

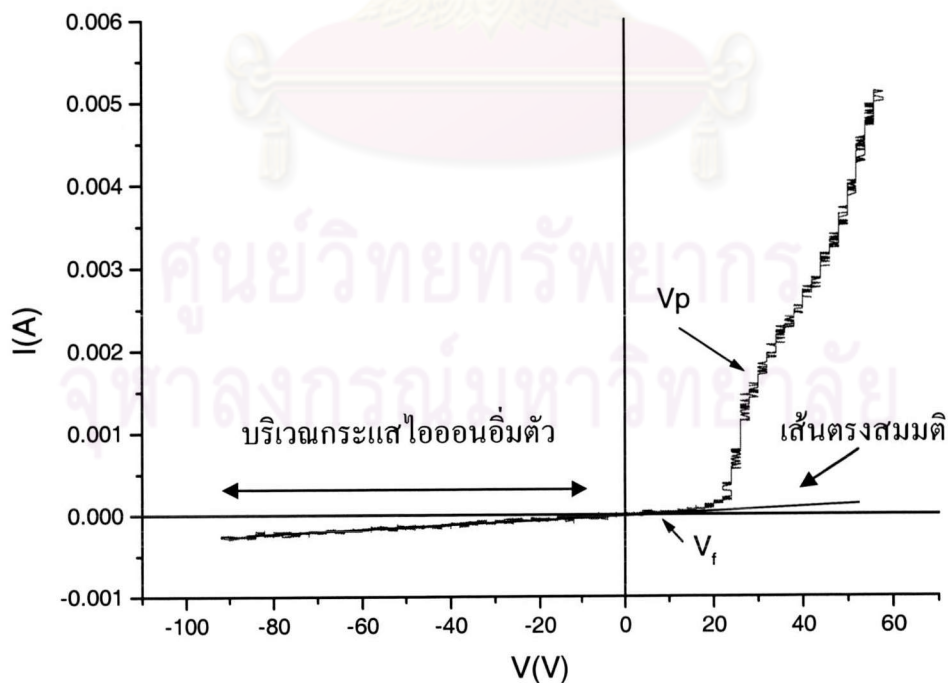
บทที่ 4

การวัดค่าพารามิเตอร์ของพลาสมา

ในบทนี้จะกล่าวถึง วิธีการวัดค่าพารามิเตอร์อย่างละเอียด ทั้งจากวิธีการวัดโดยใช้หัววัดคู่และหัววัดเดี่ยว จากนั้นจะเป็นการนำเสนอผลการวัด ในหลาย ๆ เงื่อนไข พร้อมทั้งวิเคราะห์วิจารณ์ผลการวัดค่าพารามิเตอร์เหล่านั้น

4.1 หัววัดเดี่ยว

เมื่อนำหัววัดทางไฟฟ้าแบบหัววัดเดี่ยวที่ได้ออกแบบสร้างตามรูปที่ 3.8 ใส่เข้าไปในพลาสมา ดังแผนภาพในรูปที่ 2.4 แล้วทำการไบแอสศักย์ค่าต่าง ๆ กันให้แก่หัววัดนั้น พร้อมทั้งบันทึกค่าของกระแสที่ได้จากหัววัด ซึ่งสอดคล้องกับศักย์ที่ไบแอสนั้น ๆ จากนั้นนำค่าของคู่กระแส-ศักย์ต่าง ๆ มาเขียนกราฟลักษณะเฉพาะของหัววัดกลางมวลแบบหัววัดเดี่ยว ดังรูปที่ 4.1



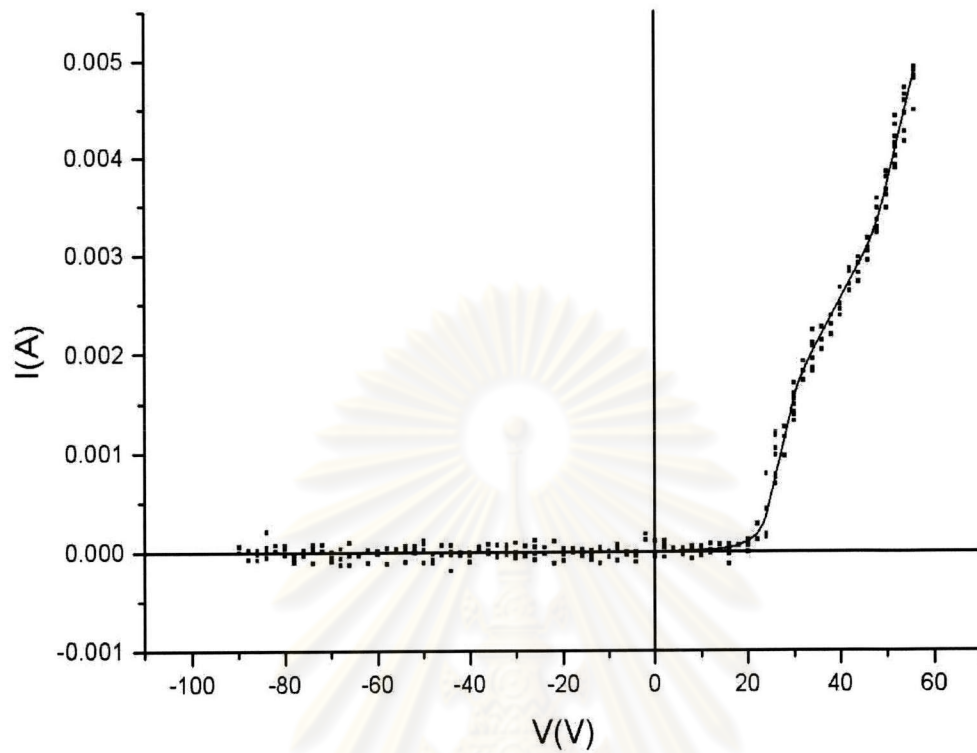
รูปที่ 4.1 กราฟส่อกระแส-ศักย์ของพลาสมาอากาศ

กราฟในรูป 4.1 นี้ ได้มาจากพลาสมาอากาศที่ความดัน 0.18 torr ตำแหน่งของหัววัด +2 cm ไปทางขวาจากแคโทดและศักย์กรอมซ์ไฟฟ้าเป็น 300 V มีกระแสของการดิสชาร์จประมาณ 10 mA กราฟส่อกระแส-ศักย์ ที่มีลักษณะแบบนี้ จะสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของพลาสมาได้ต่อไป

ค่าของกระแสที่ได้ในรูปที่ 4.1 นั้น เป็นผลรวมของกระแสไอออนและกระแสอิเล็กตรอนที่อยู่ในพลาสมาขณะทำการวัด ในบริเวณที่ศักย์มีค่าเป็นลบนั้น จะพบว่ากระแสบริเวณนั้นมีค่าลดลงเชิงเส้นตามศักย์ที่ลดลง ซึ่งบริเวณนี้คือบริเวณของกระแสไอออนอ้อมตัวนั่นเอง ส่วนกระแสในช่วงนี้ก็คือกระแสไอออนอ้อมตัว เนื่องจากกระแสไอออนอ้อมตัวนั้น มีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังนั้นเราจึงสามารถหาสมการเส้นตรงแทนค่ากระแสอ้อมตัวนี้ได้ ซึ่งแทนได้โดยเส้นตรงสมมติที่ลากทับบริเวณกระแสไอออนอ้อมตัว ในรูปที่ 4.1

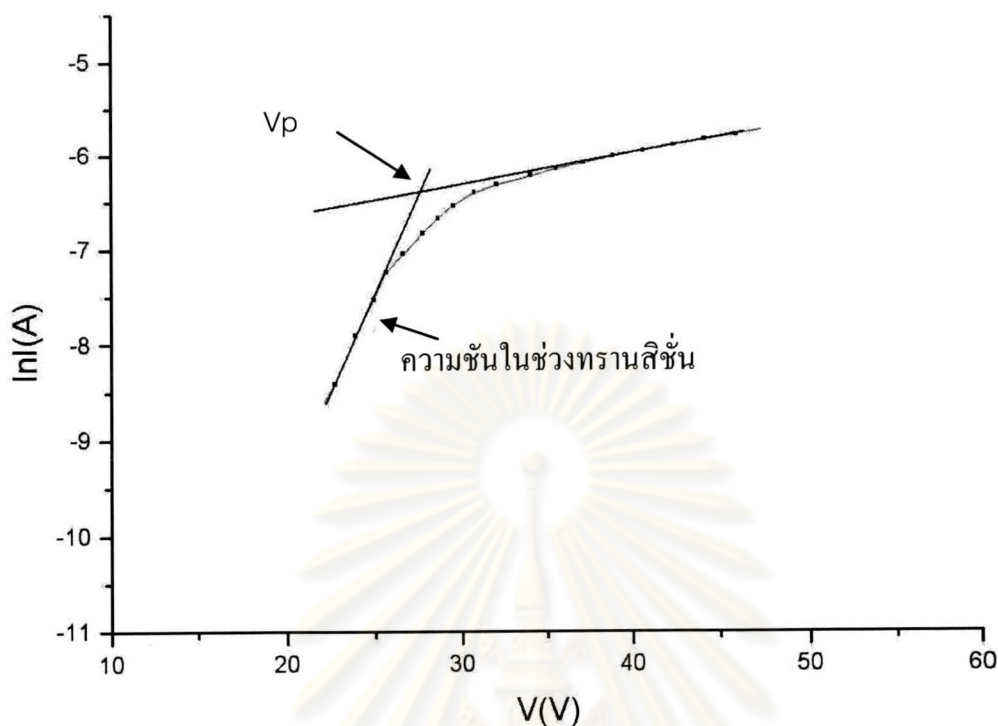
ส่วนในบริเวณที่ศักย์เป็นบวกมาก ๆ นั้น เส้นกราฟไม่ได้มีแนวโน้มที่จะขนานกับแนวระดับ เพื่อเข้าสู่ช่วงกระแสอิเล็กตรอนอ้อมตัว อย่างในทฤษฎี ซึ่งสังเกตพบเพียงแค่มีการเปลี่ยนความชันจากบริเวณทรานสิชัน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความชันมากที่สุดเท่านั้น จึงไม่สามารถหากระแสอิเล็กตรอนอ้อมตัวที่ชัดเจนได้โดยตรง เหมือนอย่างในกรณีของกระแสไอออนอ้อมตัว ในงานนี้จึงใช้การหาโดยวิธีทางอ้อม กล่าวคือหาค่ากระแสที่เหลืออยู่เมื่อหักค่ากระแสไอออนอ้อมตัวออกไป ซึ่งจะทำให้ได้กราฟลักษณะดังรูปที่ 4.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 กราฟลักษณะส่อกระแส (อิลีคตรอน)-ศักย์

กราฟที่ได้ในรูปที่ 4.2 นี้ เป็นกราฟลักษณะส่อกระแส (อิลีคตรอน)-ศักย์ เมื่อหักกระแสไอออนออกไปแล้ว กราฟที่ได้จึงมีค่ากระแสรวมลดลง ความชันของกราฟจึงลดลงด้วย ซึ่งจากสมการที่ 2.17 ทำให้เราทราบว่าอุณหภูมิของอิลีคตรอนมีความสัมพันธ์กับความชันของลอการิทึมของกระแสอิลีคตรอนและศักย์ในช่วงทรานสิชัน ดังนั้นจึงนำค่าของกระแสอิลีคตรอนที่ได้จากรูปที่ 4.2 นี้มาแปลงใหม่ให้เป็นค่าลอการิทึมของกระแสอิลีคตรอน แล้วจึงนำมาเขียนร่วมกับศักย์อีกครั้ง เพื่อจะหาความชันในช่วงทรานสิชันต่อไป ซึ่งกราฟที่ได้หลังจากกระทำลอการิทึมกับกระแสอิลีคตรอน จะมีลักษณะดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟระหว่างลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอน-ศักย์

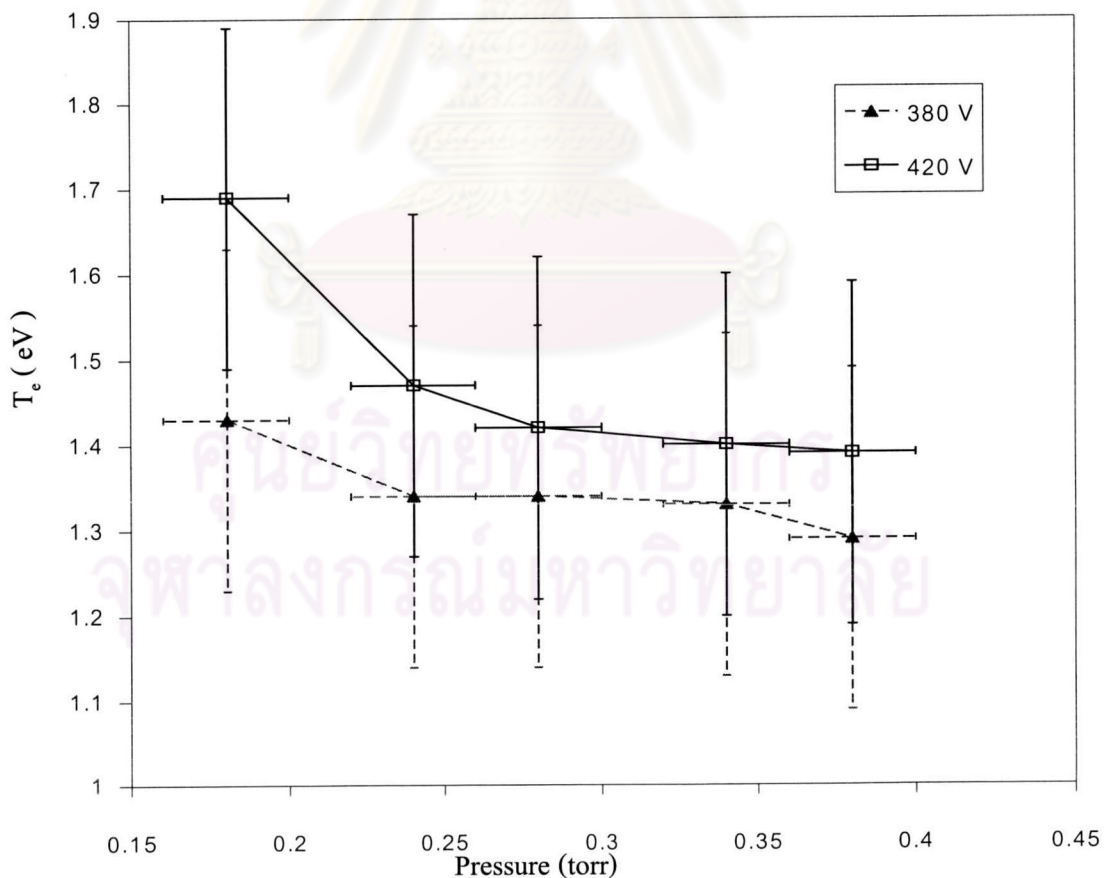
จากกราฟระหว่างลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอนกับศักย์ ดังรูปที่ 4.3 นี้ ทำให้เราสามารถหาความชันระหว่างลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอนกับศักย์ในช่วงทรานสิชันได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 ซึ่งค่าความชันที่ได้นี้ก็คื ค่าส่วนกลับของอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาขณะวัดในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.17 นั่นเอง จากกราฟตัวอย่างนี้ ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่คำนวณได้คือ 2.39 ± 0.20 eV

จากนั้น เมื่อเราทราบอุณหภูมิของอิเล็กตรอนแล้ว เราสามารถนำค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนนี้ไปคำนวณหาความหนาแน่นของพลาสมาได้อีก ตามสมการที่ 2.19 โดยค่ากระแสไอออนอิมิต์วที่ใช้ นั้น เลือจากช่วงที่ศักย์มีค่าเป็นลบมาก ๆ ตามวิธีของ หมุดตอเล็บ [23] ในการทดลองนี้ เลือกค่ากระแสไอออนอิมิต์ว ที่ค่าศักย์ประมาณ -80 V ซึ่งจากกราฟตัวอย่างนี้ ค่าความหนาแน่นของพลาสมาขณะวัดที่คำนวณได้คือ $(5.42 \pm 0.55) \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$

นอกจากนี้ ยังสามารถหาค่าศักย์ลอยและศักย์พลาสมาได้โดยตรงจากกราฟสัณ-กระแส-ศักย์ ดังรูปที่ 4.1 และจากกราฟระหว่างลอกการิทึมของกระแสอิเล็กตรอนกับศักย์ ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งในกราฟตัวอย่างนี้ ศักย์ลอยมีค่า 6.45 V ส่วนศักย์พลาสมามีค่าประมาณ 27.58 V สำหรับข้อมูลชุดอื่นของหัววัดเดี่ยว ก็จะใช้วิธีวิเคราะห์แบบเดียวกัน

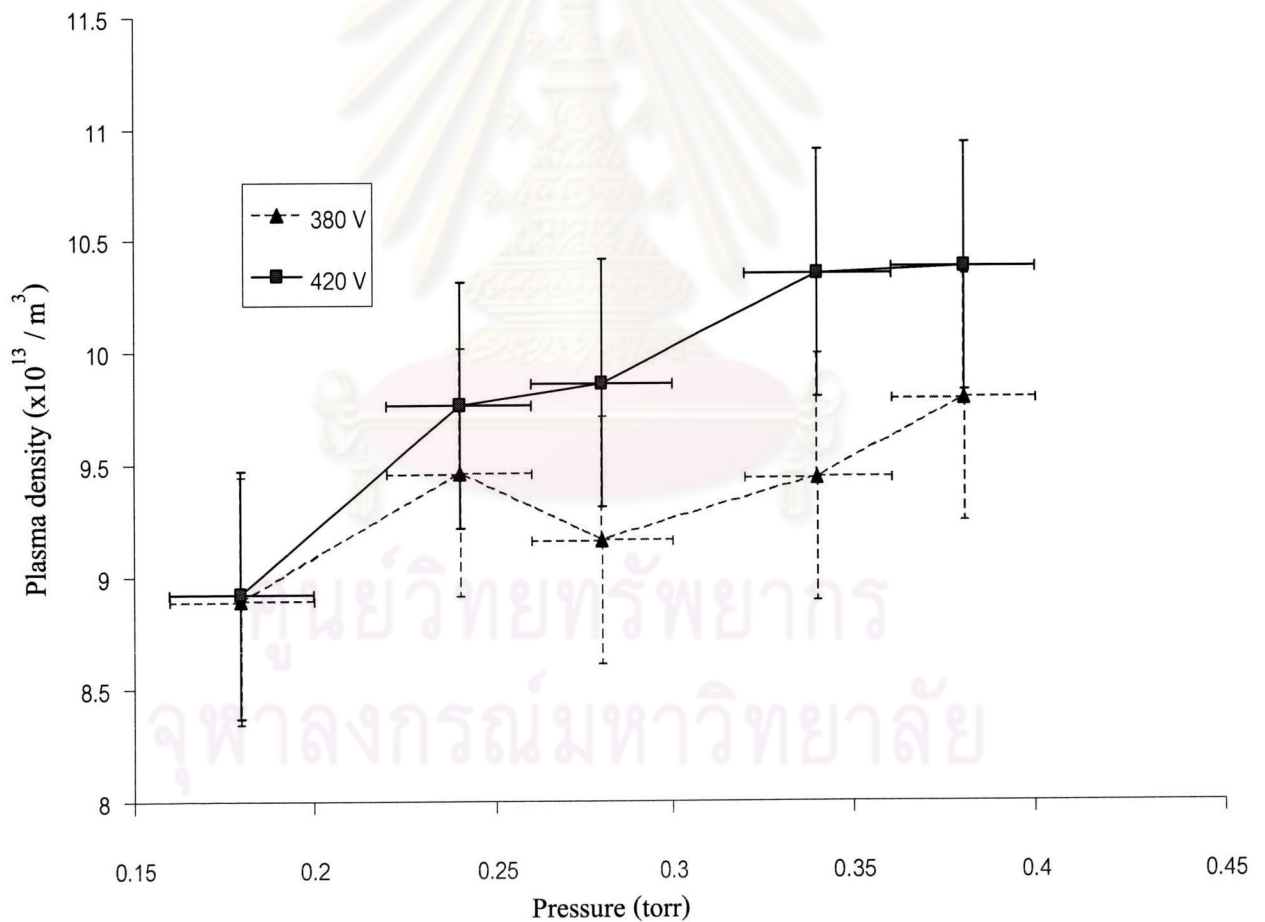
4.1.1 ผลการวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาโดยหัววัดเดี่ยว

ในการวัดค่าพารามิเตอร์ของพลาสมา โดยหัววัดเดี่ยว ได้มีการเปลี่ยนเงื่อนไขต่าง ๆ ของพลาสมา คือ ความดัน ศักย์ดิสชาร์จ ชนิดของก๊าซ เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของพลาสมา นอกจากนี้ได้นำเสนอเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนโดยวิธีจากสมการที่ 2.17 และ 2.23 ซึ่งผลการทดลองที่ได้ มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความดันของพลาสมาอากาศ

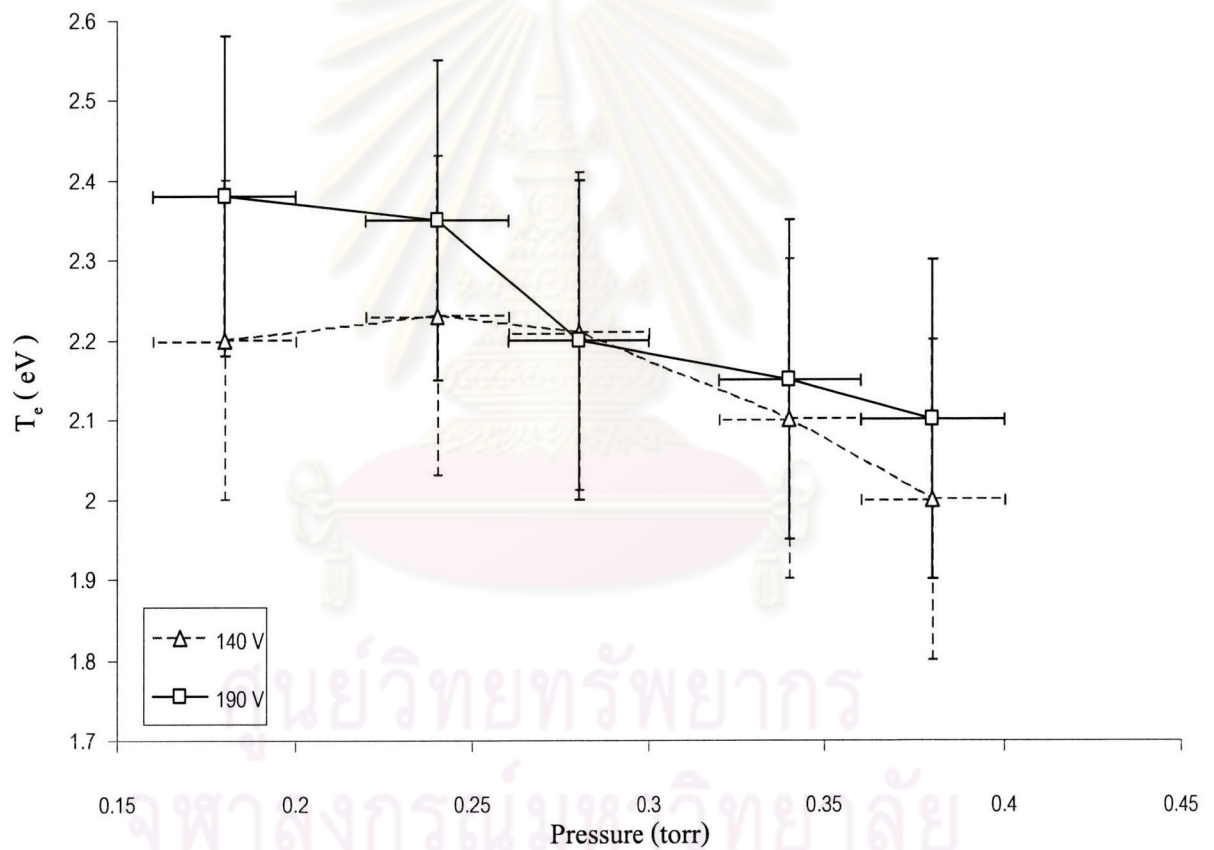
กราฟดังรูปที่ 4.4 นี้ เป็นผลการทดลองจากพลาสมาอากาศ ซึ่งใช้วิธีหาจากส่วนกลับของความชัน ดังรูปที่ 4.3 พบว่าที่ความดันต่ำคือ 0.18 torr อุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีค่าสูง และมีแนวโน้มลดลง เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อความดันเพิ่มขึ้น จำนวนอนุภาคย่อมเพิ่มมากขึ้น เมื่อใช้พลังงานเท่าเดิมจะส่งผลให้พลังงานเฉลี่ยที่ส่งผ่านไปยังอนุภาคแต่ละตัวลดลง โดยในรูปที่ 4.4 ศักย์ ดิสชาร์จที่ใช้คือ 380 V และ 420 V ซึ่งพบว่าที่ศักย์ดิสชาร์จสูงกว่า อุณหภูมิของอิเล็กตรอนจะมีค่า สูงกว่า เพราะมีการส่งผ่านพลังงานไปยังอนุภาคมากกว่า โดยเฉลี่ยแล้ว อุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ ได้ในช่วงความดัน 0.2 ถึง 0.4 torr มีค่าประมาณ 1.50 ± 0.20 eV ส่วนความหนาแน่นของพลาสมาที่ สัมพันธ์กัน ดูได้จากรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลาสมากับความดันของพลาสมาอากาศ

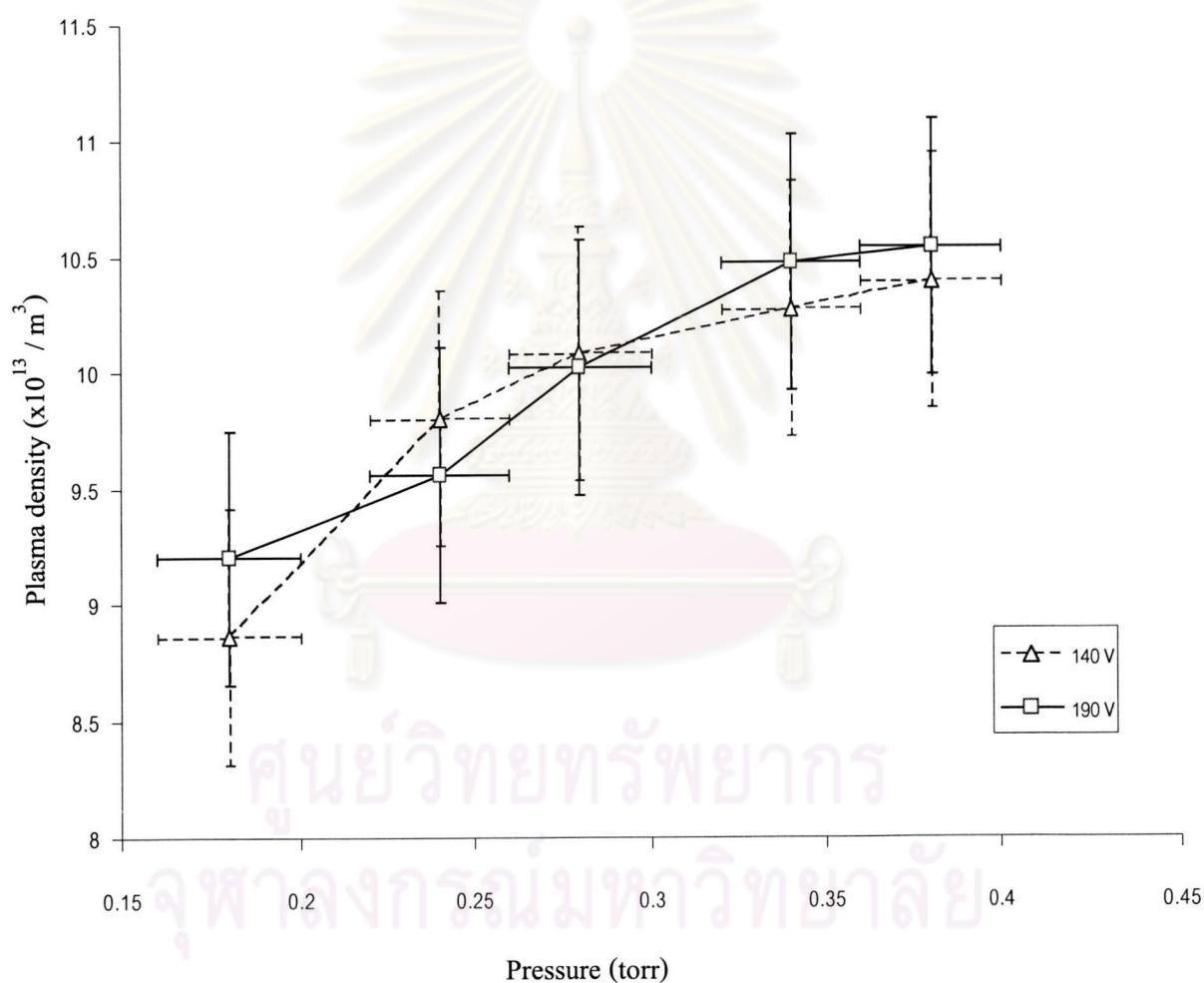
ผลการทดลองจากพลาสมาอากาศที่ปรากฏดังรูปที่ 4.5 นี้ พบว่าความหนาแน่นของพลาสมามีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อความดันเพิ่มขึ้น จำนวนอนุภาคที่จะแตกตัวก็มีมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของพลาสมาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อศักย์ดิสชาร์จมีค่าสูง ความหนาแน่นของพลาสมา ก็มีค่าสูง เพราะมีพลังงานที่จะทำให้อนุภาคแตกตัวได้มากกว่า โดยที่ความหนาแน่นของพลาสมาอากาศที่วัดในช่วงความดัน 0.2 ถึง 0.4 torr มีค่าประมาณ $(9.50 \pm 0.55) \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$

ส่วนความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความดัน ของพลาสมาอาร์กอน แสดงไว้ในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความดันของพลาสมาอาร์กอน

รูปที่ 4.6 เป็นผลการทดลองจากพลาสมาอาร์กอน ซึ่งพบว่าแนวโน้มที่เกิดขึ้นเป็นแบบเดียวกับพลาสมาอากาศกล่าวคือ ในบริเวณที่ความดันต่ำ อุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีค่าสูง และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อความดันเพิ่มขึ้น จำนวนอนุภาคยอมเพิ่มมากขึ้น เมื่อใช้พลังงานเท่าเดิมจะส่งผลให้พลังงานเฉลี่ยที่ส่งผ่านไปยังอนุภาคแต่ละตัวลดลง ซึ่งพบว่าที่ศักย์ดิสชาร์จสูงกว่า อุณหภูมิของอิเล็กตรอนจะมีค่าสูงกว่า เพราะมีการส่งผ่านพลังงานไปยังอนุภาคมากกว่า โดยเฉลี่ยแล้ว อุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ได้ในช่วงความดัน 0.2 ถึง 0.4 torr มีค่าประมาณ 2.20 ± 0.20 eV ส่วนความหนาแน่นของพลาสมาที่สัมพันธ์กัน ดูได้จากรูปที่ 4.7

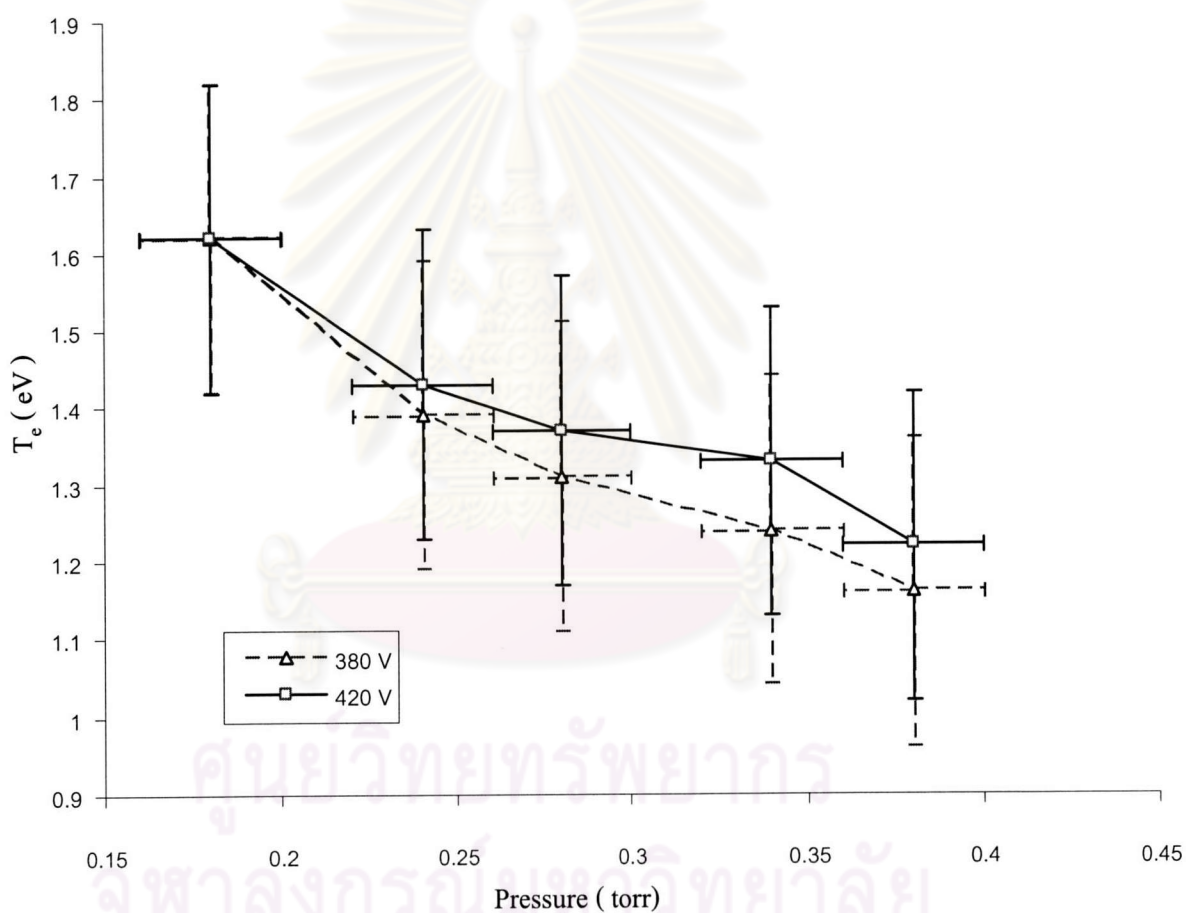


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลาสมากับความดันของพลาสมาอาร์กอน

ผลการทดลองจากพลาสมาอาร์กอนที่ปรากฏดังรูปที่ 4.7 นี้ พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับพลาสมาอากาศนั่นคือ ความหนาแน่นของพลาสมามีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เป็นเพราะที่

ความดันเพิ่มขึ้น จำนวนอนุภาคที่จะแตกตัวก็มีมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของพลาสมาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่ศักย์ดิสชาร์จมีค่าสูง ความหนาแน่นของพลาสมาที่มีค่าสูง เพราะมีพลังงานที่จะทำให้อนุภาคแตกตัวได้มากกว่า ความหนาแน่นของพลาสมาอากาศที่วัดในช่วงความดัน 0.2 ถึง 0.4 torr มีค่าประมาณ 9.20 ถึง $10.20 (\pm 0.55) \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$

ส่วนความสัมพันธ์ของศักย์พลาสมาและศักย์ลอย ที่สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้นั้น แสดงไว้ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 อุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ได้จากหัววัดเดี่ยว โดยหาจาก V_p และ V_f กับความดันของพลาสมาอากาศ

จากผลการวิเคราะห์หาอุณหภูมิของอิเล็กตรอน โดยหาจากการใช้ค่าศักย์พลาสมาและศักย์ลอย ซึ่งอ่านได้โดยตรงจากกราฟส่อกระแส-ศักย์ของหัววัดดลางมัวร์แบบเดี่ยวของพลาสมาอากาศ ดังรูปที่ 4.8 นั้น พบว่าแนวโน้มของอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความดัน มีลักษณะเดียวกับผลที่ได้จากวิธี

วิเคราะห์จากส่วนกลับของความชันดังรูปที่ 4.4 โดยที่ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ได้จากรูปที่ 4.4 และ 4.8 มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าที่ได้วิธีตามรูปที่ 4.8 มีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยคือในช่วงความดัน 0.2 ถึง 0.4 torr มีค่าประมาณ 1.20 ถึง 1.40 (± 0.20) eV

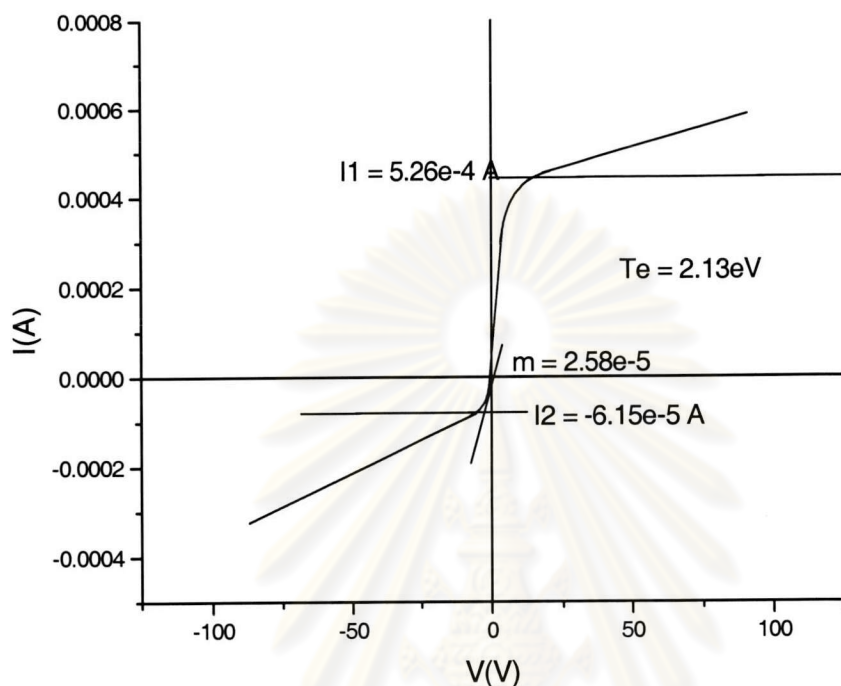
ผลของอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ได้มาจากการวิเคราะห์จากทั้งสองวิธี ดังรูปที่ 4.4 และ 4.8 นั้น พบว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ได้จากทั้งสองวิธีนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน นั้นหมายความว่าเราสามารถวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้ทั้งสองวิธี ซึ่งหากใช้ทั้งสองวิธีนี้ควบคู่กัน ก็น่าจะส่งผลให้การวิเคราะห์หาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาด้วยหัววัดเดียว มีความแม่นยำ และมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

ส่วนผลการวิเคราะห์อุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ได้จากหัววัดลงมัวร์แบบคู่ นั้น จะแสดงไว้ในหัวข้อ 4.2.1

4.2 หัววัดคู่

เมื่อนำหัววัดแบบคู่ที่สร้างตามแบบในรูปที่ 3.10 ใส่เข้าไปในระบบพลาสมาดังรูปที่ 2.6 แล้วจึงปรับเปลี่ยนค่าไบแอสศักย์ที่ให้แก่อิเล็กตรอน บันทึกลักษณะที่ได้จากหัววัดที่สัมพันธ์กับศักย์ไบแอสนั้น ขั้นตอนนี้จะเหมือนกับวิธีที่ใช้กับหัววัดแบบเดี่ยว เพียงแต่จะมีความแตกต่างกันในส่วนของวงจรที่ใช้ไบแอสหัววัด กล่าวคือสำหรับหัววัดเดียวนั้น ในวงจรไบแอสจะต่อร่วมกับกราวด์อยู่ ในขณะที่สำหรับวงจรไบแอสของหัววัดคู่นั้นจะมีลักษณะลอยไม่ต่อกราวด์ ความแตกต่างนี้ แสดงให้เห็นแล้วในรูปที่ 2.4 และ 2.6 จากนั้นนำข้อมูลของกระแสและศักย์ต่าง ๆ ที่บันทึกได้มาเขียนรวมกัน จะได้กราฟต่อกระแส-ศักย์ที่มีลักษณะเฉพาะตัวแบบหนึ่ง เรียกว่ากราฟลักษณะเฉพาะของหัววัดลงมัวร์แบบหัววัดคู่ ซึ่งจะมีลักษณะดังตัวอย่างผลในรูปที่ 4.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 กราฟส่อกระแส-ศักย์ที่ได้จากหัววัดแบบคู่

ตัวอย่างกราฟส่อกระแส-ศักย์ที่ได้ดังรูปที่ 4.9 นี้ ได้จากพลาสมาอากาศที่ความดัน 0.24 torr โดยใช้ ศักย์ดิสชาร์จ 300 V ตำแหน่งของหัววัดคือ +2 cm ไปทางขวาจากแคโทด ในขณะที่ระยะห่างของ ขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 3.5 cm จะเห็นว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับกราฟที่ควรจะเป็นตาม ทฤษฎีซึ่งได้กล่าวไปแล้วในรูปที่ 2.7 ดังนั้นโดยอาศัยวิธีวิเคราะห์ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 จะทำ ให้เราสามารถหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้

เมื่อ I_1 ในรูปที่ 4.9 คือ กระแสไอออนอิมิตต์ที่หัววัด 1

I_2 ในรูปที่ 4.9 คือ กระแสไอออนอิมิตต์ที่หัววัด 2

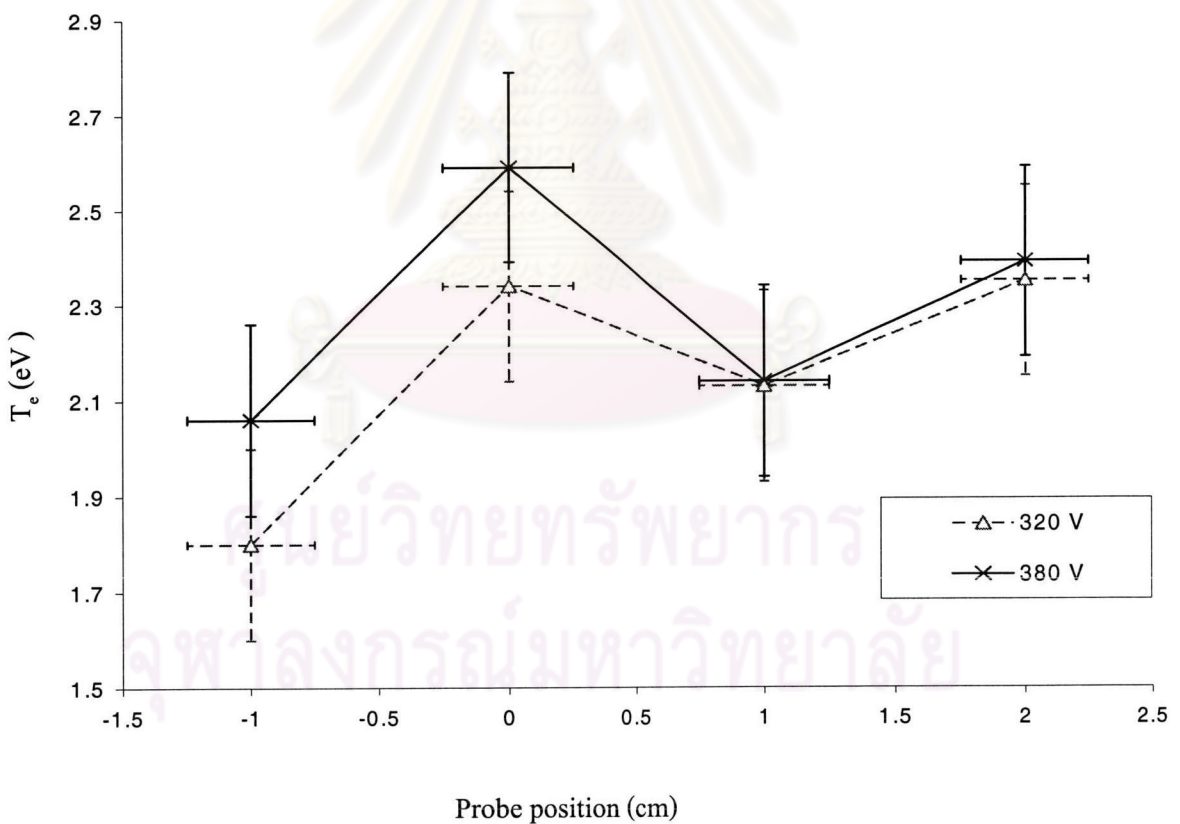
เมื่อหาความชันของกราฟที่ตำแหน่งซึ่งกระแสมีค่าเป็นศูนย์ และหาค่ากระแสไอออนอิมิตต์ที่หัววัด ทั้ง 2 ซึ่งอ่านได้โดยตรงจากกราฟ เพื่อนำไปวิเคราะห์ตามสมการที่ 2.34 แล้วพบว่า ค่าอุณหภูมิของ อิเล็กตรอนในพลาสมาอากาศที่วัดได้โดยหัววัดกลางมีร์แบบคู่ในขณะนั้นคือ 2.13 ± 0.20 eV ส่วน ความหนาแน่นของพลาสมา คำนวณตามสมการที่ 2.19 โดยเลือกกระแสไอออนอิมิตต์ในช่วงลบ

มาก ๆ เช่นเดียวกับกรณีของหัววัดเดี่ยว คือที่ -80 V ซึ่งจะได้ค่าความหนาแน่นของพลาสมาเป็น $(7.06 \pm 0.55) \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$

สำหรับการวิเคราะห์หาอุณหภูมิอิเล็กตรอน และความหนาแน่นของพลาสมา สำหรับข้อมูลชุดอื่น ๆ ก็ใช้วิธีการเดียวกันนี้

4.2.1 ผลการวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาโดยหัววัดคู่

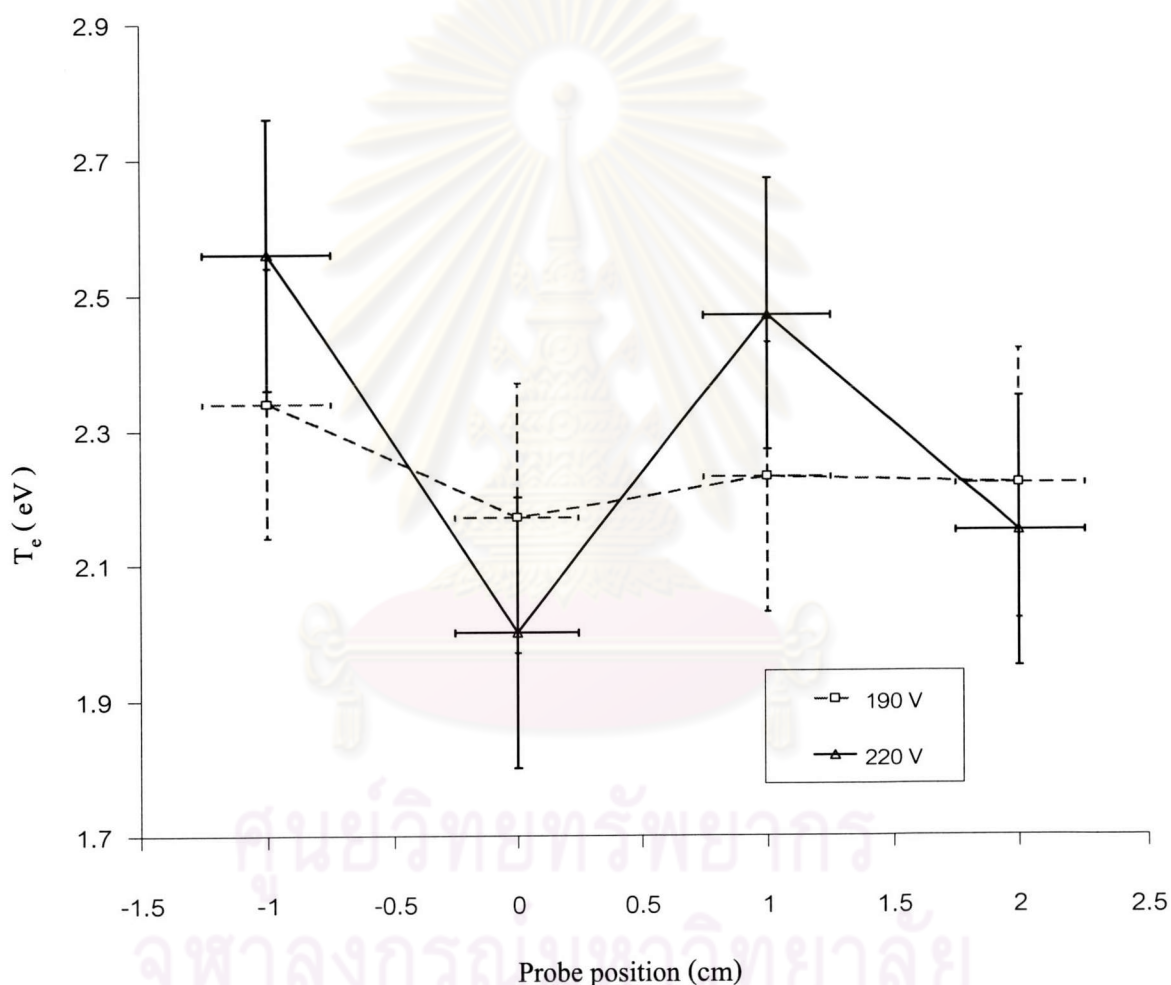
ในการวัดค่าพารามิเตอร์ของพลาสมา โดยหัววัดคู่ ได้มีการเปลี่ยนเงื่อนไขต่าง ๆ ของพลาสมา คือ ความดัน สักยด์ิสชาร์จ ชนิดของก๊าซ และตำแหน่งของหัววัด เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของพลาสมา ซึ่งผลการทดลองที่ได้ มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับตำแหน่งหัววัดของพลาสมาอากาศ

รูปที่ 4.10 นี้ เป็นผลการทดลองของพลาสมาอากาศที่ความดัน 0.18 torr ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน มีการแกว่งในช่วงกว้างจากบริเวณหลังแคโทด (position<0) และมีแนวโน้มที่จะมีการแกว่งลดลงในช่วงระยะ +1 cm ขึ้นไป ทั้งนี้เพราะในช่วงระยะ +1 cm นั้นพลาสมาอยู่ในช่วงการเรืองแสงแบบปกติ ซึ่งพลาสมาในช่วงนี้มีเสถียรภาพมากกว่าด้านหลังแคโทดนั่นเอง ดังจะเห็นได้ในภาคผนวก

ส่วนผลของตำแหน่งการวัดสำหรับพลาสมาอาร์กอน แสดงไว้ดังรูปที่ 4.11

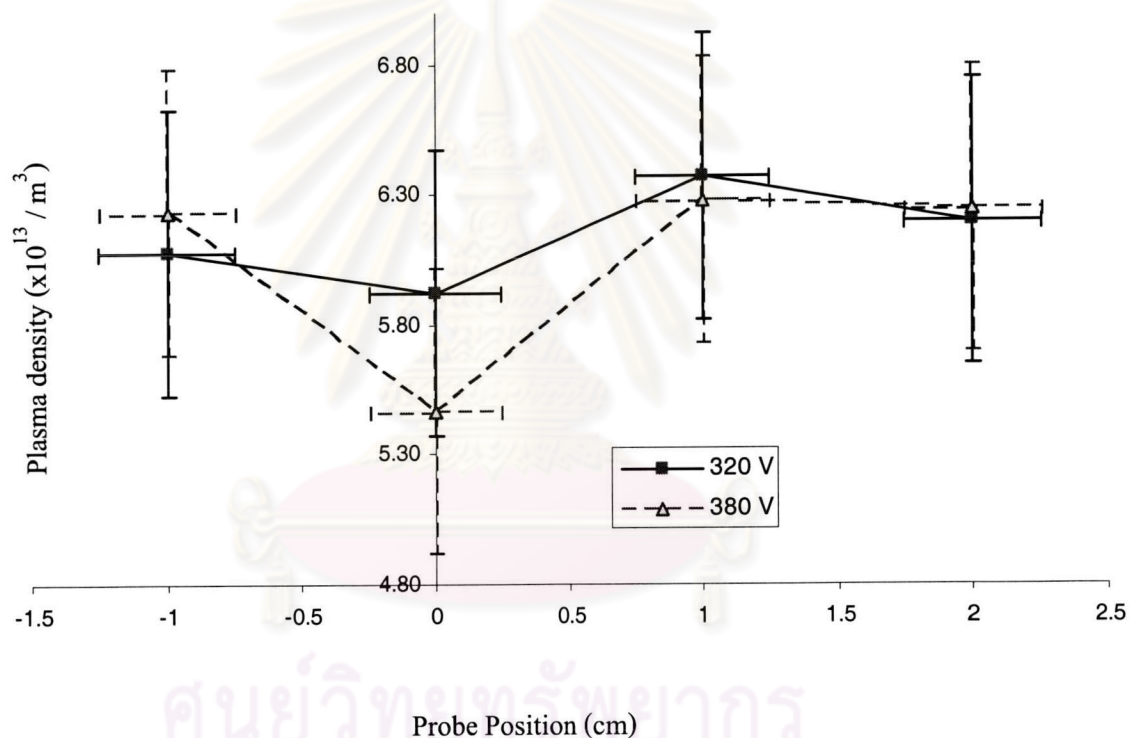


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับตำแหน่งหัววัดของพลาสมาอาร์กอน

รูปที่ 4.11 นี้ เป็นผลการทดลองของพลาสมาอาร์กอนที่ความดัน 0.18 torr ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน มีการแกว่งในช่วงกว้างจากบริเวณหลังแคโทด (position<0) และมีแนวโน้มที่จะมีการ

แกว่งลดลงในช่วงระยะ +1 cm ขึ้นไป ทั้งนี้เพราะในช่วงระยะ +1 cm นั้นพลาสมาอยู่ในช่วงการเรืองแสงแบบปกติ ซึ่งพลาสมาในช่วงนี้มีเสถียรภาพมากกว่าด้านหลังแคโทดนั่นเอง ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับที่พบในพลาสมาอากาศเช่นกัน โดยค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่พบทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกันคือ 2.30 ± 0.20 eV

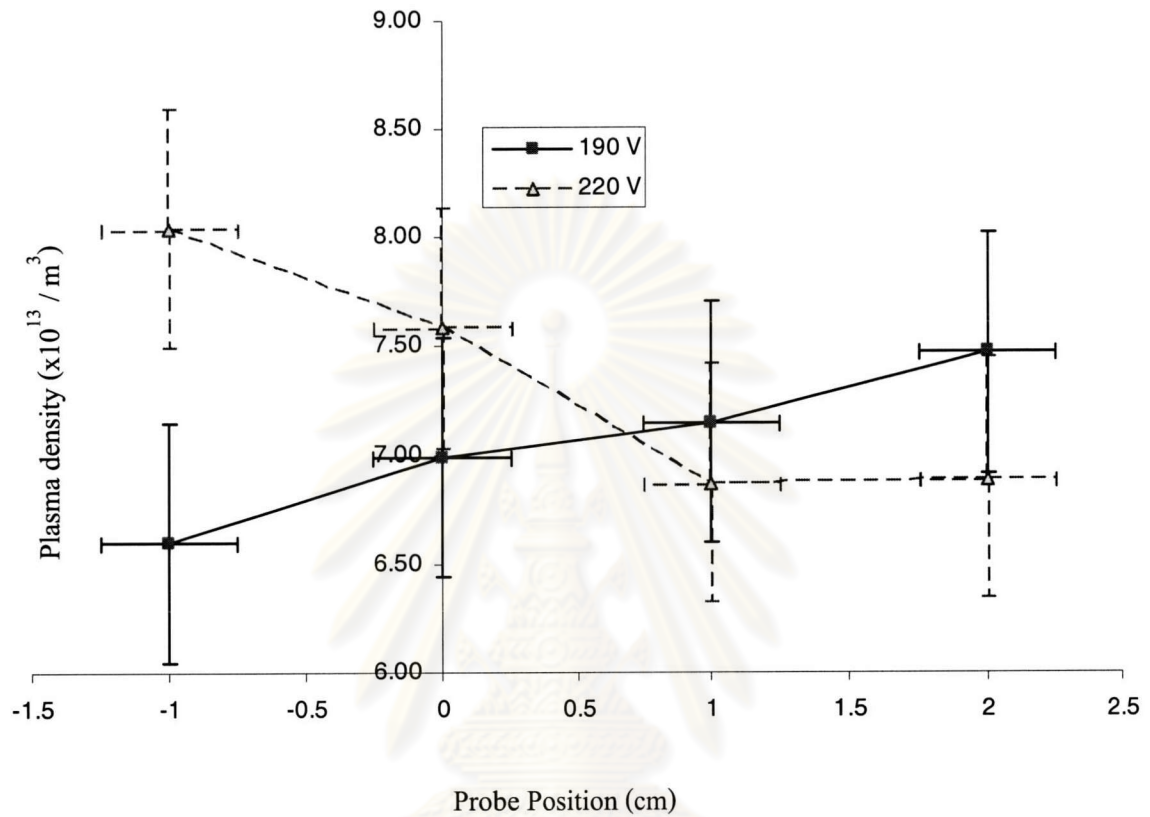
ส่วนความหนาแน่นของพลาสมาที่ได้จากหัววัดคู่ เมื่อนำมาแจกแจงตามตำแหน่งของหัววัด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพลาสมาอากาศกับตำแหน่งหัววัด

รูปที่ 4.12 นี้ เป็นผลการทดลองของพลาสมาอากาศที่ความดัน 0.18 torr ซึ่งพบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีการแกว่งในช่วงกว้างจากบริเวณหลังแคโทด (positon < 0) และมีแนวโน้มที่จะมีการแกว่งลดลงในช่วงระยะ +1 cm ขึ้นไป ทั้งนี้เพราะในช่วงระยะ +1 cm นั้นพลาสมาอยู่ในช่วงการเรืองแสงของลำสว่างด้านซ้ายบวค ซึ่งพลาสมาในช่วงนี้มีเสถียรภาพมากกว่าด้านหลังแคโทด ดังจะเห็นได้ในภาคผนวก ง โดยมีค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของพลาสมาเป็น $(6.20 \pm 0.55) \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$

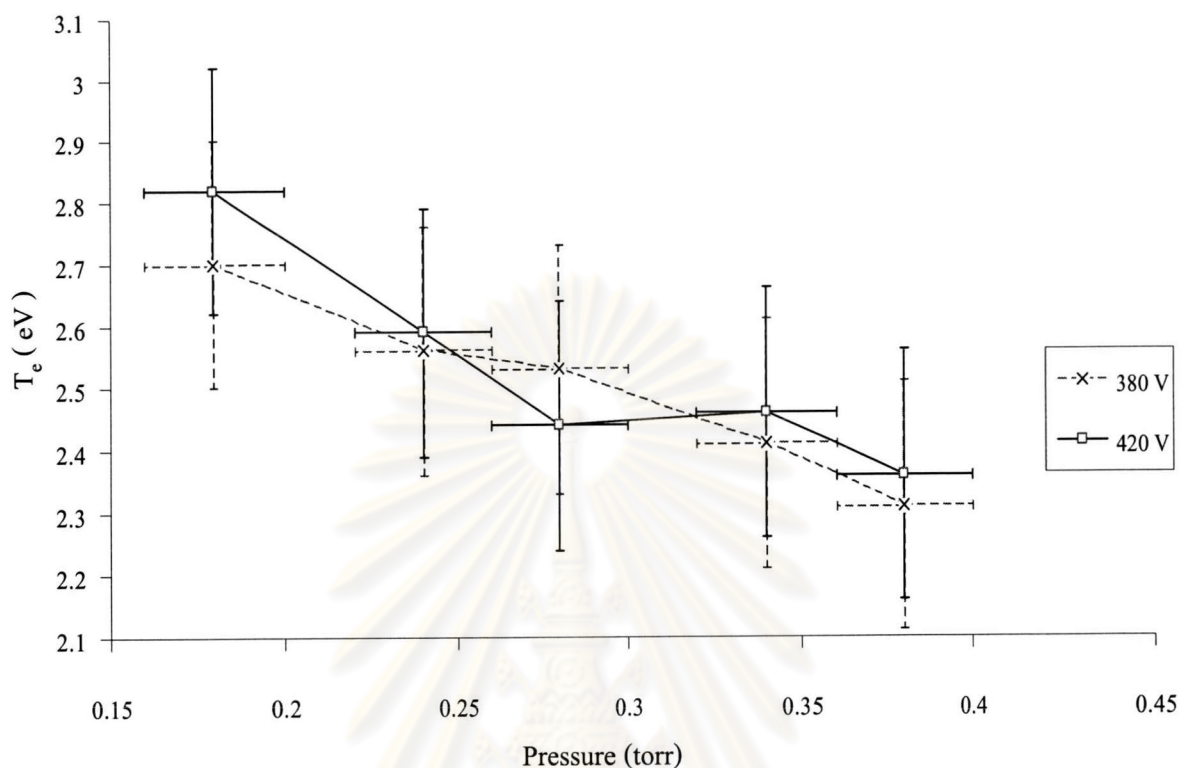
ส่วนผลของตำแหน่งการวัดสำหรับพลาสมาอาร์กอน แสดงไว้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพลาสมาอาร์กอนกับตำแหน่งหัววัด

รูปที่ 4.13 นี้ เป็นผลการทดลองของพลาสมาอาร์กอนที่ความดัน 0.18 torr ซึ่งพบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีการแกว่งในช่วงกว้างจากบริเวณหลังแคโทด (position < 0) และมีแนวโน้มที่จะมีการแกว่งลดลงในช่วงระยะ +1 cm ขึ้นไป เช่นเดียวกับกรณีของพลาสมาอากาศ ทั้งนี้เพราะในช่วงระยะ +1 cm นั้นพลาสมาอยู่ในช่วงการเรืองแสงแบบปกติ ซึ่งพลาสมาในช่วงนี้มีเสถียรภาพมากกว่าด้านหลังแคโทด โดยมีค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของพลาสมาเป็น $(7.25 \pm 0.55) \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ ซึ่งมีค่ามากกว่าของอากาศเล็กน้อย

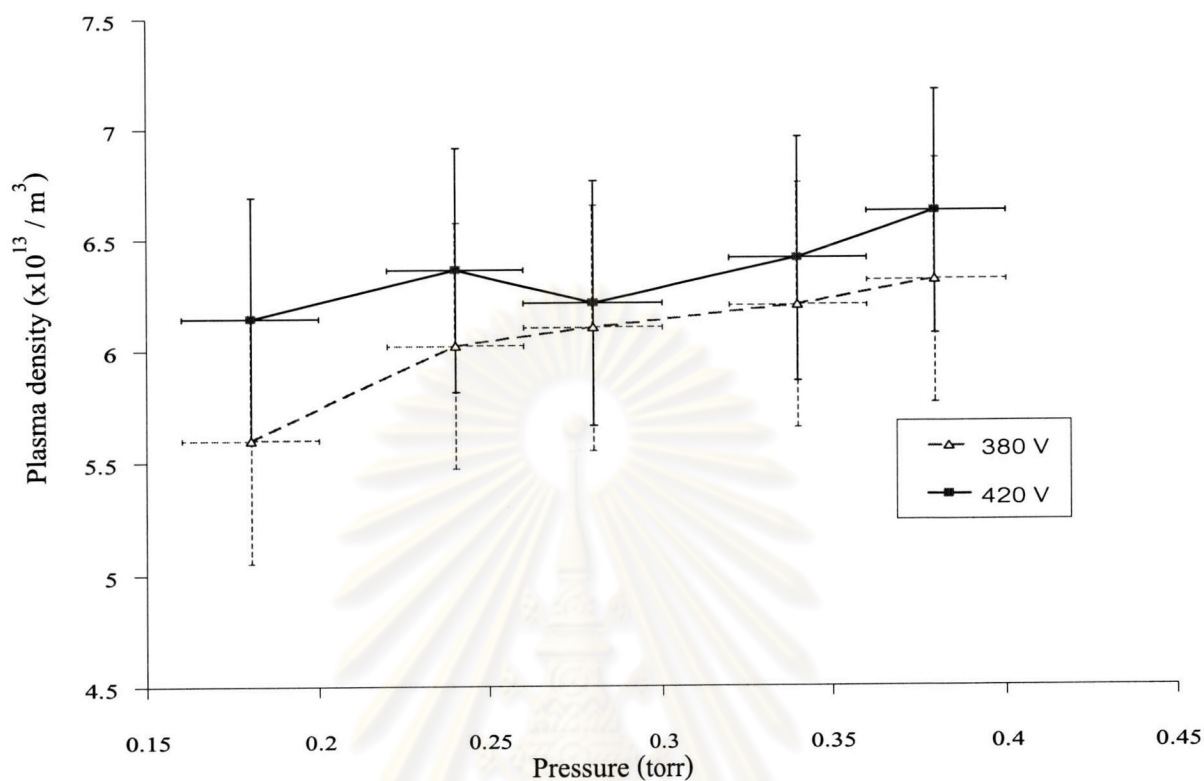
ส่วนผลของอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความดันสำหรับพลาสมาอากาศ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความดันของพลาสมาอากาศ

จากรูปที่ 4.14 นั้น เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความดัน โดยใช้พลาสมาอากาศเป็นตัวทดสอบ ซึ่งผลที่ได้พบว่า อุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เพราะที่ความดันสูงอนุภาคมีจำนวนมากขึ้น เมื่อใช้พลังงานเท่าเดิม พลังงานเฉลี่ยต่ออนุภาคจึงมีค่าลดลง เช่นเดียวกับผลที่ได้จากหัววัดเดี่ยว โดยอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ได้จากพลาสมาอากาศ ในช่วงความดัน 0.2 ถึง 0.35 torr มีค่าอยู่ในช่วง 2.35 ถึง 2.65 (± 0.20) eV

ส่วนผลของความหนาแน่นของพลาสมาอากาศกับความดัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.15

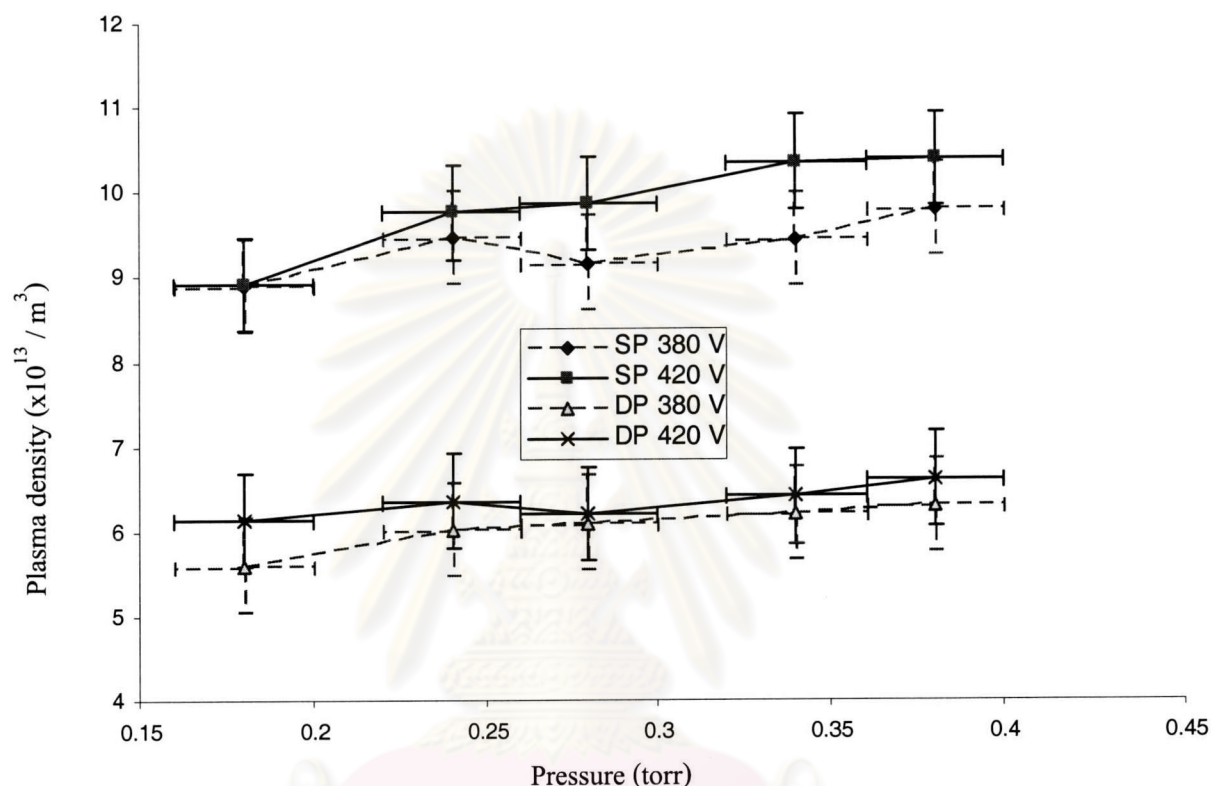


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพลาสมาอากาศกับความดัน

จากรูปที่ 4.15 นั้น เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพลาสมากับความดัน โดยใช้พลาสมาอากาศเป็นตัวทดสอบ ซึ่งผลที่ได้พบว่า ความหนาแน่นของพลาสมามีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เพราะที่ความดันสูงอนุภาคมีจำนวนมากขึ้น จำนวนอนุภาคที่แตกตัวได้จึงมีเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลที่ได้จากหัววัดเดียว โดยความหนาแน่นของพลาสมาอากาศที่ได้ในช่วงความดัน 0.2 ถึง 0.35 torr มีค่าอยู่ในช่วง 5.80 ถึง $6.40 (\pm 0.55) \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$

4.3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างหัววัดเดี่ยวและคู่

ในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากหัววัดเดี่ยวและหัววัดคู่ โดยพิจารณาผ่านค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของพลาสมาที่วิเคราะห์ได้ ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กัน



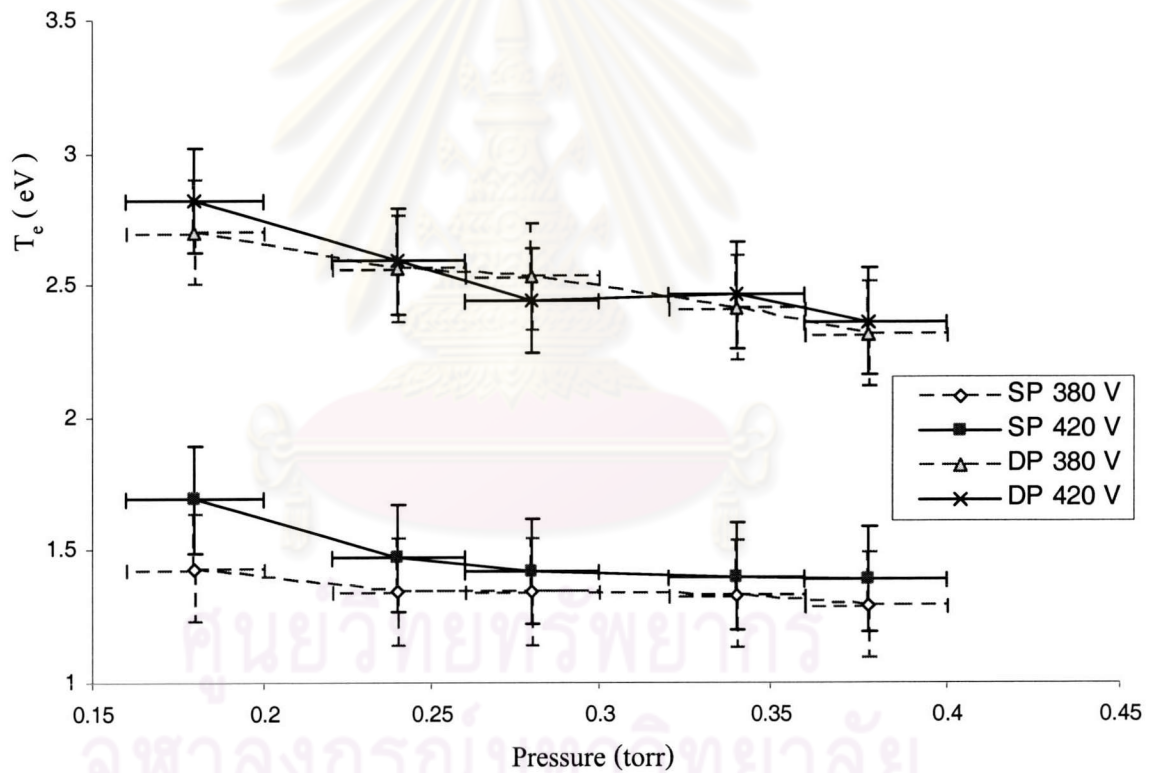
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพลาสมาอากาศกับความดันระหว่างหัววัดคู่และเดี่ยว

โดยที่ SP 380 V	คือผลจากหัววัดเดี่ยว ที่ศักย์ดิสชาร์จคงที่ 380 V
SP 420 V	คือผลจากหัววัดเดี่ยว ที่ศักย์ดิสชาร์จคงที่ 420 V
DP 380 V	คือผลจากหัววัดคู่ ที่ศักย์ดิสชาร์จคงที่ 380 V
DP 420 V	คือผลจากหัววัดคู่ ที่ศักย์ดิสชาร์จคงที่ 420 V

รูปที่ 4.16 เป็นผลที่ได้จากการศึกษาเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลาสมาอากาศที่ได้จากหัววัดกลางมัวร์แบบเดี่ยวและคู่ พบว่าโดยเฉลี่ยแล้วในกรณีตัวอย่างนี้ ความหนาแน่นของพลาสมาอากาศที่ได้จากหัววัดเดี่ยวมีค่าประมาณ 9.20 ถึง 9.80 (± 0.55) $\times 10^{13}$ m^{-3} ส่วนความหนาแน่นของพลาสมาอากาศที่ได้จากหัววัดคู่มีค่าประมาณ 5.80 ถึง 6.20 (± 0.55) $\times 10^{13}$ m^{-3} นั่นคือมีค่าต่างกันประมาณ

$3.50 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการวิเคราะห์อุณหภูมิของอิเล็กตรอนจากกราฟส่อกระแส-ศักย์จากหัววัดคู่ที่ได้จากการทดลองนี้ ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกที่ต้องกระทำในการคำนวณหาความหนาแน่นของพลาสมานั้น พบว่ากระทำได้ยาก เพราะอุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีค่าน้อย ดังที่กล่าวมาแล้วในส่วนของทฤษฎีว่าหัววัดแบบนี้เหมาะกับพลาสมาที่มีพลังงานสูง หรือระบบพลาสมาที่หาจุดอ้างอิงศักย์ได้ยาก เช่นระบบพลาสมาที่เกิดจากคลื่นวิทยุ แต่ไม่ใช่ระบบที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ซึ่งพลาสมามีพลังงานต่ำและหาจุดอ้างอิงศักย์ได้ง่าย ซึ่งในกรณีนี้หัววัดแบบเดี่ยวมีความเหมาะสมมากกว่า ดังนั้นสำหรับในการทดลองครั้งนี้การใช้หัววัดแบบคู่จึงอาจจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้มากกว่าวิธีที่ใช้หัววัดลงมัวร์แบบหัววัดเดี่ยว

ส่วนค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่สัมพันธ์กับความดัน แสดงไว้ในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิเล็กตรอนกับความดันของพลาสมาอากาศระหว่างหัววัดคู่และเดี่ยว

โดยที่ SP 380 V	คือผลจากหัววัดเดี่ยว ที่ศักย์ดิสชาร์จคงที่ 380 V
SP 420 V	คือผลจากหัววัดเดี่ยว ที่ศักย์ดิสชาร์จคงที่ 420 V
DP 380 V	คือผลจากหัววัดคู่ ที่ศักย์ดิสชาร์จคงที่ 380 V
DP 420 V	คือผลจากหัววัดคู่ ที่ศักย์ดิสชาร์จคงที่ 420 V

จากรูปที่ 4.17 พบว่าสำหรับผลที่ได้จากหัววัดเดี่ยว อุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีแนวโน้มที่จะลดลง เมื่อความดันเพิ่มขึ้น เป็นเพราะเมื่อความดันเพิ่มขึ้น จำนวนอนุภาคภายในพลาสมาจะมีจำนวนมากขึ้น ในขณะที่ศักย์ดิสชาร์จคงที่ ส่งผลให้พลังงานที่ให้แก่อนุภาคโดยเฉลี่ยลดลง จึงส่งผลให้อุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาลดลงไป สำหรับกรณีของหัววัดคู่นั้น ก็พบการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน โดยที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอนของพลาสมาอากาศที่ได้จากหัววัดคู่มีค่าประมาณ 2.50 ถึง 2.80 (± 0.20) eV ส่วนอุณหภูมิของอิเล็กตรอนของพลาสมาอากาศที่ได้จากหัววัดเดี่ยวมีค่าประมาณ 1.40 ถึง 1.60 (± 0.20) eV ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากหัววัดคู่มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากหัววัดเดี่ยวประมาณ 1.15 eV ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าของอุณหภูมิอิเล็กตรอนจากหัววัดคู่สำหรับการทดลองครั้งนี้ทำได้ยาก จึงอาจเกิดความผิดพลาดได้มาก ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนท้ายของรูปที่ 4.16

ส่วนค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่สัมพันธ์กับความหนาแน่นของพลาสมาอากาศ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

Pressure (± 0.02 torr)	Discharge voltage (± 10 V)	T_e (± 0.20 eV)	Plasma density ($\pm 0.55 \times 10^{13}/m^3$)
0.18	447	2.82	6.14×10^{13}
0.24	417	2.56	6.02×10^{13}
0.28	350	2.53	6.1×10^{13}
0.34	317	2.41	6.2×10^{13}
0.38	314	2.31	6.31×10^{13}

ตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของพลาสมาอากาศ ที่กระแสดิสชาร์จ 19 mA

จากตารางที่ 4.1 อุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างชัดเจน เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของพลาสมามีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ส่วนศักย์ดิสชาร์จมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เพราะที่ความดันมากขึ้นในช่วงที่ทำการทดลองนั้น จำนวนอนุภาคมีมากส่งผลให้การแตกทำได้ง่ายขึ้นตามไปด้วย

4.4 อภิปรายและวิจารณ์ผลการวิจัย

จากการวิจัยในครั้งนี้พบว่า โดยค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่พบในระบบพลาสมาที่เกิดจากดิสชาร์จเรืองแสงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลองนี้อยู่ที่ประมาณ 1.5 eV สำหรับหัววัดเดี่ยว ซึ่งได้ใกล้เคียงกับ Hoong [21] ซึ่งทำการศึกษาพลาสมาจากระบบดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงเหมือนกัน และ 2.4 eV สำหรับหัววัดคู่ ค่าที่ได้นี้ต่ำกว่าระบบพลาสมาดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ของ Wei [14] ซึ่งได้ T_e ถึง 28 eV อาจเป็นเพราะระบบที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ สามารถสร้างพลาสมาขึ้นมาได้ โดยใช้ศักย์ไม่สูงมาก คือประมาณ 200 V ดังนั้นพลังงานที่ส่งผ่านไปยังพลาสมาจึงมีค่าไม่สูงเช่นเดียวกัน

สำหรับผลการเปรียบเทียบของหัววัดคู่และหัววัดเดี่ยวนั้นพบว่า อุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ได้จากหัววัดเดี่ยวและหัววัดคู่มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ได้จากระบบนี้ มีขนาดประมาณ 2 eV

ส่วนความหนาแน่นของพลาสมาในระบบพลาสมาที่เกิดจากดิสชาร์จเรืองแสงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองนี้ พบว่าความหนาแน่นของพลาสมามีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อความดันและศักย์ไฟฟ้าแตกตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากอัตราการแตกตัวที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังส่งผลให้ความเข้มของการเรืองแสงเพิ่มมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของพลาสมาในระบบที่ใช้ทดลองนี้ มีค่าอยู่ในระดับของ 10^{14} m^{-3}