 10^{16}$
	2000	1.20 ± 0.01	$0.98 \pm 0.16 \times 10^{16}$
	4000	1.16 ± 0.02	$0.41 \pm 0.15 \times 10^{16}$
	8000	1.15 ± 0.02	$0.38 \pm 0.17 \times 10^{16}$

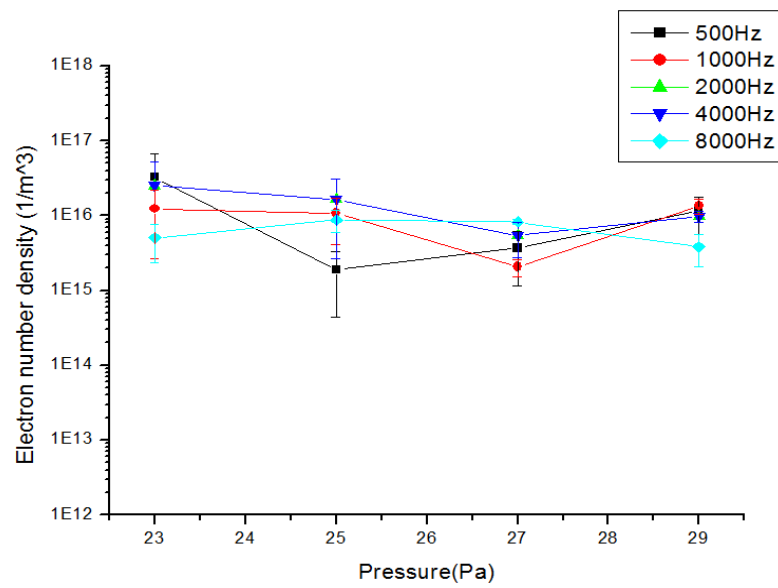
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองจากวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์

ความดัน (พาสคัล)	ความถี่(Hz)	อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (อิเล็กตรอนโวลต์)	ความหนาแน่นจำนวน อิเล็กตรอน (ตัวต่อลูกบาศก์เมตร)
23	500	1.12 ± 0.04	$2.31 \pm 1.99 \times 10^{15}$
	1000	1.01 ± 0.01	$0.52 \pm 0.12 \times 10^{15}$
	2000	1.13 ± 0.01	$1.92 \pm 0.38 \times 10^{15}$
	4000	1.10 ± 0.01	$1.16 \pm 0.30 \times 10^{15}$
	8000	1.10 ± 0.02	$1.06 \pm 0.35 \times 10^{15}$
25	500	1.12 ± 0.01	$1.29 \pm 0.01 \times 10^{15}$
	1000	1.11 ± 0.01	$1.20 \pm 0.03 \times 10^{15}$
	2000	1.08 ± 0.02	$0.65 \pm 0.02 \times 10^{15}$
	4000	1.12 ± 0.01	$1.45 \pm 0.44 \times 10^{15}$
	8000	1.12 ± 0.01	$1.53 \pm 0.40 \times 10^{15}$
27	500	1.06 ± 0.01	$0.33 \pm 0.13 \times 10^{15}$
	1000	1.06 ± 0.01	$0.33 \pm 0.10 \times 10^{15}$
	2000	1.10 ± 0.01	$0.75 \pm 0.14 \times 10^{15}$
	4000	1.05 ± 0.01	$0.24 \pm 0.09 \times 10^{15}$
	8000	1.18 ± 0.01	$7.28 \pm 0.39 \times 10^{15}$
29	500	1.11 ± 0.01	$1.48 \pm 0.25 \times 10^{15}$
	1000	1.11 ± 0.01	$0.85 \pm 0.15 \times 10^{15}$
	2000	1.12 ± 0.01	$1.96 \pm 0.28 \times 10^{15}$
	4000	1.14 ± 0.01	$2.23 \pm 0.18 \times 10^{15}$
	8000	1.16 ± 0.01	$3.73 \pm 0.29 \times 10^{15}$

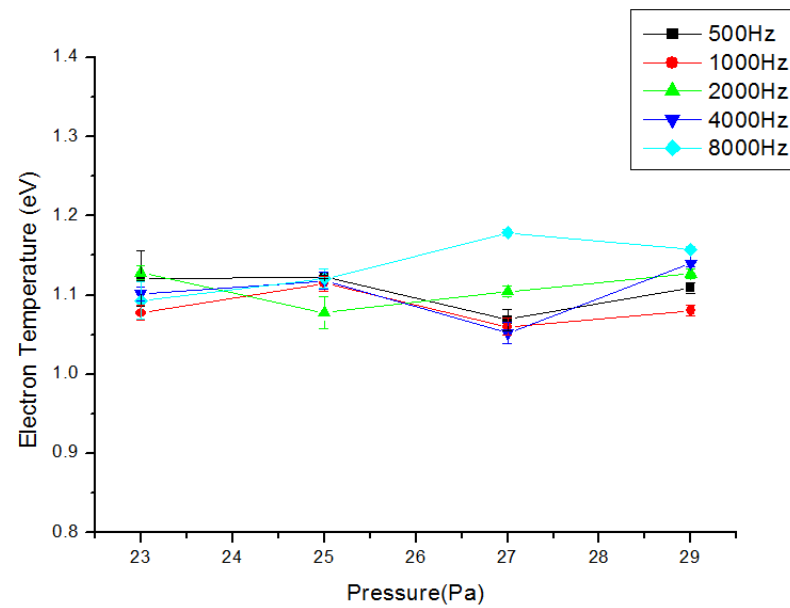
ผลจากการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความดันและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความดันแสดงดังรูปที่ 4.9 - 4.12



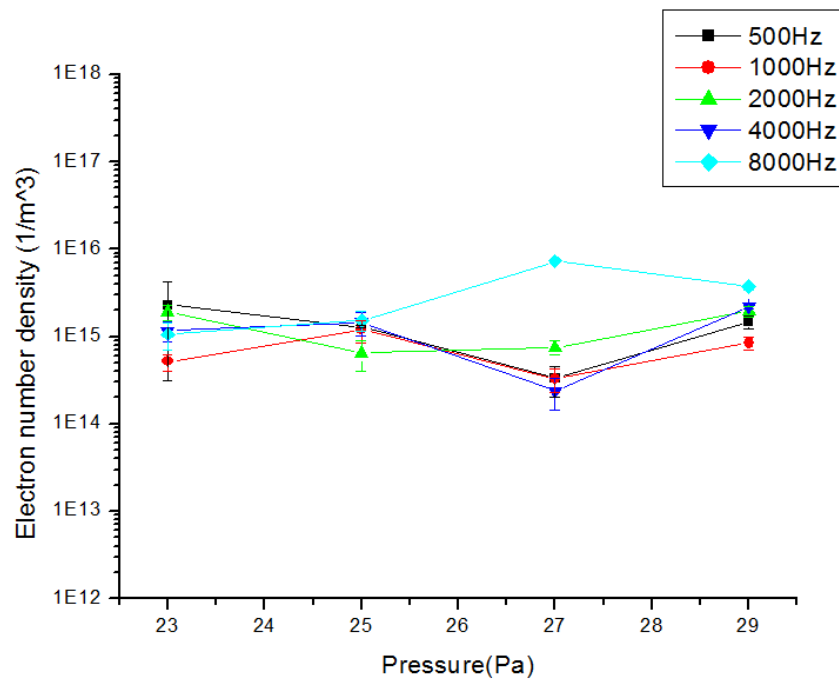
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความดัน โดยวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความดัน โดยวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความดัน โดยวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์

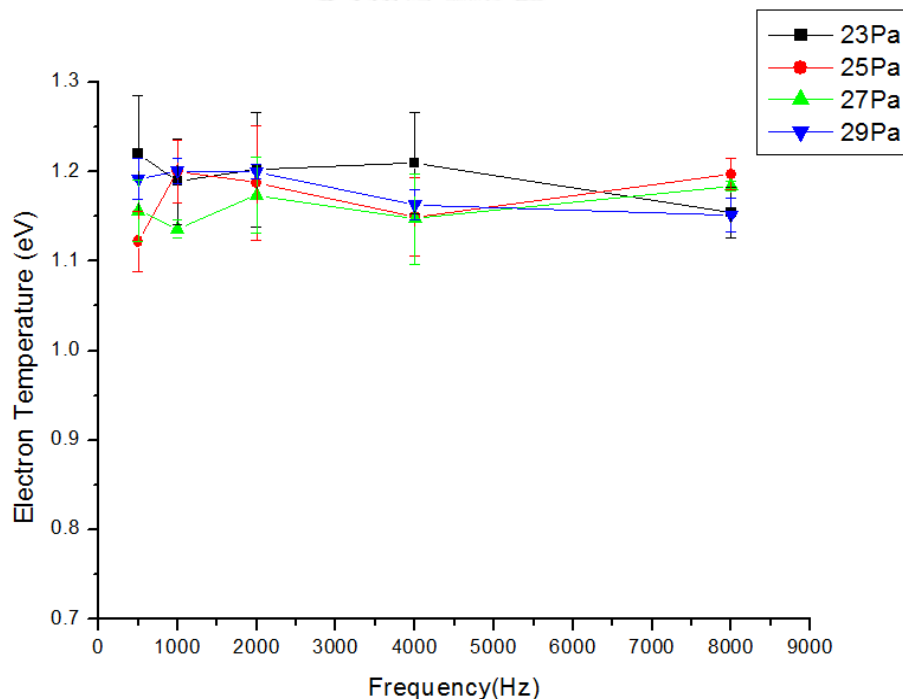


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความดัน โดยวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์

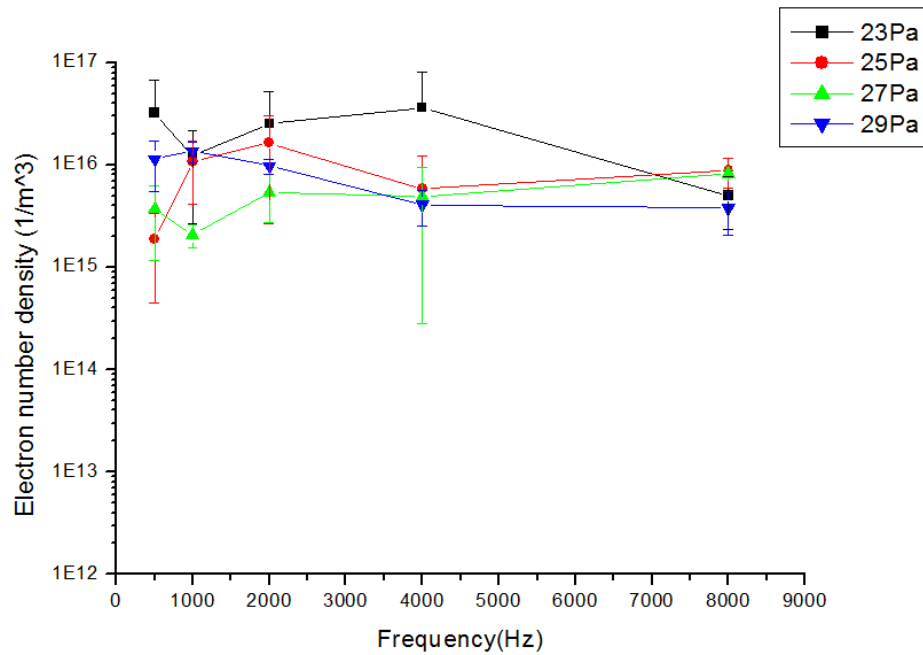
จากผลการทดลองที่ได้ดังแสดงจะเห็นได้ว่า ความดันเพิ่มขึ้นอุณหภูมิอิเล็กตรอนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยซึ่งเกิดจากเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้จำนวนอนุภาคในพลาสมาเพิ่มสูงขึ้นทำให้พลังงานเฉลี่ยต่อจำนวนอนุภาคอิเล็กตรอน เมื่อพิจารณาผลของความดันที่มีต่อความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเช่นกัน

4.1.3 ผลของความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีต่ออุณหภูมิอิเล็กตรอนและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน

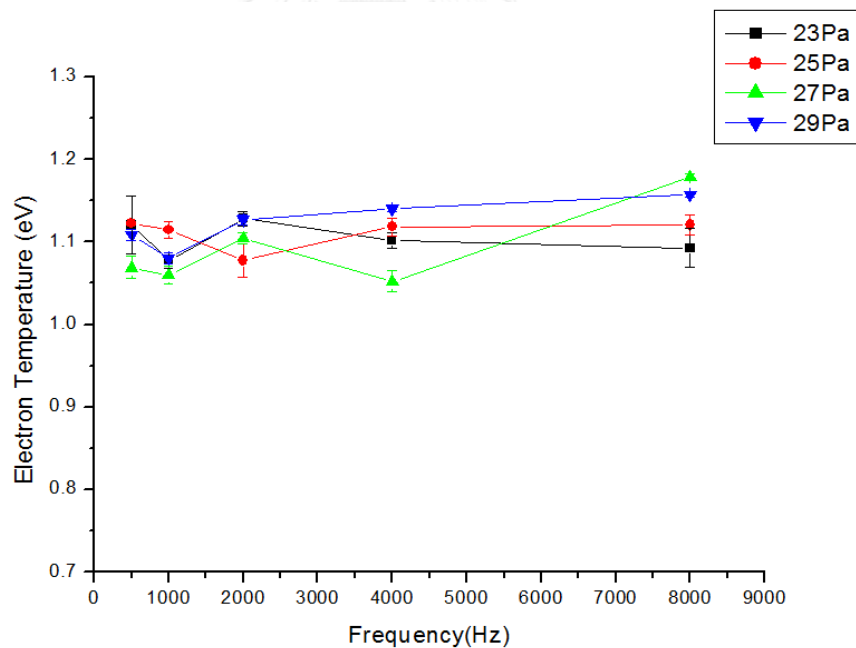
จากการวัดค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่ความดันต่างๆแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความถี่ แสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.15 จะเห็นได้ว่ามีเพียงที่ความถี่ 500 เฮิร์ตซ์ที่มีค่าน้อย โดยค่าที่ได้ที่ความถี่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกันที่ความดันต่างๆ ส่วนผลของความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความถี่แสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.16 ก็มีค่าใกล้เคียงกันทุกความดัน ทั้งจากวิธีอัตราส่วนความเข้มแสงและวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์



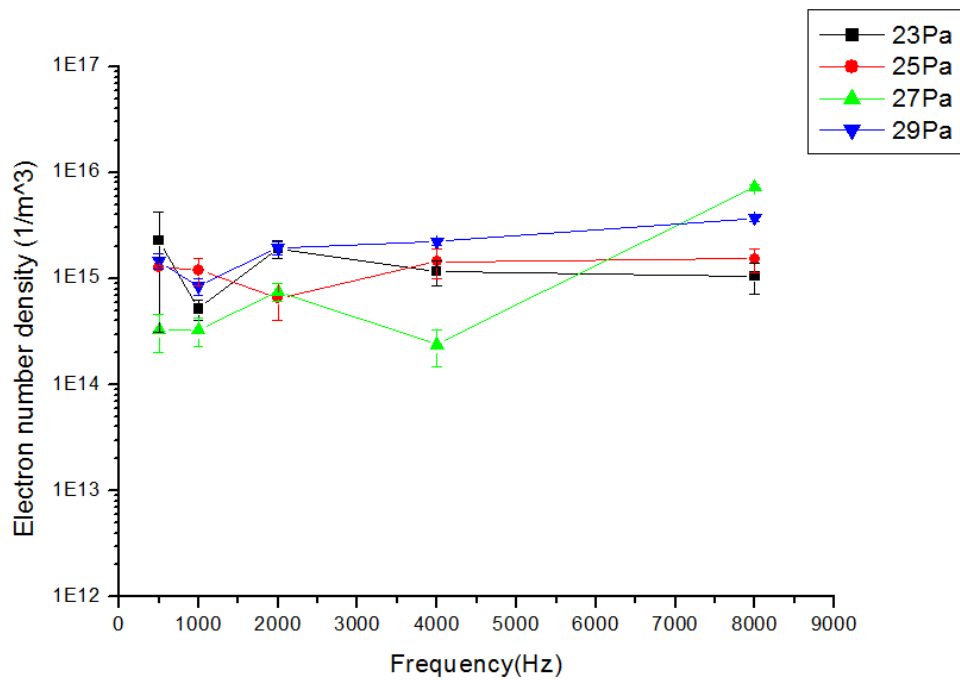
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความถี่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความถี่ของ แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยวิธีอัตราส่วนความเข้มแสง



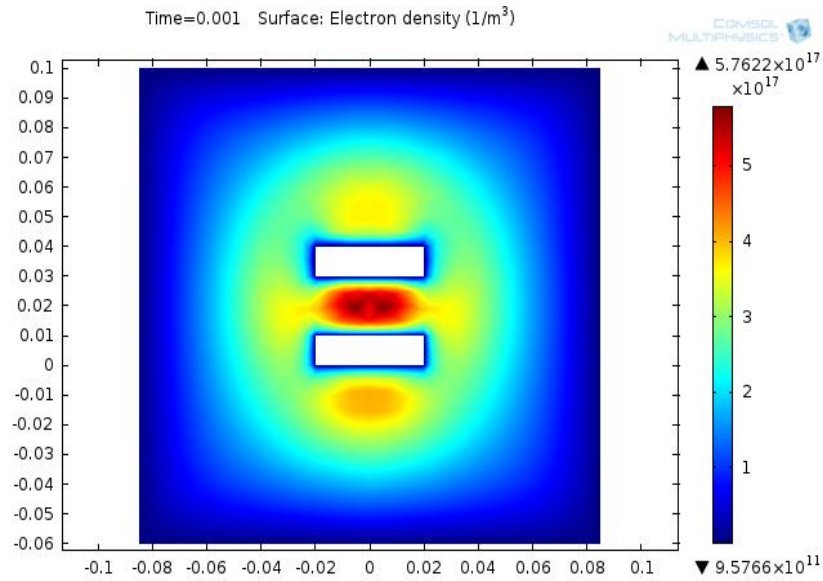
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความถี่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความถี่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์

4.2 ผลจากการจำลองการทดลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองระบบพลาสมาอย่างง่ายเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของพลาสมาอาร์กอนโดยแสดงรายละเอียดทฤษฎีในบทที่ 3 และขั้นตอนการใช้โปรแกรมในภาคผนวก.ช โดยผลจากการจำลองการทดลองไม่เพียงแต่หาค่าอนุหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน แต่ยังแสดงให้เห็นพฤติกรรมอื่นๆอีกด้วย ซึ่งค่าที่แสดงเป็นแบบเวลาตัดล แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ความดัน 29 พาสคัล และความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ ณ เวลา 0.01 วินาที โดยแกนตั้งทางด้านซ้ายคือความสูงของภาชนะสุญญากาศ แกนตั้งทางด้านขวาคือความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน แกนนอนคือความกว้างของภาชนะสุญญากาศดังรูปที่ 4.17

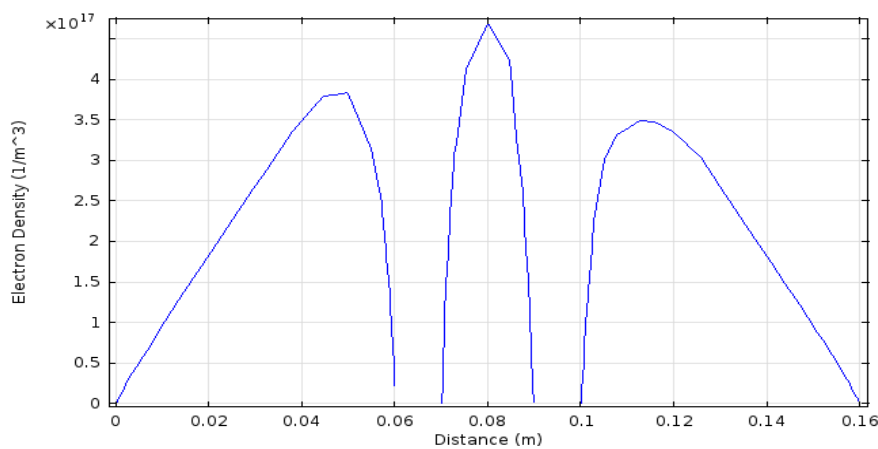


รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ และความดัน 29 พาสคัล

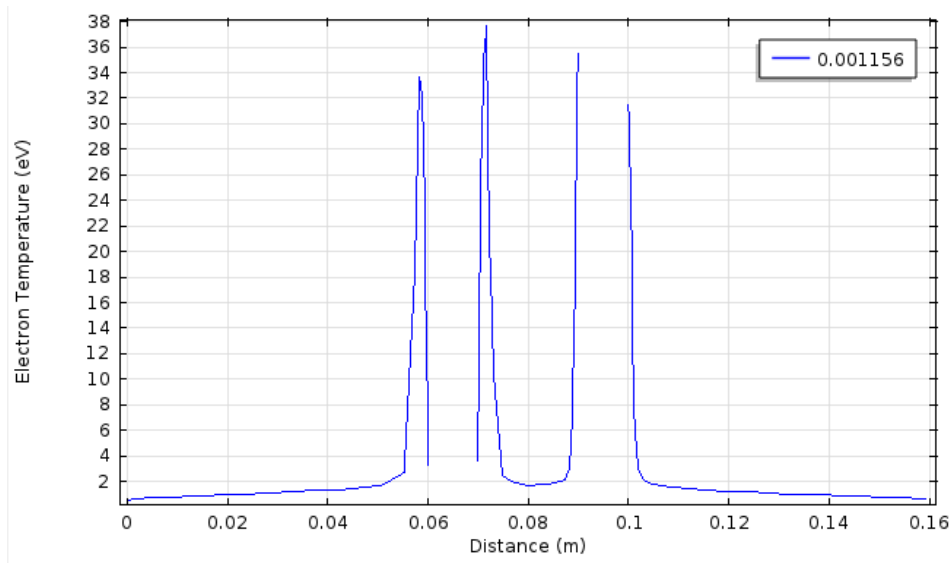
จะเห็นว่าความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนบริเวณตรงกลางมีความหนาแน่นสูงเพราะเป็นบริเวณที่เกิดพลาสมามีการแตกตัวของอะตอมอาร์กอนเป็นอิเล็กตรอนที่บริเวณนี้

4.2.1 ผลของความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนและอุณหภูมิของอิเล็กตรอน กับ ระยะทางของระบบระหว่างด้านบนและด้านล่าง

จากรูปที่ 4.17 หากพิจารณาระยะทางที่วัดจากด้านบนของภาชนะสุญญากาศสู่ด้านล่างของภาชนะสุญญากาศผ่านระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนาน ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน และอุณหภูมิของอิเล็กตรอนผลแสดงดังรูปที่ 4.18 - 4.19



รูปที่ 4.18 ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับระยะทางที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ และความดัน 29 พาสคัล

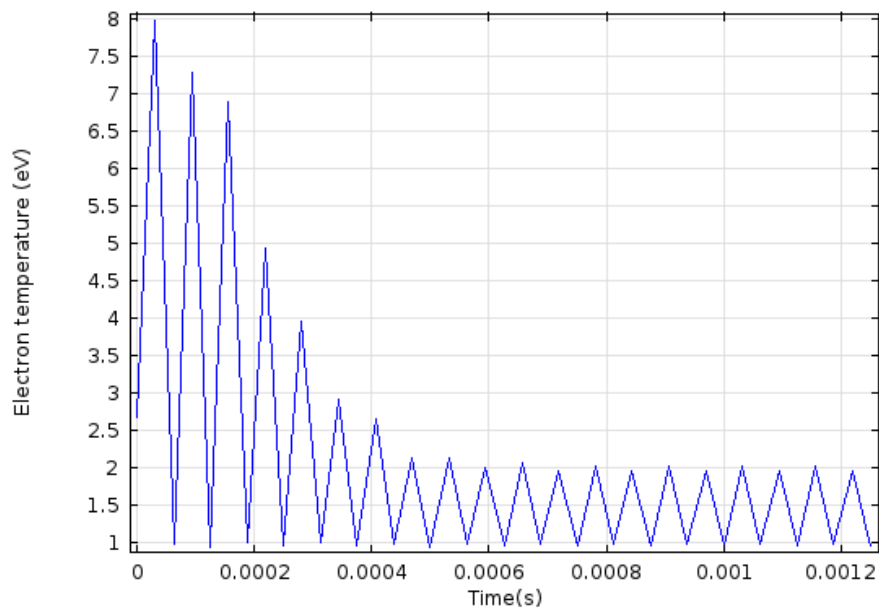


รูปที่ 4.19 อุณหภูมิอิเล็กตรอนกับระยะทางที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ และความดัน 29 พาสคัล

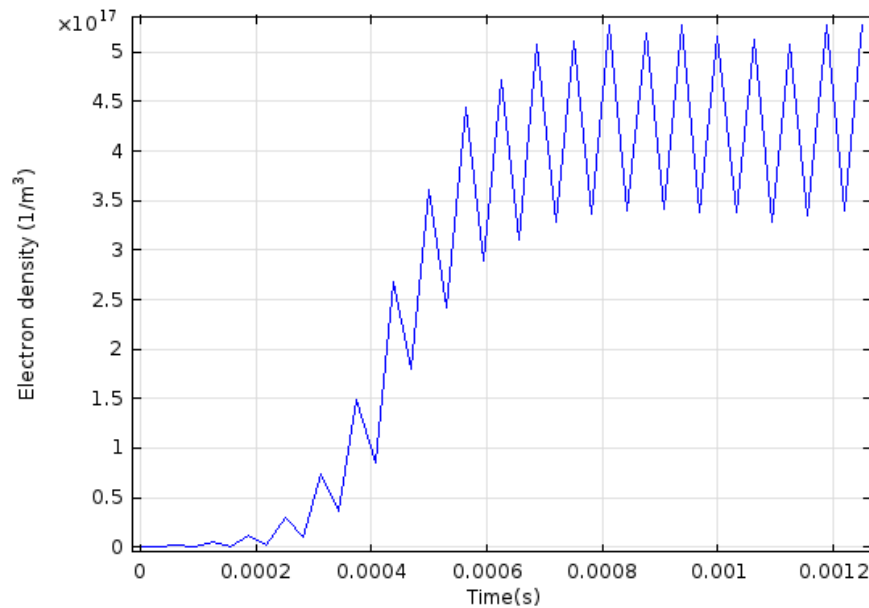
หากพิจารณาระยะทางระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนานจะเห็นว่าความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสูงที่บริเวณตรงกลางเพราะเป็นบริเวณที่เกิดพลาสมา ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการแตกตัวสูง ส่วนผลการจำลองของอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับระยะอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ตรงกลางมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับที่ขอบแผ่นโลหะคู่ขนานสาเหตุที่ขอบมีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนสูงเพราะเกิดการอาร์กที่ขอบของโลหะเนื่องจากที่ขอบเป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้าไม่เสถียรและสนามไฟฟ้ามีค่าสูง

4.2.2 ผลของเวลาที่มีผลต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน

ผลการหาความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับเวลา ที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์แสดงดังรูปที่ 4.20 - 4.21

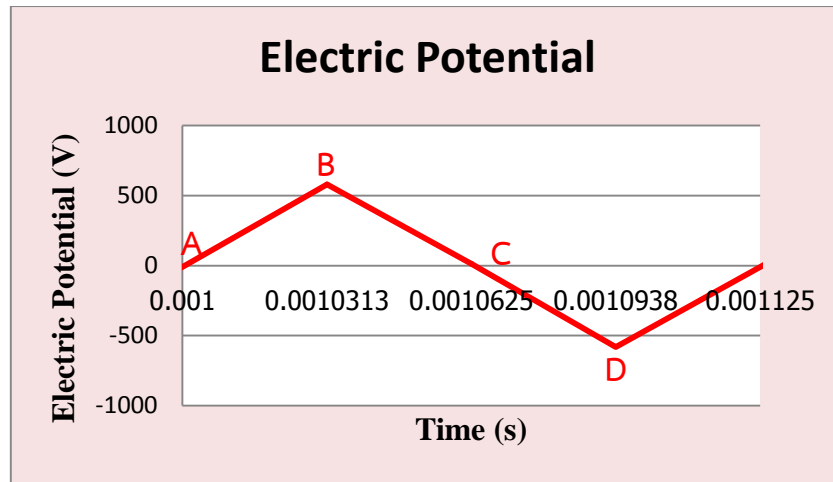


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับเวลาที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ และความดัน 29 พาสคัล

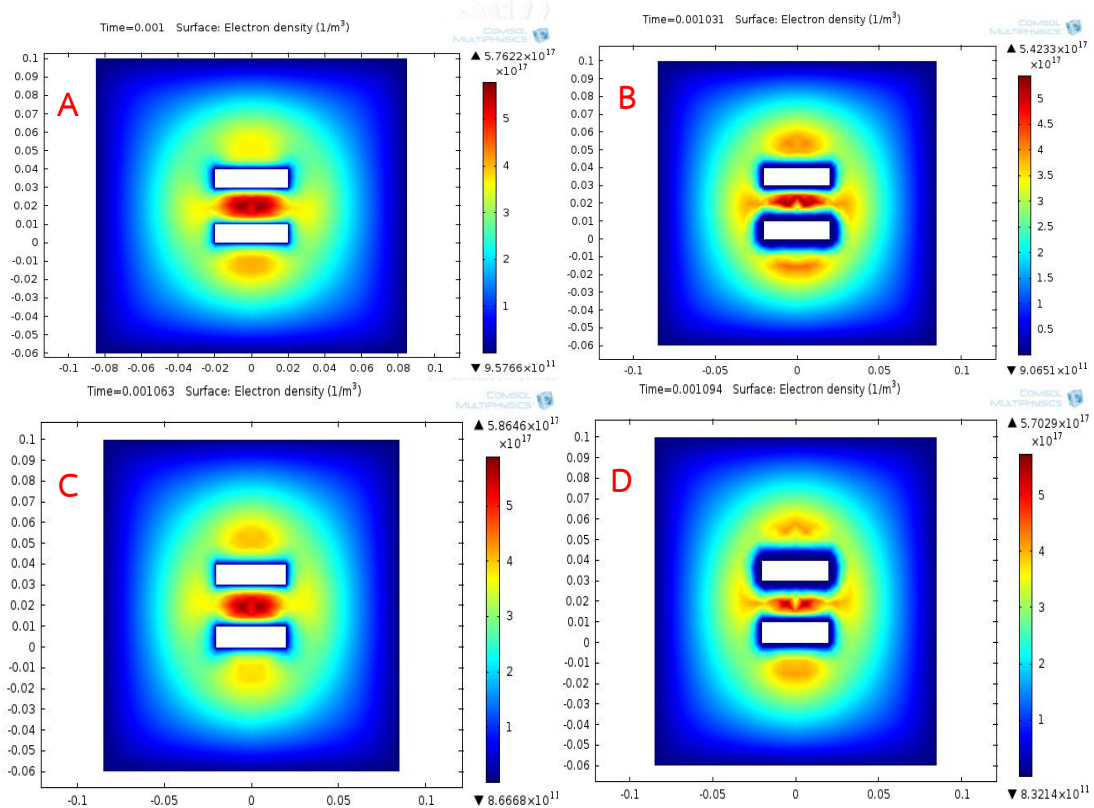


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับเวลาที่ความถี่ 8000 เฮิร์ตซ์ และความดัน 29 พาสคัล

จากกราฟจะเห็นได้ว่าลักษณะกราฟมีลักษณะเป็นคลื่น เนื่องจากผลของแหล่งกำเนิด กระแสสลับเป็นผลจากความถี่ซึ่งกราฟนี้เป็นข้อบ่งชี้ว่าความถี่ส่งผลต่อพฤติกรรมของพลาสมา



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลาในช่วงเวลาคาบ

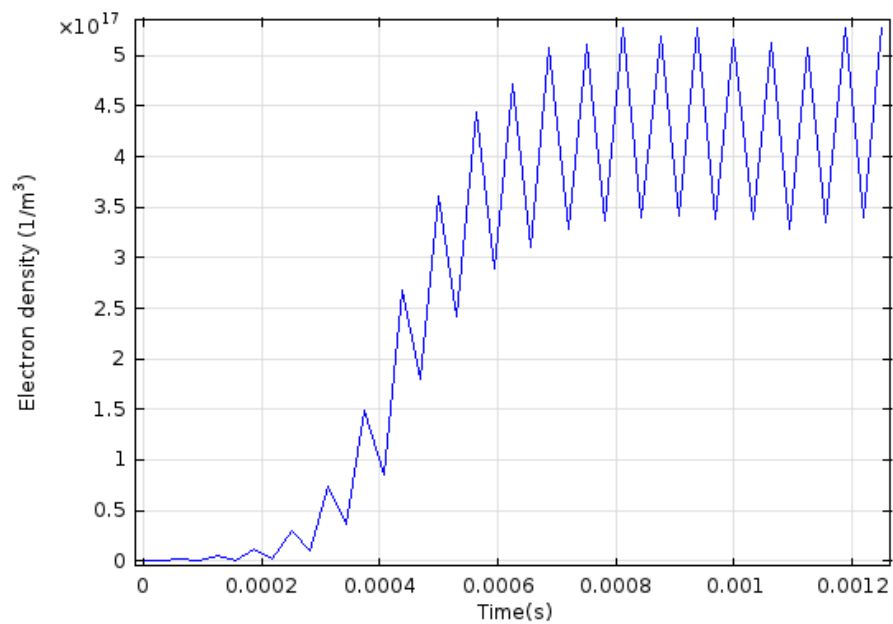


รูปที่ 4.23 ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนที่มีความถี่ 8000 เฮิรตซ์ และความดัน 29 พาสคัล

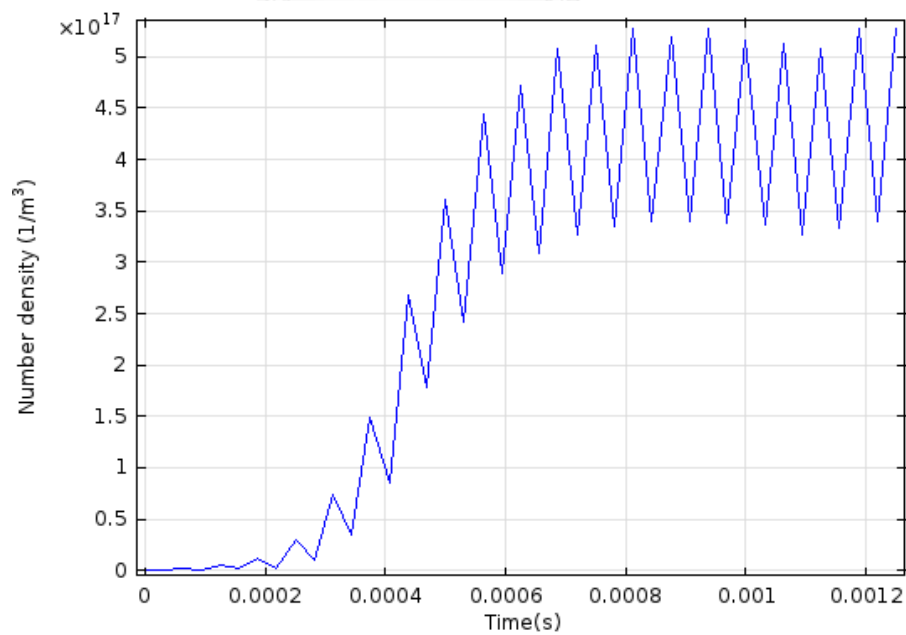
จากรูปที่ 4.22 - 4.23 แสดงให้เห็นถึงผลของศักย์ไฟฟ้า ณ เวลาต่างๆในหนึ่งคาบเวลาที่มีต่อความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน ซึ่งแสดงเป็นเหตุการณ์คือขณะเริ่มต้นคาบ (A) หนึ่งส่วนสี่คาบ (B) ครึ่งคาบ (C) และสามส่วนสี่คาบ (D) ผลที่เกิดขึ้นคือเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าเป็นบวก ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสูงที่ด้านแผ่นโลหะที่จ่ายความต่างศักย์ ต่อมาพิจารณาขณะที่ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าเป็นศูนย์พบว่าความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสูงที่บริเวณตรง

กลางระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง ถัดมาพิจารณาความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าเป็นลบ พบว่าความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสูงที่ด้านตรงข้ามแผ่นโลหะที่จ่ายความต่างศักย์

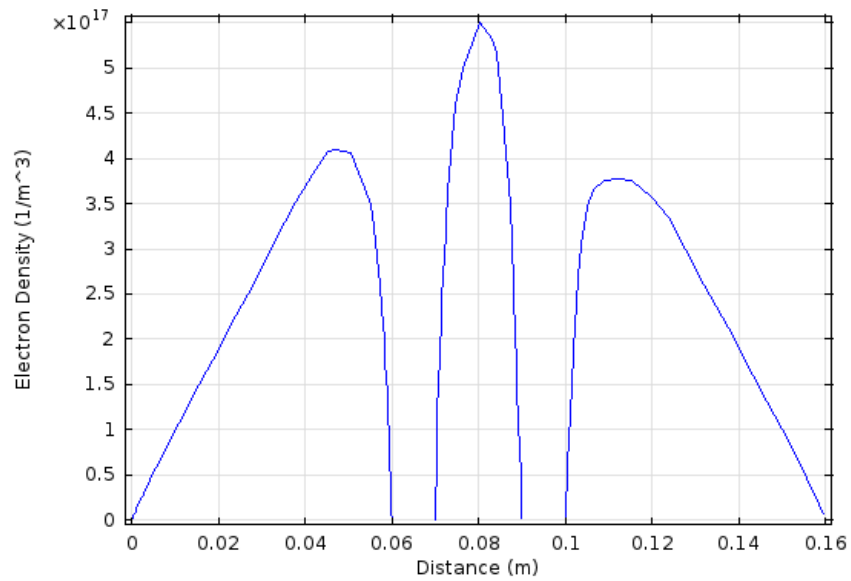
4.2.3 ผลของเวลาต่อความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนเทียบกับความหนาแน่นของ Ar^+



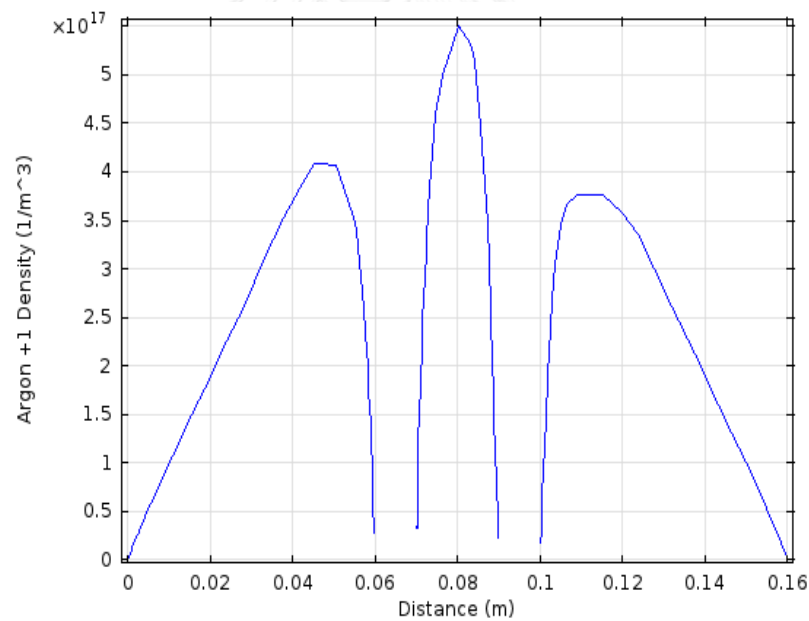
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับเวลา ที่ความถี่ 8000 เฮิรตซ์ และความดัน 29 พาสคัล



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ Ar^+ กับเวลา ที่ความถี่ 8000 เฮิรตซ์ และความดัน 29 พาสคัล



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับระยะ ที่ความถี่ 8000 เฮิรตซ์และความดัน 29 พาสคัล



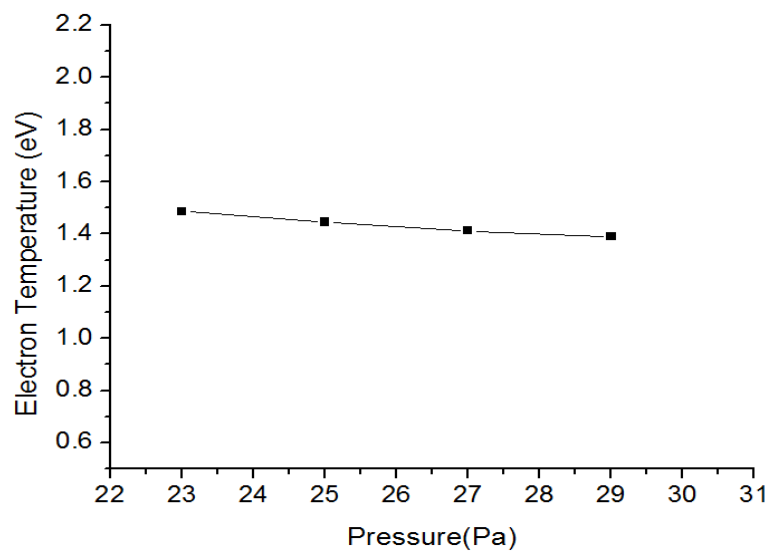
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ Ar^+ กับระยะ ที่ความถี่ 8000 เฮิรตซ์ และความดัน 29 พาสคัล

จากรูปที่ 4.24 - 4.27 กราฟระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของ Ar^+ กับเวลามีลักษณะเหมือนกันเพราะเป็นผลมาจากสมการการแตกตัวตามกฎการอนุรักษ์ความหนาแน่นประจุ $Ar \rightleftharpoons Ar^+ + e^-$

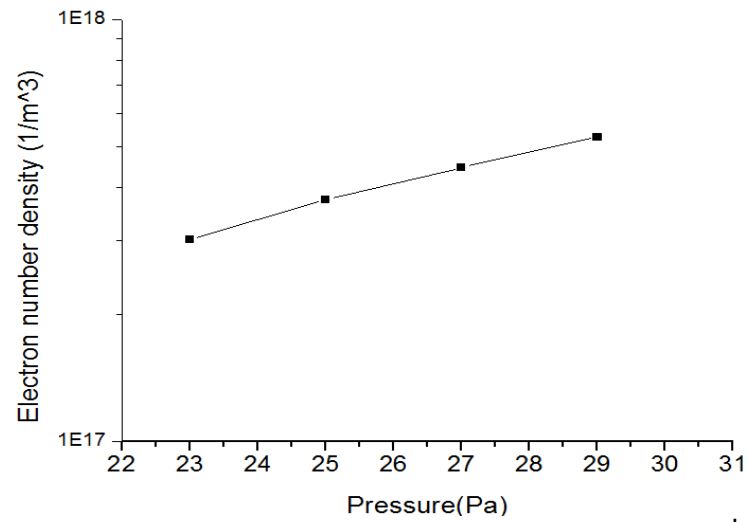
ตารางที่ 4.5 ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ความดัน (พาสคัล)	ความถี่(Hz)	อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (อิเล็กตรอนโวลต์)	ความหนาแน่นจำนวน อิเล็กตรอน (ตัวต่อลูกบาศก์เมตร)
23	500	1.47	0.81×10^{17}
	1000	1.55	0.92×10^{17}
	2000	1.60	1.22×10^{17}
	4000	1.59	1.79×10^{17}
	8000	1.49	3.01×10^{17}
25	500	1.40	0.95×10^{17}
	1000	1.49	1.07×10^{17}
	2000	1.74	1.47×10^{17}
	4000	1.51	2.13×10^{17}
	8000	1.44	3.75×10^{17}
27	500	1.27	1.11×10^{17}
	1000	1.44	1.49×10^{17}
	2000	1.48	1.64×10^{17}
	4000	1.40	2.42×10^{17}
	8000	1.41	4.46×10^{17}
29	500	1.30	1.31×10^{17}
	1000	1.40	1.41×10^{17}
	2000	1.45	1.93×10^{17}
	4000	1.42	2.00×10^{17}
	8000	1.39	5.27×10^{17}

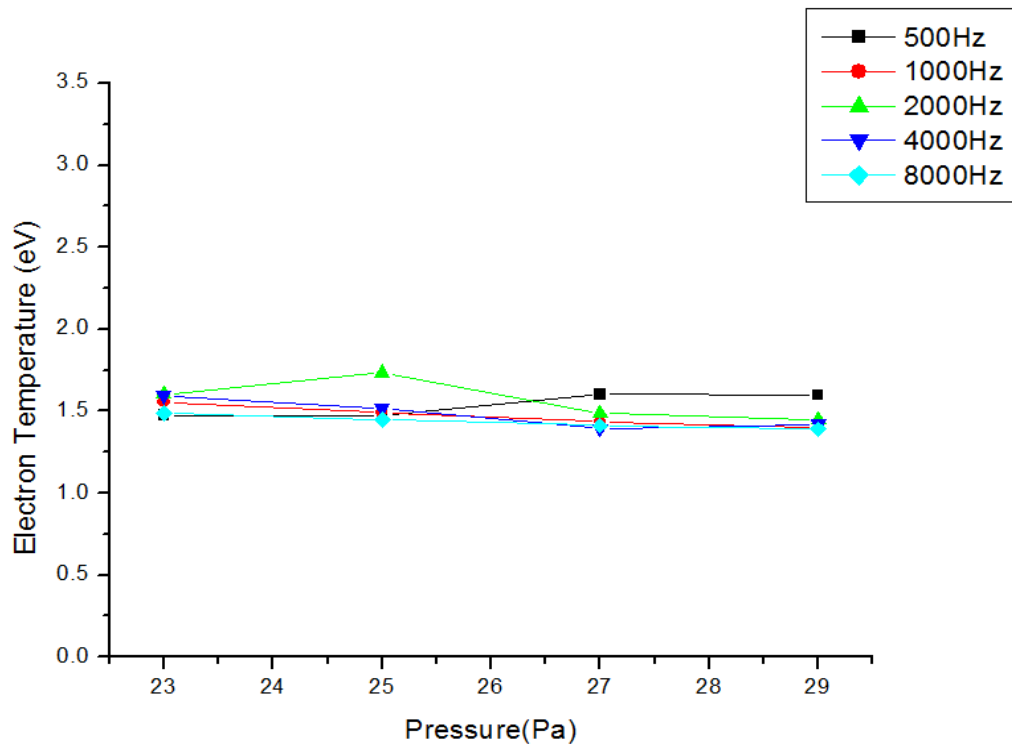
4.2.4 ผลของความดันที่มีต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน ผลการจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.28 - 4.31 จะเห็นได้ว่า ความดันเพิ่มขึ้นอุณหภูมิอิเล็กตรอนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยซึ่งเกิดจากเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้จำนวนอนุภาคในพลาสมาเพิ่มสูงขึ้นทำให้พลังงานเฉลี่ยต่อจำนวนอนุภาคมีค่าลดลง และอีกเหตุผลคือการชนแบบไม่ยืดหยุ่นส่งผลให้มีการสูญเสียพลังงานจนซึ่งพลังงานเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของพลังงานแสงดังรูปที่ 4.3 - 4.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อความดันเพิ่มความเข้มแสงก็จะเพิ่ม เมื่อพิจารณาผลของความดันที่มีต่อความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเพราะความดันเพิ่มขึ้นทำให้จำนวนอนุภาคเพิ่มขึ้นยอมทำให้โอกาสการชนกันของอนุภาคเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้การแตกตัวมีสูง ผลที่ได้คือความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสูงขึ้น โดยความดันยังส่งผลต่อค่าความไม่แน่นอน โดยยิ่งความดันสูงค่าความไม่แน่นอนยังมีค่าน้อยลง



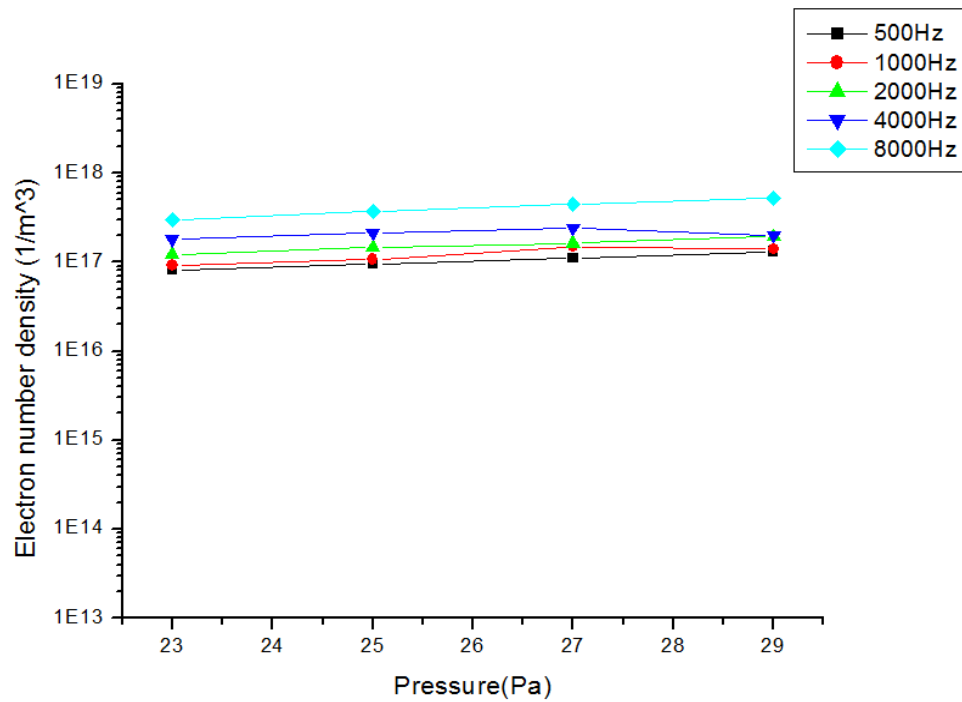
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความดันที่ใช้



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความดันที่ใช้

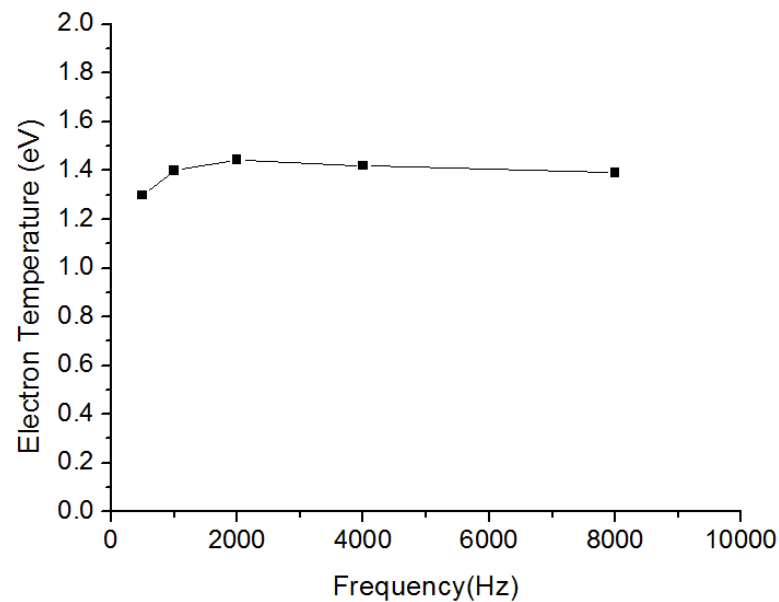


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความดันที่ใช้

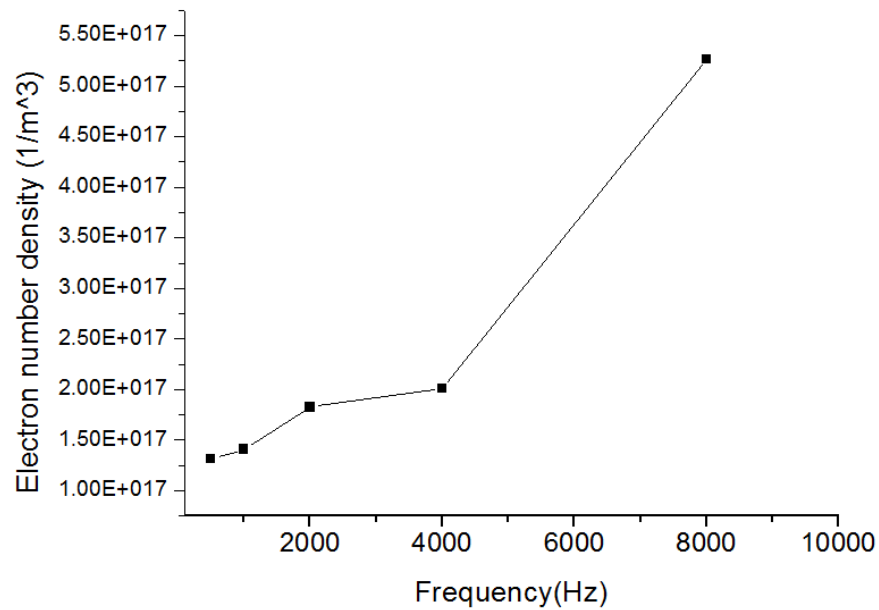


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนกับความดันที่ใช้

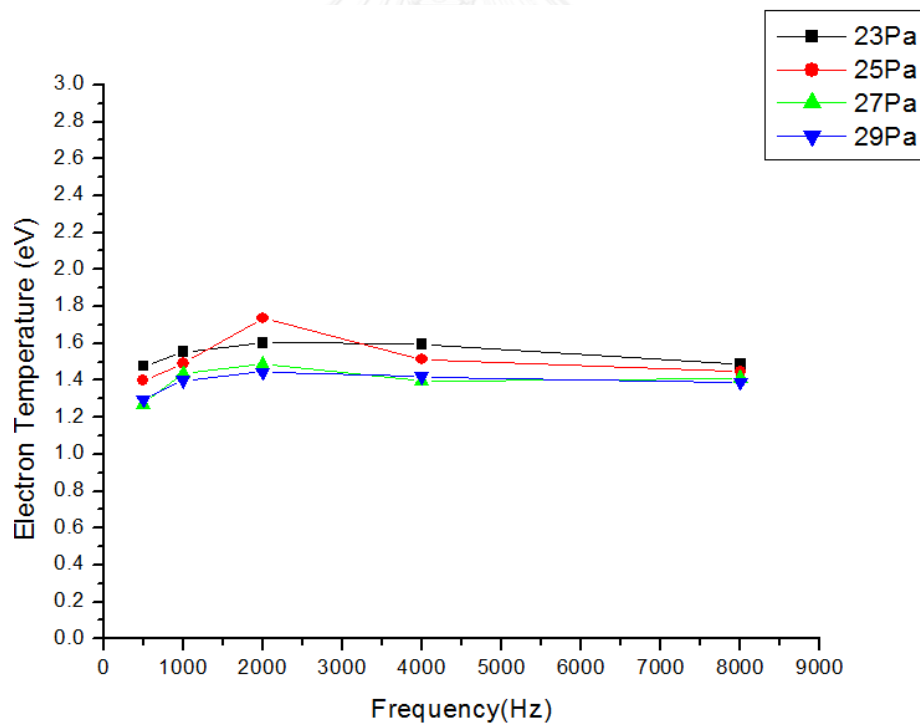
4.2.5 ผลของความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีต่ออุณหภูมิอิเล็กตรอนและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน



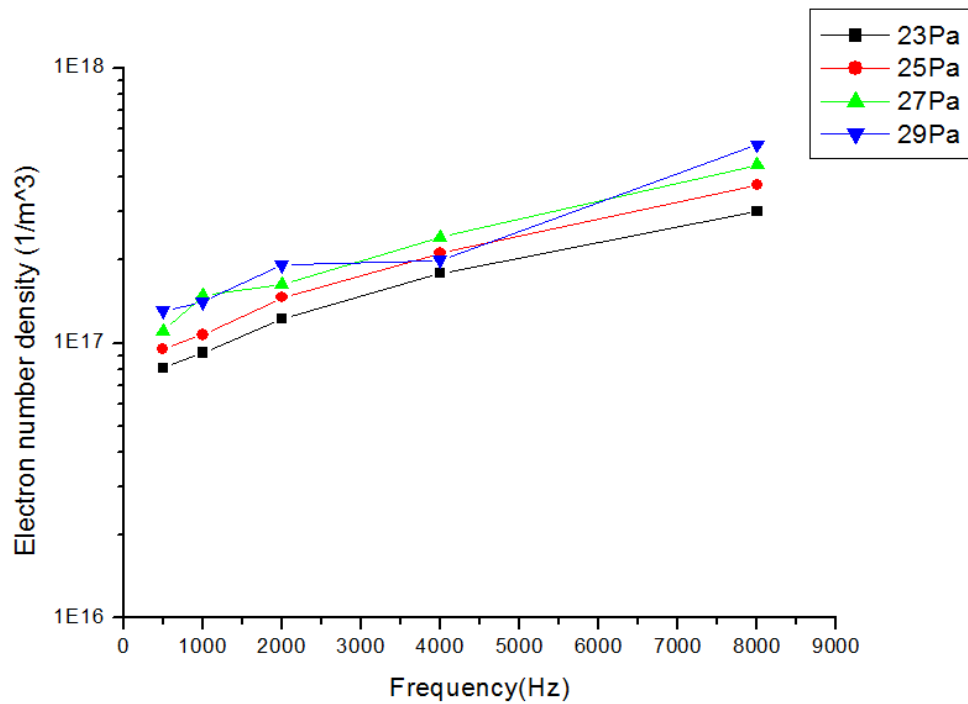
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความถี่ที่ความดัน 29 พาสคัล



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความถี่
ที่ความดัน 29 พาสคัล



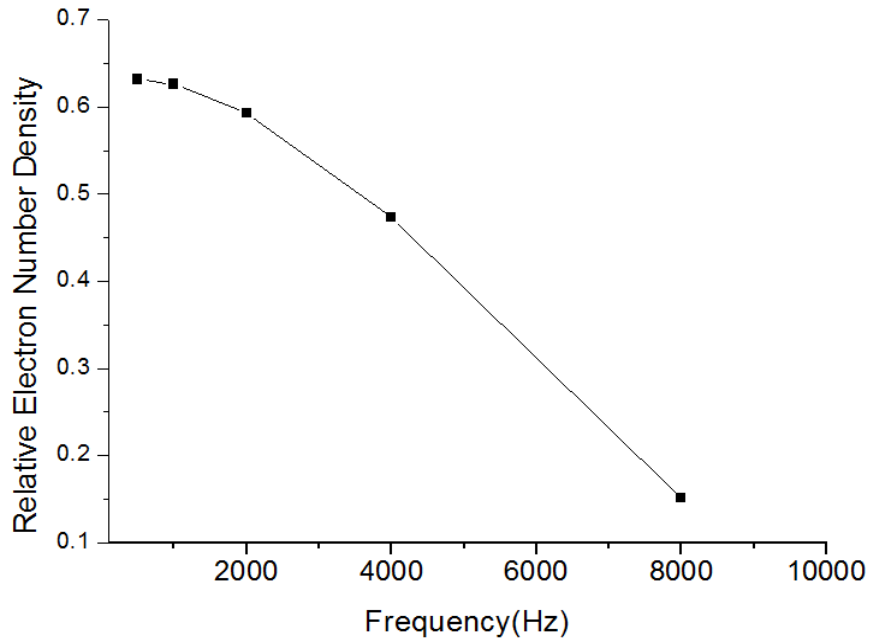
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความถี่ที่ใช้



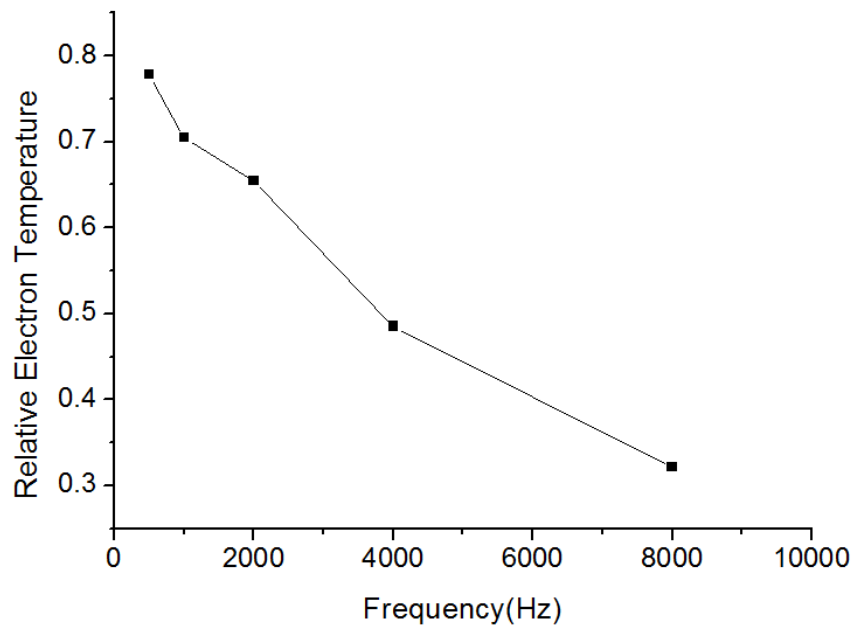
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความถี่ที่ใช้

จากผลการทดลองการเพิ่มขึ้นของความถี่ส่งผลต่ออุณหภูมิอิเล็กตรอนคือทำให้มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแต่หากพิจารณาที่ค่าความคลาดเคลื่อนจะเห็นได้ว่ายิ่งเพิ่มความถี่ของกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้นค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอิเล็กตรอนยิ่งมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มความถี่พบว่าความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

4.2.6 ผลของความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอนสัมพัทธ์และความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสัมพัทธ์ที่ความดัน 25 พาสคัล



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสัมพัทธ์กับความถี่

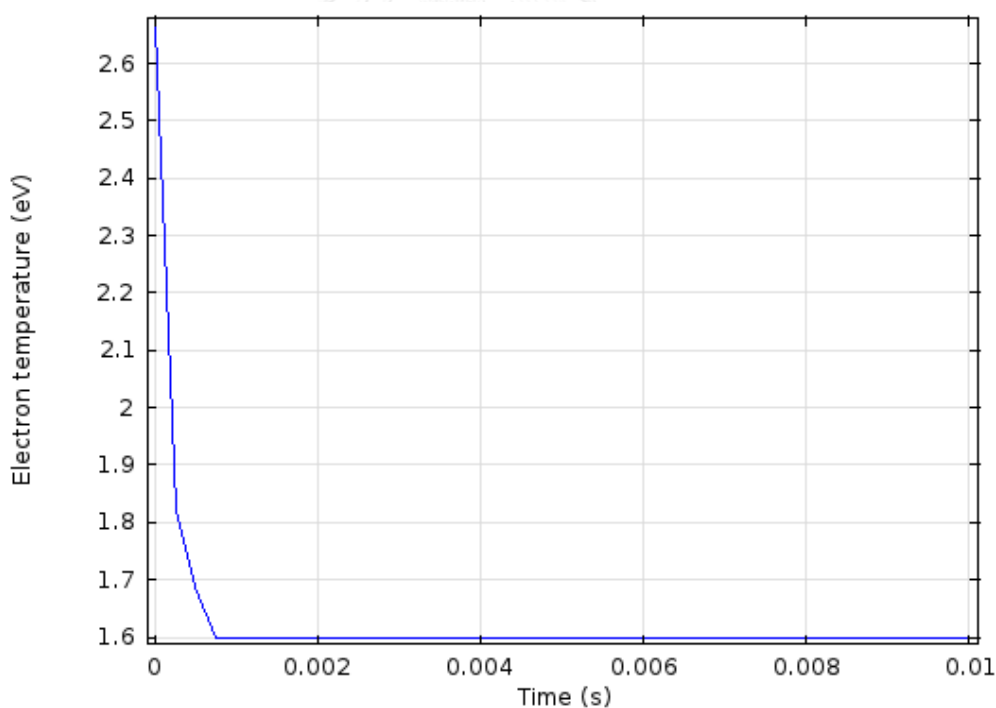


รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนสัมพัทธ์กับความถี่

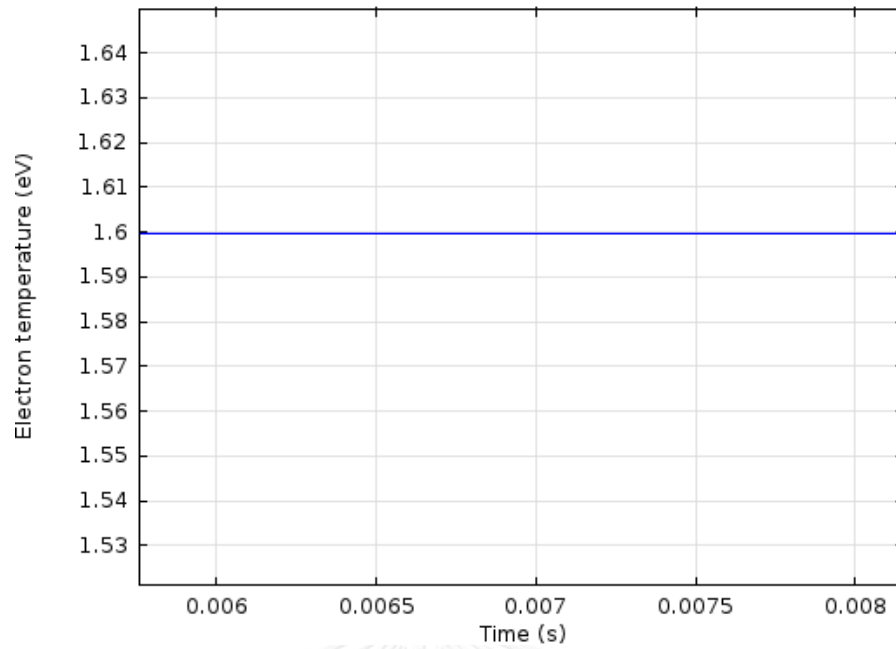
จากรูปที่ 4.36 - 4.37 ผลของการปรับความถี่ส่งผลต่อความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสัมพัทธ์อย่างชัดเจน ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสัมพัทธ์มีค่าลดลง ซึ่งความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสัมพัทธ์ในที่นี้หมายถึงค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนเทียบกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเฉลี่ย เมื่อความถี่เพิ่มแล้วความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสัมพัทธ์มีค่าลดลงเพราะความถี่ไปส่งผลต่อพฤติกรรมการแตกตัวของไอออนโดยยิ่งความถี่สูงหรือคาบมีค่าน้อยหมายความว่าเวลาที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ตามขั้วบวกและลบของระบบกระแสสลับยิ่งน้อยลงทำให้การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนมีน้อยลง ส่วนอุณหภูมิของอิเล็กตรอนสัมพัทธ์ในที่นี้คือค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอิเล็กตรอนเทียบกับอุณหภูมิของอิเล็กตรอนเฉลี่ย ผลของการปรับความถี่ส่งผลต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอนสัมพัทธ์คือมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกันซึ่งเป็นเพราะการที่การแตกตัวของอิเล็กตรอนอยู่ในบริเวณที่จำกัดก็ส่งผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ชนกันภายในบริเวณจำกัด

4.2.7 ผลการจำลองพลาสมาที่กำเนิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ที่ความดัน 29

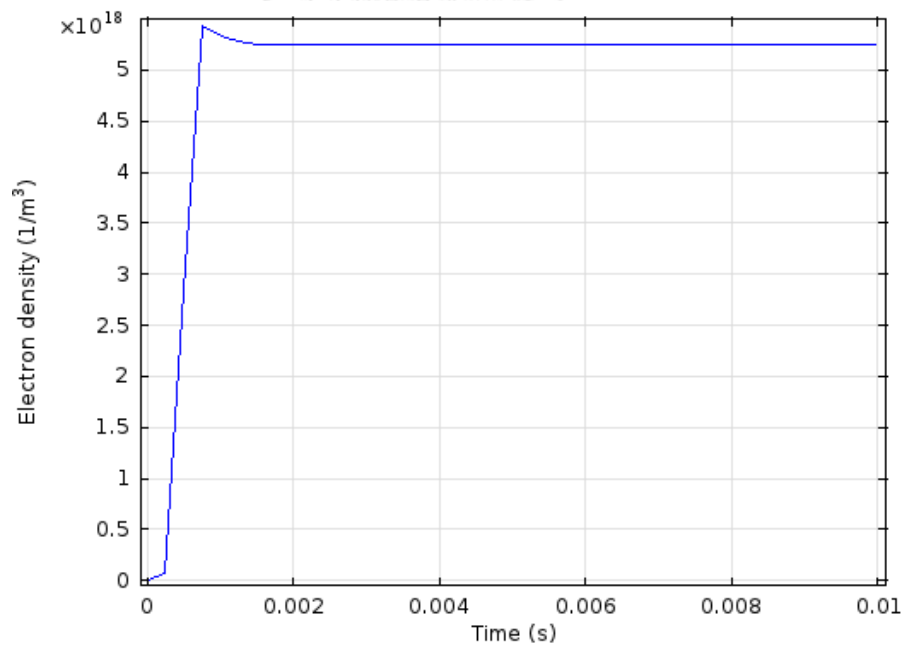
พาสคัล



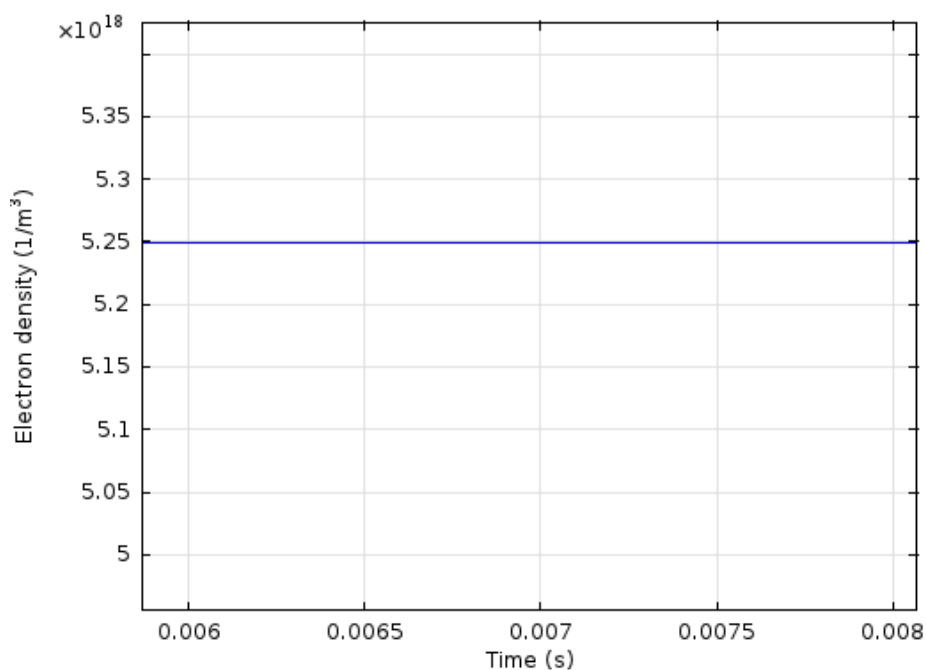
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับเวลาในช่วงเวลาระหว่าง 0.00 – 0.01 วินาที



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับเวลา ในช่วงเวลาระหว่าง 0.005 – 0.0085 วินาที



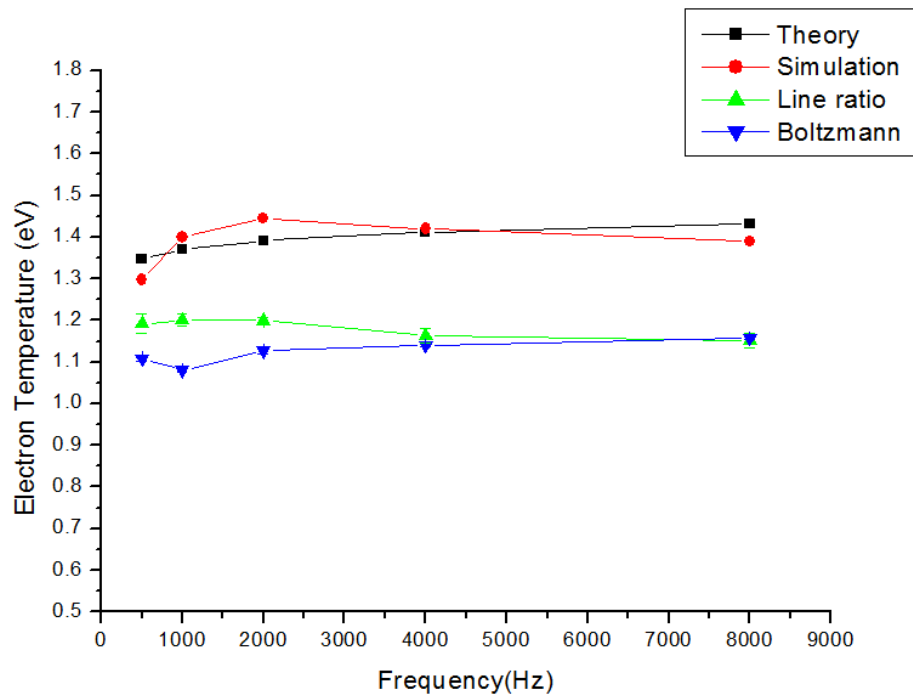
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับเวลาในช่วงเวลาระหว่าง 0.00 – 0.01 วินาที



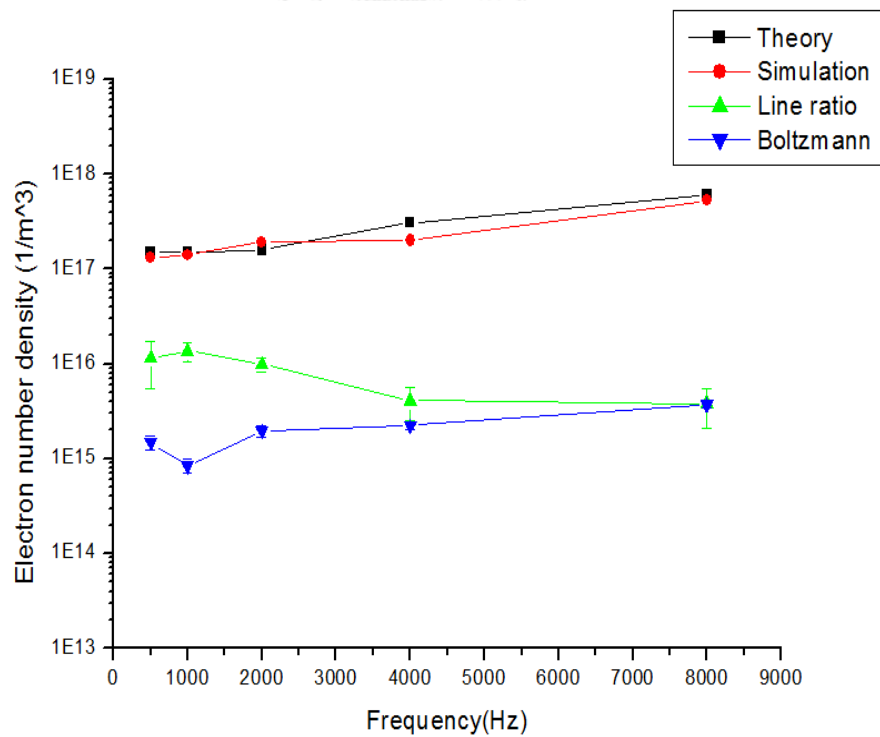
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับเวลา ในช่วงเวลาระหว่าง 0.005 – 0.0085 วินาที

จากรูปที่ 4.38 - 4.41 แสดงผลของอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนที่เวลาต่างๆ พบว่าหลังจากเกิดพลาสมาค่าของอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนมีความเสถียรไม่เกิดการแกว่งกลับไปกลับมาเหมือนกรณีพลาสมาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดกระแสสลับ จึงทำให้ทราบลักษณะเฉพาะของพลาสมาที่เกิดจากกระแสสลับแตกต่างกับกระแสตรง โดยทั้งสองมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไปสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์เทียบกับทฤษฎี



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความถี่ที่ใช้



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความถี่ที่ใช้

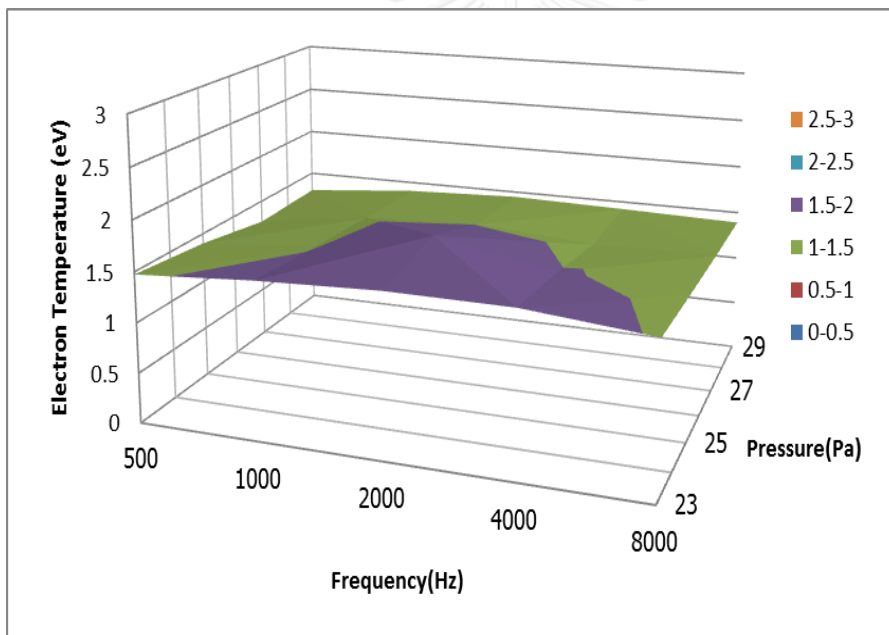
จากรูปที่ 4.42 - 4.43 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์เทียบกับทฤษฎี พบว่าทั้งผลจากการทดลองโดยวิธีอัตราส่วนความเข้มแสงวิธีการสร้างกราฟของโบลต์ซมันน์ และผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้ออกมามีแนวโน้มเช่นเดียวกับทฤษฎี แต่เมื่อพิจารณาผลของความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ แนวโน้มเช่นเดียวกับทางทฤษฎี แต่ผลจากการทดลองทั้งวิธีอัตราส่วนความเข้มแสงและวิธีการสร้างกราฟของโบลต์ซมันน์มีแนวโน้มต่างไปซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากการที่สมการของซาฮา-โบลต์ซมันน์เป็นการประมาณจากอุณหพลศาสตร์แบบเฉพาะที่ ซึ่งพลาสมาระบบนี้ พิจารณาก๊าซในระบบมีกระบวนการการแตกตัวหมดทุกตัว แต่ความเป็นจริงพลาสมามีการแตกตัวเพียงบางส่วน ส่งผลให้ค่าที่วัดไม่เป็นตามทฤษฎีและผลของการจำลองทางคอมพิวเตอร์



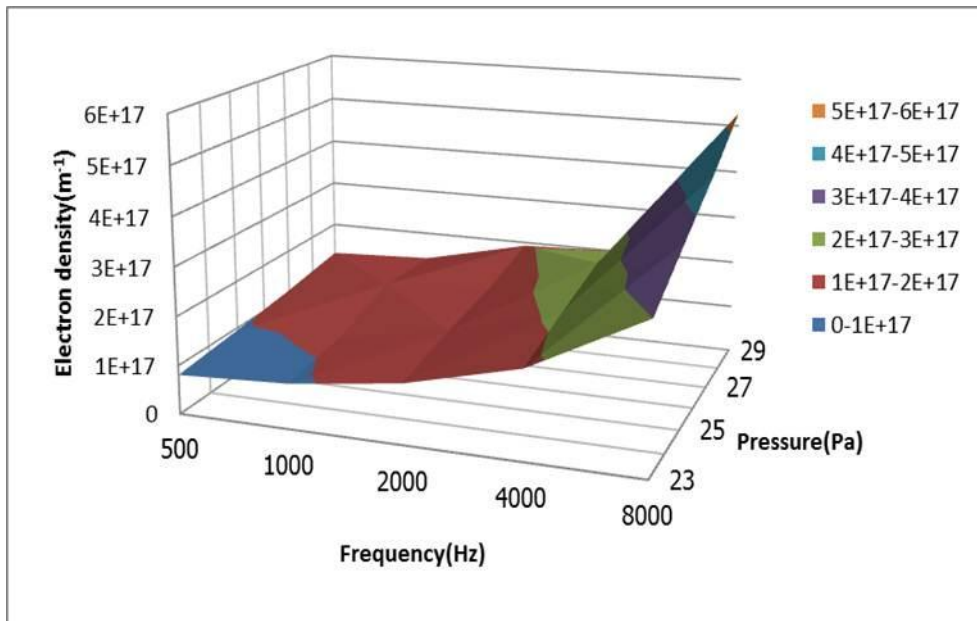
4.4 ผลจากการจำลองแสดงผลจากความถี่และความดันที่มีต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน

ผลของความดันที่มีต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอน คือ เมื่อความดันมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาผลของความถี่ที่มีต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอน คือ เมื่อความถี่ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหรือกล่าวไม่ได้ว่า ความถี่ไม่ส่งผลกับอุณหภูมิของอิเล็กตรอน แสดงดังรูปที่ 4.44

ผลของความดันที่มีต่อความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน คือ เมื่อความดันมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของความถี่ที่มีต่อความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน คือ เมื่อความถี่ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนมีเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความถี่และความดัน



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนกับความถี่และความดัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะของอาร์กอนโกลว์ดีสชาร์จพลาสมาที่ผลิตโดยใช้แหล่งไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ โดยเริ่มจากการสร้างอุปกรณ์เพื่อศึกษาพลาสมาอย่างง่ายเนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์แต่อุปกรณ์ที่มีอยู่ซึ่งใช้งานแบบการไหลของก๊าซ พบว่าพลาสมาที่เกิดขึ้นได้จากอาร์กอนปนกับก๊าซอื่นที่มีอยู่ในอากาศจึงได้สร้างอุปกรณ์เพื่อศึกษาพลาสมาอย่างง่ายขึ้นใหม่หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบพบว่ากำจัดคาร์บอนเปื้อนของก๊าซอื่นและสามารถควบคุมความดันให้เสถียรในช่วงเวลา 10 วินาที ต่อมาศึกษาลักษณะเฉพาะของพลาสมาจากตัวแปรสองตัวแปรคืออุณหภูมิของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนโดยการทดลองนี้ใช้วิธีการวัดทางแสงด้วยสเปกโตรมิเตอร์โดยใช้วิธีอัตราส่วนความเข้มแสงและวิธีการทางกราฟด้วยสมการโบลต์ซมันน์สำหรับหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอน และสมการซาฮา-โบลต์ซมันน์สำหรับหาความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนและได้จำลองการเกิดพลาสมาโดยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการศึกษาพฤติกรรมของพลาสมา

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าความดันส่งผลต่อลักษณะเฉพาะของพลาสมา หากเพิ่มความดันจะทำให้อุณหภูมิอิเล็กตรอนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่าการเพิ่มความดันส่งผลให้อุณหภูมิอิเล็กตรอนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน เหตุผลคือเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้จำนวนอนุภาคในพลาสมาเพิ่มสูงขึ้นทำให้พลังงานเฉลี่ยต่อจำนวนอนุภาคมีค่าลดลง และเหตุผลจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่นเมื่อมีการชนก็เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ พลังงานที่สูญเสียเปลี่ยนไปเป็นรูปของพลังงานแสง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าที่ความดันสูง จะมีความเข้มของแสงสูง แต่เมื่อพิจารณาผลของความดันที่มีต่อความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความดันทำให้ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งผลจากการทดลองขัดแย้งกับผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์คือความดันเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เพราะความดันที่เพิ่มขึ้นทำให้จำนวนอนุภาคเพิ่มมากขึ้น ย่อมทำให้โอกาสการชนกันของอนุภาคเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้การแตกตัวมีสูงขึ้น ทำให้ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสูงขึ้น

จากการทดลองวัดค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่ความดันต่างๆ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิเล็กตรอนกับความถี่ จะเห็นได้ว่ามีเพียงที่ความถี่ 500 เฮิร์ตซ์ที่มีค่าน้อยโดยค่าที่ได้ที่ความถี่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกันที่ความดันต่างๆ และผลของการจำลองทางคอมพิวเตอร์ก็มีแนวโน้มใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับทฤษฎี ส่วนผลของความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนที่มีต่อความถี่พบว่า เมื่อ

พิจารณาผลของความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ มีแนวโน้มเช่นเดียวกับทางทฤษฎี แต่ผลจากการทดลองมีแนวโน้มต่างไปซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากการที่สมการของซาฮา-โบลต์ซมันน์เป็นการประมาณจากอุณหพลศาสตร์แบบเฉพาะที่ซึ่งพลาสมาระบบนี้ พิจารณาสम्मติว่าก๊าซในระบบมีกระบวนการการแตกตัวหมดทุกตัว แต่ความเป็นจริงพลาสมามีการแตกตัวเพียงบางส่วน ส่งผลให้ค่าที่วัดไม่เป็นตามทฤษฎีและผลของการจำลองทางคอมพิวเตอร์ซึ่งจะเห็นว่าความถี่ส่งผลต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอนเพียงเล็กน้อย หากพิจารณาที่ความถี่สูงที่ 13.6 เมกะเฮิร์ตซ์ จากงานวิจัยก่อนหน้า (N. Balcon 2007, F. Sohbatzadeh 2012) ก็พบว่า อุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีค่าต่างจากเดิมไม่มาก โดยจะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ในอนาคตมีความเป็นไปได้ว่า สามารถใช้พลาสมาที่กำเนิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่ต่ำทดแทนพลาสมาที่มีความถี่สูงได้

จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่ายังสามารถอธิบายพฤติกรรมของพลาสมาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับและพลาสมาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงว่ามีพฤติกรรมที่แตกต่างกันโดยพลาสมาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับการแตกตัวของอิเล็กตรอน จะขึ้นกับความถี่ทำให้ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีลักษณะแบบการแกว่งคือแกว่งขึ้นแกว่งลงตามความถี่โดยสามารถเห็นได้ชัดเจนที่ความถี่ต่างๆหากพิจารณาพลาสมาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงพบว่าความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนมีแนวโน้มที่จะอยู่บริเวณเดิมไม่แกว่งไปแกว่งมา

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต

1. แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำสามารถปรับค่าได้ 500 - 8000 เฮิร์ตซ์ ซึ่งในอนาคตควรศึกษาพลาสมาที่ความถี่อื่นต่อไป
2. สามารถศึกษาลักษณะของพลาสมาอาร์กอนโดยศึกษาจากการปรับตัวแปรต่างๆ เช่น การปรับระยะของแผ่นตัวนำและการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นตัวนำ
3. สามารถนำไปประยุกต์กับอุตสาหกรรม เช่นการปรับสภาพพื้นผิว เช่นผ้านาโน ผ้าพันแผล เป็นต้น
4. ในงานวิจัยนี้มีการจำลองพลาสมาโดยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งควรเพิ่มแรมและสมบัติของเครื่องคอมพิวเตอร์ให้สูงขึ้นเพื่อผลการจำลอง จะแสดงผลที่ละเอียดมากยิ่งขึ้น
5. ควรเปลี่ยนสเปกโทรมิเตอร์ที่สามารถวัดสเปกตรัมได้ครอบคลุมเพิ่มขึ้นเพราะแสงที่ปล่อยออกมาจากพลาสมาอาจมีค่าที่ต่ำกว่าช่วงของสเปกโทรมิเตอร์มีใช้นี้

รายการอ้างอิง

B. Bora, H. B., M. Favre, E. Wyndham and H. Chuaqui (2012). "Diagnostic of capacitively coupled radio frequency plasma by homogeneous discharge model." *Physics Letters A* 376: 1356–1359.

D. L. Crintea, U. C., S. Iordanova, I. Koleva and D. Luggenhölscher (2009). "Plasma diagnostics by optical emission spectroscopy on argon and comparison with Thomson scattering." *J. Phys. D: Appl. Phys* 42: 11.

F. Sohbatzadeh, S. M. a. H. M. (2012). "Characterization of argon/air atmospheric pressure capacitively coupled radio frequency dielectric barrier discharge regarding parasitic capacitor at 13.56 MHz." *Journal of Theoretical and Applied Physics* 6: 32.

Francis, C. (1974). *Introduction to plasma physics*. New York, Plenum Press.

Lichtenberg, M. L. a. A. (1994). *Principles of plasma discharges and materials processing*, John Wiley and Sons.

Marcus, R. K. (2003). *Glow discharge plasmas in analytical spectroscopy*. New York, John Wiley & Sons.

Miyamoto, K. (2000). *Fundamentals of plasma physics and controlled fusion*. Tokyo, Iwanami Book Service Centre.

N. Balcon, A. A. a. R. B. (2007). "Pulsed RF discharges, glow and filamentary mode at atmospheric pressure in argon." *Plasma Sources Sci Technol* 16: 217.

Ngamrunroj, K. H. a. D. (2014). "Relationship of pressure and plasma temperature in plasma dc glow discharge." *Advanced Materials Research* 979: 293-296.

Pearton, R. J. S. a. S. J. (2000). *Handbook of advanced plasma processing techniques*. Heidelberg, Springer-Verlag.

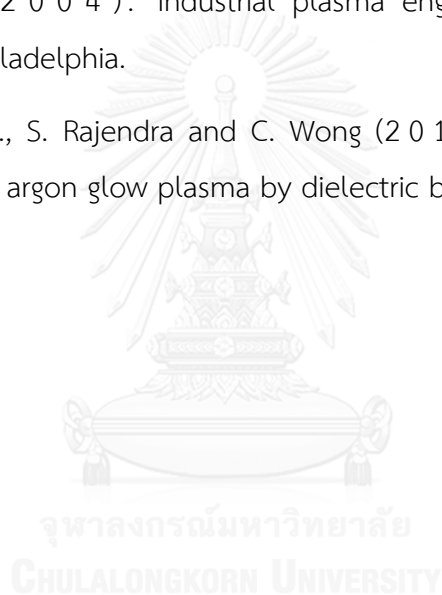
Pu, X. Z. a. Y. (2008). "Using oes to determine electron temperature and density in low-pressure nitrogen and argon plasmas." Plasma Sources Sci Technol 17: 6.

R. Shrestha, R. B. T. a. D. P. S. (2012). "Estimation of electron temperature in atmospheric pressure dielectric barrier discharge using line intensity ratio method " J Sci Eng Technol 8: 37- 42

R. B. Tyata, D. P. S. a. K. M. (2009). "Electrical and optical characterization of dielectric barrier discharge produced in atmospheric air." J Sci Eng Technol 5: 56-61.

Roth, J. R. (2 0 0 4). Industrial plasma engineering, Institute of Physics Publishing. Bristol, Philadelphia.

T. Bhai, S. P., S. Rajendra and C. Wong (2 0 1 3). "Generation of uniform atmospheric pressure argon glow plasma by dielectric barrier discharge." Pramana 80: 507- 517.



ภาคผนวก

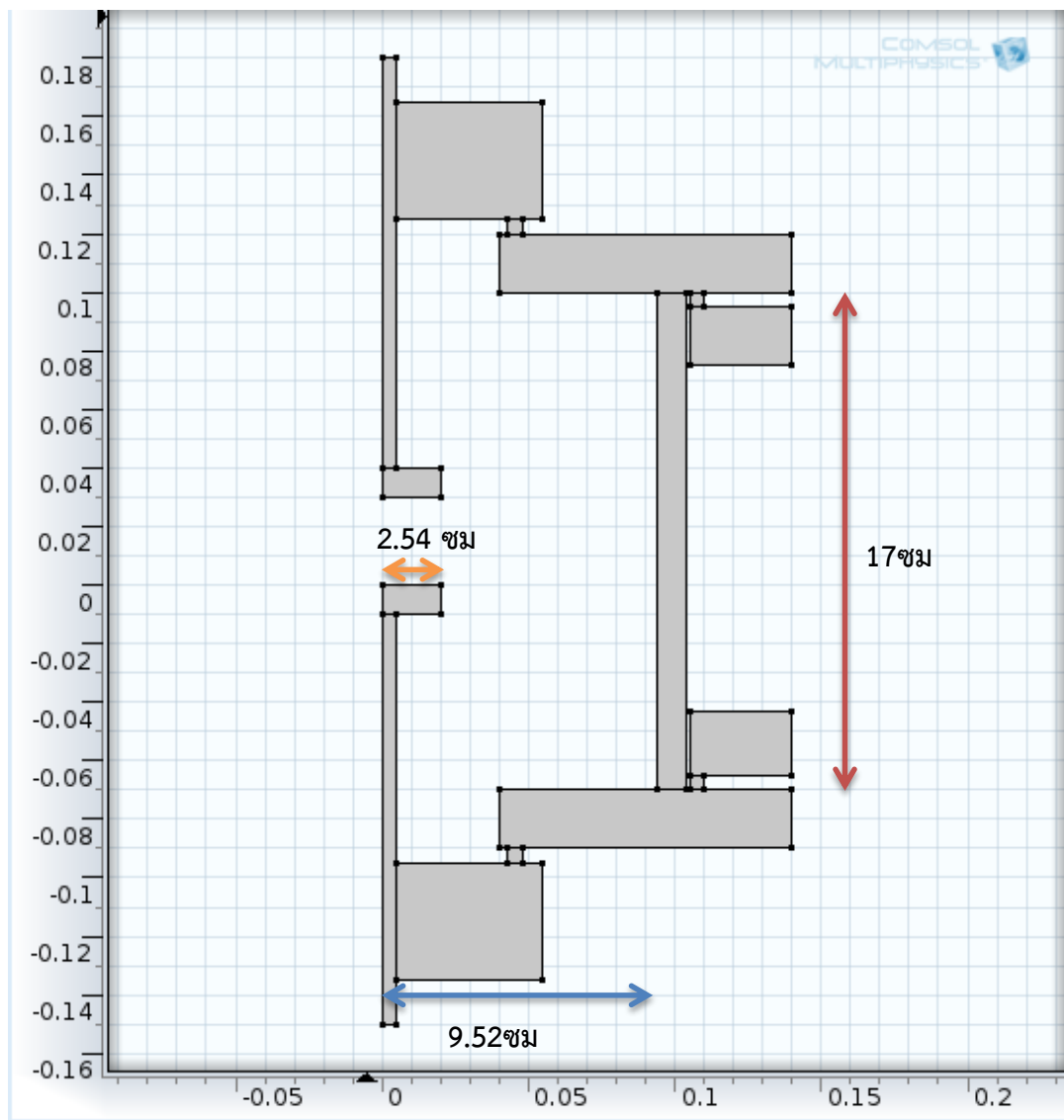


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

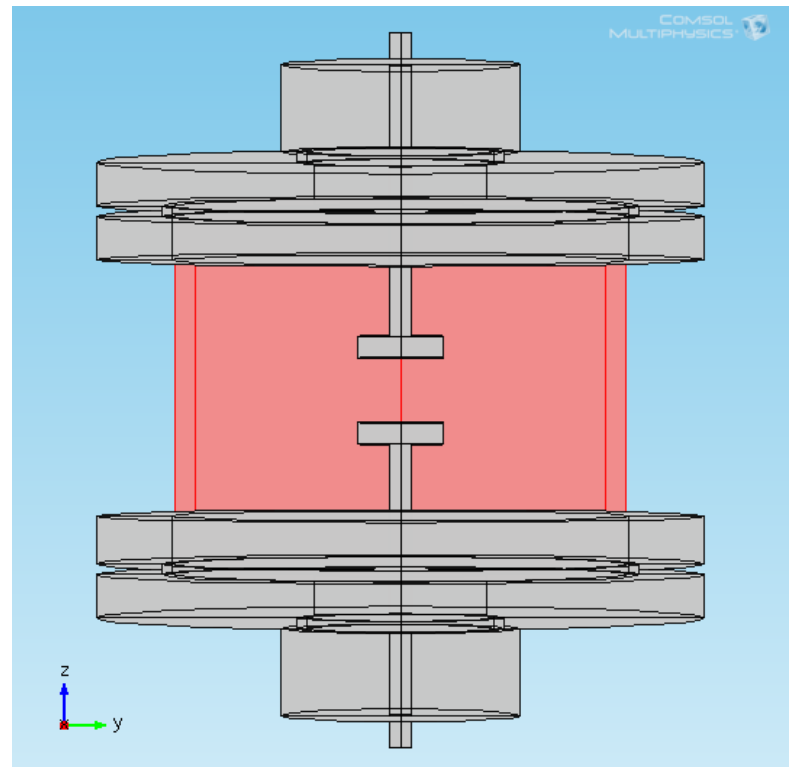
ภาคผนวก.ก

แบบส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่าย

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบเครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่ายที่มีแผ่นโลหะคู่ขนานรัศมี 2.54 ซม. และระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนานเท่ากับ 2.00 ซม. ขนาดของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าคือรัศมี 9.52 ซม. สูง 17.00 ซม.



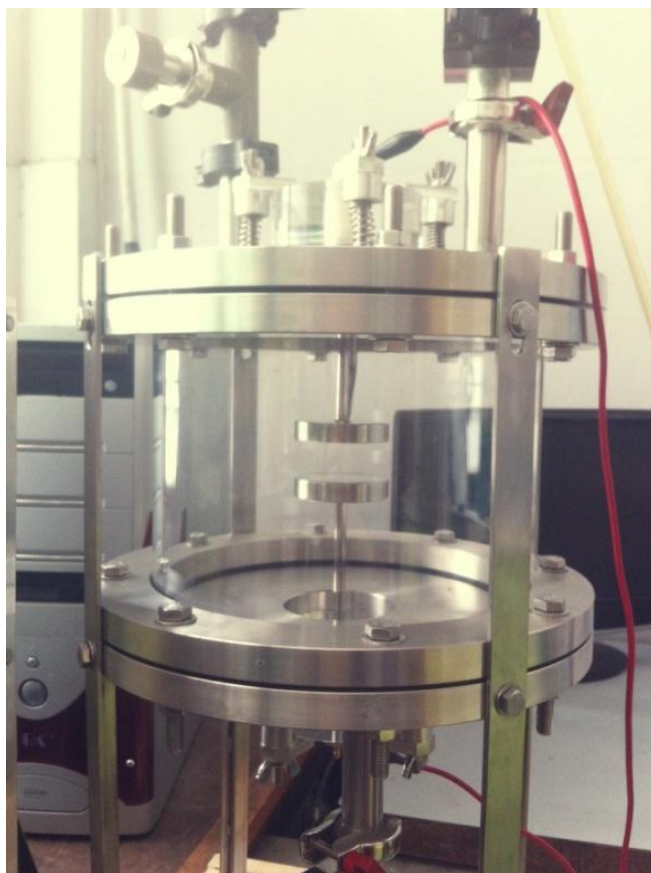
รูปที่ ก.1 ภาคตัดขวางเครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่ายที่วาดโดยโปรแกรมคอมโซล



รูปที่ ก.2 รูปสามมิติของเครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่ายที่วาดโดยโปรแกรมคอมโซล



รูปที่ ก.3 ส่วนประกอบของอุปกรณ์เครื่องกำเนิดพลาสมาอย่างง่าย

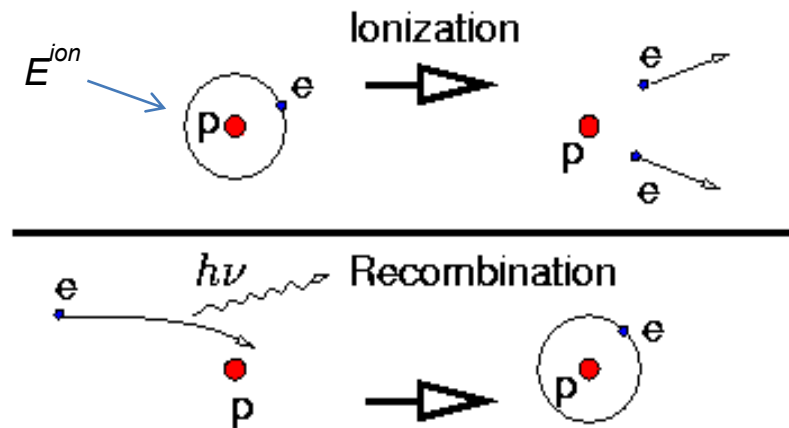


รูปที่ ก.4 เครื่องกำเนิดพลาสติกอย่างง่าย

ภาคผนวก.ข

พลังงานไอออไนเซชันของก๊าซอาร์กอน

พลังงานไอออไนเซชัน คือ พลังงานที่ใช้ในการดึงอิเล็กตรอน 1 อนุภาค ออกจากอะตอมที่เป็นกลางในสถานะก๊าซหรืออะตอมที่ไม่เป็นกลางในสถานะก๊าซ



รูปที่ ข.1 กระบวนการแตกตัวและรวมตัวของอะตอม

พลังงานไอออไนเซชันลำดับที่ 1



พลังงานไอออไนเซชันลำดับที่ 2



พลังงานไอออไนเซชันลำดับที่ 3



โดย E^{ion} คือ พลังงานไอออไนเซชันของอะตอมที่สถานะต่างๆ

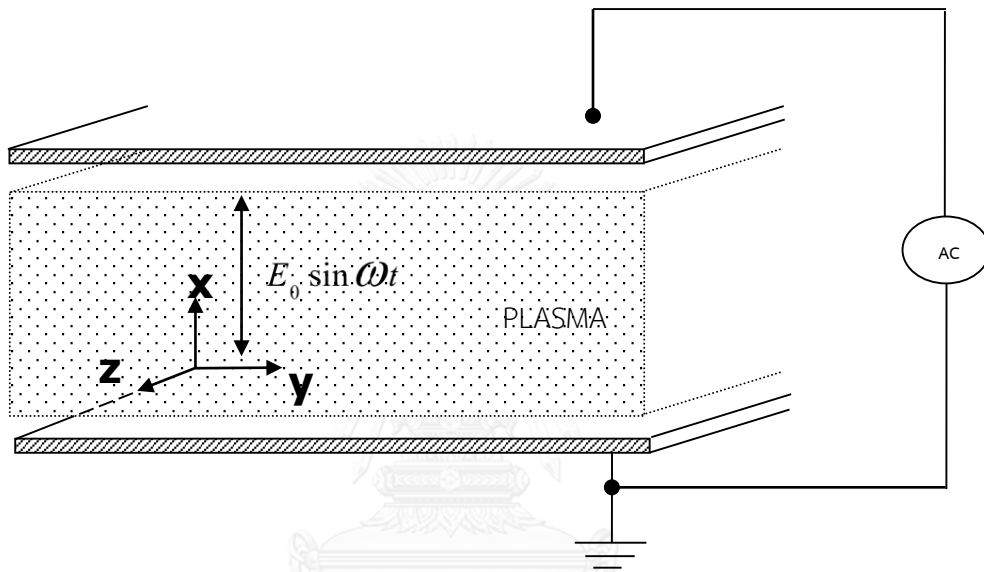
ตารางที่ ข.1 พลังงานในการแตกตัวของอะตอมที่สถานะต่างๆ

สถานะที่แตกตัว	พลังงานไอออไนเซชันของก๊าซอาร์กอน (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

ภาคผนวก.ค
ระบบดิสชาร์จแบบกระแสสลับ

การเกิดพลาสมาระบบดิสชาร์จ

ลักษณะเฉพาะของระบบดิสชาร์จแบบกระแสสลับโดยให้พลังงานไฟฟ้าเข้าสู่แผ่นโลหะคู่ขนานเพื่อสร้างพลาสมาดังรูปที่ ค.1 โดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีความถี่ ω สนามไฟฟ้าอยู่ในแนวแกน x



รูปที่ ค.1 พลาสมาดิสชาร์จโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

เราจะพิจารณาสนามไฟฟ้าไหลผ่านเฉพาะแนวแกน x

$$\vec{E} = (E_0 \sin \omega t, 0, 0) \quad (\text{ค.1})$$

และสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์

$$\vec{B} = (0, 0, 0) \quad (\text{ค.2})$$

แรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนมวล m_e และมีประจุไฟฟ้า e สามารถแสดงดังนี้

$$\Sigma \vec{F} = -m_e \nu_c \vec{v} - e\vec{E} \quad (\text{ค.3})$$

พจน์แรกทางขวามือของสมการ (ค.3) คือพจน์การชนแบบโลเรนต์ซ์ (The Lorentz collisional term) สมมติ โมเมนตัมทั้งหมดของอิเล็กตรอนในทิศของสนามไฟฟ้าหายไปเนื่องจากชนกับอะตอม การสูญหายไปของโมเมนตัมนี้เกิดขึ้นสำหรับความถี่ ν_c คือความถี่จากการชนแบบโลเรนต์ซ์สมการ (ค.3) เมื่อแรงมากระทำกับอิเล็กตรอนจนเคลื่อนที่ด้วยความเร่งสามารถพิจารณากฎของนิวตันเขียนในรูปสมการการเชิงอนุพันธ์ คือ

$$m_e \frac{d^2x}{dt^2} + m_e v_c \frac{dx}{dt} = -eE_0 \sin \omega t \quad (\text{ค.4})$$

$$m_e \frac{dv_y}{dt} + m_e v_c v_y = 0 \quad (\text{ค.5})$$

และ

$$m_e \frac{dv_z}{dt} + m_e v_c v_z = 0 \quad (\text{ค.6})$$

คำตอบของสมการ (ค.5) และ (ค.6) คือ

$$v_y(t) = v_{y0} \exp(-v_c t) \quad (\text{ค.7})$$

และ

$$v_z(t) = v_{z0} \exp(-v_c t) \quad (\text{ค.8})$$

ลักษณะของสมการเหล่านี้ความเร็วเริ่มต้นของอิเล็กตรอนที่เวลา $t=0$ ในแนวแกน y และ แกน z จะสลายตัวไปในเวลาระหว่างชน ในแนวแกน x แกนที่มีสนามไฟฟ้าส่งผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ตามแกนด์ังกล่าว สามารถบอกตำแหน่งที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาคือ

$$x = C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t \quad (\text{ค.9})$$

แทนสมการที่ (ค.9) ลงในสมการที่ (ค.4) สามารถหาค่าคงที่ C_1 และค่าคงที่ C_2 ดังนี้

$$C_1 = -\frac{eE_0}{m_e} \frac{1}{(\omega^2 + v_c^2)} \quad (\text{ค.10})$$

$$C_2 = -\frac{v_c eE_0}{\omega m_e} \frac{1}{(\omega^2 + v_c^2)} \quad (\text{ค.11})$$

จากสมการที่ (ค.9) เขียนอยู่ในรูปอนุพันธ์ที่ขึ้นกับเวลาจะให้ความเร็วในทิศแกน x

$$\frac{dx}{dt} = v_x = \omega(C_1 \cos \omega t - C_2 \sin \omega t) \quad (\text{ค.12})$$

$$\frac{dx}{dt} = v_x = -\frac{eE_0 \omega}{m_e(\omega^2 + v_c^2)} \left(\cos \omega t - \frac{v_c}{\omega} \sin \omega t \right) \quad (\text{ค.13})$$

เราคำนวณงานที่อิเล็กตรอนทำโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากำหนดให้มีระหว่างแผ่นโลหะ คู่ขนานดังแสดงในรูปที่ ค.1 โดยแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าคือ $\vec{F}_E = e\vec{E} = eE_0 \sin(\omega t)\hat{i}$ ดังนั้นความแตกต่างของงานที่อิเล็กตรอนทำคือ

$$dW = -\vec{F}_E \cdot d\vec{x} = eE_0 \sin(\omega t) dx \quad (\text{ค.14})$$

กำลังในการส่งอิเล็กตรอนโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหน่วยวัตต์คือ

$$p = \frac{dW}{dt} = eE_0 \sin(\omega t) \frac{dx}{dt} \quad (\text{ค.15})$$

แทนสมการที่ (ค.12) สำหรับความเร็วในทิศแกน x ลงในสมการ (ค.15) จะได้

$$p = eE_0 \omega [C_1 \sin \omega t \cos \omega t - C_2 \sin^2 \omega t] \quad (\text{ค.16})$$

ถ้าเราอินทิเกรตสมการ (ค.16) ในช่วงหนึ่งคาบการสั่น ค่าเฉลี่ยของเทอมแรกเข้าหาศูนย์
ดังนั้น

$$\bar{p} = \frac{-eE_0\omega C_2}{T\omega} \int_0^T \sin^2 \omega t d(\omega t) = \frac{-eE_0\omega C_2}{2} \quad (\text{ค.17})$$

แทนสมการ (ค.11) ลงในสมการ (ค.17) เทอมขวา จะได้กำลังการดูดกลืนรวมเฉลี่ยโดย
อิเล็กตรอนเดี่ยวจากสนามไฟฟ้ากระแสสลับ

$$\bar{p} = \frac{e^2 E_0^2}{2m_e} \frac{v_c}{(\omega^2 + v_c^2)} \quad (\text{วัตต์ต่ออิเล็กตรอน}) \quad (\text{ค.18})$$

ตั้งแต่พลาสมาเป็นแบบมีลักษณะเฉพาะตัว ทำให้ได้รับกำลังการดูดกลืนรวมเฉลี่ยต่อปริมาตร
จากการคูณกำลังดูดกลืนเฉลี่ยโดยอิเล็กตรอนเดี่ยวในสมการ (ค.18) ด้วยความหนาแน่นจำนวน
จำนวนอิเล็กตรอน

$$\bar{P} = n_e \bar{p} = \frac{n_e e^2 E_0^2}{2m_e} \frac{v_c}{(\omega^2 + v_c^2)} = \frac{1}{4} E_0^2 \frac{e^2 n_e}{m_e} \frac{2v_c}{(4\pi^2 f^2 + v_c^2)} \quad (\text{ค.19})$$

สมการนี้คือกำลังดูดกลืนรวมเฉลี่ยโดยพลาสมาระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนาน ในหน่วยวัตต์ต่อ
ลูกบาศก์เมตร

ภาคผนวก.ง
สมการชานา-โบลต์ซมันน์

สมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่

หากพิจารณาพลาสมาโดยแบ่งพลาสมาเป็นปริมาตรเล็กๆและสมมติว่า พลาสมาที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอและมีสมดุลอุณหพลศาสตร์ ข้อพิสูจน์ของอุณหพลศาสตร์สามารถประยุกต์ใช้กับกระบวนการผันกลับได้ในระบบโดดเดี่ยว (Isolated system) สำหรับพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูง กระบวนการการแผ่ของรังสีถูกละเลยเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการการชน เราเรียกระบบสมดุลนี้ว่า สมดุลอุณหพลศาสตร์เฉพาะที่

จำนวนไอออนในชนิดนั้นๆ สามารถอธิบายโดยการแจกแจงแบบแมกซ์เวลล์ความหนาแน่นของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z แสดงดังนี้

$$\frac{n_{k,Z}}{nZ} = \frac{g_{k,Z}}{U_Z} \exp\left(\frac{-E_{k,Z}}{k_B T}\right) \quad (ง.1)$$

พลังงานอิสระเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz free energy), $F(\beta, V, N)$ พิจารณาอุณหภูมิกึ่งที่ในระบบคาโนนิคอล (Canonical Ensemble) พลังงานอิสระตัวนี้เกิดจากการที่เราไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่าพลังงานของระบบได้จึงต้องการเปลี่ยนจากการควบคุมพลังงานมาเป็นการควบคุมอุณหภูมิแทน

$$F = E_{\text{int}} - TS \quad (ง.2)$$

โดยที่ E_{int} คือพลังงานภายใน T คืออุณหภูมิ S คือเอนโทรปี P_n คือความน่าจะเป็นในการพบที่ระดับ n และ U คือฟังก์ชันแบ่งส่วน

$$S = -k_B \sum_n P_n \ln P_n \quad (ง.3)$$

$$S = -k_B \sum_n \frac{\exp(-\beta E_n)}{U} \ln\left(\frac{\exp(-\beta E_n)}{U}\right) \quad (ง.4)$$

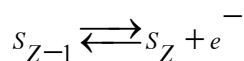
$$S = -\frac{k_B}{U} \sum_n \exp(-\beta E_n) (-\beta E_n - \ln U) \quad (ง.5)$$

$$S = k_B (\beta \langle E \rangle + \ln U) = \frac{\partial(k_B T \ln U)}{\partial T} = -\frac{\partial F}{\partial T} \quad (ง.6)$$

กำหนดให้

$$F = -k_B T \ln U \quad (ง.7)$$

ระบบสมดุลในแต่ละระดับชั้นการแตกตัวสามารถแสดงได้ดังนี้



กำหนดให้ s_Z คือเอนโทรปีของระบบที่มีประจุบวก Z , s_{Z-1} คือเอนโทรปีของระบบที่มีประจุบวก $Z-1$ และ e^- คืออิเล็กตรอน (ในงานวิจัยนี้เอนโทรปีของระบบ s คืออาร์กอน)

จากปฏิกิริยาข้างต้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ของจำนวนไอออนได้ดังนี้

$$-\delta N_{Z-1} = \delta N_Z = \delta N_e \quad (ง.8)$$

จากสมการ (ง.8) อธิบาย การลดลงของจำนวนอนุภาคด้านซ้ายของปฏิกิริยาเท่ากับการเพิ่มของจำนวนอนุภาคด้านขวาของปฏิกิริยา โดย δN_{Z-1} คือการเปลี่ยนแปลงของจำนวนไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$ (ตัว) δN_Z คือการเปลี่ยนแปลงของจำนวนไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z (ตัว) และ δN_e คือการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอิเล็กตรอน (ตัว)

หากเราพิจารณาระบบย่อยสองระบบแลกเปลี่ยนพลังงานกันเพียงอย่างเดียว การแลกเปลี่ยนจะสิ้นสุดลงเมื่ออุณหภูมิต่างกันและหากพิจารณาระบบที่อุณหภูมิและปริมาตรคงที่ ระบบจะเข้าสู่สมดุลได้พลังงานอิสระเฮล์มโฮลทซ์มีค่าน้อยที่สุด หรือ $\delta F=0$

เรื่องของ งาน, พลังงาน และพลังงานภายใน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นไปตาม กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (First 's law of thermodynamics) ดังนี้

$$E_{\text{int}} = W + Q \quad (ง.9)$$

โดย E_{int} คือพลังงานภายใน (J), W คืองาน (J) และ Q คือความร้อน (J)

$$dE_{\text{int}} = dW + dQ \quad (ง.10)$$

กรณีปริมาตรคงที่จะได้การเปลี่ยนแปลงของงานเป็นศูนย์ดังนี้

$$dE_{\text{int}} = dQ \quad (ง.11)$$

จากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์

$$dS \geq \frac{dQ}{T} \quad (ง.12)$$

$$dQ - TdS \leq 0 \quad (ง.13)$$

$$dE_{\text{int}} - TdS \leq 0 \quad (ง.14)$$

พิจารณากรณีอุณหภูมิต่างกันคงที่จะได้

$$d(E_{\text{int}} - TS) \leq 0 \quad (ง.15)$$

กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในกับพลังงานภายนอกคือพลังงานอิสระเฮล์มโฮลตซ์

$$dF \leq 0 \quad (ง.16)$$

ดังนั้นเมื่อระบบเข้าสู่สมดุลจะได้ว่า

$$\delta F = 0 \quad (ง.17)$$

โดย $F = -k_B T \ln U$ และ U คือฟังก์ชันแบ่งส่วน (Partition function) ของระบบคือ

$$U = \frac{U_e^{N_e} U_Z^{N_Z} U_{Z-1}^{N_{Z-1}}}{N_e! N_Z! N_{Z-1}!} \quad (ง.18)$$

ฟังก์ชันแบ่งส่วนของระบบ ในปฏิกริยาข้างต้นสัมพันธ์กับฟังก์ชันแบ่งส่วนของอิเล็กตรอนและไอออน ได้แก่ U_e คือฟังก์ชันแบ่งส่วนของอิเล็กตรอน, U_z คือฟังก์ชันแบ่งส่วนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z และ U_{z-1} คือฟังก์ชันแบ่งส่วนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$

ฟังก์ชันแบ่งส่วนของอิเล็กตรอนดังแสดง

$$U_e = \iint g_e e^{-\left(\frac{p^2}{2m_e}\right)/k_B T} \frac{dV d^3 p}{h^3} \quad (ง.19)$$

$$= \frac{g_e}{h^3} V \int_0^\infty p^2 e^{-\left(\frac{p^2}{2m_e k_B T}\right)} 4\pi dp \quad (ง.20)$$

$$= \frac{4\pi g_e V}{h^3} \int_0^\infty p^2 e^{-\left(\frac{p^2}{2m_e k_B T}\right)} dp \quad (ง.21)$$

ใช้สมบัติการอินทิเกรต

$$; \int_0^\infty x^2 \exp(-a^2 x^2) dx = \sqrt{\pi} / (4a^3) \quad (ง.22)$$

$$U_e = \frac{4\pi g_e V}{h^3} (2m_e k_B T)^{\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{\pi}}{4} \quad (ง.23)$$

$$= \frac{4 g_e V (2m_e \pi k_B T)^{\frac{3}{2}}}{4h^3} \quad (ง.24)$$

$$= \frac{g_e V (2m \pi k_B T)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \quad (ง.25)$$

อนุพันธ์รวมของสมการ (ง.18) ได้ดังนี้

$$\frac{\partial F}{\partial N_{Z-1}} \delta N_{Z-1} + \frac{\partial F}{\partial N_Z} \delta N_Z + \frac{\partial F}{\partial N_e} \delta N_e = 0 \quad (ง.26)$$

จากสมการ (ง.8) แทนลงในระบบสมดุลพลังงานอิสระเฮล์มโฮลตซ์มีค่าน้อยที่สุด

$$\frac{\partial F}{\partial N_{Z-1}} \delta N_{Z-1} + \frac{\partial F}{\partial N_Z} (-\delta N_{Z-1}) + \frac{\partial F}{\partial N_e} (-\delta N_{Z-1}) = 0 \quad (ง.27)$$

$$\frac{\partial F}{\partial N_{Z-1}} - \frac{\partial F}{\partial N_Z} - \frac{\partial F}{\partial N_e} = 0 \quad (\text{จ.28})$$

$$\frac{\partial F}{\partial N_e} + \frac{\partial F}{\partial N_Z} - \frac{\partial F}{\partial N_{Z-1}} = 0 \quad (\text{จ.29})$$

แทน $F = -k_B T \ln U$ ในสมการ

$$\frac{\partial(-k_B T \ln U)}{\partial N_e} + \frac{\partial(-k_B T \ln U)}{\partial N_Z} - \frac{\partial(-k_B T \ln U)}{\partial N_{Z-1}} = 0 \quad (\text{จ.30})$$

$$\frac{\partial}{\partial N_e} (-k_B T \ln \frac{U_e^{N_e} U_Z^{N_Z} U_{Z-1}^{N_{Z-1}}}{N_e! N_Z! N_{Z-1}!}) + \frac{\partial}{\partial N_Z} (-k_B T \ln \frac{U_e^{N_e} U_Z^{N_Z} U_{Z-1}^{N_{Z-1}}}{N_e! N_Z! N_{Z-1}!}) - \frac{\partial}{\partial N_{Z-1}} (-k_B T \ln \frac{U_e^{N_e} U_Z^{N_Z} U_{Z-1}^{N_{Z-1}}}{N_e! N_Z! N_{Z-1}!}) = 0 \quad (\text{จ.31})$$

ใช้สูตรของสเตอร์ลิง (Stirling formula)

$$\ln n! = n \ln n - n \quad (\text{จ.32})$$

$$(-k_B T) [\ln U_e - (\frac{N_e}{N_e} + \ln N_e - 1)] + (-k_B T) [\ln U_Z - (\frac{N_Z}{N_Z} + \ln N_Z - 1)] = 0 \quad (\text{จ.33})$$

$$-(-k_{B-1} T) [\ln U_{Z-1} - (\frac{N_{Z-1}}{N_{Z-1}} + \ln N_{Z-1} - 1)] = 0 \quad (\text{จ.34})$$

$$(\ln U_e - \ln N_e) + (\ln U_Z - \ln N_Z) - (\ln U_{Z-1} + \ln N_{Z-1}) = 0 \quad (\text{จ.35})$$

$$\ln \left(\frac{U_e U_Z N_{Z-1}}{N_e N_Z U_{Z-1}} \right) = 0 \quad (\text{จ.36})$$

$$\frac{N_e N_Z}{N_{Z-1}} = \frac{U_e U_Z}{U_{Z-1}} \quad (\text{จ.37})$$

แทนฟังก์ชันแบ่งส่วนของอิเล็กตรอนลงในสมการ (จ.37) จะได้

$$\frac{N_e N_Z}{N_{Z-1}} = \frac{U_Z V g_e}{U_{Z+1}} \left(\frac{2\pi m_e k_B T}{h^2} \right)^{3/2}; g_e = 2 \quad (\text{จ.38})$$

$$\frac{N_Z}{N_{Z-1}} = \frac{2U_Z}{n_e U_{Z-1}} \left(\frac{2\pi m_e k_B T}{h^2} \right)^{3/2} \quad (\text{จ.39})$$

ความเข้มจากการเปล่งแสง (ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน)

กำลังทั้งหมดในเส้นสเปกตรัมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรและต่อหน่วยมุมตัน (solid angle) ที่มีความถี่ ν (ε_{line}) คือ

$$\varepsilon_{line} = (4\pi)^{-1} h\nu A_{ki} N_k \quad (\text{จ.40})$$

โดย h คือค่าคงที่พลังค์, A_{ki} คือความน่าจะเป็นการเปลี่ยนพลังงานจากระดับ k ไป i ของไอออนชนิด s และ $N_{k,Z}$ คือจำนวนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ที่ระดับ k สำหรับแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาว L ความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมาคือ

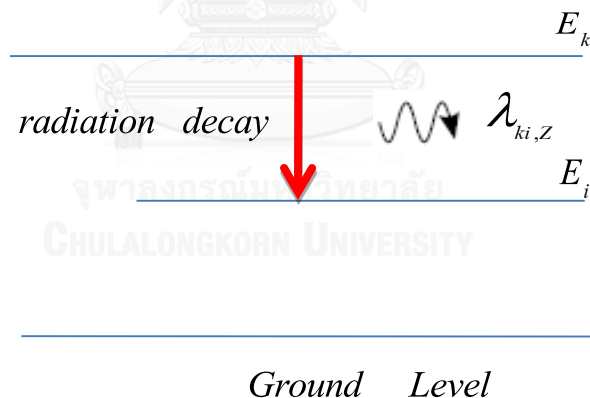
$$I_{line} = \int_0^{+\infty} I(\lambda) d\lambda = \epsilon_{line} L \quad (ง.41)$$

$$I_{line} = (4\pi)^{-1} h\nu A_{ki} N_{k,Z} L \quad (ง.42)$$

ความเข้มแสงที่เกิดขึ้นของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก (I_Z) ดังแสดง

$$I_Z = \frac{hc}{4\pi\lambda_{ki,Z}} N_{k,Z} A_{ki,Z} L \quad (ง.43)$$

โดยที่ h คือค่าคงที่พลังค์, c คือความเร็วแสง, $\lambda_{ki,Z}$ คือความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยเนื่องจากเปลี่ยนพลังงานจากระดับ k ไป i ของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$, $N_{k,Z}$ คือจำนวนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ที่ระดับ k , $A_{ki,Z}$ คือความน่าจะเป็นการเปลี่ยนพลังงานจากระดับ k ไป i ของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z และ L คือความยาวของแหล่งกำเนิดแสง



รูปที่ ง.1 การคายพลังงานในรูปแบบของแสง

ความสัมพันธ์โบลต์ซมันน์ได้แก่

$$\frac{N_{k,Z}}{N_Z} = \frac{g_{k,Z}}{U_Z} \exp\left(\frac{-E_{k,Z} + E_Z}{k_B T}\right) \quad (ง.44)$$

โดย $N_{k,Z}$ คือจำนวนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ที่ระดับ k , N_Z คือจำนวนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ในทุกระดับ $g_{k,Z}$ คือแฟกเตอร์สภาพเสื่อมคล้ายของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ที่ระดับ k , U_Z คือฟังก์ชันแบ่งส่วนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z , $E_{k,Z}$ คือพลังงานของ

ไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ที่ระดับ k , E_Z คือพลังงานของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ในทุกระดับ และ $k_B T$ คืออุณหภูมิพลาสมา

จากความสัมพันธ์โบลต์ซมันน์จะได้จำนวนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ที่ระดับ k สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แสดง

$$N_{k,Z} = \frac{N_Z g_{k,Z}}{U_Z} \exp\left(-\frac{E_{k,Z} + E_Z}{k_B T}\right) \quad (จ.45)$$

สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มแสงกับอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้ดังสมการ

$$I_Z = \frac{L}{4\pi} hc \frac{N_Z}{U_Z} \frac{A_{ki,Z} g_{k,Z}}{\lambda_{ki,Z}} \exp\left(-\frac{E_{k,Z} + E_Z}{k_B T}\right) \quad (จ.46)$$

ฟังก์ชันแบ่งส่วนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z ดังแสดง

$$U_Z = \frac{L}{4\pi} hc \frac{N_Z}{I_Z} \frac{A_{ki,Z} g_{k,Z}}{\lambda_{ki,Z}} \exp\left(-\frac{E_{k,Z} + E_Z}{k_B T}\right) \quad (จ.47)$$

ฟังก์ชันแบ่งส่วนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$ ดังแสดง

$$U_{Z-1} = \frac{L}{4\pi} hc \frac{N_{Z-1}}{I_{Z-1}} \frac{A_{k'i',Z-1} g_{k',Z-1}}{\lambda_{k'i',Z-1}} \exp\left(-\frac{E_{k',Z-1} + E_{Z-1}}{k_B T}\right) \quad (จ.48)$$

โดยที่ U_{Z-1} คือฟังก์ชันแบ่งส่วนของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$, L คือความยาวของแหล่งกำเนิดแสง, I_{Z-1} คือความเข้มแสงของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$, $\lambda_{k'i',Z}$ คือความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยเนื่องจากเปลี่ยนพลังงานจากระดับ k' ไป i' ของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$, $A_{k'i',Z-1}$ คือความน่าจะเป็นการเปลี่ยนพลังงานจากระดับ k' ไป i' ของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก Z , $g_{k',Z-1}$ คือแฟกเตอร์สภาพเสื่อมคลายของไอออนชนิด s ที่ระดับ k' ที่มีประจุบวก $Z-1$, $N_{k',Z-1}$ คือจำนวนของไอออนชนิด s ที่ระดับ k' ที่มีประจุบวก $Z-1$, E^{ion} คือพลังงานไอออนไนเซชัน และ $E_{k',Z-1}$ คือพลังงานของไอออนชนิด s ที่มีประจุบวก $Z-1$ ที่ระดับ k'

แทน U_Z และ U_{Z-1} ลงในสมการ (จ.49) จะได้

$$n_e = 2 \left(\frac{2\pi m_e k_B T_e}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{I_{Z-1} \lambda_{k'i',Z-1} A_{ki,Z} g_{k,Z}}{I_Z \lambda_{ki,Z} A_{k'i',Z-1} g_{k',Z-1}} \exp\left(\frac{-E_{k,Z} + E_Z + E_{k',Z-1} - E_{Z-1}}{k_B T}\right) \quad (จ.49)$$

จะได้สมการซาฮา-โบลต์ซมันน์ดังสมการ

$$n_e = 2 \left(\frac{2\pi m_e k_B T_e}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{I_{Z-1} \lambda_{k'i',Z-1} A_{ki,Z} g_{k,Z}}{I_Z \lambda_{ki,Z} A_{k'i',Z-1} g_{k',Z-1}} \exp\left(-\frac{E^{ion} + E_{k,Z} - E_{k',Z-1}}{k_B T}\right) \quad (จ.50)$$

สมการซาฮา-โบลต์ซมันน์เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนและอุณหภูมิของอิเล็กตรอน

ภาคผนวก.จ

การแก้สมการเชิงอนุพันธ์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

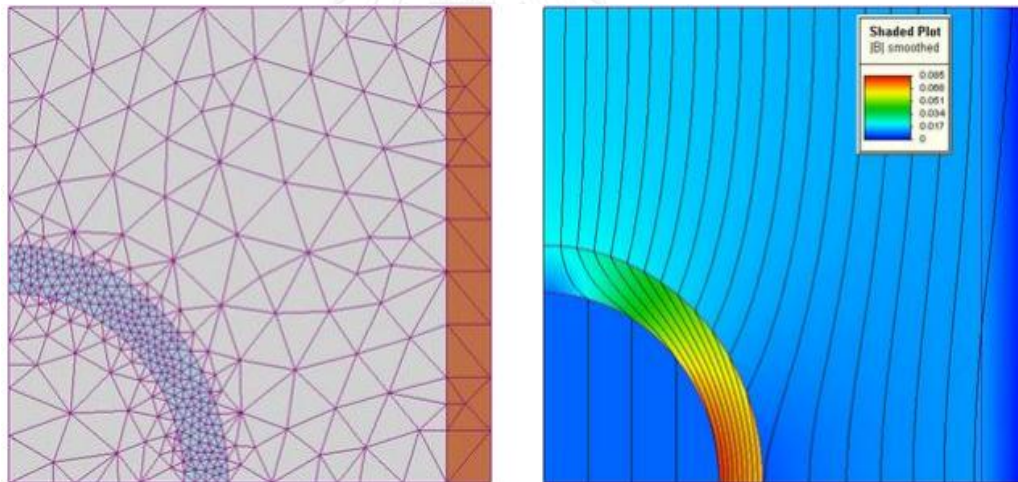
ผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution)

เมื่อปัญหาที่กำหนดมีขอบเขตและเงื่อนไขที่ซับซ้อน การหาผลเฉลยแม่นยำตรงจะทำได้ยากหรืออาจทำไม่ได้เลย

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) เป็นการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ แล้วทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์เพื่อแก้ปัญหาต่อไป

แนวคิดพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

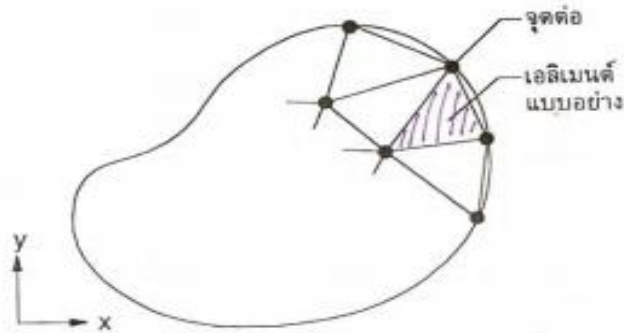
ทำการเปลี่ยนค่าผลเฉลยแม่นยำตรงทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านี้ ให้อยู่ในรูปผลเฉลยโดยประมาณที่มีจำนวนนับได้ (finite) ด้วยการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ (element) ซึ่งมีขนาดแตกต่างกัน



รูปที่ จ.1 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

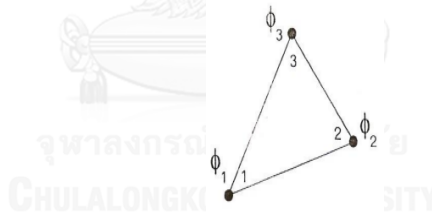
หลักการเบื้องต้นของ FEM

1. แบ่งรูปร่างของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ



รูปที่ จ.2 การแบ่งเอลิเมนต์

2. เลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ ซึ่งประกอบด้วยจุดต่อและปริมาณไม่ทราบค่าที่จุดต่อนั้นๆ กำหนดให้ $\phi_i; i = 1, 2, 3$ คือตัวแปรที่ไม่ทราบค่าสำหรับงานวิจัยนี้หมายถึง อุณหภูมิ $N_i(x, y), i = 1, 2, 3$ คือฟังก์ชันการประมาณ แสดงดังสมการ



รูปที่ จ.3 การเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (\text{จ.1})$$

สามารถเขียนอยู่ในรูปของ

$$\phi(x, y) = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \quad (\text{จ.2})$$

$$\phi(x, y) = \begin{bmatrix} N \end{bmatrix}_{1 \times 3} \{ \phi \}_{3 \times 1} \quad (\text{จ.3})$$

โดย $\begin{bmatrix} N \end{bmatrix}$ คือเมตริกซ์แนวนอนของคือฟังก์ชันการประมาณ และ $\{ \phi \}$ คือเวกเตอร์เมตริกซ์แนวตั้งที่ประกอบด้วยตัวแปรที่ไม่ทราบค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้นๆ

3. ทำการสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (\text{จ.4})$$

โดย $[K]_e$ แสดงถึงเมตริกซ์ของแต่ละเอลิเมนต์จากสมการที่สนใจ (เช่น สมการความร้อน สมการคลื่น เป็นต้น) และ $\{F\}_e$ แสดงถึงเวกเตอร์เมตริกซ์แนวตั้งของแต่ละเอลิเมนต์จากสมการที่สนใจ

4. นำสมการที่ประดิษฐ์ได้จากทุกๆ เอลิเมนต์มาประกอบรวมกันเข้าเป็นระบบสมการ

$$[K]_{sys} \{\phi\}_{sys} = \{F\}_{sys} \quad (\text{จ.5})$$

โดย $[K]_{sys}$ แสดงถึงเมตริกซ์ของผลรวมสำหรับทุกๆเอลิเมนต์ และ $\{F\}_{sys}$ แสดงถึงเวกเตอร์เมตริกซ์แนวตั้งของผลรวมสำหรับทุกๆเอลิเมนต์

5. ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบและเงื่อนไขเริ่มต้นลงในสมการ
6. คำนวณค่าที่ต่อเนื่องอื่นๆ หลังจากการคำนวณปริมาณไม่ทราบค่าที่จุดต่อไป

ภาคผนวก.ฉ

สมการที่ใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอน (n_e) และความหนาแน่นพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน (n_ε) จะคำนวณโดยการแก้คู่ของสมการดริฟท์-ดิฟฟิวชัน สำหรับความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนสมการ (ฉ.1) และสมการดริฟท์-ดิฟฟิวชันสำหรับพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนสมการ (ฉ.2)

$$\frac{\partial(n_e)}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e \quad (\text{ฉ.1})$$

$$\frac{\partial(n_\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_\varepsilon + E \cdot \Gamma_e = R_\varepsilon \quad (\text{ฉ.2})$$

โดยที่ Γ_e คือฟลักซ์ของอิเล็กตรอน ($1/\text{m}^2\text{s}$), R_e คือแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ($1/\text{m}^3\text{s}$), E คือสนามไฟฟ้า (N/C), Γ_ε คือฟลักซ์พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน ($\text{J}/\text{m}^2\text{s}$) และ R_ε คือพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ($\text{J}/\text{m}^3\text{s}$)

$$\Gamma_e = -n_e(\mu_e \cdot E) - D_e \nabla \cdot n_e \quad (\text{ฉ.3})$$

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ถูกนิยามภายหลังสภาพแพร่ของอิเล็กตรอน (D_e) ค่าสภาพการเคลื่อนที่ของพลังงาน (μ_ε) และพลังงานเนื่องจากสภาพแพร่ (D_ε) ถูกคำนวณจากค่าสภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (μ_e) โดย $k_B T_e$ คืออุณหภูมิของอิเล็กตรอน

$$D_e = \mu_e k_B T_e, \quad \mu_\varepsilon = \left(\frac{5}{3}\right) \mu_e, \quad D_\varepsilon = \mu_\varepsilon k_B T_e \quad (\text{ฉ.4})$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของแหล่งกำเนิดในสมการข้างต้นถูกหาค่าจากเคมีของพลาสมาโดยใช้สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา สมการนี้แสดงผลรวมของทั้งการเพิ่มและการสลายของความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมด M ปฏิกิริยา

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_{jk} N_n n_e \quad (\text{ฉ.5})$$

โดย x_j คือสัมประสิทธิ์โมลของสปีชีส์เป้าหมายสำหรับปฏิกิริยา j , k_j คือสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา j และ N_n คือความหนาแน่นจำนวนอะตอมทั้งหมดที่เป็นกลาง

พลังงานที่สูญเสียของอิเล็กตรอนได้รับจากการรวมพลังงานที่สูญเสียจากการชนของทุกปฏิกิริยา

$$R_\varepsilon = \sum_{j=1}^P x_{jk} N_n n_e \Delta \varepsilon_j \quad (\text{ฉ.6})$$

โดย $\Delta \varepsilon_j$ คือพลังงานการสูญเสียจากปฏิกิริยา j (eV), k_j คือสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา j

สนามไฟฟ้าสถิตถูกหาจากศักย์ไฟฟ้า (V) ดังสมการ

$$\nabla \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \nabla V = \rho \quad (ฉ.7)$$

โดย ϵ_0 คือค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m) ส่วน ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) Z คือเลขอะตอม และความหนาแน่นของประจุ (ρ) ถูกคำนวณจาก

$$\rho = q \left(\sum_{k=1}^N Z_k n_k - n_e \right) \quad (ฉ.8)$$

อาร์กอนเป็นหนึ่งในแก๊สที่ง่ายที่สุดในการดำเนินการที่ความดันต่ำ อิเล็กตรอนที่สถานะกระตุ้นในสปีชีส์เดียวซึ่งส่งผลให้กลไกทางเคมีประกอบด้วยเพียง 3 สปีชีส์และ 7 ปฏิกริยาโดย e คือ อิเล็กตรอน Ar คือก๊าซอาร์กอนที่เป็นกลางทางไฟฟ้า Ars คือก๊าซอาร์กอนที่อยู่ในสถานะกระตุ้น Ar^+ คือก๊าซอาร์กอนที่มีประจุบวกเนื่องจากแตกตัวไปเป็นอิเล็กตรอนหนึ่งตัว

ตารางที่ ฉ.1 ปฏิกริยาของก๊าซอาร์กอน

REACTION	FORMULA	TYPE	$\Delta\epsilon$ (eV)
1	$e+Ar \Rightarrow e+Ar$	Elastic	0
2	$e+Ar \Rightarrow e+Ars$	Excitation	11.5
3	$e+Ars \Rightarrow e+Ar$	Superelastic	-11.5
4	$e+Ar \Rightarrow 2e+Ar^+$	Ionization	15.8
5	$e+Ars \Rightarrow 2e+Ar^+$	Ionization	4.24
6	$Ars+Ars \Rightarrow e+Ar+Ar^+$	Penning ionization	-
7	$Ars+Ar \Rightarrow Ar+Ar$	Metastable quenching	-

กระบวนการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic)

เป็นกระบวนการที่เกิดจากอิเล็กตรอนชนก๊าซที่เป็นกลางหนึ่งตัว แล้วได้อิเล็กตรอนออกมาหนึ่งตัว และก๊าซที่เป็นกลางหนึ่งตัว โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

กระบวนการชนที่สภาวะกระตุ้น (Excitation)

เป็นกระบวนการที่เกิดจากอิเล็กตรอนชนก๊าซที่เป็นกลางหนึ่งตัว แล้วได้อิเล็กตรอนออกมาหนึ่งตัว และก๊าซที่อยู่ในสถานะกระตุ้น

กระบวนการชนแบบยืดหยุ่นยิ่งยวด (Superelastic)

เป็นกระบวนการที่เกิดจากอิเล็กตรอนชนก๊าซที่อยู่ในสถานะกระตุ้น แล้วได้อิเล็กตรอนออกมาหนึ่งตัว และก๊าซที่เป็นกลางหนึ่งตัว โดยมีการสูญเสียพลังงาน

กระบวนการชนแบบซูเปอร์ยืดหยุ่น (Ionization)

เป็นกระบวนการที่เกิดจากอิเล็กตรอนชนก๊าซที่อยู่ในสถานะกระตุ้น แล้วได้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นหนึ่งตัว

กระบวนการแตกตัวเพนนิง (Penning ionization)

เป็นกระบวนการที่เกิดจากก๊าซที่อยู่ในสถานะกระตุ้นชนกับก๊าซที่อยู่ในสถานะกระตุ้น แล้วได้อิเล็กตรอนออกมาหนึ่งตัว ก๊าซที่มีประจุบวกเนื่องจากแตกตัวไปเป็นอิเล็กตรอนหนึ่งตัว และก๊าซที่เป็นกลางหนึ่งตัว

กระบวนการเมตาสเตเบิล ควีนซิง (Metastable quenching)

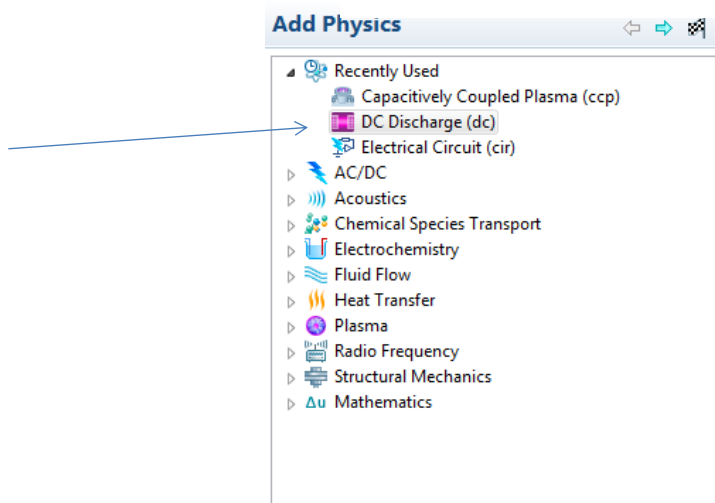
เป็นกระบวนการที่เกิดจากที่อยู่ในสถานะกระตุ้นชนกับก๊าซที่เป็นกลางหนึ่งตัว แล้วได้ก๊าซที่เป็นกลางสองตัว โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงาน



ภาคผนวก.ช

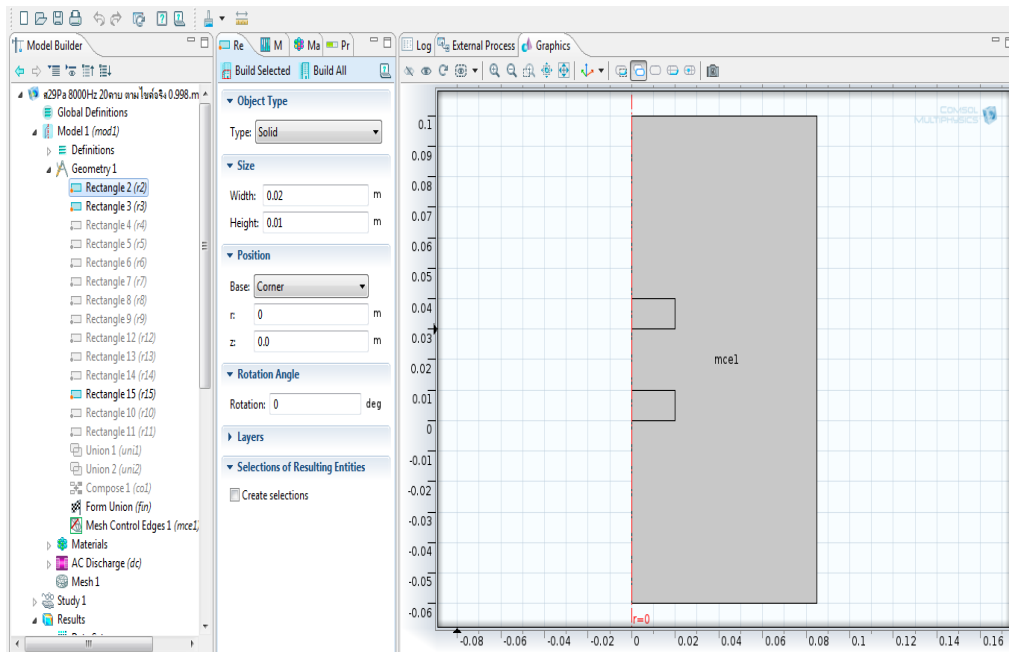
ขั้นตอนการจำลองพลาสมาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์อย่างง่าย

ขั้นตอนที่ 1 เลือกรูปแบบของพลาสมาที่ใช้ในการคำนวณโดยในขั้นตอนนี้เลือก DC Discharge ซึ่งรูปแบบดังกล่าวมีลักษณะใกล้เคียงกับพลาสมาที่กำเนิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ



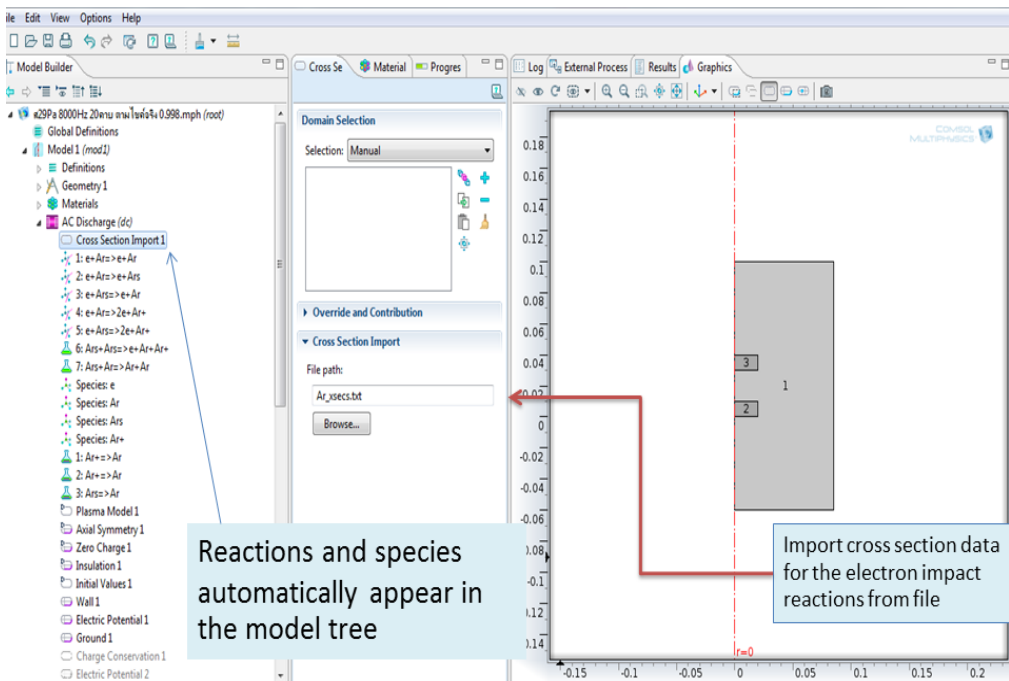
รูปที่ ช.1 ขั้นตอนเลือกรูปแบบของพลาสมา

ขั้นตอนที่ 2 วาดรูปโครงสร้างระบบพลาสมาโดยในระบบนี้เป็นพลาสมาที่เกิดจากแผ่นโลหะคู่ขนานดังรูปที่ ช.2 โดยเป็นการจำลองที่มีลักษณะใกล้เคียงกับระบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้



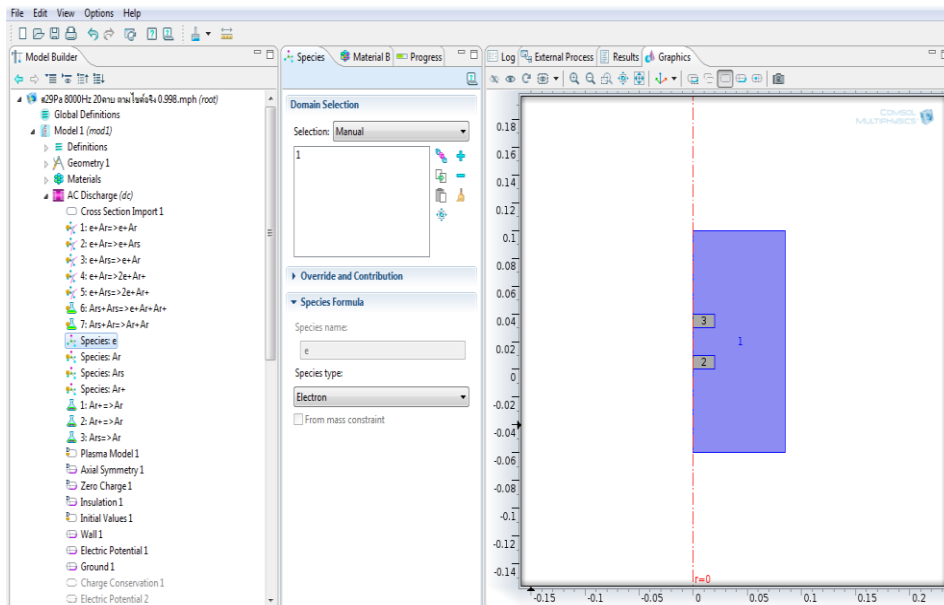
รูปที่ ข.2 โครงสร้างระบบพลาสมาที่กำหนดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

ขั้นตอนที่ 3 นำข้อมูลภาคตัดขวางเข้าคือการนำค่าคงที่ต่างๆซึ่งเกี่ยวกับอาร์กอนเข้าโปรแกรม



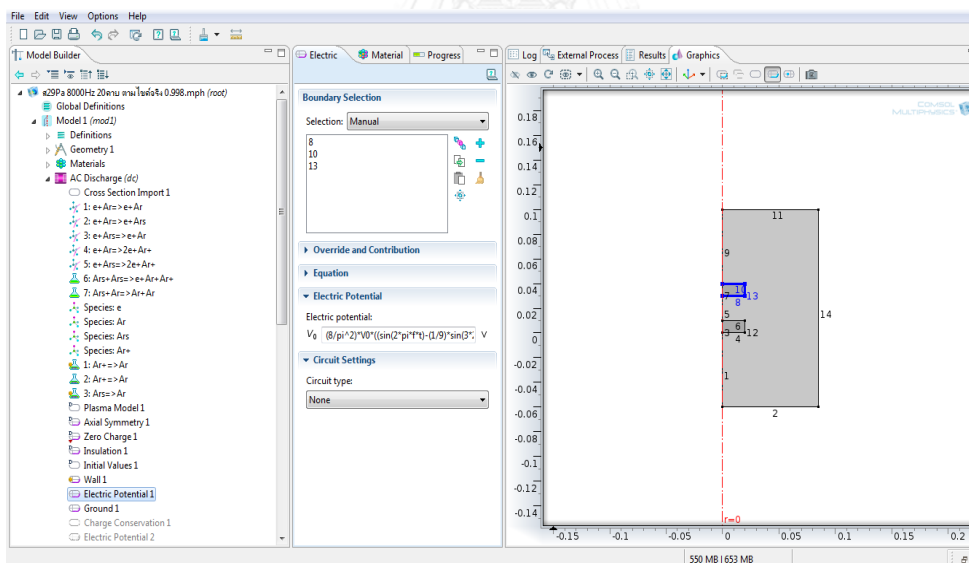
รูปที่ ข.3 การนำค่าคงที่ต่างๆซึ่งเกี่ยวกับอาร์กอนระบบ

ขั้นตอนที่ 4 เลือกบริเวณส่วนที่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆในระบบนี้โดยเลือกส่วนของบริเวณหมายเลขหนึ่งซึ่งเป็นบริเวณที่บรรจุก๊าซ



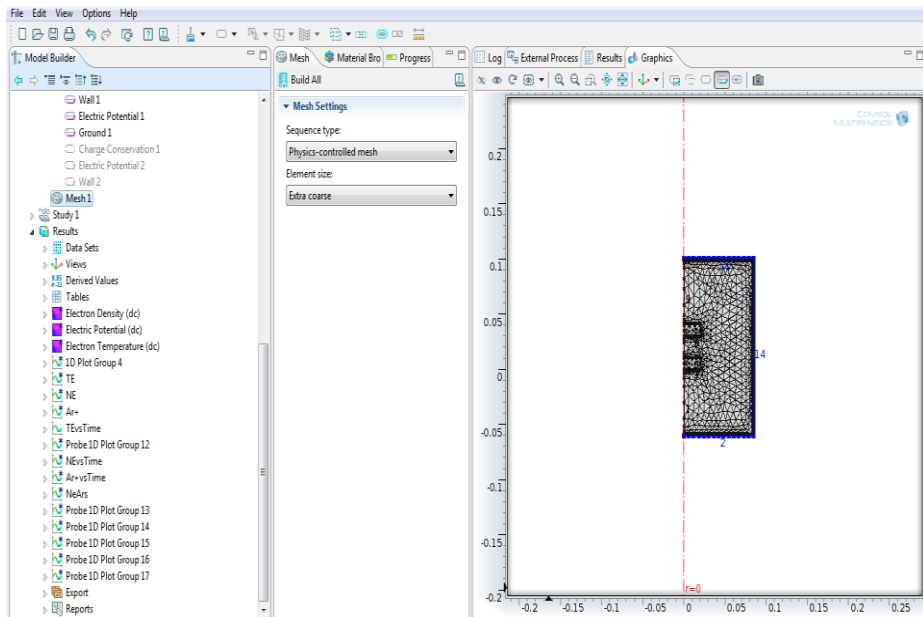
รูปที่ ข.4 ขั้นตอนเลือกบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาต่างๆในระบบนี้

ขั้นตอนที่ 5 ขั้นตอนการป้อนข้อมูลเงื่อนไขขอบอภาติ เลือกส่วนที่ต้องการนำกระแสไฟฟ้าเข้าระบบ และเงื่อนไขเริ่มต้นต่างๆ



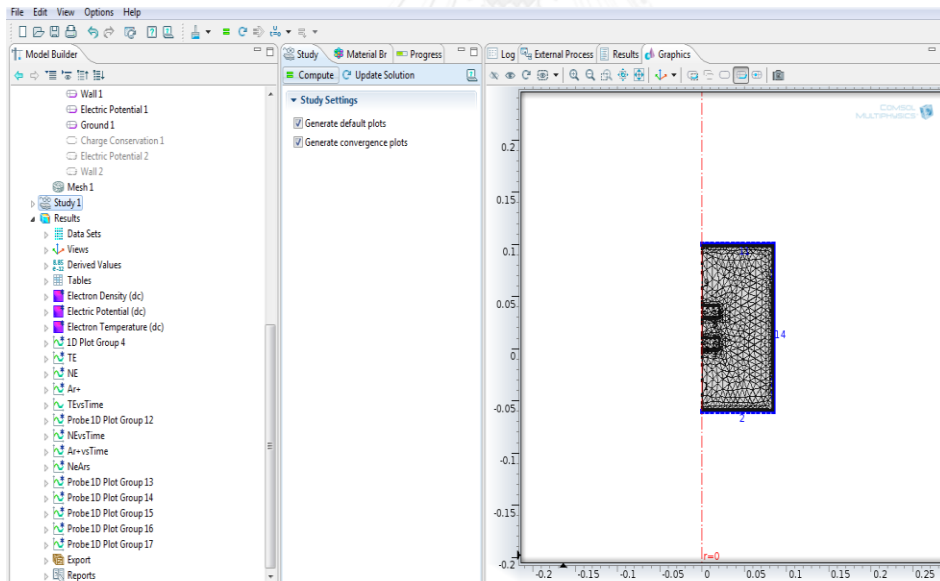
รูปที่ ข.5 ขั้นตอนการป้อนข้อมูลเงื่อนไขขอบและเงื่อนไขเริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 6 สร้าง mesh ให้กับระบบซึ่งยิ่งปรับค่านี้นี้ให้มีความละเอียดก็จะทำให้เห็นพฤติกรรมของพลาสมาชัดเจน



รูปที่ ข.6 การสร้างmesh ให้กับระบบ

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณ



รูปที่ ข.7 ขั้นตอนการคำนวณ

ภาคผนวก.ซ

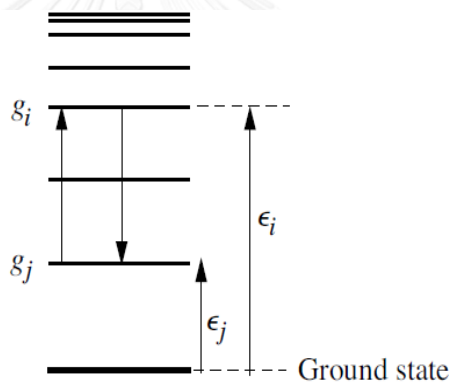
ความสัมพันธ์ของโบลต์ซมันน์

โอกาสการพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงานขึ้นกับค่าแฟกเตอร์ของโบลต์ซมันน์ $\exp(-E_i / k_B T)$ สามารถเขียนความสัมพันธ์ของโอกาสของการพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน j เทียบโอกาสการพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน i ได้ดังนี้

$$\frac{P(j)}{P(i)} = \exp\left(-\frac{E_j - E_i}{k_B T}\right) \quad (\text{ซ.1})$$

$$\frac{n_j}{n_i} = \frac{g_j}{g_i} \exp\left(-\frac{E_j - E_i}{k_B T}\right) \quad (\text{ซ.2})$$

โดย g คือค่าถ่วงน้ำหนักทางสถิติหรือเรียกอีกชื่อว่าแฟกเตอร์สภาพเสื่อมคลาย ซึ่งเป็นค่าที่บอกจำนวนแบบที่มีพลังงานเหมือนกัน



รูปที่ ซ.1 ความสัมพันธ์พลังงานกระตุ้นจากระดับพื้นไประดับ i และระดับ j

ตัวอย่าง หากพิจารณาไฮโดรเจน

$g(n=1) = g(1) = 2$ คือมี n อยู่ 2 แบบ ที่มีพลังงานเท่ากับ -13.6 eV

$g(n=2) = g(2) = 8$ คือมี n อยู่ 8 แบบ ที่มีพลังงานเท่ากับ -3.40 eV

n	l	m_l	m_s	E (eV)
1	0	0	+1/2	-13.6
1	0	0	-1/2	-13.6
2	0	0	+1/2	-3.40
2	0	0	-1/2	-3.40
2	1	0	+1/2	-3.40
2	1	0	-1/2	-3.40
2	1	1	+1/2	-3.40
2	1	1	-1/2	-3.40
2	1	-1	+1/2	-3.40
2	1	-1	-1/2	-3.40

เลขควอนตัม (Quantum Number)

การแก้สมการชเรอดิงเงอร์เพื่อหาพลังงานและบริเวณที่จะพบอิเล็กตรอนในสามมิติ จะมีตัวเลขจำนวนเต็มเข้ามาเกี่ยวข้องคือ

ข.1. เลขควอนตัมหลัก (n) คือตัวเลขที่บ่งบอกขนาดของออร์บิทัลเมื่อเพิ่มขึ้น โดยเลขควอนตัมหลักต้องเป็นเลขจำนวนเต็มบวก และสำหรับอะตอมที่มีอิเล็กตรอนมากกว่าหนึ่งตัวอาจมีอิเล็กตรอนหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งตัวที่มีค่า n เดียวกัน เรียกว่า ชั้นอิเล็กตรอน (electron shell) เดียวกัน โดยแต่ละชั้นจะมีอิเล็กตรอนเข้าอยู่ได้จำนวน $2n^2$

n= 1 2 3 4 5 6 7

K L M N O P Q

ซ.2. เลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุม คือตัวกำหนดรูปร่างเฉพาะตัวของออร์บิทัล

- l เป็นเลขจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ $0, 1, 2, 3, \dots, (n-1)$

- l มักแสดงเป็นตัวอักษรมากกว่าตัวเลข

ค่าตัวอักษรที่ใช้ค่าของ l (ออร์บิทัลหรือชั้นย่อย)

0	1	2	3	4
s	p	d	f	g

ตัวอย่าง ออร์บิทัลที่มีค่า $n=3$ และ $l=2$ คือ 3d-orbital

ซ.3. เลขควอนตัมแม่เหล็ก ใช้อธิบายการจัดตัวของออร์บิทัลในที่ว่าง

- m_l เป็นเลขจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ l ถึง $-l$

- จำนวนเลขควอนตัมแม่เหล็กทั้งหมด คือ $m_l = 2l+1$ ค่า

ซ.4. เลขควอนตัมสปิน

เนื่องจากอิเล็กตรอนที่อาศัยอยู่ในออร์บิทัลมีพฤติกรรมเสมือนเป็นแท่งแม่เหล็กแท่งเล็กๆ สปินรอบนิวเคลียสและขณะเดียวกันก็สปินรอบแกนตัวเองด้วย การหมุนนี้ทำให้อิเล็กตรอนมีอำนาจสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีเลขควอนตัมตัวที่สี่ เพื่อบอกถึงโมเมนตัมสปินของอิเล็กตรอนที่อยู่ในออร์บิทัล โดย m_s มีค่าเท่ากับ $+1/2$ หรือ $-1/2$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ข้าพเจ้านายวัชรพล คงพิบูลย์กิจเกิดเมื่อวันที่16 ตุลาคม พ.ศ.2533 ที่จังหวัดพะเยา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556

การเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ

W. Kongpibookkid, R. Mongkolnavin, Plasma characteristics of Argon glow discharge produced by AC power supply operating at low frequencies, National Physics Conference (PERFIK 2014), Kuala Lumpur, Malaysia (Oral)

