

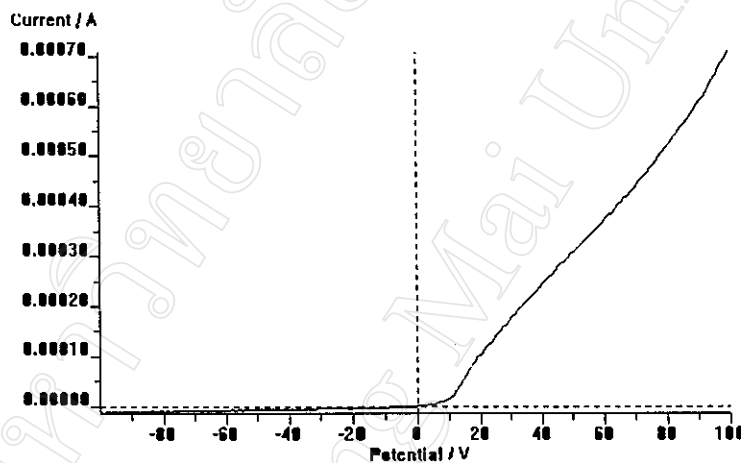
บทที่ 4

การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง

4.1 หัววัด Langmuir

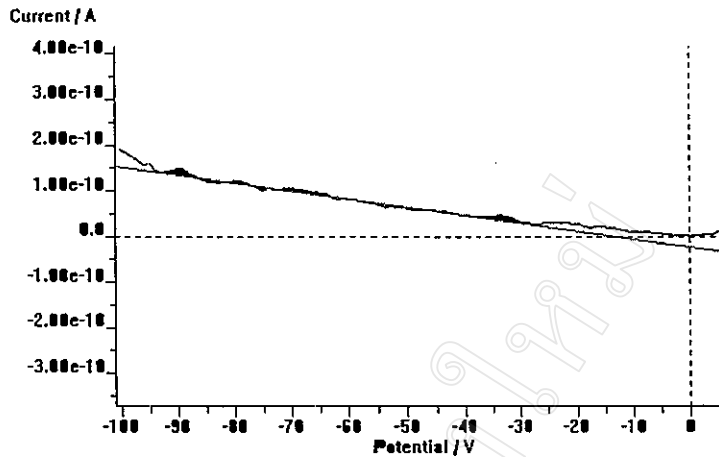
4.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการใช้หัววัด Langmuir วัดกระแสจากพลาสมาอาร์กอนโดยเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าของหัววัดตั้งแต่ -100 V ถึง $+100\text{ V}$ จะได้ I-V characteristic ที่มีลักษณะดังรูป 4.1



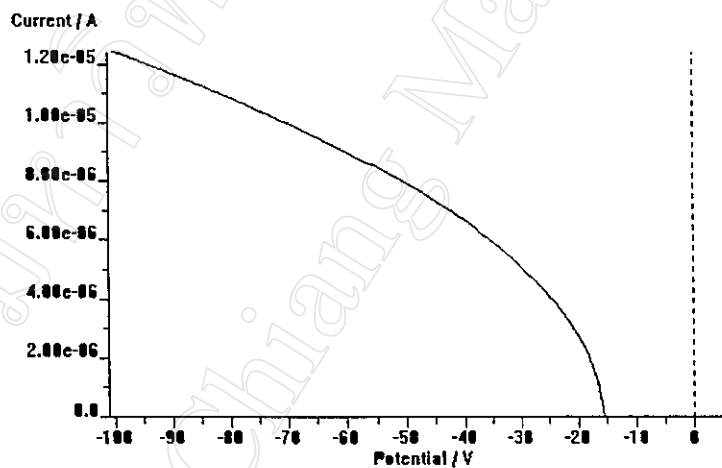
รูป 4.1 I-V characteristic ของพลาสมาอาร์กอน

การหาค่า n_e ทำได้โดยยกกำลังสองของกระแสเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของหัววัด แล้วหาความชันของเส้นตรงที่สอดคล้องกับกระแสยกกำลังสองในบริเวณกระแสไอออนบวกอิ่มตัว ความชันที่หาได้จะนำไปคำนวณค่า n_e จากสมการ (2.81)



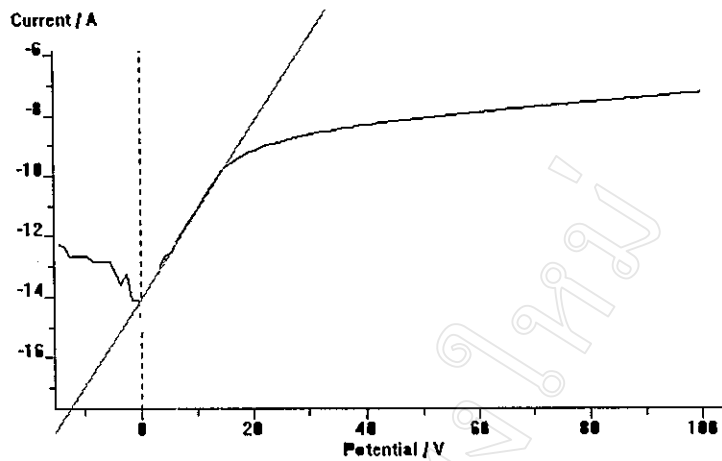
รูป 4.2 เส้นตรงที่สอดคล้องกับกระแสยกกำลังสองในบริเวณกระแสไอออนบวกอิมิตัว

สำหรับการหา T_e จะต้องลบกระแสไอออนบวกออกจากกระแสรวมใน I-V characteristic ซึ่งทำได้โดยการถอดกราฟที่สองของเส้นตรงซึ่งสอดคล้องกับกระแสยกกำลังสอง (เส้นตรงแสดงความชันในรูป 4.2) จากนั้นนำค่านี้ไปลบออกจากกระแสรวม I-V characteristic จะเหลือเฉพาะค่ากระแสอิเล็กตรอนเท่านั้น



รูป 4.3 กราฟที่สองของเส้นตรงที่สอดคล้องกับ I^2 จาก I-V characteristic

ต่อไปกระทำการหาค่าที่สัมพันธ์กับกระแสอิเล็กตรอน จะปรากฏเส้นตรงขึ้นในบริเวณ transition ซึ่งความชันของเส้นตรงที่ตำแหน่งนี้จะนำมาคำนวณหา T_e ตามสมการ (2.84)

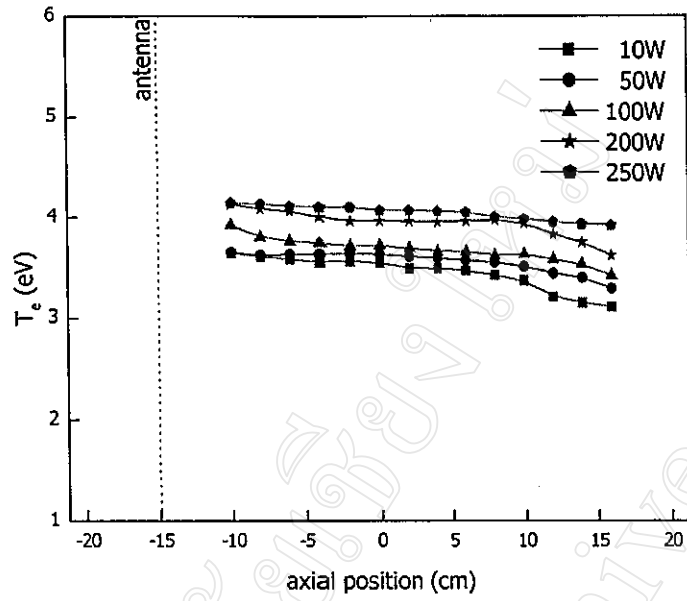


รูป 4.4 ลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอน ซึ่งปรากฏเส้นตรงในบริเวณ transition

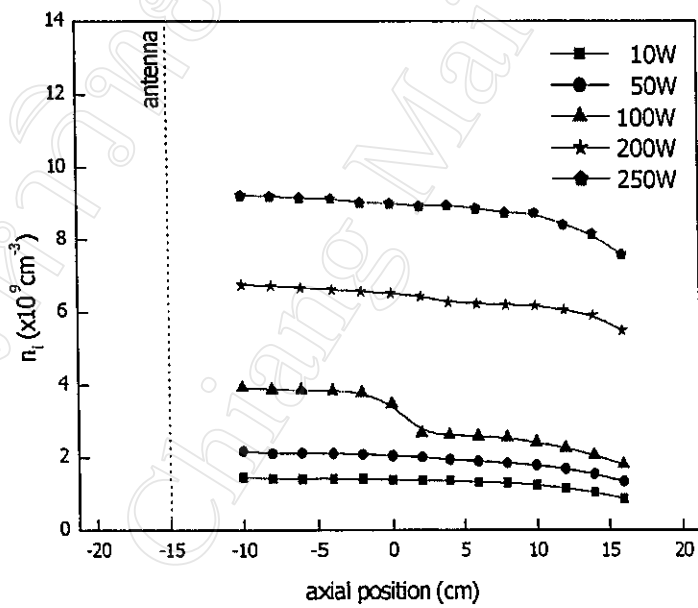
4.1.2 ผลการทดลอง

โดยการวัดกระแสพลาสมาของหัววัด Langmuir ที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกนและแนวรัศมีของแชมเบอร์ พบว่าการกระจายของ T_e และ n_e ภายในแชมเบอร์ที่ความดันต่างๆ ภายใต้การแปรค่ากำลังความถี่คลื่นวิทยุ 13.56 MHz แสดงดังรูป 4.5 – รูป 4.10

ก. แนวแกนของแชมเบอร์

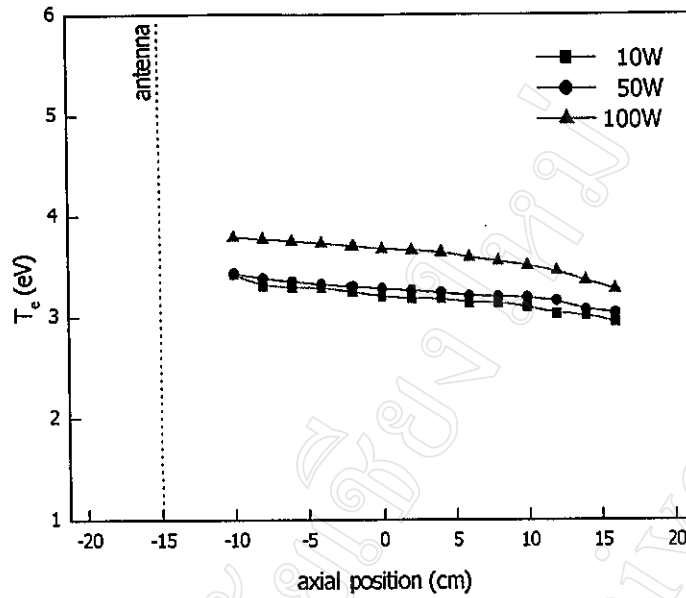


(ก)

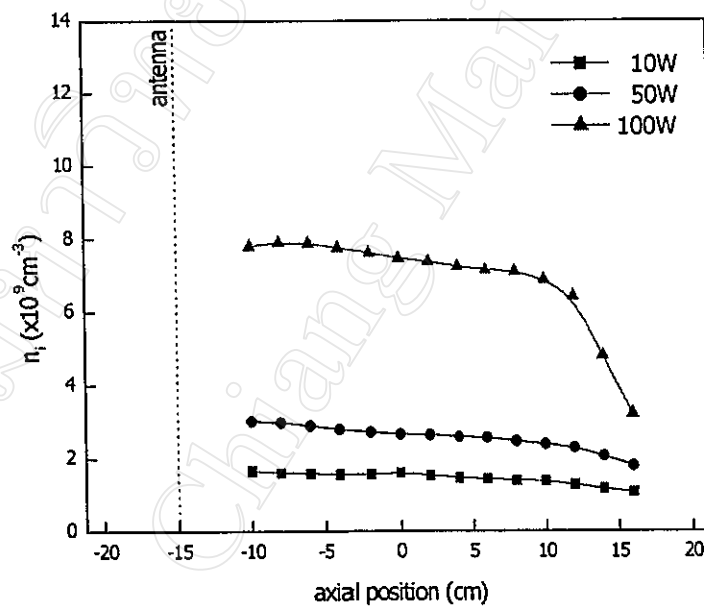


(ข)

รูป 4.5 การกระจายของ (ก) T_e และ (ข) n_e ตามแนวแกนแคมเบอร์ที่ความดันก๊าซ 0.5 mTorr

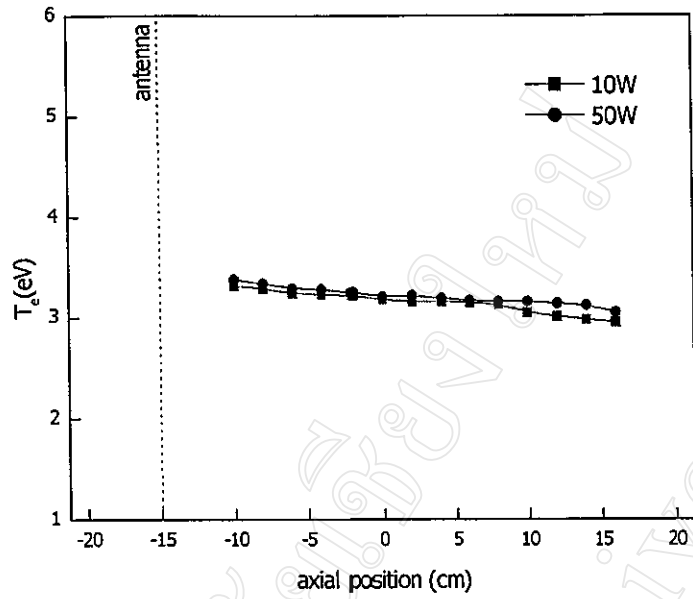


(ก)

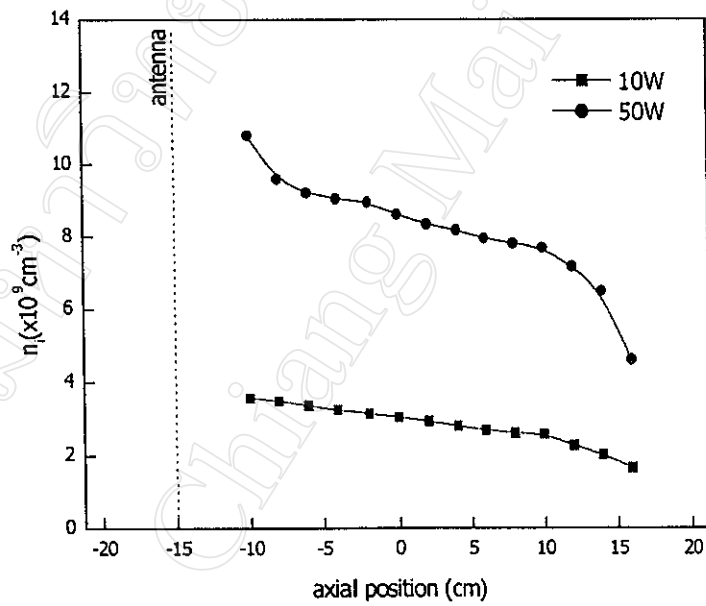


(ข)

รูป 4.6 การกระจายของ (ก) T_e และ (ข) n_e ตามแนวแกนของแชนเบอร์ที่ความดันก๊าซ 1.0 mTorr



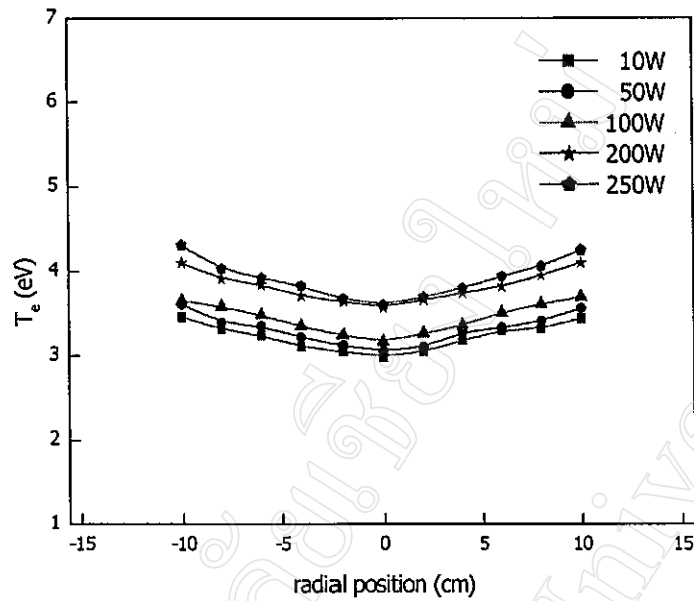
(ก)



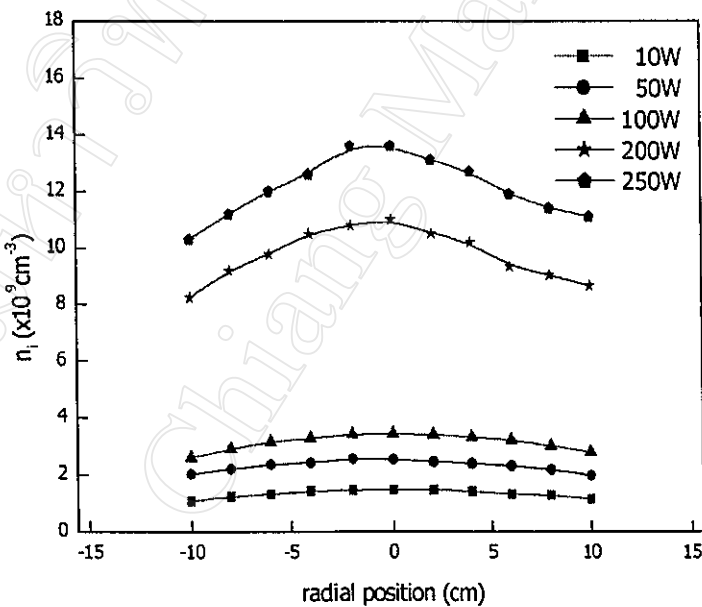
(ข)

รูป 4.7 การกระจายของ (ก) T_e และ (ข) n_e ตามแนวแกนของแชนเบอร์ที่ความดันก๊าซ 3.0 mTorr

ข. แนวรัศมี ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของแชมเบอร์

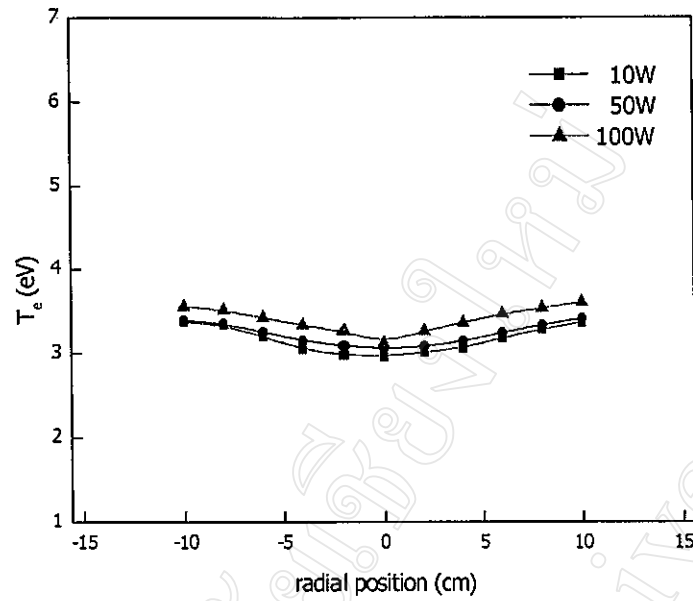


(ก)

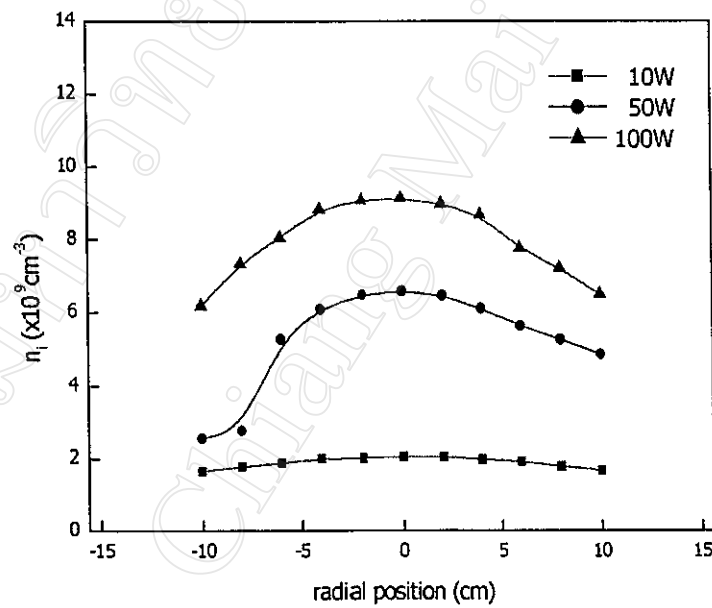


(ข)

รูป 4.8 การกระจายของ (ก) T_e และ (ข) n_e ตามแนวรัศมีของแชมเบอร์ที่ความดันก๊าซ 0.5 mTorr

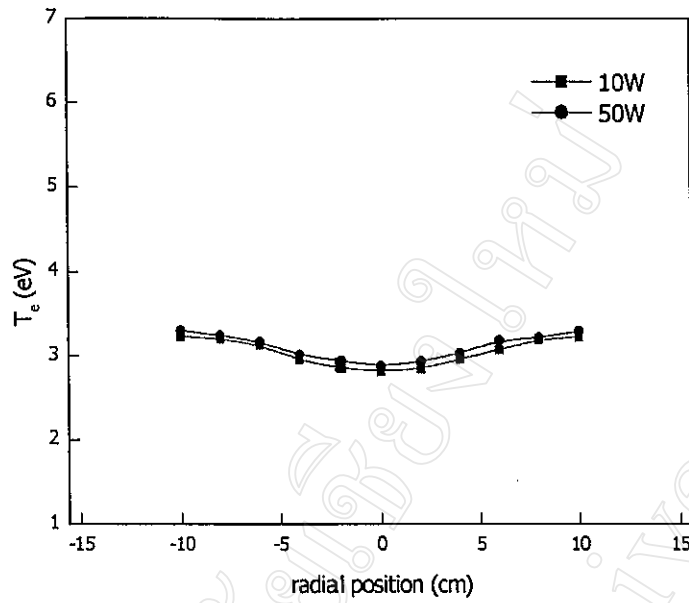


(ก)

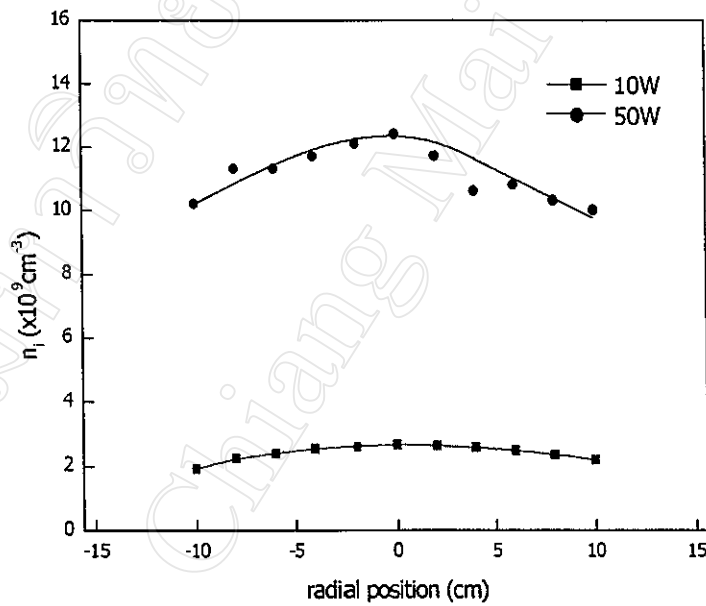


(ข)

รูป 4.9 การกระจายของ (ก) T_e และ (ข) n_e ตามแนวรัศมีของแคมเบอร์ที่ความดันก๊าซ 1.0 mTorr

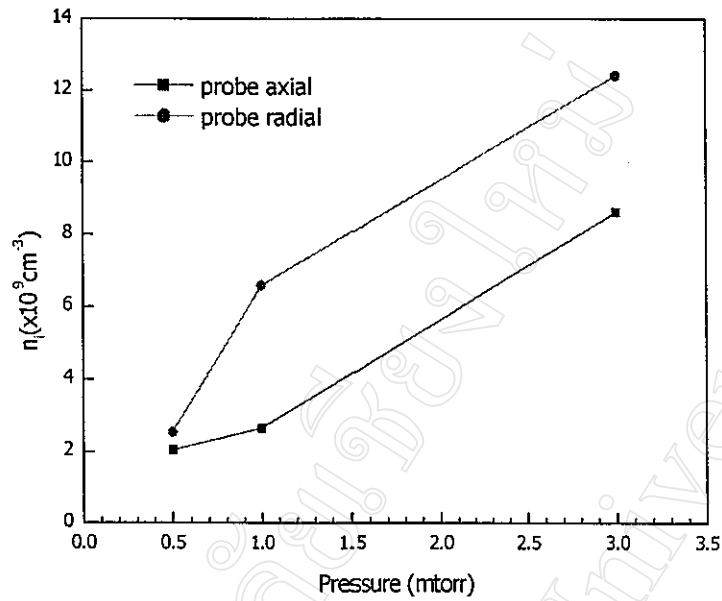


(ก)

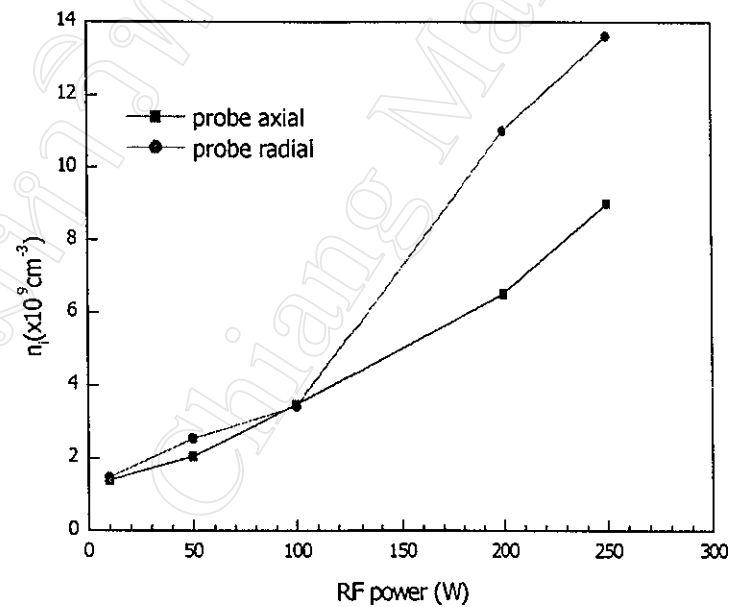


(ข)

รูป 4.10 การกระจายของ(ก) T_e และ(ข) n_e ตามแนวรัศมีของแคมเบอร์ที่ความดันก๊าซ 3.0 mTorr



(ก)



(ข)

รูป 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง n_i และ (ก)ความดันก๊าซ โดยกำลังคลื่นวิทยุมีค่า 50 W (ข)กำลังคลื่นวิทยุ โดยความดันก๊าซมีค่า 0.5 mTorr

จากรูปแสดงการกระจายของ T_e และ n_i ตามแนวแกนของแชมเบอร์ที่ความดันก๊าซและกำลังคลื่นวิทยุต่างๆนั้น พบว่า T_e มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะที่เข้าใกล้ antenna โดยที่ความดันก๊าซเท่ากับ 0.5 mTorr และกำลังคลื่นวิทยุ 50 W T_e มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.3 eV เป็น 3.7 eV (เพิ่มขึ้น 0.1 เท่า) และที่ความดันก๊าซ 3.0 mTorr กำลังคลื่นวิทยุ 50 W T_e มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.1 eV เป็น 3.4 eV (เพิ่มขึ้น 0.1 เท่า) เมื่อวัดที่ตำแหน่งเข้าใกล้ antenna มากที่สุด ส่วน n_i นั้นก็มีการกระจายที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะที่เข้าใกล้ antenna เช่นเดียวกันแต่จะมีการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่า คือ n_i มีค่าเพิ่มขึ้นจาก $1.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ เป็น $2.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (เพิ่มขึ้น 0.6 เท่า) ที่ความดัน 0.5 mTorr กำลังคลื่นวิทยุ 50 W และมีค่าเพิ่มขึ้นจาก $4.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ เป็น $10.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (เพิ่มขึ้น 1.3 เท่า) ที่ความดันก๊าซ 3.0 mTorr กำลังคลื่นวิทยุ 50 W การที่การกระจายของทั้ง T_e และ n_i เป็นเช่นนี้ เพราะที่บริเวณใกล้กับ antenna นั้นสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำมีความเข้มสูง อิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณนี้จะมีพลังงานสูงและชนกับก๊าซอาร์กอนและเกิดการแตกตัวได้มากขึ้นนั่นเอง

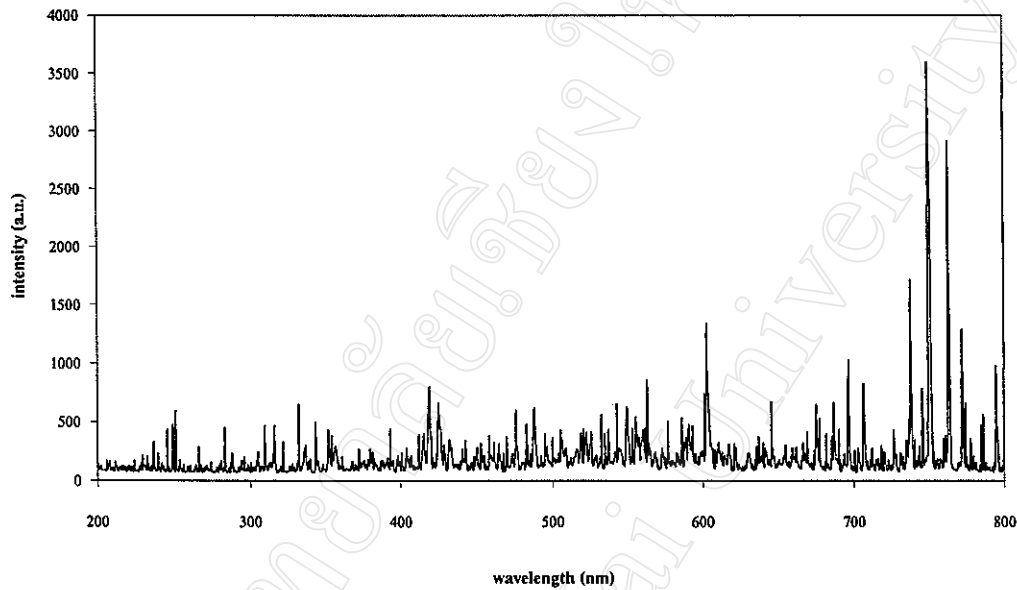
สำหรับการกระจายของ T_e และ n_i ตามแนวรัศมีของแชมเบอร์นั้น T_e จะมีค่าต่ำสุดที่บริเวณศูนย์กลางของแชมเบอร์และเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้ผนังแชมเบอร์ ซึ่งตรงข้ามกับการกระจายของ n_i ที่มีค่าสูงสุดบริเวณศูนย์กลางแชมเบอร์และมีค่าลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนังแชมเบอร์ การกระจายของ T_e และ n_i ในแนวรัศมีของแชมเบอร์ในลักษณะนี้เนื่องจากเกิดการสูญเสียไอออนบวกและอิเล็กตรอนที่ผนังแชมเบอร์นั่นเองและในบริเวณที่ n_i มีค่าน้อยนี้ อิเล็กตรอนก็จะสามารถเคลื่อนที่โดยเกิดการชนหรือถ่ายเทพลังงานกับไอออนบวกน้อยลง พลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณนี้จึงมีมากกว่าบริเวณศูนย์กลางของแชมเบอร์ซึ่งไอออนบวกมีความหนาแน่นมากกว่า

จากรูป 4.11 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของ n_i กับความดันก๊าซและกำลังคลื่นวิทยุนั้น n_i จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันและกำลังคลื่นวิทยุขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่าง n_i และกำลังคลื่นวิทยุค่อนข้างจะเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Hopwood และคณะ (1993) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง T_e กับความดันก๊าซและกำลังคลื่นวิทยุนั้นจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

4.2 OES

4.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูล

สเปกตรัมที่ได้จากพลาสมาอาร์กอนในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm มีลักษณะดังรูป 4.12



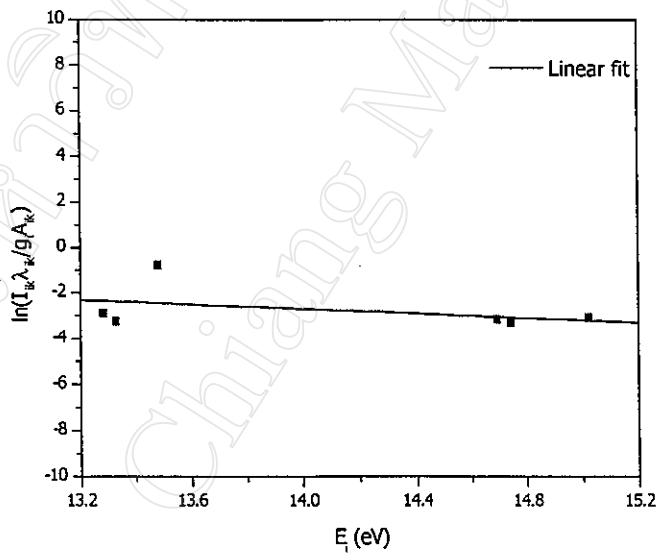
รูป 4.12 สเปกตรัมของพลาสมาอาร์กอนในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm

การวิเคราะห์ T_e ได้เลือกใช้ light intensity ของอะตอมอาร์กอน (Ar I) ในช่วงความยาวคลื่น 660-730 nm โดยค่าความยาวคลื่นที่ใช้ (λ_{ik}), transition probability (A_{ik}), statistical weight (g_i) และพลังงานกระตุ้น (E_i) ของแต่ละสเปกตรัมของ Ar I แสดงในตาราง 4.1 เหตุผลในการเลือกความยาวคลื่นทั้งหมดนี้ เนื่องจากเป็นช่วงความยาวคลื่นซึ่งอยู่ใกล้เคียงกัน และมีช่วงของพลังงานกระตุ้นที่ค่อนข้างกว้าง (13.5-15.0 eV) และมีค่า transition probability ที่มีระดับความน่าเชื่อถืออยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้ความคลาดเคลื่อนในการคำนวณอุณหภูมิอิเล็กตรอนมีน้อยลง

ตาราง 4.1 ความยาวคลื่น, transition probability, accuracy, statistical weight และพลังงานกระตุ้น สำหรับเส้นสเปกตรัม ของอะตอมอาร์กอนในสถานะกระตุ้น ที่ใช้ในการคำนวณ T_e ¹

λ_{ik} (nm)	A_{ik} (s ⁻¹)	Acc.	g_i	E_i (eV)
667.8	2.63×10^5	C	1	13.480
675.3	1.93×10^6	C	5	14.742
693.8	3.08×10^6	C	1	14.963
712.6	6.0×10^5	D ⁺	3	15.022
714.7	6.25×10^5	C	3	13.283
727.3	1.83×10^5	C	3	13.328

จากสมการ (2.71) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I_{ik}\lambda_{ik}}{g_i A_{ik}}\right)$ และ E_i จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง โดยมีความชันเท่ากับ $\left(-\frac{1}{kT_e}\right)$

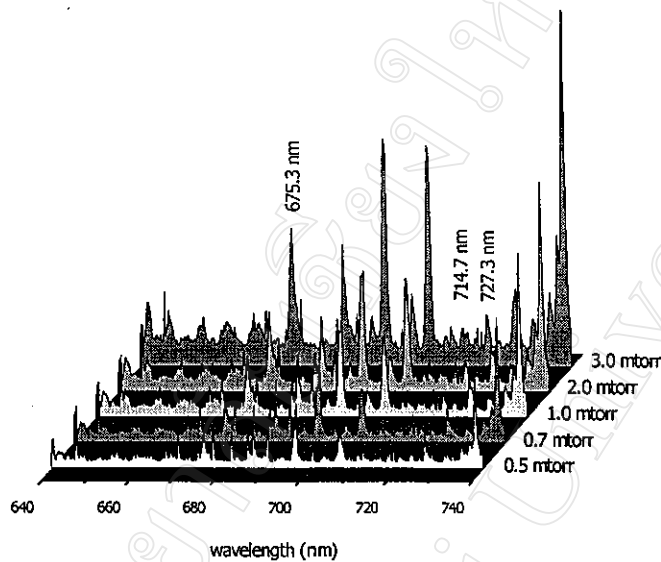


รูป 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I_{ik}\lambda_{ik}}{g_i A_{ik}}\right)$ และ E_i

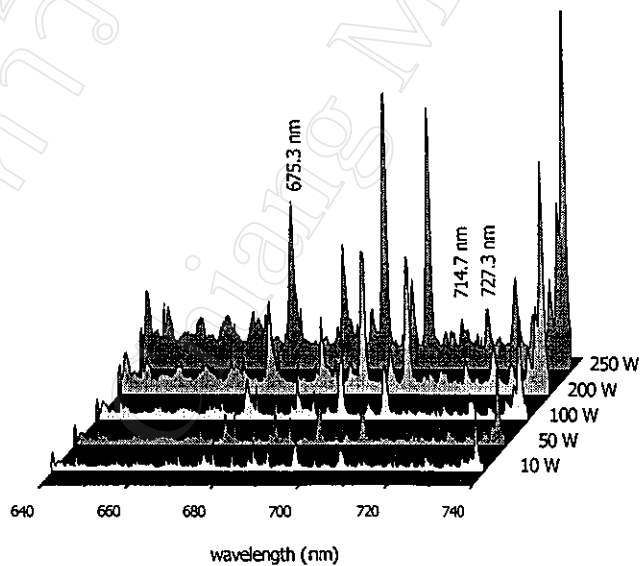
¹ http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData/process_pt?el=Ar&optionlist=XXT1

4.2.2 ผลการทดลอง

ในการทดลอง สเปกตรัมของพลาสมาอาร์กอนในช่วง 640-740 nm ที่ความดันก๊าซและกำลังคลื่นวิทยุต่างๆ แสดงดังรูป 4.14



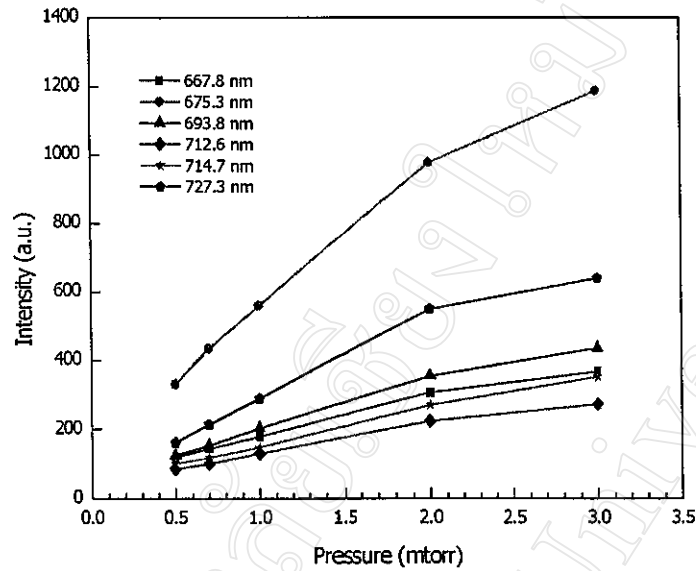
(ก)



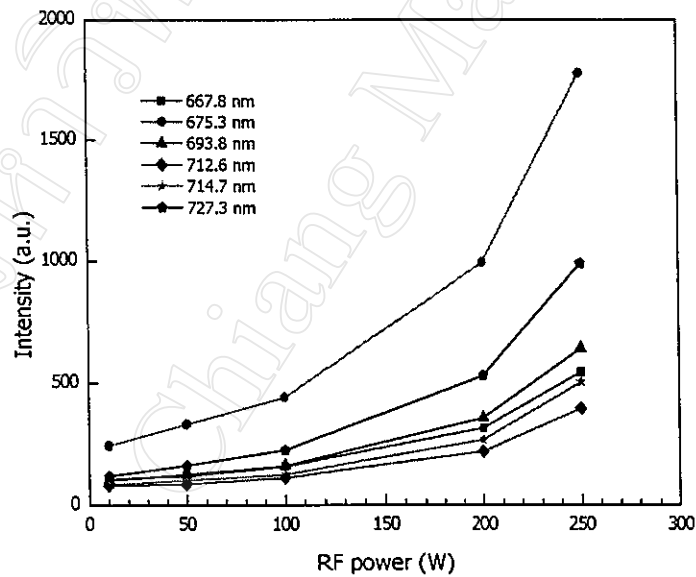
(ข)

รูป 4.14 สเปกตรัมของพลาสมาอาร์กอนที่ (ก) ความดันก๊าซต่างๆ เมื่อใช้กำลังคลื่นวิทยุ 50 W และ (ข) กำลังคลื่นวิทยุต่างๆ เมื่อใช้ความดันก๊าซ 0.5 mTorr

สำหรับ light intensity ของ Ar I ที่ความยาวคลื่นต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ T_e นั้นเปลี่ยนแปลงกับความดันก๊าซและกำลังคลื่นวิทยุดังแสดงในรูป 4.15

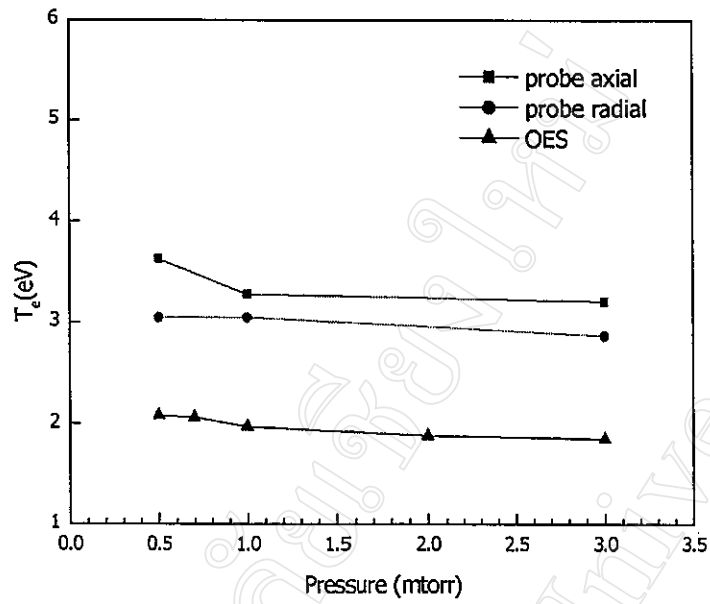


(ก)

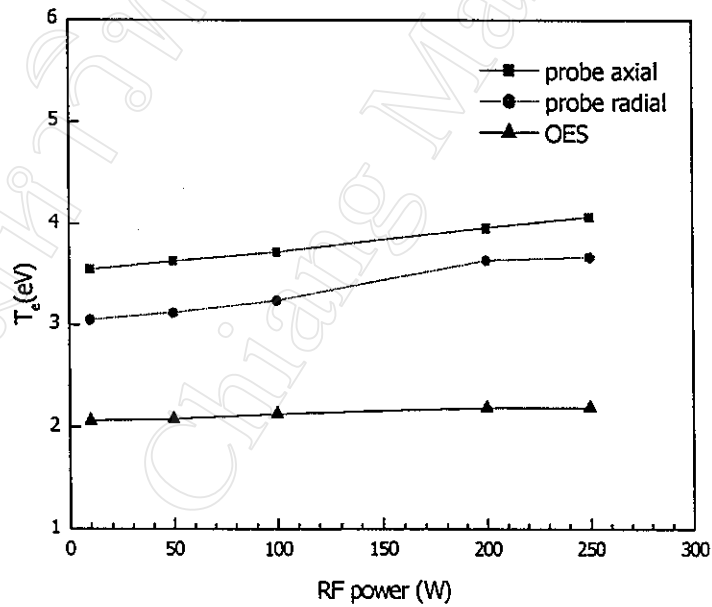


(ข)

รูป 4.15 light intensity ของ Ar I ที่ความยาวคลื่นต่างๆที่ (ก) ความดันก๊าซต่างๆ เมื่อใช้กำลังคลื่นวิทยุ 50 W และ (ข) กำลังคลื่นวิทยุต่างๆ เมื่อใช้ความดันก๊าซ 0.5 mTorr



(ก)



(ข)

รูป 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง T_e และ (ก) ความดันก๊าซ โดยกำลังคลื่นวิทยุมีค่า 50 W (ข) กำลังคลื่นวิทยุ โดยความดันก๊าซมีค่า 0.5 mTorr

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง T_e ที่คำนวณได้จากเทคนิค Langmuir และ เทคนิค OES กับ ความดันก๊าซและกำลังคลื่นวิทยุจะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูป 4.16

จากรูป 4.14 และ 4.15 จะเห็นว่า light intensity ของ Ar I มีค่าเพิ่มขึ้นกับทั้งความดันก๊าซอาร์กอนและกำลังคลื่นวิทยุที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความดันก๊าซที่เพิ่มขึ้นหมายถึง total concentration n ของอะตอมมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า n นี้มีผลโดยตรงกับ light intensity ที่ปลดปล่อยออกมา ส่วน T_e ที่คำนวณได้จากเทคนิค OES นั้นมีค่าน้อยกว่า T_e ที่คำนวณโดยเทคนิคหัววัด Langmuir ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Dheerawan (2002) ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่คำนวณนี้แท้จริงแล้วเป็นอุณหภูมิของอิเล็กตรอนของอะตอมอาร์กอนในสถานะกระตุ้น (excitation temperature, T_{ex}) จากรูป 4.16 จะเห็นว่าแนวโน้มของทั้ง T_e และ T_{ex} กับความดันก๊าซและกำลังคลื่นวิทยุเป็นไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ มีค่าลดลงเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังคลื่นวิทยุเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นเมื่อพิจารณารูป 4.11 และรูป 4.16 ประกอบกันพบว่า สำหรับการวัดโดยหัววัด Langmuir n , ในแนวรัศมีจะมีค่ามากกว่า n , ในแนวแกนของแชมเบอร์ เช่นเดียวกับ T_e ที่แนวแกนจะมีค่าสูงกว่า T_e ที่วัดตามแนวรัศมี ทั้งนี้อาจเนื่องจากลักษณะของแหล่งส่งผ่านพลังงานให้กับพลาสมานั้นคือ antenna ที่มีลักษณะเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย นอกจากนั้นลักษณะทางกายภาพของหัววัดที่มีลักษณะการวางตัวเมื่อทำการวัดกระแสทั้งสองแนว