

อุปกรณ์พลาสมาสภาวะคงตัวปราศจากสนามแม่เหล็ก-ไฟฟ้า

A STEADY STATE FIELD FREE PLASMA DEVICE



ชวลิต โอราพิริยกุล

CHOVALIT ORAPIRIYAKUL

วัน เดือน ปี.....

เลขทะเบียน 01๒54๗

เลขเรียกหนังสือ ๑๗. ๖ ๒๘1๗. ๒๖๒1 @๑1

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร-ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 25๒4

	หน้า
กิติกรรมประกาศ	iv
บทคัดย่อ	v
Abstract	vi
บทที่ 1 พลาสมาและวัตถุประสงค้งานวิจัย	1
1.1 บทนำ	1
1.2 แหล่งกำเนิดพลาสมาภายในห้องปฏิบัติการ	3
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 บทนำ	5
2.2 การวัดคุณสมบัติพลาสมา	5
2.2.1 ทฤษฎีหัววัดไฟฟ้า	6
2.3 ทฤษฎีเทอร์โมอิเล็กทริก อิมิตชัน	12
บทที่ 3 การสร้างชุดอุปกรณ์วิจัย	15
3.1 บทนำ	15
3.2 ภาวะสุญญากาศ	17
3.3 ระบบชีวไฟฟ้า	17
3.3.1 วงจรไฟฟ้าอิซซาร์ค	20
3.3.2 การสร้างระบบชีวไฟฟ้าในภาวะสุญญากาศ	22
3.3.3 ขั้นตอนการประกอบระบบชีวไฟฟ้าในภาวะสุญญากาศ	27
3.4 ระบบวินิจฉัยคุณสมบัติพลาสมา	30
3.4.1 วงจรไฟฟ้าของหัววัด	31
3.4.2 การสร้างหัววัด	32
3.4.3 การสร้างระบบบังคับหัววัดเคลื่อนในสุญญากาศด้วยอำนาจเหนี่ยวนำจากแม่เหล็กภายนอก	34

	หน้า
3.4.4 เทคนิคการวัดค่าแรงของหัววัดในกระเปาะ	37
3.5 ระบบบีบ	40
3.6 ระบบวัดความดัน	40
3.7 ระบบระบายความร้อน	40
3.8 ระบบจ่ายก๊าซอาร์กอน	41
3.9 ขบวนการทำความสะอาด	41
บทที่ 4 การทดลอง และวิเคราะห์ผล	44
4.1 บทนำ	44
4.2 การคำนวณค่าอุณหภูมิพลาสมา และความหนาแน่นพลาสมา	44
4.2.1 อุณหภูมิพลาสมา	44
4.2.2 การคำนวณคาชขนาดของความหนาแน่นพลาสมา	45
4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	45
4.3.1 เปรียบเทียบกราฟผลการทดลอง รูปที่ 4.3.1/1, 4.3.2/2 และ 4.3.2/3	47
4.3.2 เปรียบเทียบกราฟผลการทดลอง รูปที่ 4.3.2/1, 4.3.2/2 และ 4.3.2/3	53
4.3.3 ศึกษาสภาพความไม่เป็นเนื้อเดียวของพลาสมาที่ตำแหน่งกึ่งกลางในแนวแกนของกระเปาะ จากกราฟผลการทดลอง รูปที่ 4.3.3/1, 4.3.3/2 และ 4.3.3/3 ซึ่งเป็นกรณีการกำเนิดพลาสมาโดยอาศัยความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายลวดความร้อน	58
บทที่ 5 สรุป วิจารณ์ และเสนอแนะ	64
5.1 บทนำ	64
5.2 สรุปและวิจารณ์ชุดเครื่องมือวิจัย	64

5.3 สรุปและวิจารณ์เงื่อนไขซีคจำกัดของเครื่องมือและผลที่มีต่อ
บรรยากาศพลาสมาที่กำเนิดในกระเปาะ 65

5.4 ข้อเสนอแนะเพื่อการดำเนินงานวิจัยต่อโดยอาศัยชุดเครื่องมือ
ที่สร้าง 68

เอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรม

ภาคผนวกที่ 1 ข้อมูลเพิ่มเติม 70

ภาคผนวกที่ 2 คำนวณที่ 76

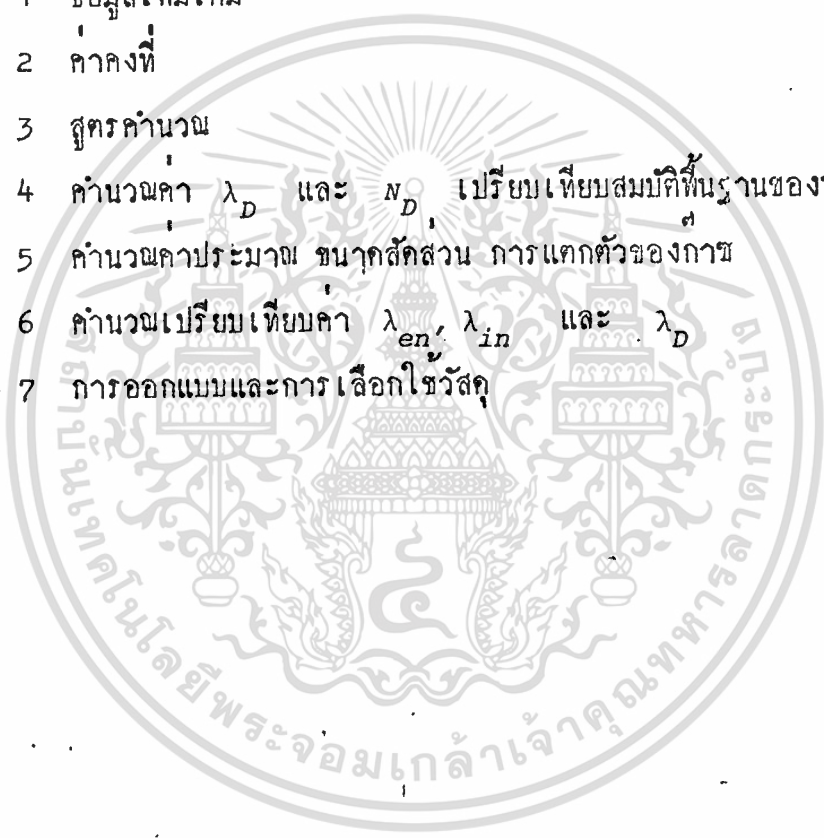
ภาคผนวกที่ 3 สูตรคำนวณ 77

ภาคผนวกที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ λ_D และ N_D เปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานของพลาสมา 78

ภาคผนวกที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ประมาณ ขนาดสัดส่วน การแตกตัวของก๊าซ 79

ภาคผนวกที่ 6 ค่าพารามิเตอร์เปรียบเทียบค่า λ_{en} , λ_{in} และ λ_D 80

ภาคผนวกที่ 7 การออกแบบและการเลือกวัสดุ 81



กิติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง อุปกรณ์พลาสติกภาวะคงตัวปราศจากสนามแม่เหล็ก-ไฟฟ้า สำเร็จลุล่วง ด้ยความช่วยเหลือของ คร.คาเนียด บริน และ ผศ.ดร.ชัยวิทย์ ศิลาวีชนาไนย อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้ข้อคิดเห็น คำแนะนำ รวมทั้งให้ความช่วยเหลือเอาใจใส่แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ อย่างคี่ ยิ่งตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความอนุเคราะห์ที่ผู้วิจัยได้รับในเรื่อง การเชื่อมโลหะเหล็ก สแตนเลส ทองเหลืองและอลูมิเนียมจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตพระนครเหนือ การกลึง - เชื่อมโลหะจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย- สงขลานครินทร์ การกลึงกระเปาะเหล็กสแตนเลสจากคุณ Joachim Gisa

การถ่ายภาพ ถ่ายสไลด์ จากหน่วยโสตฯ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ การเป่า คัดแก้วและน้ำยาเคมี จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ คำปรึกษาเรื่องเซรามิกพลาสติก (Ceramic Plast) จากแผนกวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ฯ และ ขอขอบคุณ คุณรัชณี ชันยิวา ที่ช่วยพิมพ์รายงานวิทยานิพนธ์ให้จนสำเร็จลุล่วง รวมทั้งขอขอบคุณ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาตลอด

อนึ่ง การศึกษาวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์เป็นอย่างคี่ยิ่ง โดยจัดเป็นโครงการวิจัยร่วมของภาควิชา ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณ อย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ชาลิต โอฬาทิรียกุล

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัย เป็นการวิจัยเพื่อสร้างชุดเครื่องมือสำหรับใช้ศึกษาพลาสมาก๊าซ ในสภาพคงตัว ปราศจากสนามรบกวน โดยอาศัย อิเล็กตรอน (จากขั้วคาโทดร้อน) ที่ได้รับพลังงานเพิ่มภายใต้ สนามไฟฟ้ากระตุ้นให้ก๊าซแตกตัว เพื่อกำเนิดพลาสมาภายใต้ขอบเขตแผ่นขั้วอานโนดรูปทรงกระบอกที่มี ศักย์ดิน (Ground Potential) ซึ่งจะได้พลาสมาที่มีปริมาตรเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.2 เซนติเมตร สูง 19.7 เซนติเมตร

จากการศึกษาสมบัติของพลาสมาอาร์กอนที่กำเนิดโดยชุดเครื่องมือที่สร้าง ที่ค่าความดัน $\geq 10^{-3}$ ทอร์ กระแสอิเล็กตรอน ≤ 64 มิลลิแอมแปร์ กระแสคิซาร์จ ≤ 120 มิลลิแอมแปร์ และศักดาไฟฟ้า คิซาร์จ ≤ 50 โวลต์ ด้วยหัววัดแลงเมียร์ (Langmuir Probe) พบว่า อิเล็กตรอนมีอุณหภูมิ $6.0 \times 10^4 - 1.9 \times 10^4$ เคลวิน และขนาดความหนาแน่น $\sim (10^{15} - 10^{16})$ เมตร⁻³ (โดยประมาณ) โดยพลาสมาที่กำเนิดมีสภาพแตกตัวแบบอ่อน (อัตราการแตกตัว $\leq 10^{-4}$) มีสภาพ ไร้การชน มีรูปกระจายความเร็วของอนุภาคแบบแมกเวล มีสภาพไม่เป็นเนื้อเดียวกันในแนวแกนกลาง ของปริมาตรพลาสมา และมีสภาพนิ่ง (Quiessent) นอกจากนี้ได้พบพลาสมาซึ่งประกอบด้วยอนุภาค-อิเล็กตรอนสองกลุ่มพลังงาน ซึ่งกลุ่มที่มีพลังงานสูงเป็นผลจากมีอิเล็กตรอนบางส่วนเคลื่อนมาถึง หัววัด โดยไม่เกิดการชนกับโมเลกุลก๊าซ

ชุดเครื่องมือที่สร้างนี้ อาจประยุกต์เพื่อใช้ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของพลาสมาอื่น ๆ หรือ เพื่องานวิจัยทางวัสดุศาสตร์ เช่น อาจดัดแปลงเป็นเครื่อง หลาสมาสปิตเตอร์ (Plasma Sputtering Device) หรืออื่น ๆ

ABSTRACT

This research study involves design and construction of a device for producing plasma which is essentially field free. In principle, electrons emitted from hot cathode are accelerated by electric field towards the anode which is grounded. By collisional ionisation process, plasma is formed inside the anode cylinder. Plasma is thus bounded by the anode dimension of diameter 10.2 cm. and height 19.7 cm.

Preliminary study on properties of Argon plasma generated by this device at an experimental condition (gas pressure $\geq 10^{-3}$ torr; emission current ≤ 64 mA; discharge current ≤ 120 mA; and discharge voltage ≤ 50 V) by means of a single Langmuir probe yields plasma electron temperature of $6.0 - 1.9 \times 10^4$ °K and electron density approximately $\sim 10^{15} - 10^{16} \text{ m}^{-3}$. Plasma is also found to be weakly ionised (rate $\leq 10^{-4}$); collisionless; Maxwellian; inhomogeneous along median line of plasma volume and quiescent.

It is interesting to find also two groups of electrons, one being the higher energy primary electrons which suffer no collisions and reach the electric probe.

Our device will prove to be useful in studying of basic plasma physics and in material development by converting it to function as an arc discharge plasma sputtering; either with or without magnetic field, or else.

พลาสมาและวัตถุประสงคงานวิจัย

1.1 บทนำ

คำว่า พลาสมา (PLasma) นำมาใช้ครั้งแรกโดย แลงเมอร์ (Langmuir) ในปี 1928 เพื่อให้เรียกก๊าซซึ่งอยู่ในสภาพแตกตัว (Ionized Gas) ในหลอดพิชชาร์ท (Discharge Tube). แต่ในภายหลังก็นำไปใช้เพื่อหมายถึง สภาพของผสมที่มีอนุภาคประจุบวกและอนุภาคประจุลบซึ่งเคลื่อนไหวปะปนกันโดยมีความหนาแน่นของประจุแต่ละชนิดเท่ากันโดยเฉลี่ย ($n_o = n_{eo} = n_{io}$) และสามารถรักษาสภาพความเป็นกลางทางไฟฟ้าไว้ได้ จึงทำให้คำว่าพลาสมาไม่จำกัดใช้เฉพาะกับก๊าซซึ่งอยู่ในสภาพแตกตัวเท่านั้น แต่ยังสามารถรวมไปถึงของเหลวซึ่งอยู่ในสภาพอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Liquid) หรือ ของแข็งในบางสภาพหรือบางชนิดอีกด้วย

สมบัติพื้นฐานของพลาสมาซึ่งทำให้พลาสมาแตกต่างไปจากสถานะภาพ (state) ก๊าซของเหลว และของแข็ง คือ (9)

1. พลาสมาจำเป็นต้องมีอนุภาคประจุไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบด้วยอย่างน้อยส่วนหนึ่ง ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคประจุไฟฟ้า เป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's Law) และทำให้อนุภาคประจุไฟฟ้าแต่ละอนุภาคในพลาสมามีแรงกระทำกับอนุภาคประจุไฟฟ้าข้างเคียงโดยรอบอยู่ตลอดเวลา

2. ขนาดสัดส่วน ความยาวของปริมาตรพลาสมา (Physical Dimensions of Plasma, L) จะต้องมีค่ามากเมื่อเทียบกับ ค่าช่วงความยาวเดบาย (Debye Length, λ_D) ทั้งนี้เพื่อจะมีที่ว่างเพียงพอให้อนุภาคประจุไฟฟ้าในพลาสมาจะสามารถจัดตัวเองในลักษณะเพื่อหักล้างสภาพสนามไฟฟ้าสถิตของประจุไฟฟ้าที่มีหรืออาจจะเกิดขึ้น หรือผิวของวัตถุแปลกปลอมที่มาสัมผัสกับพลาสมา (ซึ่งเป็นความจำเป็นในการรักษาสภาพความเป็นกลางทางไฟฟ้าของพลาสมาไว้)

$$\lambda_D \ll L \quad (1.1)$$

ซึ่งค่าช่วงความยาวเดบายหาได้จากความสัมพันธ์

$$\lambda_D = 69.0 \left(\frac{T}{n_e} \right)^{1/2} \quad \text{เมตร} \quad (1.2)$$

เมื่อ

T คือ ค่าอุณหภูมิในหน่วยองศาเคลวิน ($^{\circ}K$)

n_e คือ ค่าความหนาแน่นอนุภาคอิเล็กตรอนในหน่วย จำนวนอนุภาคต่อหน่วยลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญาอื่นใดในนามของศูนย์วิจัยพลาสมาและอนุภาคพลังงานสูง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

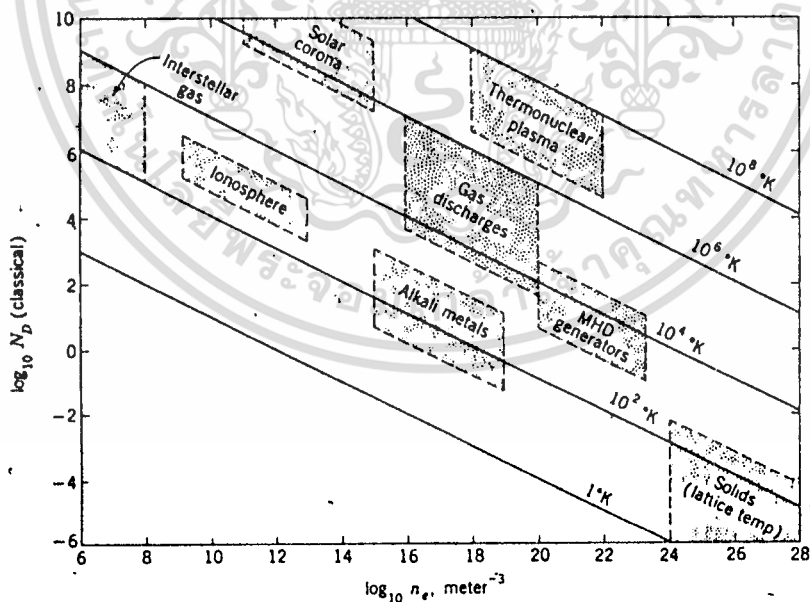
3. ระยะห่างระหว่างอนุภาคอิเล็กตรอนโดยเฉลี่ย จะต้องสั้นเมื่อเทียบกับค่าช่วงความยาวที่มาย หรืออีกนัยหนึ่ง จำนวนอนุภาคอิเล็กตรอนในปริมาตรทรงกลมที่มีรัศมีเท่าค่าช่วงความยาวที่มาย (N_D) จะต้องมามีค่ามากกว่า 1 มากๆ

$$N_D \gg 1 \tag{1.3}$$

เมื่อ

$$N_D \approx \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 n_e \quad \text{เมตร}^{-3} \tag{1.4}$$

จากหลักเกณฑ์ที่บ่งลักษณะเฉพาะของพลาสมาซึ่งกล่าวในข้างต้น เทอม n_e และ T เป็นตัวแปรที่สำคัญที่บ่งสภาพพลาสมา ซึ่งจากการศึกษาค่าของเทอม n_e และ T ของพลาสมา แต่ละชนิดที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ และที่ถูกสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ทำให้สามารถแยกลักษณะเฉพาะของพลาสมาที่เกิดขึ้นแต่ละชนิดได้ ดังรูปที่ 1.1/1



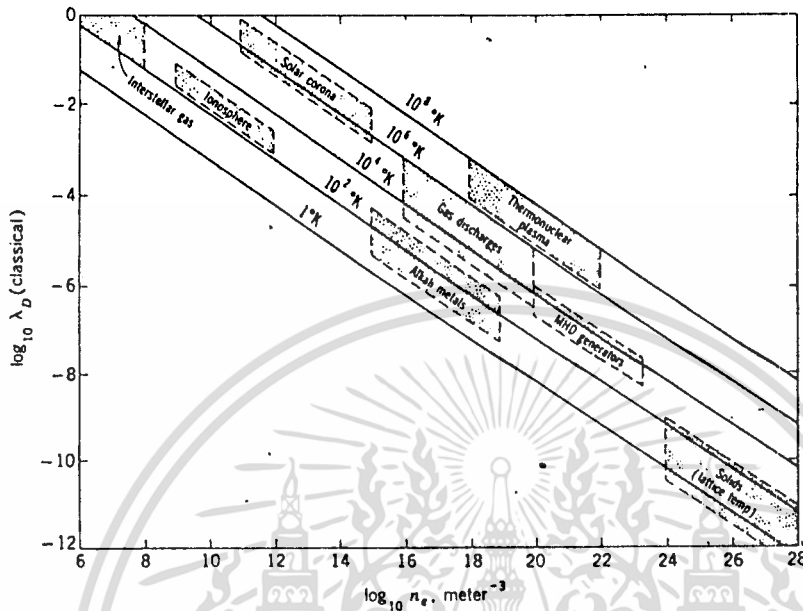
รูปที่ 1.1/1

แสดงค่าความหนาแน่นอนุภาคในทรงกลมรัศมีเท่าค่าความยาวที่มาย ในเทอมที่

สัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นอนุภาค และอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1/2

แสดงค่าช่วงความยาวเดบาย ในเทอมที่สัมพันธ์กับค่า ความหนาแน่นอนุภาค และ ค่าอุณหภูมิ

1.2 แหล่งกำเนิดพลาสมาก๊าซ ในห้องปฏิบัติการ

พลาสมาก๊าซที่ถูกสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ จะเป็นชนิดที่เกิดเพียงชั่วขณะ (Pulse) หรือ เกิดคงตัว (Steady State) ก็ตาม จะต้องมิชบวนการป้อนพลังงานเพื่อกระตุ้นให้ก๊าซแตกตัว (Ionization) เกิดเป็นบรรยากาศผสมของอนุภาคอิเล็กตรอนและอนุภาคไอออนพลังงานที่ป้อนให้อาจอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน พลังงานโฟตอนหรืออื่น ๆ ก๊าซที่พลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีการสลายตัวตลอดเวลาเนื่องจากสภาพการเกิดการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) หรือการแพร่กระจาย (Diffusion) ไปยังผนังของภาชนะที่บรรจุ แหล่งป้อนพลังงานนี้จึงจำเป็นต้องป้อนพลังงานทดแทนเพื่อชดเชยเวลาที่ห้องการรักษาสภาพพลาสมาก๊าซไว้

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ในช่วง 20 ปีนี้ วิทยาการทางคานพลาสมาได้ถูกนำมาประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ในหลายลักษณะ ทั้งเพื่อการยกระดับการดำรงชีวิตให้มีความสะดวกสบายมากขึ้น และถูกใช้เป็นวิทยาการพื้นฐานของวิทยาการขั้นสูงซึ่งจะถูกค้นพบต่อไปในอนาคต โดยเฉพาะในปัจจุบันซึ่งโลกกำลังประสบปัญหาเรื่องพลังงาน ทำให้วิทยาการทางคานพลาสมาเพิ่มความสำคัญเพิ่มขึ้นอีก ทั้งนี้ด้วยความหวังที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานของโลกแห่งหนึ่งในอนาคต ในประเทศไทย ขณะที่วิทยาการคานพลาสมาและวิทยาศาสตร์ประยุกต์ในหลายสาขามีความเจริญก้าวหน้าเพิ่มขึ้นโดยลำดับ แต่วิทยาการทางคานพลาสมาซึ่งเป็นสาขาหนึ่งยังขาดอยู่ ซึ่งถึงจะมีอยู่บ้างก็เป็นเพียงการบรรยายในหัวข้อหนึ่งหรือวิชาหนึ่งในระดับชั้นอุดมศึกษาเท่านั้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความยากลำบากในการจัดหาชุดเครื่องมือวิจัย ซึ่งจะต้องมีลักษณะเฉพาะและมีราคาแพง จึงทำให้ขาดขบวนการฝึกฝนนักวิจัยทางด้านนี้

ด้วยเหตุผลดังกล่าว วัตถุประสงค์ในการเลือกทำวิจัยในหัวข้อนี้จึงมีขึ้น เพื่อจะสร้างชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยทางคานพลาสมา นับแต่การออกแบบ การคัดเลือก ศึกษาค้นคว้า และจัดหาวัสดุที่เหมาะสมที่สามารถหาได้และราคาไม่แพง รวมทั้งการสร้างชิ้นเอง ซึ่งจะทำให้ผู้วิจัยไม่เพียงแต่ได้รับความรู้และมีความเข้าใจในวิทยาการทางคานพลาสมา และระบบสูญญากาศเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่ผู้วิจัยจะยังสามารถดำเนินงานวิจัยต่อไปได้อีกในภายหน้า โดยอาศัยหรือศึกษาค้นคว้าเครื่องมือวิจัยซึ่งประกอบสร้างขึ้น อีกทั้งประสบการณ์และข้อมูลซึ่งได้จากการวิจัยครั้งนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อบุคคลอื่นที่ประสงค์จะสร้างเครื่องมือวิจัยทางด้านนี้ในอนาคตอีกด้วย

2.1 บทนำ

ชุดเครื่องมือที่ประกอบสร้างขึ้น เพื่อจุดประสงค์ใช้กำเนิดพลาสมาอาร์กอน (Ar - Gas Plasma) ที่ระคิมความดันต่ำกว่าบรรยากาศ โดยคาดหวังจะโค้พลาสมาซึ่งอนุมาณ (Assume) โค้ว่าเป็นพลาสมาในสภาพไร้การชน (Collisionless) เป็นกลางทางไฟฟ้าโดยเฉลี่ย (Quasi-Neutral) มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) สถิตย์ (Stationary) มีสภาพแตกตัวอย่างอ่อน (Weakly Ionized) และมีรูปการกระจายความเร็วแมกแมกเวล (Maxwellian Velocity Distribution) ทั้งนี้เพื่อสอดคล้องกับทฤษฎีของหัววัดไฟฟ้าแบบเดี่ยว (Single Electrical Probe) ที่จะนำมาใช้เพื่อศึกษาคูสมบัติพลาสมา

การกำเนิดพลาสมาจะอาศัยอนุภาคอิเล็กตรอนจากขบวนการเทอร์โมไอออนิก อิมิชชัน (Thermionic Emission) ซึ่งถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่กระตุ้นให้ก๊าซอาร์กอนแตกตัว (Ionization) ทั้งนี้โดยมีปั้มชนิดโรตารี (Rotary Pump) ปั้มชนิดแพร่กระจาย (Diffusion Pump) และกระเปาะดักไอ (Vapour Trap) ทำหน้าที่ลดความดัน สำหรับค่าความดันของระบบจะอาศัยอ่านจาก หัววัดความดันชนิดพิรานี (Pirani Gauge) หรือหัววัดความดันชนิดเทอร์โมคัลเบิล (Thermocouple Gauge) หรือหัววัดความดันชนิดไอออน (Ionization Gauge) ซึ่งจักเตรียมไว้

2.2 การวัดคุณสมบัติพลาสมา (Plasma Diagnostic)

การศึกษาคูสมบัติพลาสมาอาจทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ทำได้ง่ายและสามารถทราบคุณสมบัติพลาสมาที่ตำแหน่งเฉพาะหนึ่งหนึ่ง คือ การศึกษาโดยวิธีอาศัยหัววัดไฟฟ้า (Electrical Probes) หัววัดไฟฟ้าที่ประกอบขึ้นเพื่อวัดคุณสมบัติพลาสมาในห้องปฏิบัติการจะประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ

1. หัววัด ซึ่งสอดยื่นเข้าไปในบรรยากาศพลาสมายังตำแหน่งที่ต้องการวัด โดยทั่วไปจะเป็นลวดเส้นเล็กมากซึ่งหุ้มด้วยฉนวน เหลือเฉพาะปลายลวดก้านหนึ่งโผล่ไว้เพื่อทำหน้าที่เป็นผิวหัววัด ซึ่งมีชื่อเรียกว่า หัววัดแลงเมอว์ (Langmuir Probe) หรือ หัววัดทรงกระบอก (Cylindrical Probe) ในบางครั้ง อาจเชื่อมท่อปลายลวดด้วยแผ่นโลหะบางขนาดเล็ก หรือ

เอ็กสาร์ทเป็นเอ็กสาร์ทที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้เข้าใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โธเททรงกลมขนาดเล็ก ซึ่งมีชื่อใหม่ว่า หัววัดแบน (Plane Probe) และ หัววัดปลายโธเททรงกลม (Spherical Probe) ตามลำดับ

2. เครื่องจ่ายไฟ ซึ่งต่อเชื่อมวงจรไปยังหัววัดข้างหนึ่ง และขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสอยู่กับบรรยากาศพลาสมาอีกข้างหนึ่ง

3. เครื่องมือวัด ซึ่งต่อเข้ากับวงจรของเครื่องจ่ายไฟ เพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัววัด สัมพันธ์กับ ค่าศักดาไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัด

จากลักษณะสัมพันธ์ กระแส-ศักดาไฟฟ้าซึ่งได้จากหัววัดไฟฟ้า (Electrical Probe Characteristic, EPC) นี้ อาจสามารถทราบถึงรายละเอียดของอุณหภูมิอิเล็กตรอน (Electron Temperature, T_e) ค่าความหนาแน่นของอนุภาคประจุไฟฟ้า (Charge Carrier Concentration, n_0) และอื่น ๆ เช่น ศักดาไฟฟ้าพลาสมา (Plasma Potential, V_{sp}) เป็นต้น

2.2.1 ทฤษฎีหัววัดไฟฟ้า (10, 11, 12)

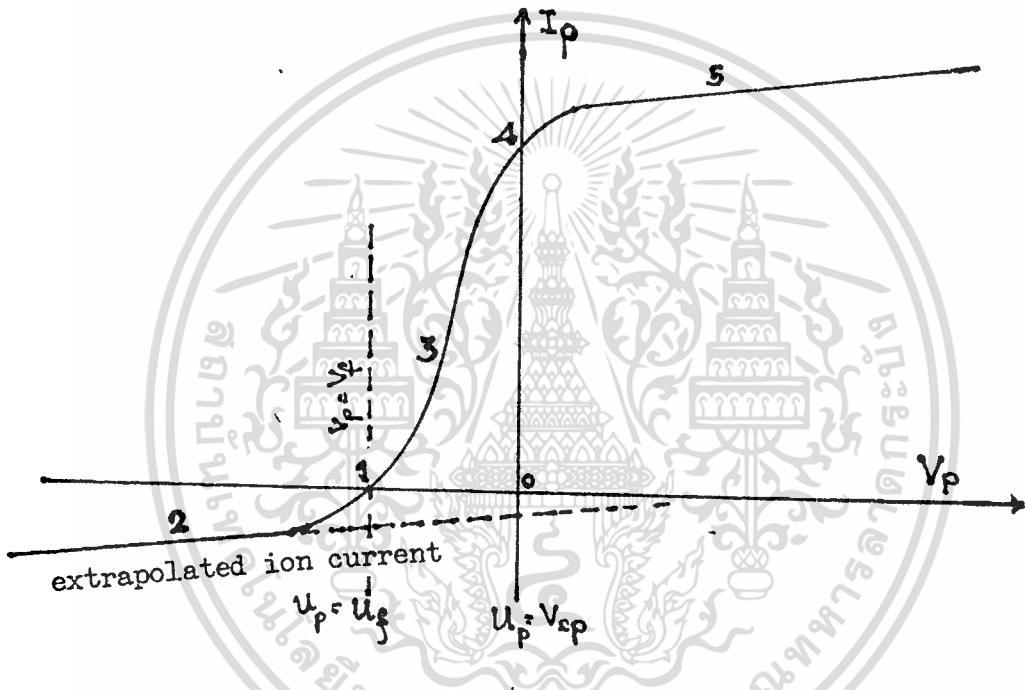
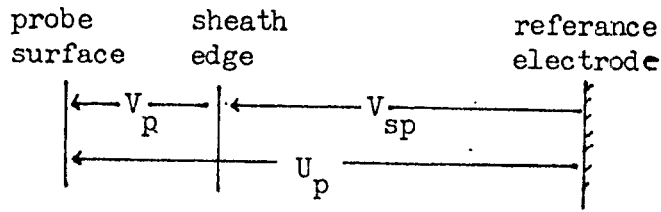
กรณีพลาสมามีสภาพไร้การชน (Collisionless) เป็นกลางทางไฟฟ้าโดยเฉลี่ย (Quasi-Neutral, $n_{e0} \approx n_{i0} \approx n_0$) สถิตย์ และเป็นเนื้อเดียวกัน (Stationary and Homogeneous) มีสภาพการแตกตัวแบบอ่อน (Weakly Ionized) และมีรูปการกระจายความเร็วแบบแมกเวล (Maxwellian Velocity Distribution) ลักษณะสัมพันธ์กระแสศักดาไฟฟ้าซึ่งวัดได้โดยอาศัยหัววัดแลงเมอว์ จะมีลักษณะคังกราฟในรูปที่ 2.2.1/1 โดย

U_p คือ ศักดาไฟฟ้าของหัววัด เปรียบเทียบกับ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซึ่งสัมผัสอยู่กับพลาสมา (Reference Electrode)

V_p คือ ศักดาไฟฟ้าของหัววัด เปรียบเทียบกับ ขอบภายนอกของเบสิคกั่มประจุ (Space Charge Region) และ

V_{sp} คือ ศักดาไฟฟ้าซึ่งตกคร่อมระหว่างส่วนของพลาสมาที่ไม่ถูกรบกวน (Unperturbed Plasma) ซึ่งอยู่ระหว่าง ขอบภายนอกของเบสิคกั่มประจุ และ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

ซึ่งสัมพันธ์กันด้วยสมการ



รูปที่ 2.2.1/1

แสดงลักษณะสัมพันธ์ กระแส-ศักดาไฟฟ้า ของพลาสมา วัดโดยหัววัดไฟฟ้า เมื่อ I_p คือ ค่ากระแสหัววัด, V_p คือ ค่าศักดาไฟฟ้าหัววัด และ U_p คือ ค่าศักดาไฟฟ้าที่จ่ายให้หัววัด

$$U_p = V_{sp} + V_p \quad (2.1)$$

การปรับค่าศักดาไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัด (U_p) จะทำให้ค่าศักดาไฟฟ้าของหัววัดเปลี่ยนแปลงไปตามไปด้วย ทำให้กระแสหัววัด (I_p) ที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

(1) ค่าแห่ง ศักดาไฟฟ้าหัววัดเมื่อกระแสหัววัดเป็นศูนย์ ($I_p = 0$)

เมื่อสอดหัววัดเข้าไปในบรรยากาศพลาสมา อนุภาคอิเล็กตรอนซึ่งมีความเร็วเทอร์มอล (Thermal Speed) สูงกว่าอนุภาคไอออนจะพุ่งชนผิวหัววัดด้วยจำนวนต่อหน่วยเวลาที่มากกว่า ทำให้เกิดสภาพการสะสมประจุลบบนผิวหัววัด ประจุลบซึ่งสะสมเพิ่มขึ้นบนผิวหัววัดจะแสดงพฤติกรรมผลกอนุภาคอิเล็กตรอนซึ่งวิ่งตามมาและดึงอนุภาคไอออนให้วิ่งเข้าสู่หัววัดด้วยความเร็วสูงขึ้น เกิดเป็นบริเวณเปลือกหุ้มประจุบวก (Positive Space Charge Region) โดยรอบผิวหัววัดซึ่งในที่สุดเมื่อเข้าสู่สภาพสมดุล ปริมาณกระแสอิเล็กตรอน (I_e) และกระแสไอออน (I_i) ที่พุ่งชนผิวหัววัดจะมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้น กระแสหัววัด (I_p) จะมีค่าเป็นศูนย์ ขณะที่ค่าศักดาไฟฟ้าของหัววัดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าศักดาไฟฟ้าที่ขอบนอกของเปลือกหุ้มประจุ จะมีค่าเป็นลบค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ค่าศักดาฟลอยิง (Floating Potential, V_f) นั่นคือ

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } V_p &= V_f \\ \text{จะได้ } I_p(V_f) &= I_e + I_i = 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

[ในวงจรหัววัด จะสามารถสร้างสภาวะสมดุลในลักษณะเดียวกันได้ เมื่อปรับให้หัววัดมีศักดาไฟฟ้าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง (U_p) ซึ่งพอดีทำให้กระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออนที่ถูกจับไว้โดยหัววัดมีปริมาณเท่ากัน นั่นคือ

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } U_p &= U_f = V_{sp} + V_f \\ \text{จะได้ } I_p(U_p) &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

(2) เมื่อศักดาไฟฟ้าหัวรั้วมีค่าน้อยกว่า ค่าศักดาไฟฟ้าพุ่ง ($v_p < v_f$)

เมื่อปรับให้ศักดาไฟฟ้าของหัวรั้วมีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้น อนุภาคอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในบริเวณเปลือกหุ้มประจุด้วยความเร็วเทอร์มอล (กลุ่มที่มีค่า $\langle w_{e0} \rangle < |ev_p|$ เมื่อ $\langle w_{e0} \rangle$ คือ ค่าพลังงานกลเฉลี่ยของอนุภาคอิเล็กตรอนซึ่งอยู่ห่างไกลจากหัวรั้ว) จะถูกผลักออกจากหัวรั้วขณะที่อนุภาคอิเล็กตรอนถูกจับเพิ่มมากขึ้น เมื่อ $|ev_p| \gtrsim 10 \langle w_{e0} \rangle$ จะอนุมโนได้ว่า ค่ากระแสหัวรั้ว (I_p) คือ กระแสไอออนอิ่มตัว (Ion Saturation Current) ซึ่งในทางปฏิบัติ กระแสไอออนอิ่มตัวที่รั้วได้จะไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น (เล็กน้อย) เมื่อ ศักดาไฟฟ้าของหัวรั้วมีค่าเป็นลบเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพราะ การเพิ่มศักดาไฟฟ้าของหัวรั้วจะทำให้ เกิดการขยายตัวของบริเวณเปลือกหุ้มประจุโดยรอบผิวหัวรั้วหนาเพิ่มตามไปด้วย

(3) ช่วงซึ่งกระแสหัวรั้ว (I_p) และศักดาไฟฟ้าของหัวรั้วมีความสัมพันธ์แบบเอ็กโพเนนเชียล

เมื่อปรับให้ศักดาไฟฟ้าของหัวรั้วมีค่าเป็นลบน้อยลง ($v_f < v_p < 0$) อนุภาคอิเล็กตรอน (ที่มีพลังงานเทอร์มอล $\langle w_{e0} \rangle > |ev_p|$) ที่สามารถเคลื่อนที่ไปถึงผิวหัวรั้วจะเพิ่มจำนวนมากขึ้น ทำให้ความหนาของบริเวณเปลือกหุ้มประจุแคบลง สภาพที่หัวรั้วเลือกจับเฉพาะอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีค่าความเร็วเทอร์มอลเฉพาะ ทำให้พลาสมาในบริเวณใกล้หัวรั้วถูกรบกวนให้มีรูปการกระจายความเร็วของอนุภาค (Velocity Distribution) เปลี่ยนไปบ้าง แต่ถ้า v_p ไม่แตกต่างจาก v_f มากนัก และ $|I_e(v_p)| \ll |I_e(v_p = 0)|$ สภาพรบกวนดังกล่าวจะเกิดขึ้นน้อยมากพออนุมโนได้ว่าไม่มี นั่นคือ

ถ้าสันนิษฐานให้พลาสมาซึ่งอยู่ห่างไกลจากผิวหัวรั้วเป็นพลาสมาในสภาพไร้การชน และมีรูปการกระจายความเร็วแบบแมกเวล

จะสามารถหาค่ากระแสไอออนได้จากความสัมพันธ์ (๒.๔)

$$I_e(v_p) = \frac{-n_0 e \langle v_{e0} \rangle A}{4} \cdot \exp \left| \frac{ev_p}{kT_e} \right| \tag{2.4}$$

เมื่อ $\langle v_{e0} \rangle$ คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคอิเล็กตรอน
A คือ ค่าพื้นที่ผิวหัวรั้ว

015543

- e คือ ค่าประจุของอนุภาคอิเล็กตรอน
 k คือ ค่าคงที่ของ โบทล์แมน
 T_e คือ อุณหภูมิอิเล็กตรอน
 และ n_0 คือ ค่าความหนาแน่นของพลาสมาที่อยู่ไกลห้วงวิค (Unperturbed Plasma)
 ($n_0 = n_{e0} = n_{i0}$; เมื่อ n_{e0}, n_{i0} คือ ค่าความหนาแน่นของ
 อนุภาคอิเล็กตรอนและอนุภาคไอออนในบรรยากาศพลาสมาที่อยู่ไกลห้วงวิค)

ถ้าแปลงรูปความสัมพันธ์ที่อยู่ในเทอมของอวก คิฟเพื่อเรนซิเอค และอาศัยสมการ 1 จะได้

$$\frac{d \ln |I_e|}{d v_p} = \frac{d \ln |I_e|}{d U_p} = \frac{e}{k T_e} \quad (2.5)$$

ซึ่ง ค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e) จะคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์
 ระหว่าง $\log |I_e|$ และ U_p ในทางปฏิบัติ ถ้า $I_i(U_p) \ll I_e(U_p)$
 จะอนุমানให้ $I_p(U_p) \approx I_e(U_p)$ ได้

(4) ตำแหน่งศักดาไฟฟ้าของห้วงวิคมีค่าเป็นศูนย์ ($v_p = 0$)

เมื่อศักดาไฟฟ้าของห้วงวิคมีค่าเป็นศูนย์ บริเวณเปลือกหุ้มประจุซึ่งเคิมเกิดโดยรอบผิวห้วงวิค
 จะหายไป กระแสห้วงวิค (I_p) ซึ่งวัดได้ในสภาพนี้ จะเกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอน และ
 อนุภาคไอออนมายังผิวห้วงวิคเนื่องจากสภาพความเร็วเทอร์มอล (Random Thermal Velocity)
 ของตัวเอง ซึ่งกรณีของพลาสมาในสภาพไร้การชนและมีรูปการกระจายความเร็วแบบแมกเวล กระแส
 อิเล็กตรอนและกระแสไอออนจะสัมพันธ์กับค่าความเร็วเทอร์มอลเฉลี่ยของอนุภาคอิเล็กตรอน ($\langle v_{e0} \rangle$)
 และอนุภาคไอออน ($\langle v_{i0} \rangle$) ดังนี้

$$I_{e0}(v_p = 0) = \frac{-n_0 e \langle v_{e0} \rangle A}{4} \quad (2.6)$$

$$I_{i0}(v_p = 0) = \frac{n_0 e \langle v_{i0} \rangle A}{4} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$\langle v \rangle = (8 kT_e / \pi M)^{1/2} \quad (2.8)$$

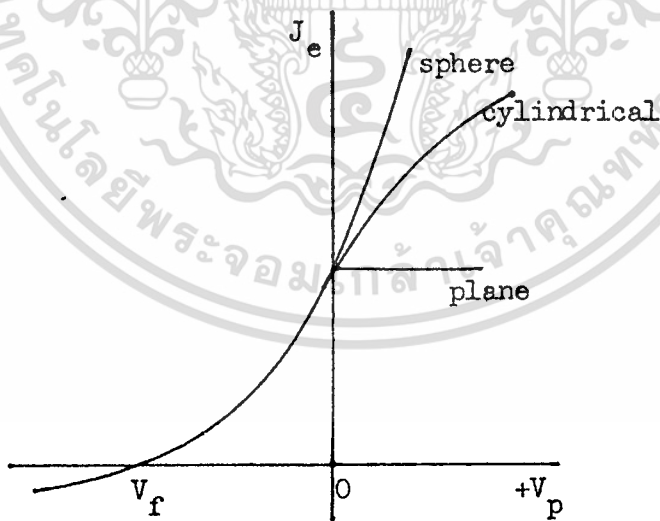
(T และ M คือ อุณหภูมิและมวลของอนุภาคตามลำดับ)

แต่ด้วยเหตุที่ $|\langle v_{e0} \rangle| \gg |\langle v_{i0} \rangle|$ ดังนั้นอาจพออนุมานได้ว่า

$$I_p (V_p = 0) = \frac{-n_0 e \langle v_{e0} \rangle A}{4} \quad (2.9)$$

(5) เมื่อศักคาไฟฟ้าของหัวขั้วมีค่าเป็นบวก ($V_p > 0$)

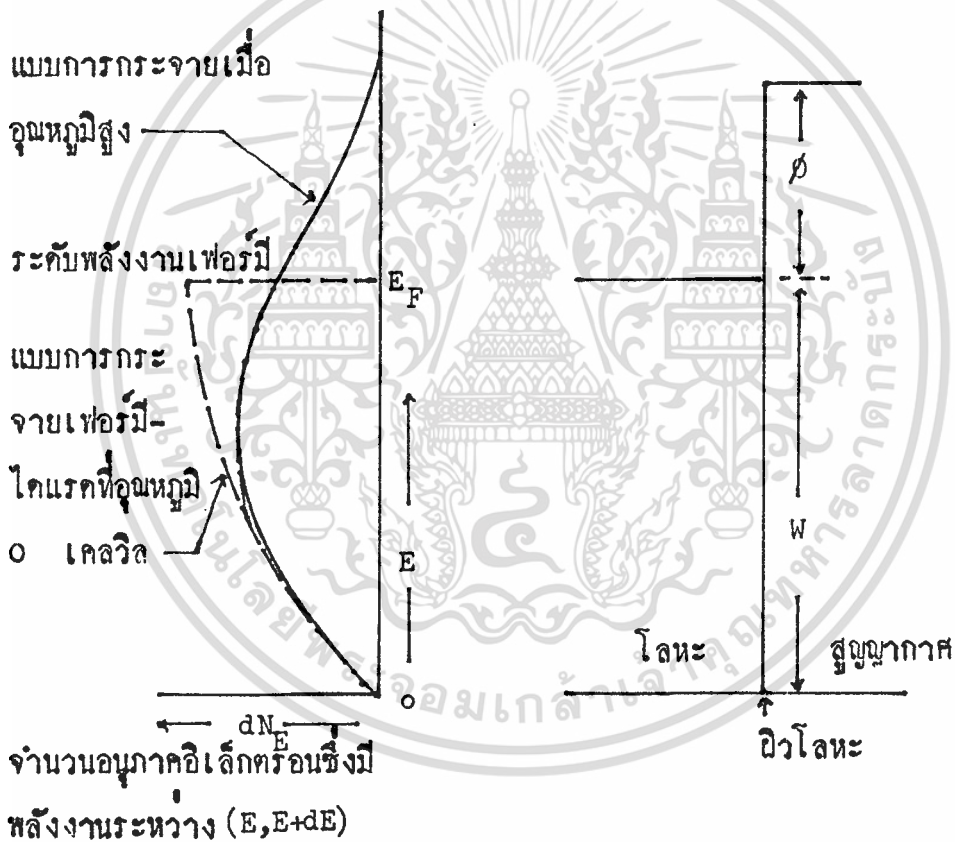
เมื่อปรับให้ศักคาไฟฟ้าของหัวขั้วมีค่าเป็นบวก จะเกิดบริเวณเปลือกหุ้มประจุลบ (Negative Space Charge Region) โดยรอบผิวหัวขั้ว อนุภาคอิเล็กตรอนที่เคลื่อนเข้ามาในบริเวณเปลือกหุ้มประจุจะถูกดึงให้เคลื่อนเข้าสู่หัวขั้วเร็วขึ้นด้วยสนามไฟฟ้า ส่วนอนุภาคไอออนจะถูกผลักออกไป ดังนั้น เมื่อศักคาไฟฟ้าของหัวขั้วมีค่าเป็นบวกพออนุมานได้ว่า กระแสหัวขั้ว I_p เป็นกระแสอิเล็กตรอนอีมิตัว ซึ่งการเลือกใช้หัวขั้วแต่ละประเภทจะให้ลักษณะกระแสหัวขั้วในช่วงนี้แตกต่างกัน (10)



รูปที่ 2.2.1/2 แสดงความแตกต่างของลักษณะกระแส-ศักคาไฟฟ้าของทลามาในช่วงกระแสอิเล็กตรอนอีมิตัว เมื่อวัดโดยหัวขั้วชนิดทรงกระบอก ทรงกลม และ แบน

2.3 ทฤษฎีเทอร์มิออนิก อิมิชชัน (Thermionic Emission) (3,5,6)

ในของแข็ง อนุภาคอิเล็กตรอนซึ่งกระจุกกระจายที่ผิวถูกยึดมิให้หลุดจากผิวด้วยพลังงานศักย์ค่าหนึ่ง ซึ่งในการทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุดเป็นอิสระจากผิวนั้น จำเป็นต้องให้พลังงานแก่อนุภาคอิเล็กตรอนมากพอที่จะเอาชนะพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวค่านั้น ในโลหะพลังงานของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ผิวโลหะจะมีลักษณะสอดคล้องตามแบบการกระจายเฟอร์มี-ไดแรค (Fermi - Dirac Distribution) ซึ่งที่อุณหภูมิ 0°K จะไม่มีอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi Level) เลย ดังในรูปที่ 2.3/1



รูปที่ 2.3/1 แสดงการเปรียบเทียบแบบการกระจายเฟอร์มี-ไดแรคของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ผิวโลหะที่อุณหภูมิ 0°K และ $> 0^{\circ}\text{K}$

ค่าความแตกต่างระหว่างค่าพลังงานศักย์ที่ยึดอนุภาคอิเล็กตรอนมิให้หลุดจากผิว กับค่าระดับพลังงานเฟอร์มี เรียกว่าค่าเวอริคฟังก์ชัน (Work Function)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อโลหะได้รับความร้อน แบบการกระจายเฟอร์มี-ไดแรคของพลังงานของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ผิวโลหะ จะเปลี่ยนไป จะมีอนุภาคอิเล็กตรอนบางส่วนที่มีพลังงานมากพอจะเอาชนะพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยว และหลุดจากผิวโลหะเป็นอิสระ ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า " เทอร์โมอิเล็ก อิมิชัน "

เมื่อคำนวณปริมาณอนุภาคอิเล็กตรอนที่หลุดจากผิวโลหะเป็นอิสระ ที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง ๆ ของแบบการกระจายเฟอร์มี-ไดแรค ทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่คายจากผิวโลหะ (Emission Current) กับค่าอุณหภูมิของผิวโลหะ ดังสมการ

$$J = 120 T^2 \exp(-11600 \phi/T) \quad (2.10)$$

สมการ Richardson-Dushman

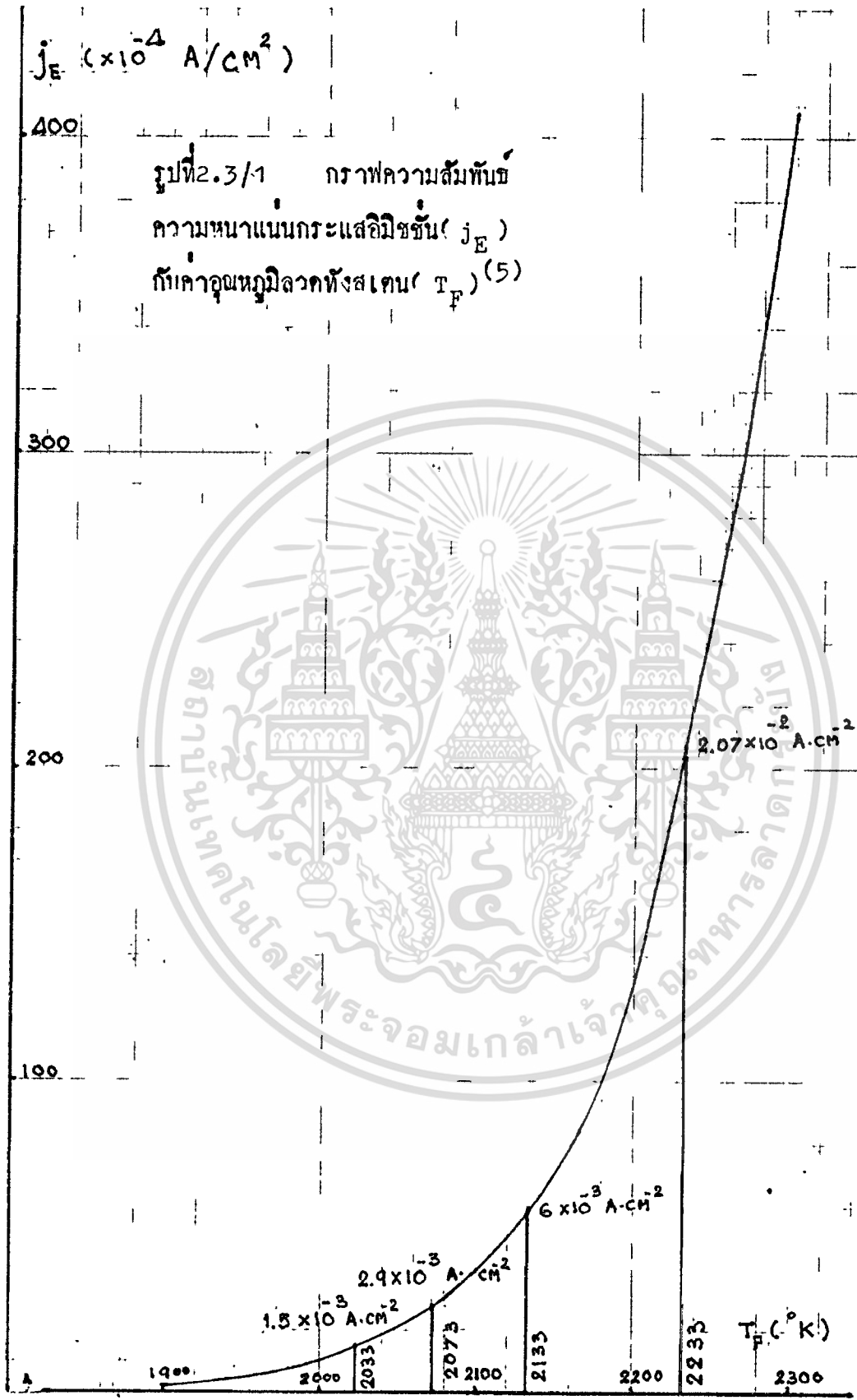
โดย

J คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่คายจากผิวโลหะ ($A \cdot cm^{-2}$)

T คือ ค่าอุณหภูมิของผิวโลหะ ($^{\circ}K$)

ϕ คือ ค่าเวอรค์ฟังก์ชัน (eV)

(หมายเหตุ : ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่คายจากลวดทั้งสแตนดีเพนร้อนที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง ๆ สามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ข้างต้น หรืออาจจะอ่านได้จากกราฟรูปที่ 2.3/1)



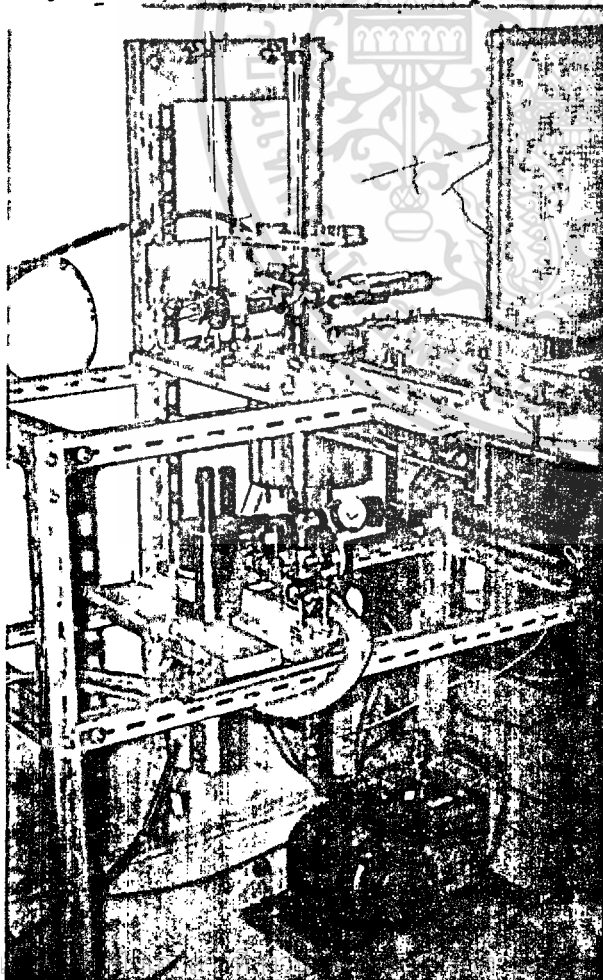
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การสร้างชุดอุปกรณ์วิจัย

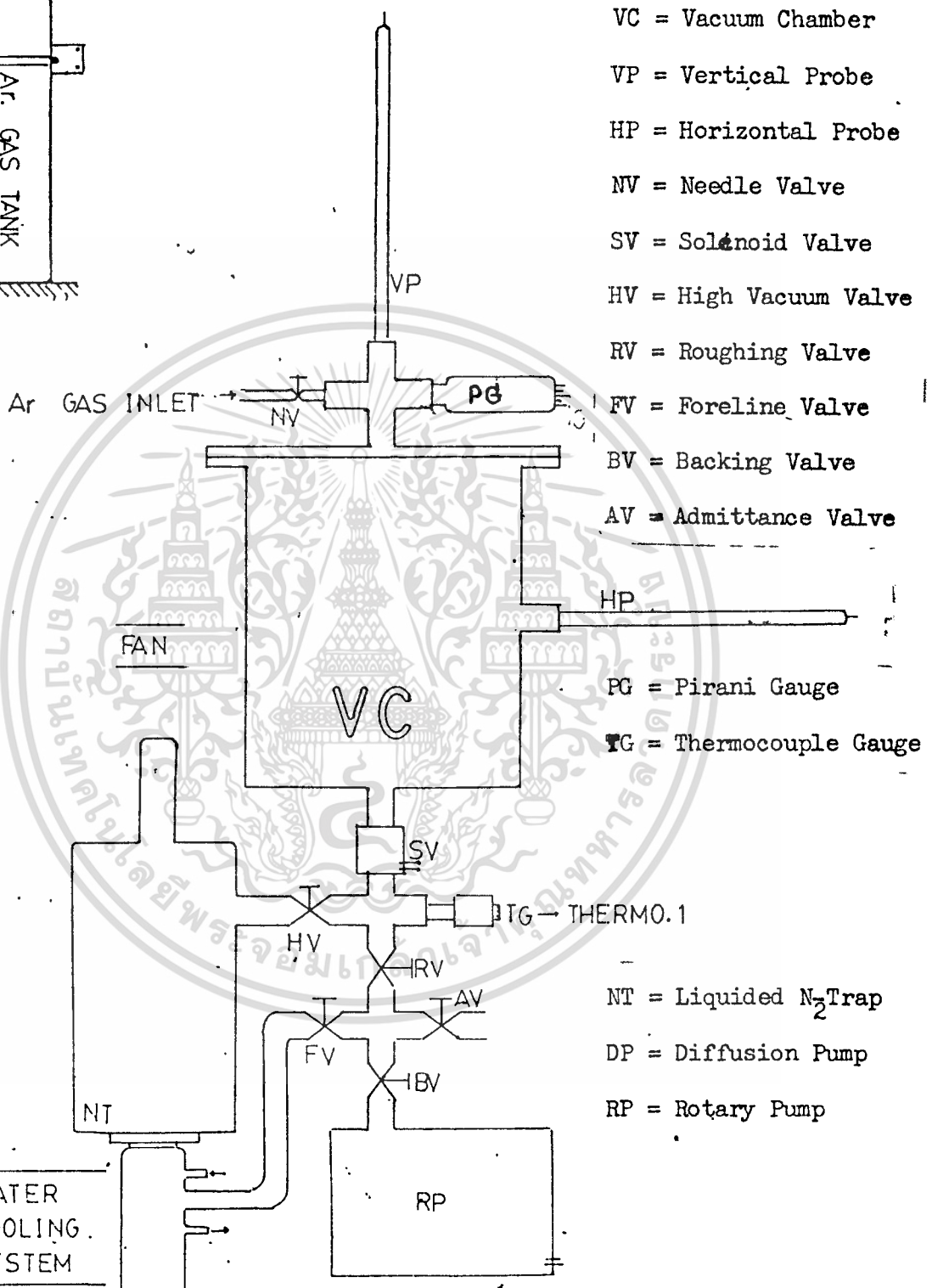
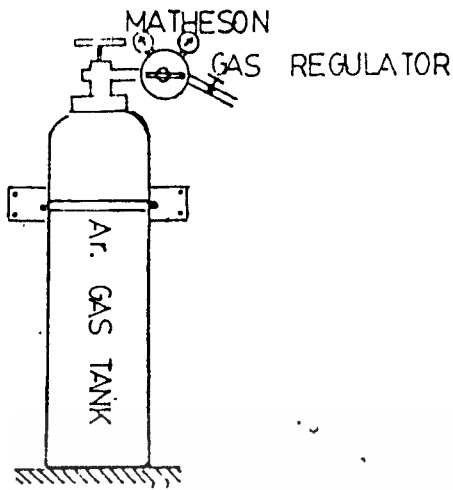
3.1 บทนำ

ชุดอุปกรณ์วิจัยซึ่งประกอบและสร้างขึ้นประกอบด้วยส่วนของกระเปาะสูญญากาศรูปทรงระฆังที่มีขดลวดความร้อน (Filaments) และแผ่นกริด (Grid) ทำหน้าที่เป็นระบบขั้วไฟฟ้า (Electrode System) ซึ่งและคักเป็นวงซ้อนอยู่ภายใน โดยกระเปาะสูญญากาศส่วนนี้ประกอบเหนือระบบปั๊ม (Pumping System) ซึ่งประกอบด้วย ปั๊มชนิดแพร่กระจายแบบกำลังสอง (Diffusion Pump) และโรตารี (Oil - Sealed Rotary Pump) ทั้งนี้โดยมีหัววัดความดันชนิดพิรานี (Pirani Gauge) และเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Gauge) ทำหน้าที่เป็นระบบวัดความดัน (Pressure Gauge System) สำหรับพลาสมาซึ่งสร้างขึ้นในกระเปาะเป็นชนิด พลาสมาอาร์กอน (Ar - Gas Plasma) โดยมีระบบจ่ายก๊าซ (Ar - Gas Handling System) ทำหน้าที่จ่ายก๊าซอาร์กอน และมีหัววัดแลงเมียร์ (Langmuir Probes) หัววัดปลายโลหะทรงกลม (Spherical Electrical Probe) ทำหน้าที่เป็นระบบวินิจฉัยคุณสมบัติพลาสมา (Plasma Diagnostic System)



รูปที่ 3

รูปที่ 3.1/1 แสดงภาพถ่ายชุดอุปกรณ์วิจัย (ถ่ายที่ ภาค วิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ม.สงขลานครินทร์ วิทยาเขต หาดใหญ่)



- VC = Vacuum Chamber
- VP = Vertical Probe
- HP = Horizontal Probe
- NV = Needle Valve
- SV = Solenoid Valve
- HV = High Vacuum Valve
- RV = Roughing Valve
- FV = Foreline Valve
- BV = Backing Valve
- AV = Admittance Valve
- PG = Pirani Gauge
- TG = Thermocouple Gauge

รูปที่ 3.1/2 โคอะแกรมแสดงส่วนประกอบชุดเครื่องมือวิจัย

3.2 กระจาเปาะสุญญากาศ

กระจาเปาะสุญญากาศในงานวิจัยสร้างจาก เหล็กสแตนเลสชนิดไม่ถูกเหนียวนำด้วยอำนาจแม่เหล็ก (Ummagnetized Stainless Steel Type 304) มีลักษณะเป็นกระจาเปาะรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16.7 เซนติเมตร สูง 21 เซนติเมตร เชื่อมปิดปลายค้ำหนึ่งกับแผ่นฝา ซึ่ง มีรูสำหรับช่องคู่อไฟฟ้าและก้านช้อคอบีม ส่วนปลายอีกค้ำเชื่อมตอเป็นปีกวงแหวนที่มีร่องเป็นวงสำหรับสวมยางวงกลม (O-ring) ซึ่งทำหน้าที่กันอากาศรั่ว เมื่อประกบกับแผ่นฝาปิดวงกลม ที่ค้ำแห่งกึ่งกลางแผ่นฝาปิดวงกลม มีก้านช้อคสำหรับสวมยึดช้อคตอแยกสามทาง เพื่อตอยึด หัววัดความคั้นแบบฟิราณีทางหนึ่ง วาล์วเข็ม (Needle Valve) ทางหนึ่ง และช่องยื่นหัววัดแนวคิ่งอีกทางหนึ่ง ส่วนก้านช้อคสำหรับช่องยื่นหัววัดแนวระดับถูกเชื่อมตอที่ผนังค้ำข้างที่ค้ำแห่งกึ่งกลางระหว่างปลายทั้งสองของตัวกระจาเปาะ ดังรูปที่ 3.1/2

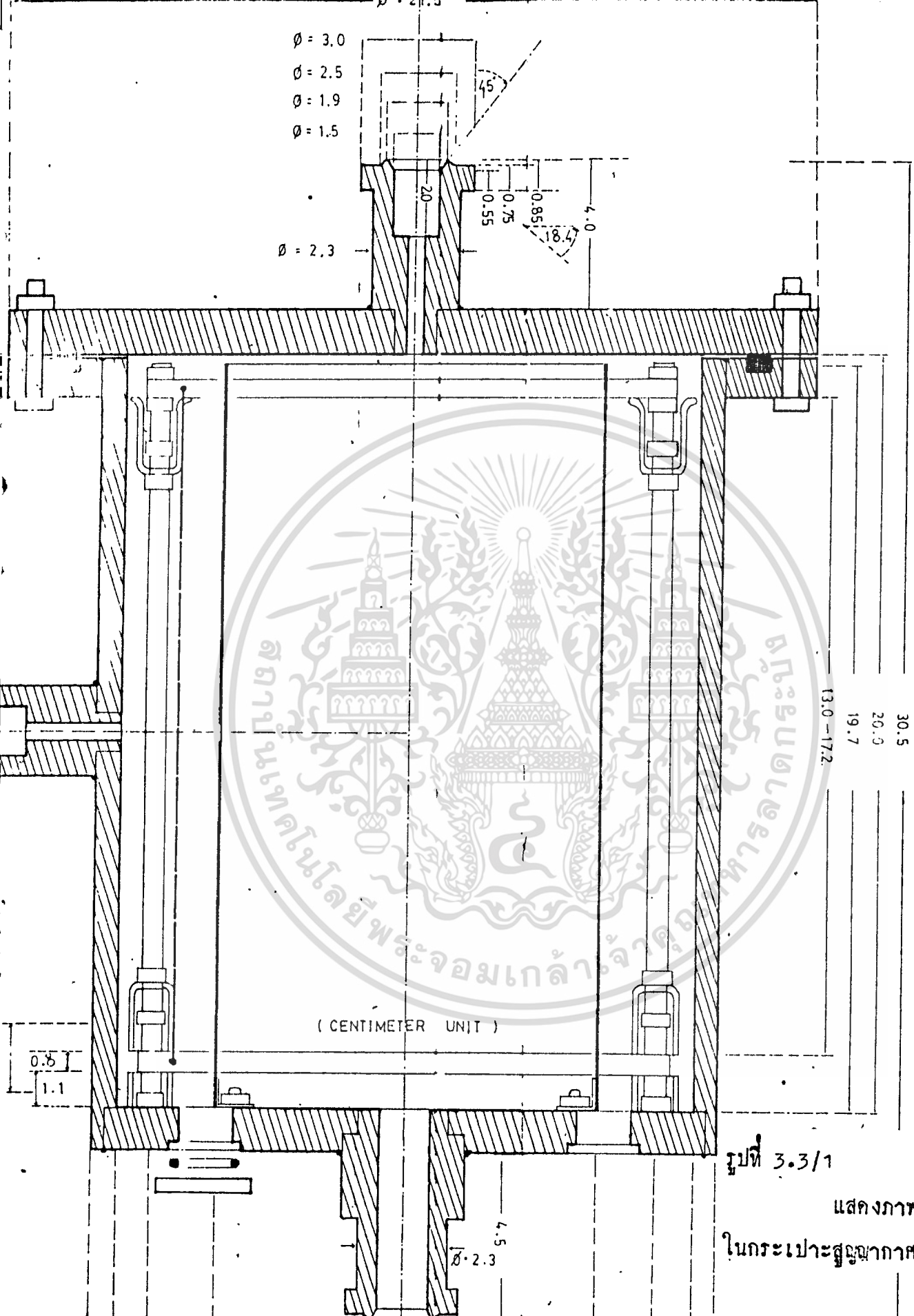
3.3 ระบบช้อไฟฟ้า

ระบบช้อไฟฟ้าภายในกระจาเปาะสุญญากาศประกอบด้วย ชุดลวดความร้อน (Filaments) ซึ่งทำจากโลหะทั้งสแตนเลสจำนวน 1 - 6 เส้น ซึ่งในแนวคิ่งขนานเป็นวงช้อในกระจาเปาะ เพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายอนุภาคอิเล็กตรอนโดยชบวนการเทอร์โมไออนิก อิมิชชัน (Thermionic Emission Process) และกริด (Grid) รูปทรงกระบอกซึ่งทำจากแผ่นตะแกรงเหล็กสแตนเลสค้ำเป็นวง วางช้ออยู่ค้ำในสุด

ลวดความร้อนแต่ละเส้นซึ่งซึ่งในแนวคิ่ง ปลายบนของลวดความร้อนจะยึดตอกับแถบยึดลวดความร้อนอันบน ซึ่งถูกค้ำให้ล้อยอยู่บนปลายแกนเหล็กสแตนเลส จำนวน 3 ทอน และมีฉนวนรูปประฉิ่งพยางมีให้แถบยึดลวดความร้อนสัมผัสผิวค้ำข้างของกระจาเปาะ ส่วนปลายค้ำที่เหลือของแกนเหล็กจะยึดกับแท่งเซรามิก ซึ่งยึดตอกับฐานค้ำในของกระจาเปาะอีกที่หนึ่ง สำหรับปลายล่างของลวดความร้อน จะยึดกับแถบยึดลวดความร้อนอันล่างซึ่งวางสวมล้อยู่กึ่งกลางของแท่งเซรามิก 3 อัน ที่ทำหน้าที่ค้ำแกนเหล็ก โดยมีฉนวนรูปหลอดทำหน้าที่พยางแถบยึดลวดความร้อนอันล่างมิให้หล่นสัมผัสฐานของกระจาเปาะ และฉนวนรูปถ้วย ทำหน้าที่ยันมิให้แถบยึดลวดความร้อนอันล่างเขยื้อนขึ้นไปสัมผัสแกนเหล็ก ดังรูปที่ 3.3/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

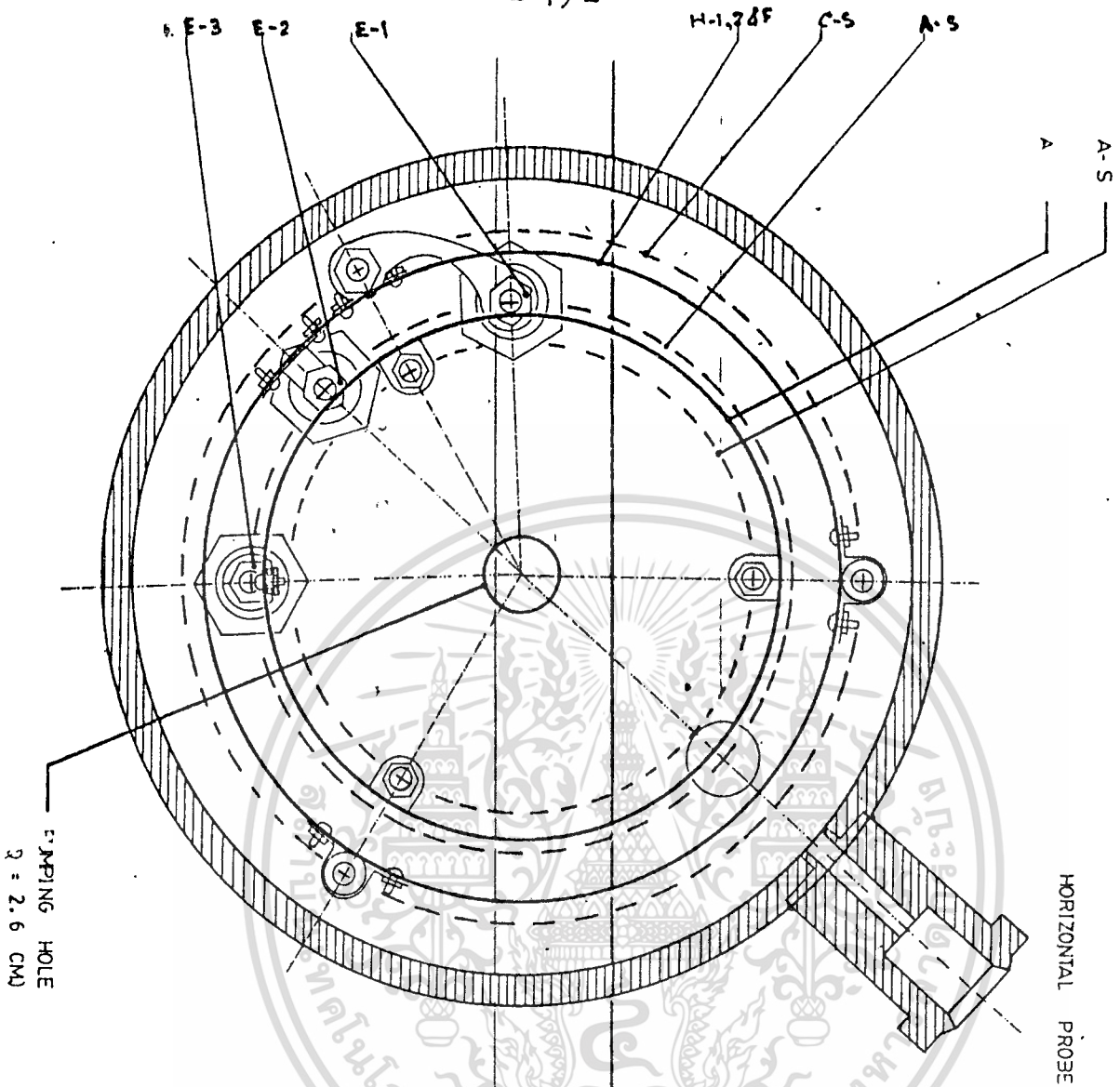
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3/1

แสดงภาพระบบชั่วคราว
ในกระเปาะสูญอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในสถานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- A = cylindrical shaped (anode) grid (stainless steel; $\phi = 10.2$ cm.)
- A-s = line of the (stainless steel) screws holding the grid ($\phi = 9.2$ cm.)
- C-s = line of the screws holding the ceramic rods, which hold the verticle filament holder rods ($\phi = 13.6$ cm.)
- E-1 = electrode to the upper circular filament holder
- E-2 = electrode to the lower circular filament holder
- E-3 = electrode to the cylindrical shaped (anode) grid
- E-s = Line of the lower (pyrex) glass-window and electrodos ($\phi = 11.0$ cm.)
- H-1, 2&F = lower and upper circular filament (stainless steel) holders and (tungsten) filaments, respectively ($\phi = 12.8$ cm.)

รูปที่ 3.3/2

เอกสารนี้แสดงภาพหน้าตัดของ ระบบหัวไฟฟ้าในกระเปาะสุญญากาศให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

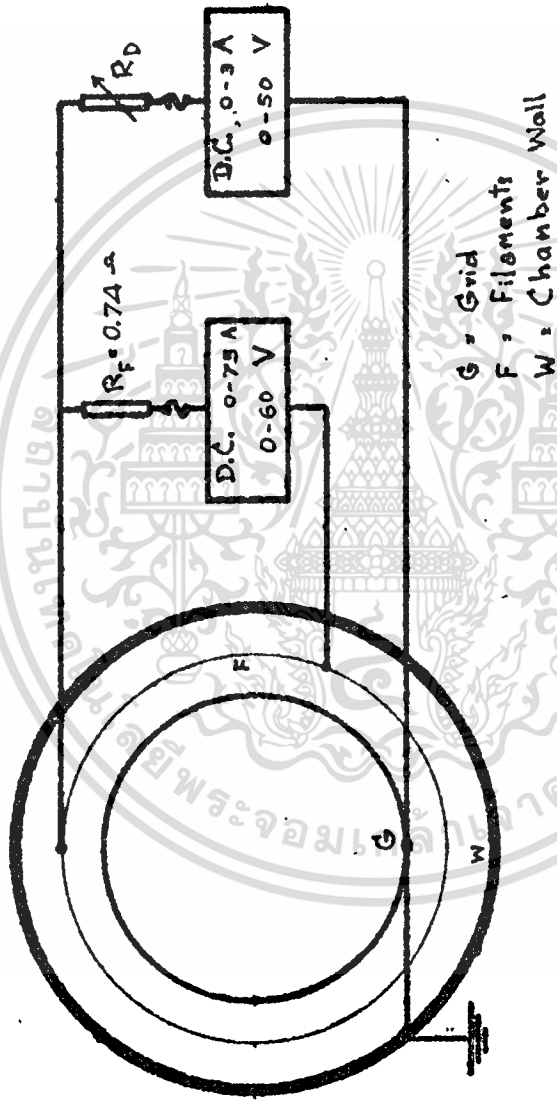
ในการ เชื่อมโยงวงจรไฟฟ้าภายในกระเปาะ แกนเหล็กสแตนเลสซึ่งทำหน้าที่เชื่อมโยงวงจร-
ไฟฟ้าไปยังปลายบนของลวดความร้อนนั้นจะมีแผ่นตัวนำย่อยรูปมูมมอแรง เชื่อมต่อวงจรไปยังขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่ง
ส่วนแถบยึดลวดความร้อนอันล่าง ซึ่งเชื่อมวงจรไฟฟ้ากับปลายล่างของลวดความร้อนนั้นจะมีห่วงสวม
เข้ากับขั้วไฟฟ้าอีกขั้วหนึ่งพอดี กริดซึ่งยึดติดกับฐานของกระเปาะควายนอกสแตนเลส จะมีแผ่นตัวนำย่อย
รูปง่าม เชื่อมต่อเป็นวงจรกับขั้วไฟฟ้าอีกขั้วหนึ่งเช่นกัน ดังรูปที่ 3.3/2

3.3.1 วงจรไฟฟ้าคิซซาร์ค

วงจรไฟฟ้าภายนอก ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับระบบขั้วไฟฟ้าในกระเปาะ
เพื่อให้เกิดขบวนการสร้างพลาสมาอาร์กอน มีวงจรดังรูป 3.3.1/1

ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 0-75 แอมแปร์ 0-60 โวลต์

ทำหน้าที่เผาผลาญความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงพอที่จะคายอนุภาคอิเล็กตรอนในจำนวนที่มากพอ และ
แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 0-3 แอมแปร์ 0 - 50 โวลต์ ทำหน้าที่สร้างความ-
ต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างลวดความร้อนกับกริดในขนาดที่ก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าที่แรงมากพอ ซึ่งเมื่อ
อนุภาคอิเล็กตรอนที่หลุดจากลวดความร้อน และถูกเร่ง (Acceleration) ภายใต้อสนามไฟฟ้า
นี้แล้ว จะมีพลังงานเพียงพอที่จะก่อให้เกิดขบวนการแตกตัว (Ionization) กับโมเลกุลก๊าซ-
อาร์กอนในกระเปาะได้



รูปที่ 3.3.1/1

แสดงวงจรไฟฟ้าเนวคความรอน และ วงจรไฟฟ้าทริชวาร์ค

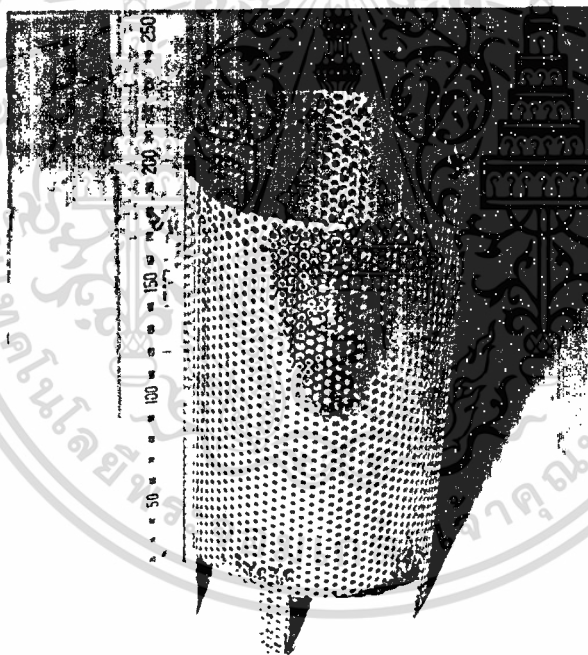
3.3.2 การสร้างระบบขั้วไฟฟ้าในกระเปาะสูญญากาศ
ส่วนประกอบต่าง ๆ ซึ่งประกอบเป็นระบบขั้วไฟฟ้าในกระเปาะสูญญากาศ มีรายละเอียด

คือ

กริด (Grid)

สร้างจากแผ่นตะแกรงสแตนเลสชนิดไม่เหนียวนำด้วยอำนาจแม่เหล็ก ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.2 เซนติเมตร ความโปร่ง (Transparency) ประมาณ 22.4 % ม้วนเป็นรูปทรงกระบอก ยึดริมชั้นด้วยนอตสแตนเลสโดยมี

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง	10.3	± 0.1	เซนติเมตร
สูง	19.8	± 0.1	เซนติเมตร



รูปที่ 3.3.2/1

ภาพถ่ายกริด

แถบยึดลวดความร้อนอันบน

สร้างจากแผ่นตะแกรงสแตนเลสชนิดเดียวกับกริด โดยตัดเป็นแถบกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร, ยาวประมาณ 65 เซนติเมตร ใช้ส่วนเจาะขยายรูกึ่งกลางแถบให้ใหญ่พอสำหรับสวมนอกสแตนเลส(ซึ่งทำหน้าที่ยึดปลายลวดความร้อนกับแถบวงแหวน) จากนั้นม้วนแถบเป็นวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.8 เซนติเมตร

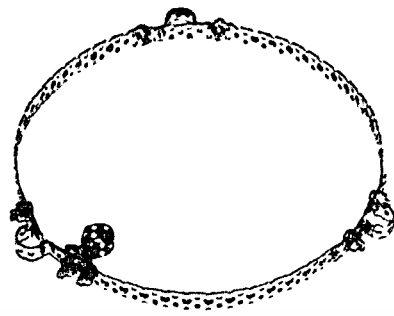
ที่ตำแหน่งบนแถบ 3 ตำแหน่ง ซึ่งมีระยะห่างระหว่างตำแหน่งเท่า ๆ กัน(ประมาณ 13.4 เซนติเมตร) จะมีข้อยึดติดอยู่ เพื่อใช้สวมยึดบนแกนเหล็กสแตนเลส 3 ท่อน



รูปที่ 3.3.2/2 แสดงภาพถ่าย แถบยึดลวดความร้อนอันบน

แถบยึดลวดความร้อนล่าง

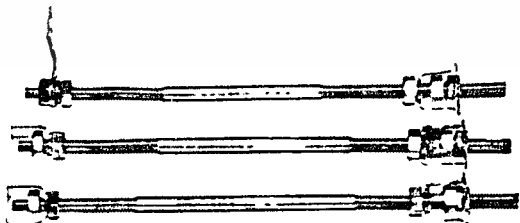
มีลักษณะ เช่นเดียวกับแถบยึดลวดความร้อนบนทุกประการ ท่างแต่มีห่วงซึ่งจะสวมเข้ากับขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งในกระเปาะไคโพติ



รูปที่ 3.3.2/3 แสดงภาพถ่าย แถบ ยึดลวดความร้อนอันล่าง

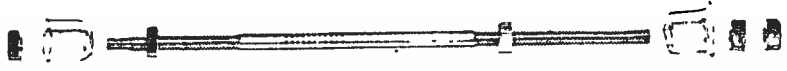
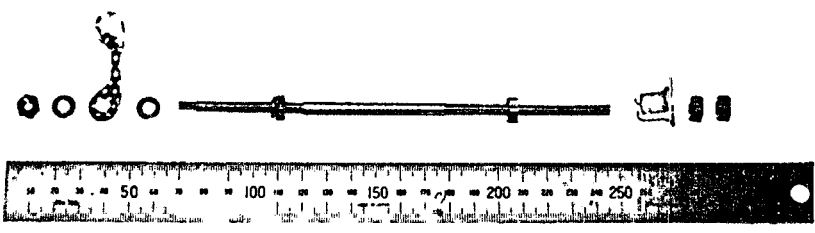
แกนสำหรับจับแถบยึดลวดความร้อนอันบน

สร้างจากเหล็กสเตนเลส(ชนิดไม่ถูกเหนียวนำควยอำนาจแม่เหล็ก) แบบเส้น โดย
ตัดเป็นท่อนขนาดความยาว 17.7 เซนติเมตร ทำเกลียวที่ปลายทั้งสอง เกลียวที่ปลายด้านหนึ่ง
เพื่อสวมยึกับแหงเซรามิกและมีเกลียวสำหรับขันนอตยึดจนวนรูปด้วยเพื่อควแถบยึดลวดควนำอันล่าง
ส่วนเกลียวที่ปลายอีกด้านหนึ่งสำหรับใช้ขันนอตเพื่อยึดและปรับระดับแถบยึดลวดควนำอันบน และยัง
เพื่อยึดจนวนรูปประดังอีกควย อนึ่ง แผ่นควนำย่อยรูปมมมอแรงซึ่งทำหน้าที่เชื่อมวงจรไฟฟ้าระหว่าง
แกนเหล็กกับควไฟฟ้า ก็สวมในแกนเหล็กนี้และถูกยึดควยนอตและเกลียวบนแกนเหล็กเช่นกัน)



รูปที่ 3.3.2/4 แสดงภาพถ่าย แกนสำหรับจับแถบยึดลวดความร้อนอันบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3.2/5 แสดงภาพถ่ายแยกส่วนประกอบและ ลำดับการประกอบ

ชิ้นตัวนำย่อย

สร้างจากแผ่นตะแกรงสแตนเลสชนิดเดียวกับกริด โดยตัดเป็นรูปง่ามอันหนึ่ง และ มุมมอแรงอันหนึ่ง ทั้งนี้โดยมีขนาดพอเหมาะที่จะใช้เชื่อมต่อดวงจรไฟฟ้าในกระเปาะได้

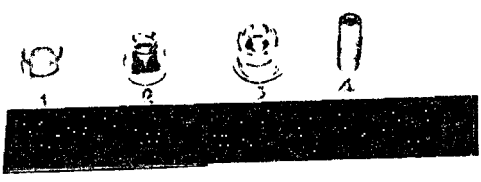


รูปที่ 3.3.2/6 แสดงภาพถ่าย ชิ้นตัวนำรูปง่าม(1) และรูปมุมมอแรง(2)

ฉนวนไฟฟ้า

ฉนวนไฟฟ้าซึ่งนำมาใช้ประกอบในระบบขั้วไฟฟ้าในกระเปาะนี้มี 4 ชนิด คือ ฉนวนรูปหลอด ฉนวนรูปถ้วย ฉนวนรูปประฆัง และแท่งเซรามิก กังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3.2/7 แสดงภาพถ่ายฉนวนรูปหลอด(1) ฉนวนรูปถ้วย(2) ฉนวนรูปประฉิ่ง(3) และ แท่งเซรามิก (4)

ฉนวนรูปหลอด

สร้างจากหลอดแก้วไพเรกซ์ (Pyrex - Glass Tube) ขนาดความสูงประมาณ 1 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 1.4 เซนติเมตร หนา 0.15 เซนติเมตร

ฉนวนรูปถ้วย

สร้างจากหลอดแก้วไพเรกซ์ เป้าเป็นรูปถ้วยก้นรัว โดยมีขนาดความสูงประมาณ 1.5 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางรูที่ก้นถ้วยประมาณ 0.5 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกที่ปากถ้วย 1.4 เซนติเมตร หนา 0.15 เซนติเมตร

ฉนวนรูปประฉิ่ง

สร้างจากหลอดแก้วไพเรกซ์ เป้าเป็นรูปประฉิ่งยกครีว โดยมีขนาดความสูงประมาณ 1.7 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางรูที่ยอกระฉิ่งประมาณ 0.5 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางปากกระฉิ่งประมาณ 1.8 เซนติเมตร หนา 0.15 เซนติเมตร

แท่งเซรามิก

เป็นท่อนขนาดความสูง 1.9 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.78 เซนติเมตร ที่ปลายทั้งสองมีร่องเกลียวซึ่งสวมยึกับเกลียวบนปลายแกนเหล็กและนอตบนฐานกระเปาะทอง

ฉนวนความร้อน

สร้างจากโลหะทั้งสเทนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.015 เซนติเมตร

3.3.3 ขั้นตอนการประกอบระบบขั้วไฟฟ้าในกระเปาะสูญญากาศ

การประกอบระบบขั้วไฟฟ้าในกระเปาะสูญญากาศที่ใช้วิจัย มีขั้นตอนตามลำดับ ดังนี้

1. สวมยึกตาป สแตนเลสบนฐานกระเปาะ ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าสวมยึกอยู่ 3 ขั้ว



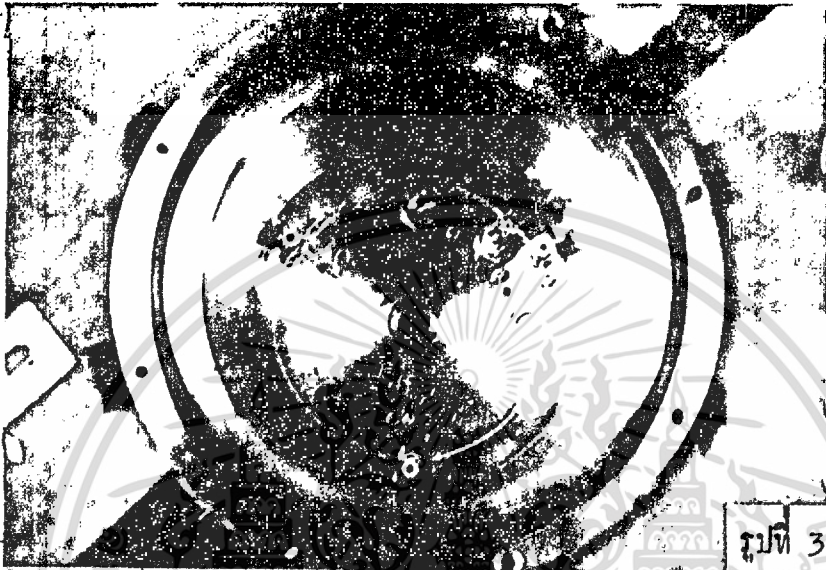
รูปที่ 3.3.3/1

2. สวมยึกแท่งเซรามิกกับตาปแต่ละอัน
3. วางฉนวนรูปหลอดกลมท่อนเซรามิกแต่ละอัน



รูปที่ 3.3.3/2

4. วางแถบยึดลวดความร้อนอันล่าง (ซึ่งยึดปลายหนึ่งของลวดความร้อนไว้เรียบร้อยแล้ว) ให้หูของแถบสวมคล้องแท่งเซรามิกแต่ละแท่ง ซึ่งห่วงบนแถบจะคล้องบนขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งพอดี ยึดห่วงบนแถบกับขั้วไฟฟ้าแคพอแน่น



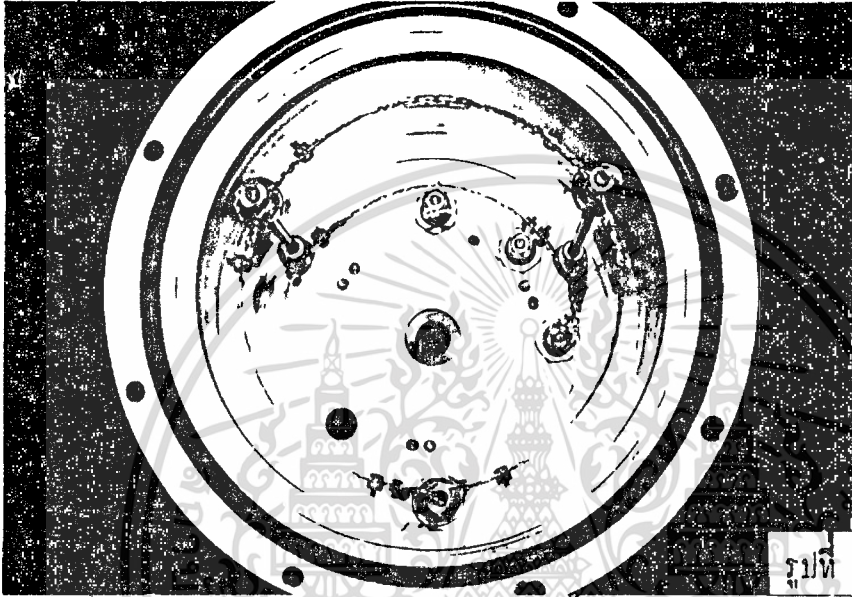
5. สวมแถบสำหรับจับแถบยึดลวดความร้อนอันบนทั้ง 3 ท่อน ซึ่งเตรียมไว้ในรูป 3.3.2/4 บนท่อนเซรามิก โดยจกให้ยื่นคว้านำย่อย รูปมุมมอแรงยึดติดกับขั้วไฟฟ้าอีกขั้วหนึ่งแคพอแน่น จากนั้นยึดจนวนรูปถ้วยให้ค้ำยัน แถบยึดลวดความร้อนอันล่างแคพอแน่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. วางแถบยึดลวดความร้อนอันบน โดยให้หูของแถบสวมบนปลาย
แกนเหล็กเหนือฉนวนรูปประฆัง

ยึดแถบกับแกนเหล็กแต่พอแน่น จากนั้นยึดปลายลวดความร้อน
อีกปลายที่เหลือกับแถบยึดลวดความร้อนอันบน



รูปที่ 3.3.3/5

7. สวมกริดลงตรงกลางกระเปาะ โห่ขายึดของกริดสวมบนตาป
สแตนเลสซึ่งยึดติดอยู่กับฐานของกระเปาะ และจัดให้ขามของชิ้นตัวนำย่อย
รูปง่ามซึ่งยึดอยู่กับขั้วไฟฟ้าที่เหลือสอดคนอติคมกริดพอดี

ยึดขายึดของกริดให้ติดกับฐาน และนอตยึดกับชิ้นตัวนำย่อยรูปง่าม
แต่พอแน่น



รูปที่ 3.3.3/6 โยชน์ด้านการค้า

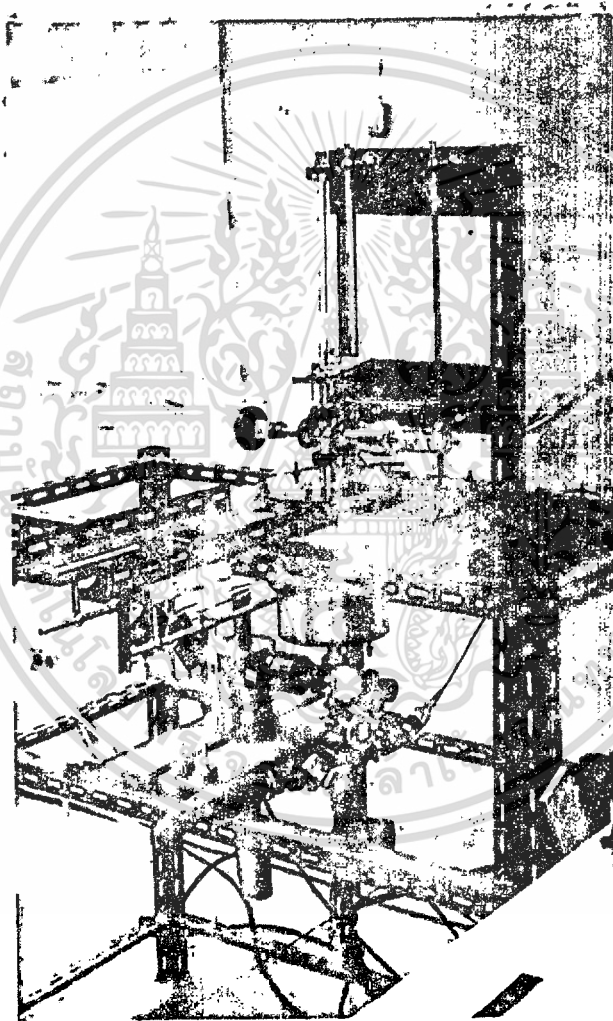
เอกสารนี้เป็นเอกสารลับ... ท่านนั้น ไม่อนุ... โยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ระบบวินิจฉัยคุณสมบัติพลาสมา

การวินิจฉัยคุณสมบัติของพลาสมาอาร์กอนที่เกิดในกระเปาะสูญญากาศ จะอาศัยหัววัดสองชนิด

คือ หัววัดแลงเมอว์ (Langmuir Probe) ชนิดหนึ่ง และหัววัดปลายโลหะทรงกลม (Spherical Electrical Probe) อีกชนิดหนึ่ง โดยเมื่อประกอบกับกระเปาะสูญญากาศ จะสามารถบังคับเคลื่อนหัววัดไปมาได้ด้วยอำนาจแม่เหล็กจากภายนอก

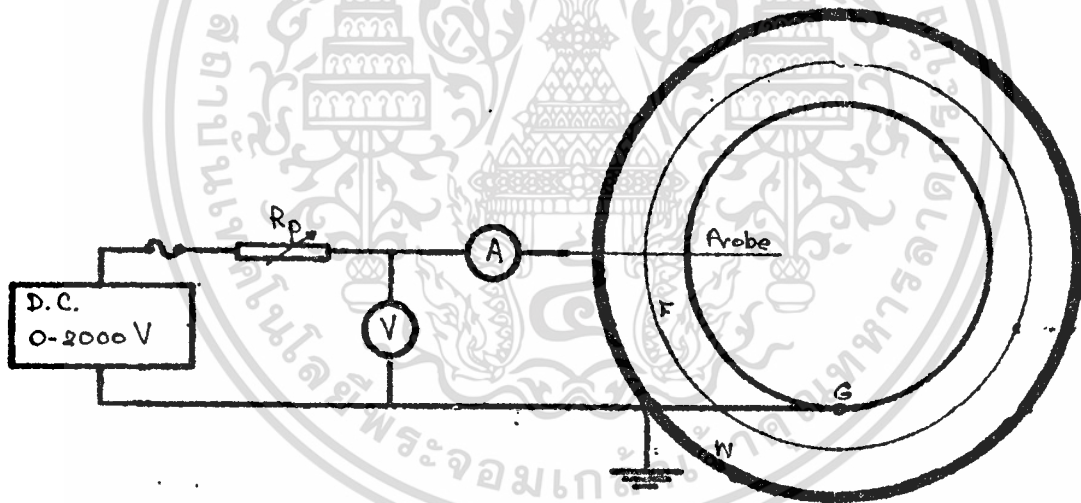


รูปที่ 3.4/1 แสดงภาพถ่ายหัววัดซึ่งบังคับเคลื่อนด้วยอำนาจแม่เหล็กจากภายนอก ซึ่งประกอบอยู่กับกระเปาะสูญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 วงจรไฟฟ้าของหัววัด (Probe Circuit)

วงจรไฟฟ้าภายนอก ซึ่งทำหน้าที่จ่ายศักดาไฟฟ้าให้หัววัด เพื่อให้หัววัดจะสามารถดึงอนุภาค อิเล็กตรอนหรืออนุภาคไอออนจากบรรยากาศพลาสมาอาร์กอนในกระเปาะสูญญากาศได้นั้น มีวงจรคั้งรูป 3.4.1/1 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 0 - แอมแปร์, 0 - 2000 โวลต์ ทำหน้าที่จ่ายศักดาไฟฟ้าให้หัววัด และมีเตอร์ไฟฟ้าแบบวี-โอ-เอ็ม (VOM, Simpson) ทำหน้าที่วัด กระแสหัววัดเครื่องหนึ่ง และวัดศักดาไฟฟ้าของหัววัดอีกเครื่องหนึ่ง



รูปที่ 3.4.1/1 แสดงวงจรไฟฟ้าของหัววัด

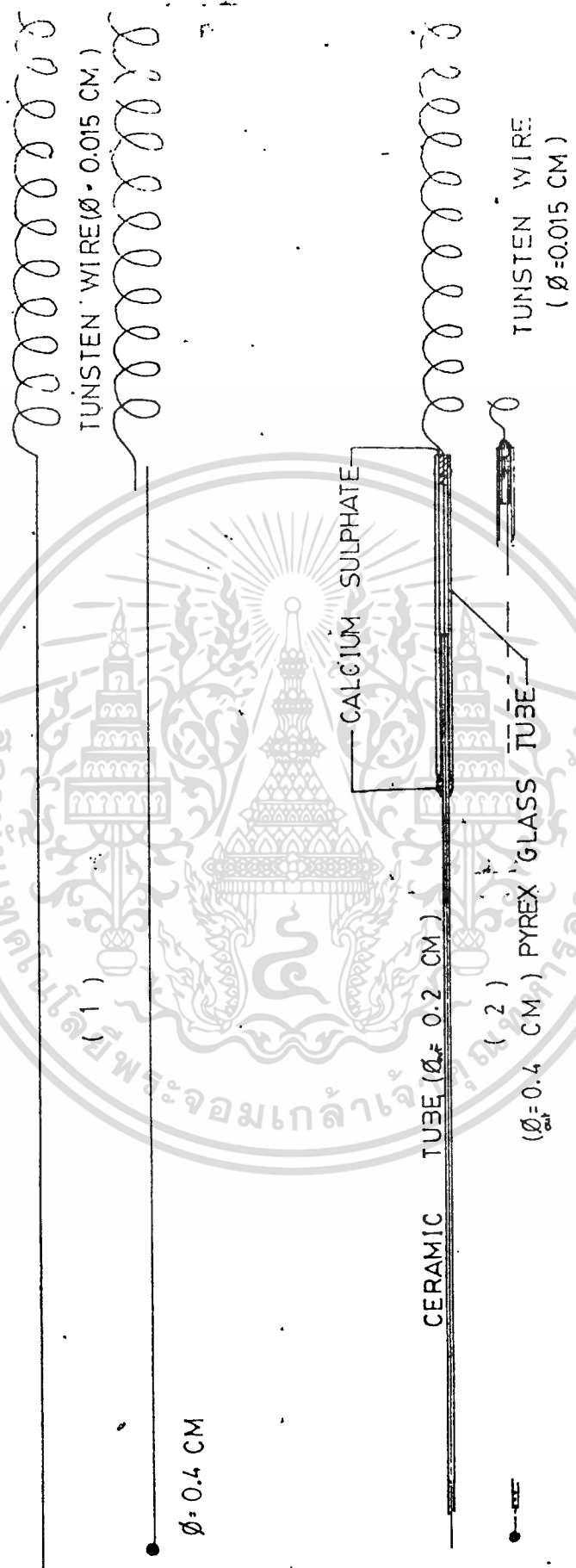
3.4.2 การสร้างหัววัด

หัววัดแรงเมอริที่ใช้ สร้างจากลวดโลหะทั้งสเทนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.015 เซนติเมตร ยาวประมาณ 100 เซนติเมตร ชกเกลียวสปริงปลายค้ำหนึ่งบนเกลียวนอก (Nut) ซึ่งเมื่อคลายออก จะให้เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร โดยให้เหลือปลายลวดอีกค้ำหนึ่งยาวประมาณ 25 เซนติเมตร สอดปลายลวดค้ำไม่พันเกลียวผ่านรูหลอดแก้วไพเรกซ์ (Pyrex Glass Tube) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 0.4 เซนติเมตร ยาวประมาณ 10 - 14 เซนติเมตร แล้วสอดผ่านรูหลอดเซรามิก (Ceramic Tube) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 0.2 เซนติเมตร อีกครั้งหนึ่ง

ในการยึดปลายหลอดเซรามิก และหลอดแก้วไพเรกซ์เข้าด้วยกัน ได้เลือกใช้ปูนปลาสเตอร์ โดยใช้หลอดนิกเกิลยาคูปูนปลาสเตอร์เหลว ซึ่งผสมเตรียมไว้บนกระจกนาฬิกา นิกเกิลยาคูอีกเข้าในรูของหลอดแก้วซึ่งมีลวดทั้งสเทนสอดคาอยู่จนปูนล้นออกอีกปลายหนึ่งของหลอดแก้ว จากนั้นอัดปลายหลอดเซรามิกค้ำที่อยู่ใกล้หลอดแก้ว แทรกปูนปลาสเตอร์สวมเข้าไปในรูของหลอดแก้ว พอให้ปลายทั้งสองซ้อนกันยาวประมาณ 2 เซนติเมตร แล้วเติมปูนปลาสเตอร์บริเวณรอยต่อให้มากขึ้น ระหว่างรอปูนแข็งตัว หลอดแก้วและหลอดเซรามิกถูกจัดให้อยู่ในแนวเส้นตรง โดยใช้หลอดแก้วไพเรกซ์ขนาดเดียวกันสวมรองรับหลอดเซรามิก

เมื่อปูนแข็งตัว ใช้ใบมีดแต่งผิวปูนบริเวณรอยต่อ จากนั้นนำไปไล่ความชื้นซึ่งเกิดจากการซังไอน้ำบริเวณกลางหลอดแก้วโดยวิธีอบร้อนในสุญญากาศ แล้วจึงแต่งปลายลวดที่โผล่พ้นปลายหลอดเซรามิกให้เหลือโผล่พ้นปลายหลอดเซรามิก 0.8 เซนติเมตร

สำหรับหัววัดปลายโลหะทรงกลมก็สร้างโดยวิธีที่คล้ายคลึงกัน โดยเชื่อมลูกปืนเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4 เซนติเมตร กับลวดโลหะนิโครม (Nichrome Wire) ก่อน แล้วนำไปประกอมกับหลอดเซรามิกและหลอดแก้วไพเรกซ์ในวิธีเดียวกัน โดยจัดให้ลูกปืนเหล็กอยู่ห่างจากปลายหลอดเซรามิก 0.8 เซนติเมตร จากนั้นจึงเชื่อมต่อปลายลวดนิโครมที่โผล่พ้นหลอดแก้วกับเกลียวลวดทั้งสเทนที่เตรียมไว้



รูปที่ 3.4.2/1 แสดงภาพการประกอบหัววัดแสงเมอร์ และหัววัดปลายโพละทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

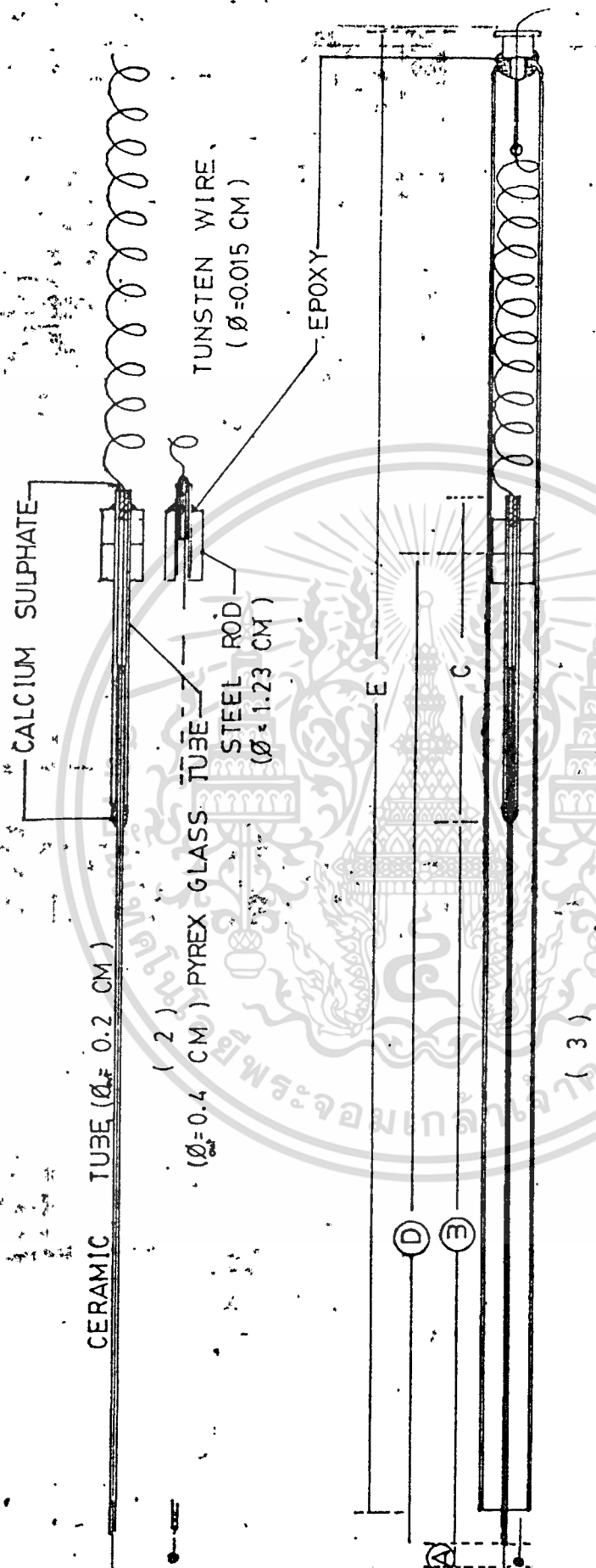
3.4.3 การสร้างระบบบังคับหัววัดเคลื่อนในสูญญากาศด้วยอำนาจเหนี่ยวนำจากแม่เหล็กภายนอก

เพื่อให้สามารถบังคับหัววัดซึ่งสร้างขึ้นในหัวข้อ 3.4.2 เคลื่อนที่ได้ในกระเปาะซึ่งเป็นสูญญากาศ โดยอาศัยอำนาจเหนี่ยวนำจากแม่เหล็กภายนอก จึงยึดท่อนเหล็กอ่อนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร กับปลายหลอดแก้วของหัววัดที่สร้างขึ้น โดยอาศัยกาวอีพอกซี (Epoxy) ชนิดที่มีค่าความต้านไอค่า ที่กึ่งกลางของท่อนเหล็กอ่อน มีเส้นซีครอมผิวเป็นวง เพื่ออาศัยเป็นตำแหน่งอ้างอิงของตำแหน่งหัววัดในกระเปาะ

สวมหัววัดที่ประกอบท่อนเหล็กอ่อนเรียบร้อยแล้วในหลอดแก้วไฟเรซซ์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 1.5 เซนติเมตร หนา 0.1 เซนติเมตร ยาว 45 เซนติเมตร และมีปลายหนึ่งถูกเป่าให้มนเพื่อลดขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง โดยให้ปลายหลอดแก้วมีเกลียวลอดผ่านช่องปลายมน ออกมายาวประมาณ 8 เซนติเมตร หลอดแก้วไฟเรซซ์จะมีขนาดซึ่งสวมวัดพอดีกับข้อต่อของช่องยื่นหัววัดของกระเปาะสูญญากาศซึ่งสร้างขึ้นในหัวข้อ 3.2

สอดปลายหลอดซึ่งโผล่จากช่องปลายมนของหลอดแก้ว ผ่านรูของเข็มฉีดยาซึ่งมีขนาดของรูานสวมใหญ่พอดีกับช่องค้ำปลายมนของหลอดแก้ว โดยสอดผ่านเข้าทางค้ำปลายเข็ม แล้วตอกปลายเข็มให้แบนเพื่อให้เข็มฉีดยายึดติดกับหลอดที่สอดคาอยู่ จากนั้นใช้กาวอีพอกซีอุดปลายเข็มกันรูไว้อีกครั้งหนึ่ง แล้วจึงยึดฐานสวมของเข็มฉีดยาติดกับช่องปลายมนของหลอดแก้วด้วยกาวอีพอกซีอีกทีหนึ่ง เข็มฉีดยาซึ่งต่อเป็นวงจรไฟฟ้ากับหลอดหัววัดนี้จะทำหน้าที่เป็นรูเสียบขั้วไฟฟ้าของหัวเสียบขั้วไฟฟ้า (Jack) หัวไปได้อย่างพอดี

หลังจากประกอบชุดหัววัดซึ่งอยู่ในหลอดแก้วนี้กับกระเปาะสูญญากาศเรียบร้อยแล้ว เนื่องจากเพื่อให้สามารถบังคับเคลื่อนจากภายนอกได้สะดวกยิ่งขึ้น ได้สร้างชุดรางเลื่อนแท่งแม่เหล็กแบบปรับการเคลื่อนที่ด้วยมือติดตั้งขนานกับหลอดแก้ว ซึ่งอำนาจเหนี่ยวนำจากแท่งแม่เหล็กจะดึงดูดแท่งเหล็กอ่อนที่ยึดติดกับหัววัดในหลอดแก้วให้หยุดอยู่กับที่หรือเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งตามต้องการได้



PROBE NO	TYPE	MEASURE RANGE	SIZE (CM)				
			A	B	C	D	E
1	LANGMUIR PROBE	$-2.0 \leq r \leq 7.8$	0.8	12.2	10.1	20.7	45.7
2	LANGMUIR PROBE	$-5.0 \leq r \leq 7.8, -10.0 \leq z \leq 10.0$	0.8	23.2	12.3	34.0	45.7
3	SPHERICAL PROBE ($\phi = 0.4$)	$-5.0 \leq r \leq 7.8, -10.0 \leq z \leq 10.0$	0.8	23.3	13.5	35.0	45.7

รูปที่ 3.4.3/1 แสดงภาพการประกอบระบบบึงกัมหัววัด เคสื่อนในสูญญากาศด้วยอำนาจเพื่อย่นำจากแม่เหล็กภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

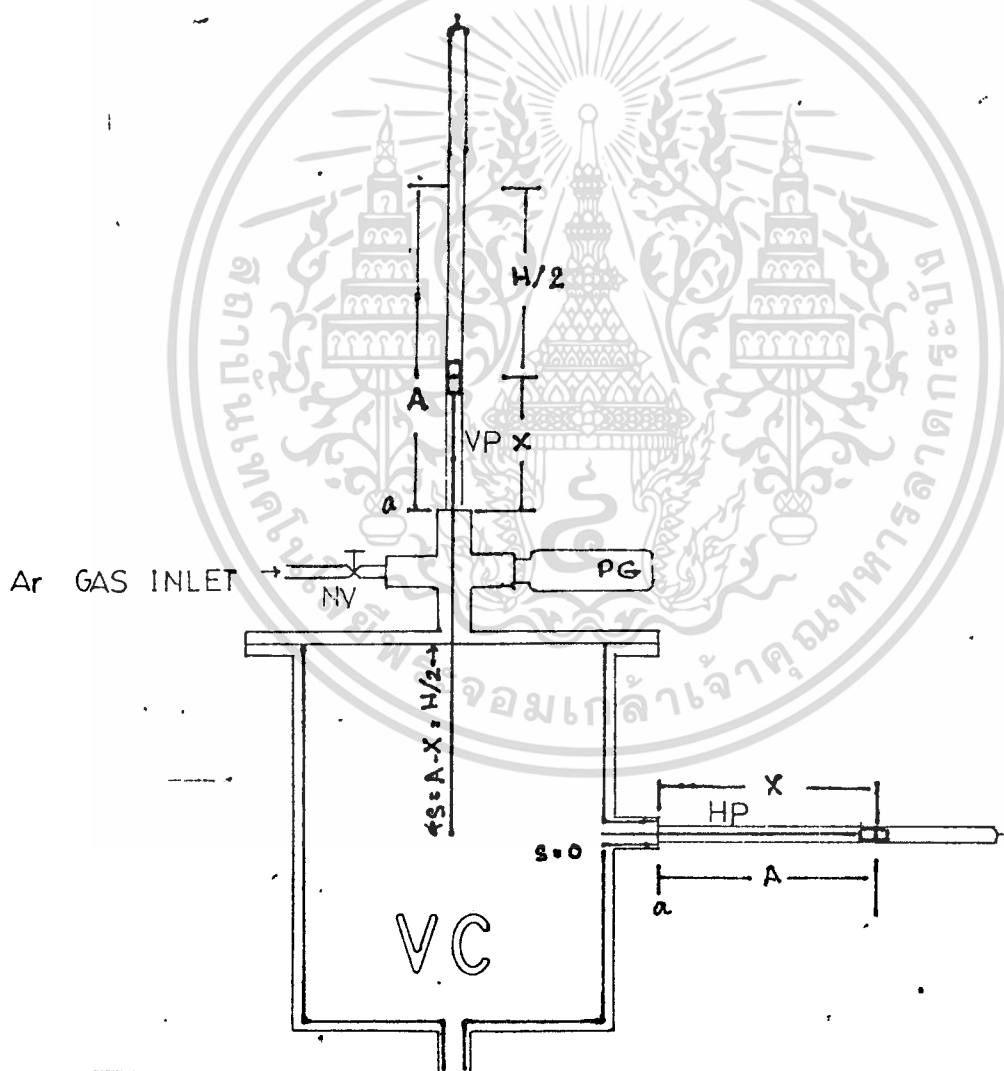
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4.3/2 แสดงภาพถ่าย หัววัดแสงเมอร์(1) และหัววัดปลายโลหะทรูทอม(2)

3.4.4 เทคนิคการวัดตำแหน่งหัววัดในกระเปาะ

ควยเหตุที่กระเปาะสร้างขึ้นจากเหล็กสแตนเลส จึงไม่สามารถมองเห็นตำแหน่งของหัววัดในกระเปาะ ดังนั้นในการจะทราบตำแหน่งของหัววัดจำเป็นต้องอาศัยตำแหน่งอ้างอิงบนชุดหัววัด (คือ เส้นซีคบนท่อนเหล็กก่อน) เปรียบเทียบกับตำแหน่งบนกระเปาะ (ซึ่งเลือกใช้ ขอบนอกสุดของข้อต่อ ตำแหน่ง α) พิจารณาจากรูปที่ 3.4.4/1



รูปที่ 3.4.4/1 แสดงภาพ การกำหนดค่า α , x และ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ถ้าห้วงเคลื่อนมาอยู่ที่ตำแหน่งระดับเดียวกับผนังคานในของกระเปาะ กำหนดให้เส้นซิกมบน
 ทอนเหล็กอ่อนอยู่ห่างจากตำแหน่ง a เป็นระยะทาง A และเมื่อห้วงถูกเคลื่อนไปหยุดที่ตำแหน่ง
 ใด ๆ ในกระเปาะสูญอากาศ กำหนดให้เส้นซิกมบนทอนเหล็กอ่อนอยู่ห่างจากตำแหน่ง a เป็นระยะ-
 ทาง X

จะคำนวณตำแหน่งของห้วงได้ จากความสัมพันธ์

$$S = A - X \quad (3.1)$$

เมื่อ

S คือ ระยะห่างของตำแหน่งห้วงในกระเปาะถึงผนังกระเปาะในแนวการเคลื่อนที่ของ
 ห้วง

หากต้องการทราบตำแหน่งห้วงในกระเปาะเทียบกับตำแหน่งกึ่งกลางของกระเปาะ ซึ่งเป็น
 ตำแหน่งที่อยู่ห่างจากผนังข้างในแนวรัศมีเป็นระยะทางเท่ากัน และอยู่ห่างจากผนังบนและผนัง
 ด้านล่างในแนวเส้นแกนของกระเปาะเป็นระยะทางเท่ากัน จะคำนวณตำแหน่งของห้วงได้ดังนี้

$$R(X) = \frac{D}{2} - (A - X) \quad \dots \text{กรณีการยื่นห้วงในแนวรัศมี} \quad (3.2)$$

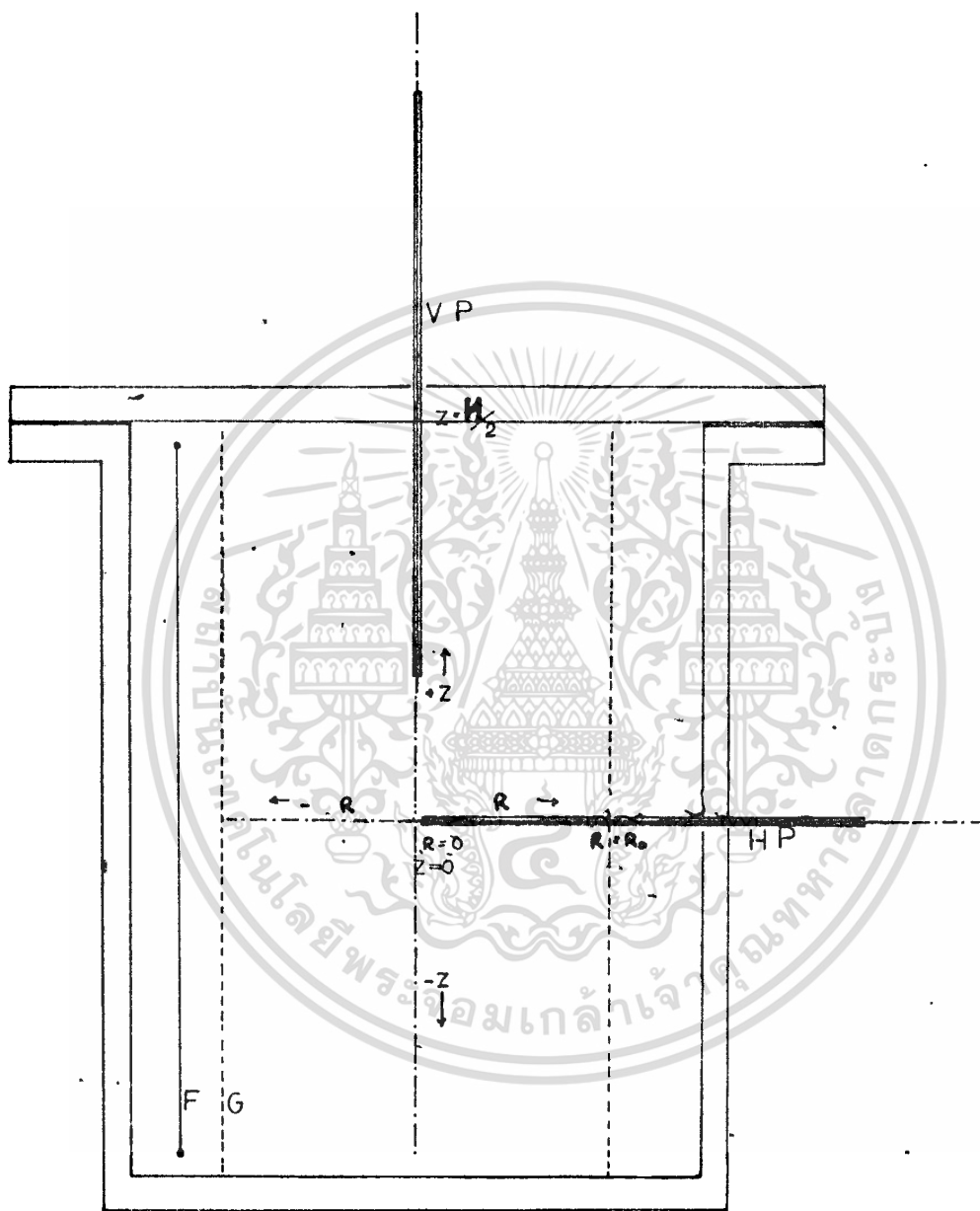
$$\text{และ } Z(X) = \frac{H}{2} - (A - X) \quad \dots \text{กรณีการยื่นห้วงในแนวตั้ง} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$(R = 0, Z = 0)$ คือ ตำแหน่งกึ่งกลางของกระเปาะ

$R(X)$ และ $Z(X)$ คือ ตำแหน่งห้วงในกระเปาะกรณีการยื่นห้วงในแนวรัศมี และ
 แนวตั้ง ตามลำดับ

D และ H คือ ค่าความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของกระเปาะ และค่า
 ความสูงภายในของกระเปาะ ตามลำดับ



ELECTRODE SYSTEM

รูปที่ 3.4.4/2

แสดงรายละเอียดการกำหนดค่า R และ Z ($R_0 = 5.1$ เซนติเมตร,

$H = 20$ เซนติเมตร)

3.5 ระบบปั๊ม

ระบบปั๊มของเครื่องมือวิจัย เป็นระบบปั๊มแบบทำงานสองตอน คือ อาศัยปั๊มชนิดโรตารีดูดอากาศจากกระเปาะเพื่อลดความดันให้ต่ำกว่า 0.5 ทอร์ (Torr) ตอนหนึ่ง และอาศัยปั๊มชนิดแพร่กระจายเพื่อทำงานช่วยอีกตอนหนึ่ง ซึ่งทำให้ลดความดันได้ต่ำกว่า 10^{-3} ทอร์ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบปั๊มและป้องกันการฟุ้งกระจายกลับ (Back Migration) ของไอ น้ำมันของปั๊มชนิดแพร่กระจาย จึงติดตั้งกระเปาะดักไอชนิดหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวไว้เหนือปั๊มชนิดแพร่กระจายอีกส่วนหนึ่งด้วย

ปั๊มชนิดโรตารีที่ประกอบในเครื่องมือวิจัย เป็นปั๊มที่สร้างจากบริษัท เอ็คเวอร์ค รุ่น ES35 ซึ่งเป็นชนิดมีวาล์วกลไกชนิดปั๊มชนิดแพร่กระจายและกระเปาะดักไอ สร้างจากบริษัทเดียวกัน คือ ปั๊มแพร่กระจายเป็นรุ่น EO1 ซึ่งเป็นแบบกำลังสองและระบายความร้อนด้วยน้ำ ส่วนกระเปาะดักไอเป็นรุ่น NTM1 ซึ่งเป็นแบบหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว

3.6 ระบบวัดความดัน

ระบบวัดความดันที่ใช้ แบ่งออกเป็น สองส่วนตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน คือ เพื่อวัดค่าความดันทำงานของปั๊มชนิดแพร่กระจายส่วนหนึ่ง โดยใช้ หัววัดความดันชนิดเทอร์โมคิลเปิด และเพื่อวัดค่าความดันของกระเปาะสูญอากาศอีกส่วนหนึ่ง ซึ่งอาจใช้ หัววัดความดันชนิดพิราณี

หัววัดความดันทั้งสามล้วนต่างผลิตจากบริษัท เอ็คเวอร์ค กล่าวคือเป็น หัววัดความดันชนิดเทอร์โมคิลเปิดรุ่น TC1 หัววัดความดันชนิดพิราณีรุ่น PR25

3.7 ระบบระบายความร้อน

ระบบระบายความร้อนของเครื่องมือวิจัย แบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนระบายความร้อนด้วยน้ำ ส่วนหนึ่ง และส่วนระบายความร้อนด้วยลม อีกส่วนหนึ่ง

ส่วนระบายความร้อนด้วยน้ำได้แก่ การระบายความร้อนจากปั๊มชนิดแพร่กระจาย สำหรับใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดเครื่องมือวิจัยนี้ ได้ดัดแปลงใช้น้ำเย็นจากเครื่องทำน้ำเย็น ซึ่งสามารถปรับระดับความเร็วของการไหลของน้ำ โดยวิธีจัดความสูงและปรับวาล์วควบคุมการไหลของน้ำให้พอเหมาะ ส่วนระบายความร้อนด้วยลมได้แก่ การระบายความร้อนจากกระเปาะสูญญากาศ สำหรับในชุดเครื่องมือวิจัยนี้ ได้อาศัยลมจากพัดลมจำนวน 2 ตัว

3.8 ระบบจ่ายก๊าซอาร์กอน

ก๊าซอาร์กอนซึ่งใช้ในงานวิจัย เป็นก๊าซอาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์ในระดับที่ใช้ในงานวิจัย โดยมี สายยางพลาสติกทำหน้าที่เป็นท่อนำก๊าซ เชื่อมโยงจาก ปลายท่อจ่าย ของวาล์วปรับก๊าซ (Gas Regulator : Matheson Model) ซึ่งติดตั้งที่หัวดึงก๊าซ ไปยังวาล์วเข็ม (Needle Valve) ซึ่งในการปรับขนาดการปล่อยก๊าซอาร์กอนสู่กระเปาะสูญญากาศนั้นจะอาศัยการปรับวาล์วปรับก๊าซส่วนหนึ่ง และวาล์วเข็มอีกส่วนหนึ่ง

3.9 ขบวนการทำความสะอาด (2)

เนื่องจากสาร เบื้อน (Contaminants) บนผิวชิ้นส่วนอุปกรณ์ของชุดวิจัย ระบบสูญญากาศ จะสามารถระเหยหรือระเหิดกลายเป็นไอ เมื่อสภาพความดันของระบบสูญญากาศลดค่าใกล้ความดันไอ (Vapour Pressure) ของสาร เบื้อน ซึ่งเป็นขีดจำกัดให้ระบบไม่สามารถลดความดันต่ำมากกว่านั้น ดังนั้นความสกปรกบนชิ้นส่วนอุปกรณ์ซึ่งมีขึ้นเนื่องจากขบวนการผลิต การใช้งานหรือการปล่อยทิ้งในบรรยากาศห้อง (Atmosphere) เป็นเวลานาน จึงจำเป็นต้องกำจัดออกให้มากที่สุด (โดยเฉพาะสาร เบื้อนประเภทที่มีค่าความดันไอสูง)

ขบวนการทำความสะอาดสำหรับชิ้นส่วนอุปกรณ์แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ตามลักษณะและชนิดวัสดุที่ประกอบเป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์ ดังตารางที่ 3.8 - 1

ตารางที่ 3.8 - 1

ขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นส่วนอุปกรณ์

ประเภทของชิ้นส่วนอุปกรณ์	ขั้นตอนการทำความสะอาด
1. ยางวงกลม (O-ring)	1. เช็ดทำความสะอาดกวยสารละลายอะซิโตน (Acetone)
2. แก้ว/เซรามิก	1. แช่และเช็ดทำความสะอาดในน้ำสบู่ 2. เชยาล้างในน้ำกลั่นร้อน 3. เชยาล้างในสารละลายอะซิโตนหรือ MEK (Methyl Ethyl Ketone) 4. เชยาล้างในสารละลายไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) 5. เชยาล้างในสารละลายอะซิโตน 6. เป่าแห้งกวยลมร้อน (ใช้ลมร้อนจากเครื่องเป่าผม)
3. เหล็ก เหล็กโรสเนิมหรืออลูมิเนียม	1. ชูคและชักสิ่งสกปรกที่มองเห็นกวยกาเปลาออก มากที่สุด กวย ตะไบหรือกระดาษทราย 2. แช่และชักสิ่งสกปรกในน้ำสบู่กวยแปรงทองเหลือง 3. เชยาล้างในน้ำกลั่นร้อน 4. เชยาล้างในสารละลายอะซิโตนหรือ MEK 5. เชยาล้างในสารละลายไตรโคลโรเอทิลีน 6. เชยาล้างในสารละลายอะซิโตน 7. เป่าแห้งกวยลมร้อน (ใช้ลมร้อนจากเครื่องเป่าผม)
4. ทองเหลือง	1. ชักสิ่งสกปรกอื่นเนื่องจากการเชื่อมกวยน้ำยาบัคโซ (Basso) ทำความสะอาดตามขบวนการจากข้อ 1-7 ในหัวข้อที่ 3 (เหล็ก เหล็กโรสเนิม หรืออลูมิเนียม)

หมายเหตุ 1) เชื่อมอลูมิเนียม/เหล็กโรสเนิมกวยขบวนการ TIG เชื่อมทองเหลืองกวยขบวนการการ เป่าแผ่น

โดยใช้ลดดอกเบี้ยเงินต้น 15%

- 2) ระหว่างขั้นตอนการทำความสะดวก ได้ระวางมิให้มิ้วสัมผัสอย่างวงกลมบริเวณข้อเกิดรอยช้ำขึ้น
เพราะอาจเกิดปัญหาเรื่องรูอากาศรั่ว (Leak) ในภายหลัง
- 3) ค่ายเหตูที่ผู้วิจัย ระบบสูญอากาศที่ไว้วิจัย ได้ประกอบสร้างขึ้นเองและได้ระวางเรื่อง
ความสะดวกระหว่างขบวนการผลิตมาโดยตลอด ทั้งนี้จึงกำหนดให้ขบวนการการทำ
ความสะดวกเพียงครั้งเดียวในการวางของตน



การทดลอง และการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

พลาสมาอาร์กอนที่ทดลองกำเนิดในกระเปาะเหล็กสเตนเลส เพื่อทำการศึกษานี้เป็นประเภท พลาสมาอิสระไร้สนามรบกวน (Free Field Plasma) ทั้งนี้ โดยเลือกแปรค่า ความดันก๊าซอาร์กอน $(P_{Ar}) \geq 10^{-3}$ ทอร์ อุณหภูมิหลอด $(T_F) \leq 2300^\circ K$ กระแสคิซซาร์ค $(I_D) \leq 150$ มิลลิแอมแปร์ ศักคาไฟฟ้าคิซซาร์ค $(V_D) \leq 50$ โวลท์ ซึ่งลักษณะสัมพันธ์ กระแส - ศักคา ไฟฟ้าหัวักของพลาสมาหัวัก โดยหัวักแลงเมอร์ มีลักษณะเฉพาะหนึ่ง ๆ แยกต่างกันไป

4.2 การคำนวณค่า อุณหภูมิพลาสมา (T) และค่าความหนาแน่นพลาสมา (n_0)

จากลักษณะสัมพันธ์ กระแส - ศักคาไฟฟ้าหัวักของพลาสมา ซึ่งวัดโดยหัวักแลงเมอร์ อาจ สามารถคำนวณค่า อุณหภูมิพลาสมา และความหนาแน่นพลาสมาได้ โดยอาศัยทฤษฎีในบทที่ 2

4.2.1 อุณหภูมิพลาสมา

ควัยเหตุที่การกำเนิดพลาสมาโดยวิธีของการทดลองนี้ จะได้พลาสมาซึ่งไม่อยู่ในสภาพ สมดุลย์ความร้อน (Thermal Equilibrium, $T = T_e = T_i$; $T_i =$ อุณหภูมิอิออน) คือ ค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e) ของพลาสมา สูงกว่า ค่าอุณหภูมิอิออน (T_i) ของพลาสมา มาก ดังนั้นจึงถือให้ ค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอน เป็นค่า อุณหภูมิพลาสมาได้ กล่าวคือ

$$T = T_e \gg T_i \approx T_g \quad (4.1)$$

เมื่อ T_g คือ ค่าอุณหภูมิก๊าซ

การคำนวณค่า อุณหภูมิอิเล็กตรอนจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log I_p(U_p)$ และ U_p นั้น ถ้า $I_i(U_p) \ll I_e(U_p)$ อนุโลม ให้ $I_p(U_p) \approx I_e(U_p)$ ได้ และจะสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนจากค่าความชันของกราฟได้โดยตรง สำหรับกรณี ซึ่ง $I_i(U_p) \approx I_e(U_p)$ ค่ากระแสหัวัก และค่ากระแสอิเล็กตรอนจะแตกต่างกันมาก ทำให้การอนุโลมให้ $I_p(U_p) \approx I_e(U_p)$ ทำไม่ได้ ดังนั้นจำเป็นต้องคำนวณค่า $I_e(U_p)$ จากค่ากระแสหัวักก่อน โดยวิธีประมาณค่ากระแสอิออนจากการทอกราฟ จากช่วงกระแสอิออน ซึ่งมีสภาพอ้อมตัวไปทางขวามือและอ่านค่า กระแสอิออน (ซึ่งถือว่าเป็นค่าประมาณ) ที่ตำแหน่ง ศักคาไฟฟ้า U_p ค่าหนึ่ง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การคำนวณคาชนาท (Order) ของคาความหนาแน่นพลาสมา

ควยเหตุที่เมื่อหักคาไฟฟาของหัววักมีค่าไกลศูนย์ ($v_p \sim 0$) รูปการกระจายความเร็วของอนุภาคอิเล็กตรอนในบริเวณโดยรอบหัววักถูกรบกวนใหม่สภาพแตกคางไปจากบริเวณหางไกลหัววัก ทำให้ในการทดลองอาจไม่พบช่วงของกระแสอิเล็กตรอนอ้อมตัว (คังส่วนที่ 5 ของกราฟรูปที่ 2.2.1/1) จากกราฟซึ่งแสดงลักษณะสัมพันธ์ระหว่าง กระแสและคักคาไฟฟาหัววัก หรืออาจพบแคก็มีสภาพโค้งหักงอไม่ชัดเจน คังนั้นการพิจารณาคาความหนาแน่นของพลาสมา (n_0) จากค่า กระแสอิเล็กตรอนอ้อมตัว (สมการ 2.6) อาจทำไม่ได้

ในทางปฏิบัติ อาจประมาณ (คาหยาบ) คาชนาท (Order of Magnitudes) ของคาความหนาแน่นพลาสมา จากค่ากระแสอิเล็กตรอนอ้อมตัว (I_{io}) ได้จากความสัมพันธ์ (10)

$$I_{io} \sim \frac{1}{2} n_0 A (kT_e/M)^{1/2} \cdot e \quad (4.2)$$

เมื่อ

M คือ คามวลของอนุภาคอิออน (กรณีกาซอาร์กอน = 6.625×10^{-26} กิโลกรัม)

A คือ คาพื้นที่หัววัก ($= \pi \times 0.015 \times 10^{-2} \times 0.8 \times 10^{-2} = 3.77 \times 10^{-6}$ เมตร²)

k คือ คาคงที่ของ โบลทแมน ($= 1.38 \times 10^{-23}$ จูล/เคลวิน)

คังนั้น กรณีพลาสมาอาร์กอน

$$n_0 \sim 2.3 \times 10^{23} \cdot I_{io} \text{ (แอมแปร์)} \cdot T_e^{-1/2} \text{ อนุภาค.เมตร}^{-3} \quad (4.3)$$

4.3 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล

ในการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล ได้บันทึกข้อมูลโดยอาศัยสัญญาณที่คางกัน ซึ่งมีความหมาย

คังนั้นคือ

P_{R0} คือ คาความคันทกคาง (Residual Pressure) หน่วย ทอร์

P_{Ar} คือ คาความคันท่าซาร์กอน (Argon Pressure) หน่วย ทอร์

T_F คือ คาอุณหภูมิฉลวค (Filament Temperature) หน่วย เคลวิน

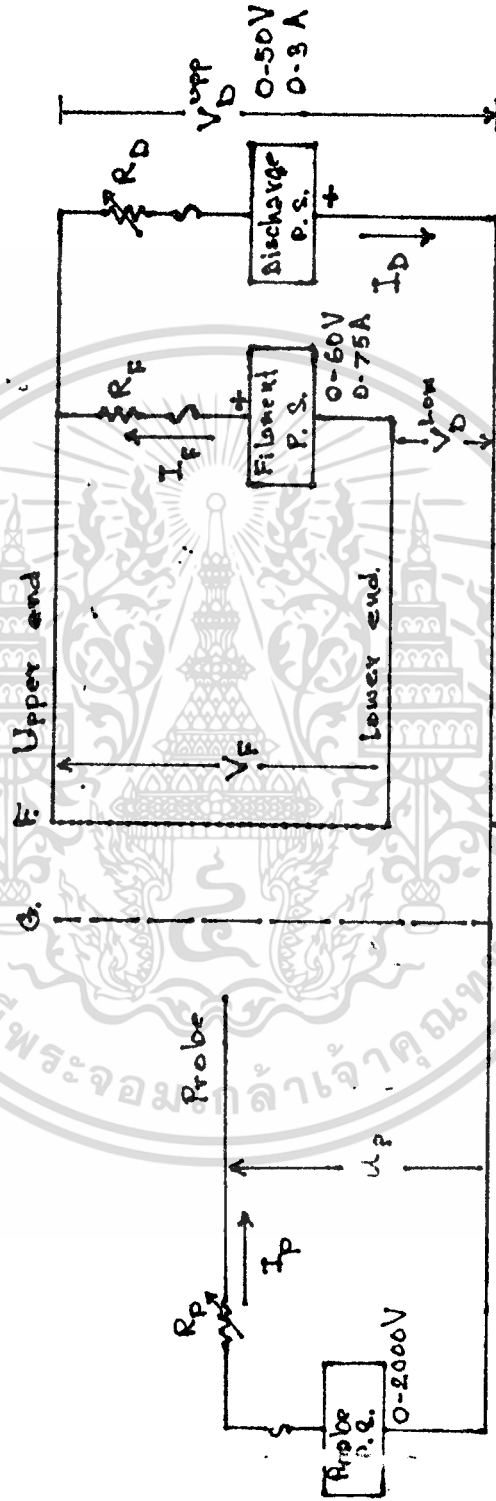
(วักโดยอาศัยไฟโรมิเตอร์ (Optical Pyrometer))

V_F คือ คาคักคาไฟฟาครอมลวคความร้อน หน่วย โวลท์

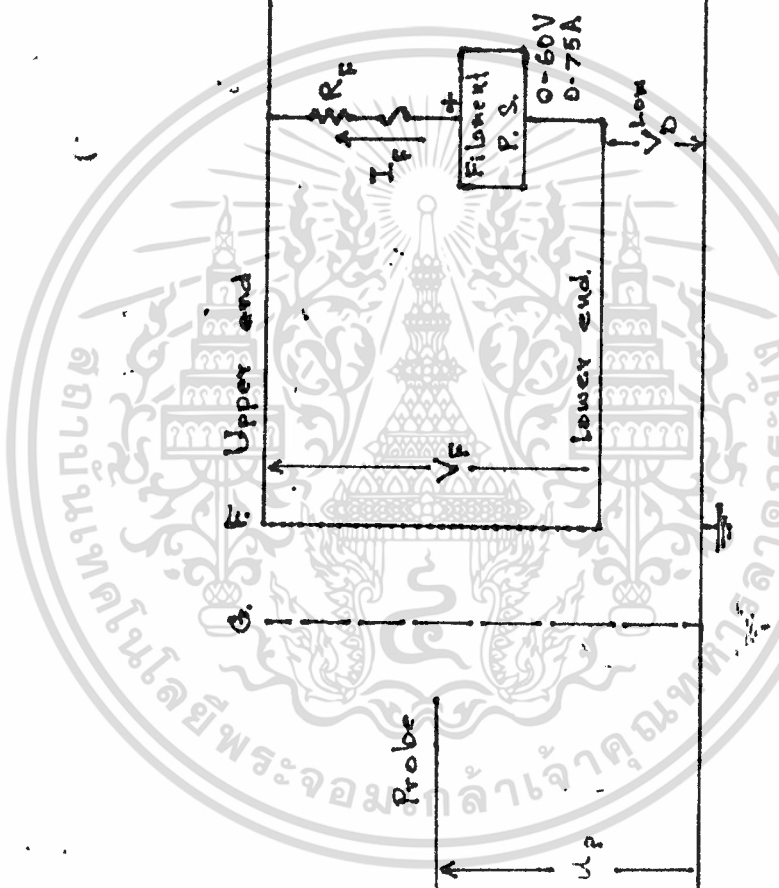
V_D^{Upp} คือ คาคักคาไฟฟาครอมระหว่างกริกกับปลานบนของฉลวคความร้อน หน่วย โวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3/1 แสดงวงจรไฟฟ้าของการทดลอง



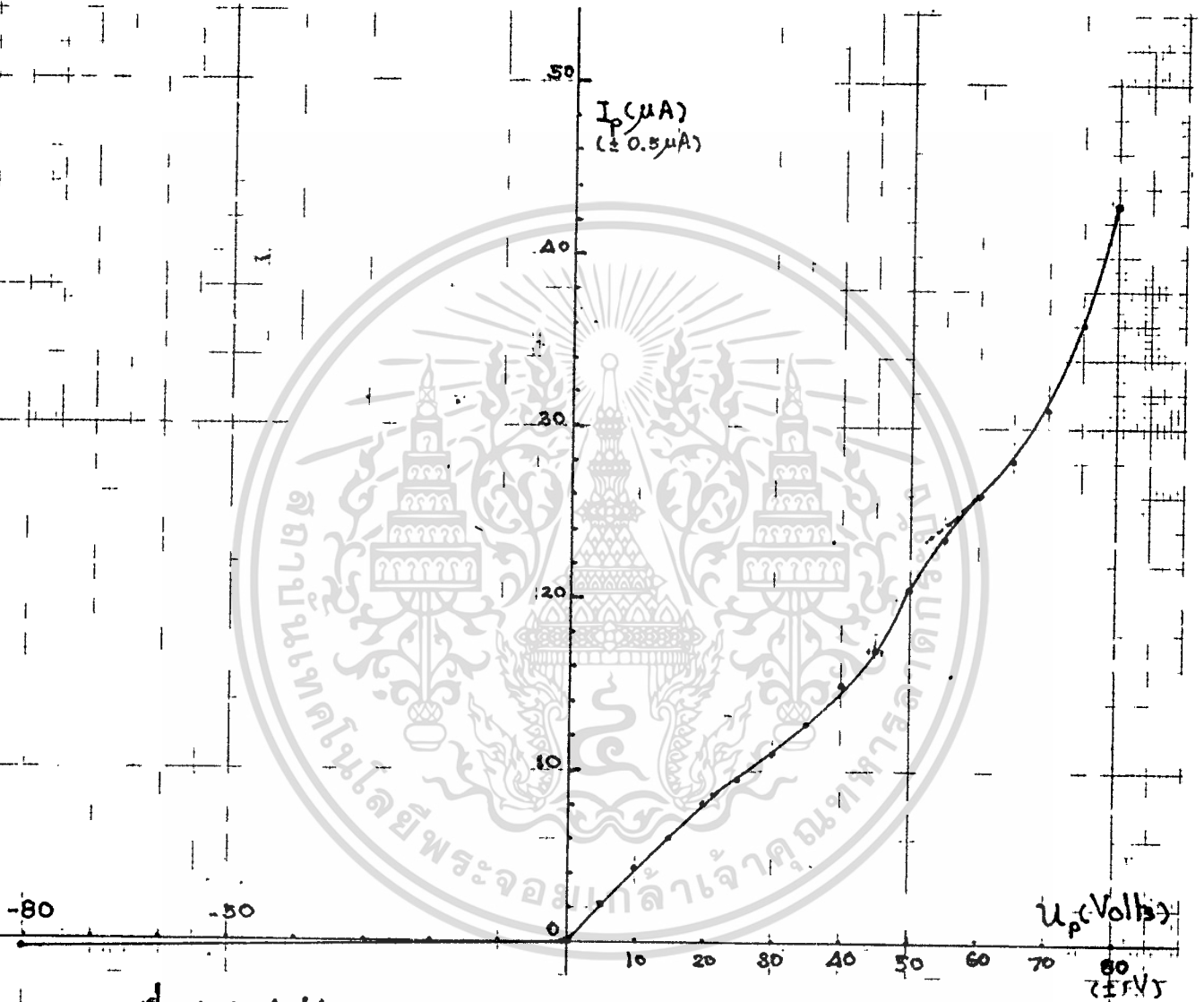
- V_D^{Low} คือ ศักย์คาไฟฟ้าคร่อมระหว่างกริดกับปลายล่างของหลอดความร้อน หน่วย โวลต์
- U_p คือ ศักย์คาไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัด หน่วย โวลต์
- I_F คือ ค่ากระแสแผ่หลอดความร้อน หน่วย แอมแปร์
- I_D คือ ค่ากระแสกริด หน่วย แอมแปร์
- I_p คือ ค่ากระแสหัววัด หน่วย แอมแปร์
- I_E คือ ค่ากระแสอิมิชชัน หน่วย แอมแปร์
- (R, Z) คือ ตำแหน่งหัววัดในกระเปาะ หน่วย เมตร

(รูป 4.3/1)

4.3.1 เปรียบเทียบกราฟผลการทดลอง รูปที่ 4.3.1/1, 4.3.1/2 และ 4.3.1/3

พิจารณากราฟผลการทดลอง รูปที่ 4.3.1/1 ($I_p = 3.5 \text{ mA} < I_p$) จะพบว่า

$I_p (U_p > 0)$ มีค่าน้อย และ $I_p (U_p < 0) \approx 0$ ซึ่งแสดงว่า เมื่อหัววัดมีศักย์คาไฟฟ้าเป็นบวก ก็
 สามารถดึงอนุภาคอิเล็กตรอนจากบรรยากาศโดยรอบได้เล็กน้อย และเมื่อหัววัดมีศักย์คาไฟฟ้าเป็นลบ หัววัด
 ก็แทบจะไม่สามารถดึงอิเล็กตรอนจากบรรยากาศโดยรอบหัววัดได้เลย จึงอธิบายได้ว่า สำหรับกรณีผลการทดลองนี้
 อิมิชชันอิเล็กตรอน (Emission Electrons) ซึ่งหลุดจากหลอดความร้อน และถูกเร่งเนื่องจาก ศักย์คาไฟฟ้า
 V_D นั้น มีพลังงานไม่มากพอ จะกระตุ้นให้ก๊าซเกิดการแตกตัว (Ionization) ได้ ดังนั้น ลักษณะสัมพันธ์
 กระแส - ศักย์คาไฟฟ้า (I_p, U_p) จึงมีพฤติกรรมเหมือน หลอดสุญญากาศ (Vacuum Tubes)
 ซึ่งเกี่ยวข้องกับการควบคุมปริมาณ กระแสอิมิชชันอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้า ต่างแต่ว่า ถ้าเพิ่มศักย์คาไฟฟ้าที่
 จ่ายให้หัววัด (U_p) มีค่ามากพอ สนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากศักย์คาไฟฟ้าของหัววัดอาจมากพอที่จะเร่งอิมิชชัน
 อิเล็กตรอนบางส่วนให้มีพลังงานพอจะกระตุ้นก๊าซในกระเปาะให้เกิดการแตกตัวได้



รูปที่ 4.3.1/1

กราฟแสดงลักษณะสัมพันธ์ กระแส-ศักดาไฟฟ้าของพลาสมาอาร์กอน

(วัดโดยหัววัดแสงเมอร์ ขนาดรัศมี 7.5×10^{-5} เมตร ยาว 8×10^{-3} เมตร)

$$P_{\text{Re}} = < 10^3 \text{ torr} \quad T_{\text{F}} = 2023 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$P_{\text{Ar}} = (11-7) \times 10^{-3} \text{ torr} \quad I_{\text{E}} = 4.65 \text{ mA}$$

$$(V_{\text{D}}^{\text{Upp}}, V_{\text{D}}^{\text{Low}}) = (-2.5, +9) \text{ Volts}; I_{\text{D}} = 3.5 \text{ mA}$$

$$\text{ตำแหน่งหัววัด} \quad (R, Z) = (0, -3.7) \text{ cm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

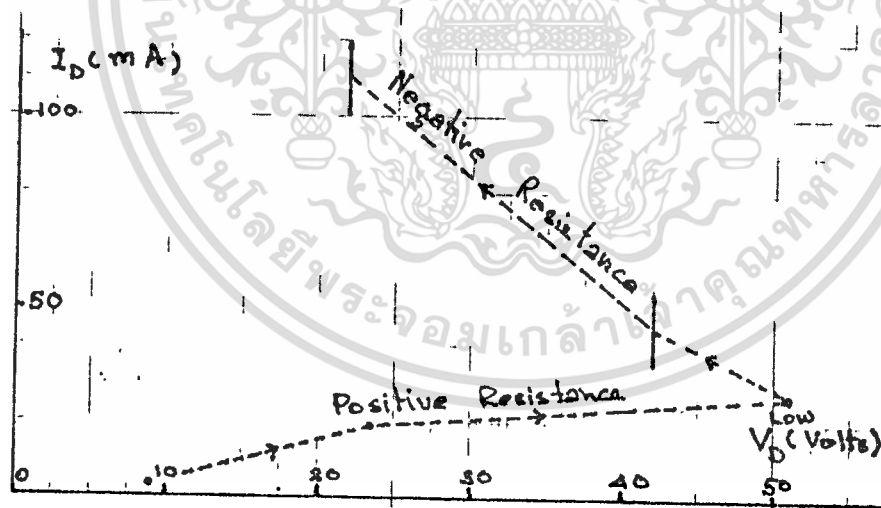
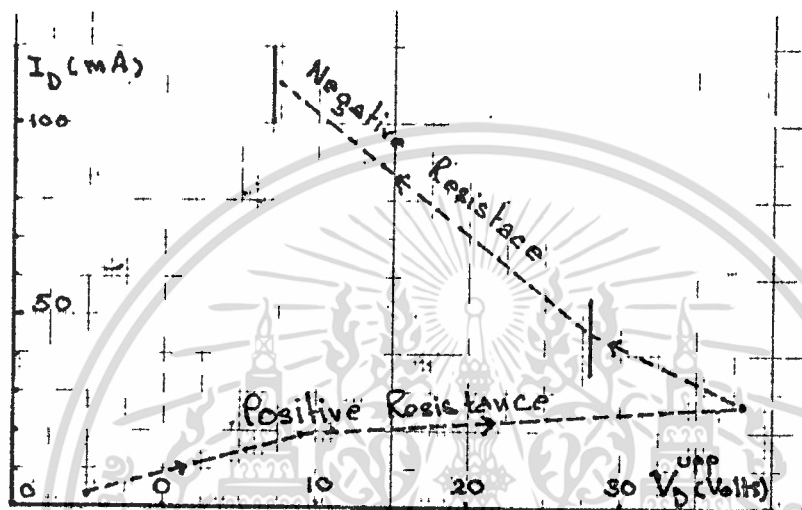
พิจารณากราฟผลการทดลอง รูปที่ 4.3.1/2, 4.3.1/3 และตารางที่ 4.3.1 - 1 พบว่า เมื่อ I_D และ V_D มีความสัมพันธ์แบบ ความต้านทานเชิงบวก (Positive Resistance) (กราฟรูปที่ 4.3.1/2) ค่า I_D จะมีอัตราการเพิ่มค่อนข้างช้า และ $I_p (U_p < 0)$ มีค่าน้อย ซึ่งอธิบายได้ว่า สภาพการแตกตัว (Ionization) ของโมเลกุลก๊าซยังมีปริมาณน้อย และเพิ่มมากขึ้นเมื่อ I_D มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น พฤติกรรมรวมของบรรยากาศ ซึ่งอยู่ระหว่างกรีกกับลวดความร้อน จึงคล้ายไปทางบรรยากาศของโมเลกุลก๊าซที่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า (Neutral Molecules) คือ มีสภาพต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า

เมื่อเพิ่มให้ V_D มีศักกไฟฟ้าสูงเพียงพอ อิเล็กตรอนอิสระที่ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจนมากพอจะกระตุ้นให้โมเลกุลก๊าซ (Neutral Molecules) เกิดสภาพแตกตัวได้ ทำให้บรรยากาศระหว่างกรีกกับลวดความร้อน ประกอบด้วยโมเลกุลก๊าซในสภาพแตกตัว (Ionization Molecules) เป็นจำนวนมาก ดังนั้น พฤติกรรมรวมจึงเป็นพฤติกรรมของก๊าซในสภาพแตกตัว ซึ่งมีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นเมื่อ มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากขึ้น จึงเป็นช่วงที่กระแส I_D และศักกไฟฟ้า V_D มีความสัมพันธ์แบบ ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)

ก๊าซในสภาพแตกตัวซึ่งเกิดบริเวณระหว่างกรีกกับลวดความร้อน จะไหลไปยังบริเวณตอนกลางของกระเปาะได้เอง ซึ่งถ้าอัตราการกระตุ้นให้ก๊าซเกิดการแตกตัวมีค่ามากเพียงพอที่จะชดเชยส่วนสูญเสียของก๊าซในสภาพแตกตัว (อนุภาคไอออนบวก และอนุภาคอิเล็กตรอน) อันเนื่องจากการเกิดสภาพการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) หรือ การตายเพอร์จุไปยังผิวของวัตถุที่สัมผัส หรืออื่น ๆ บรรยากาศก๊าซในสภาพแตกตัวซึ่งอยู่ตอนกลางของกระเปาะจะคงตัวอยู่ได้ และด้วยเหตุที่ลักษณะเงื่อนไขของการทดลองนี้ ค่าช่วงความยาวความยาว (Debye length, λ_D) มีค่าน้อยกว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และความสูงของตะแกรงกรีกมาก ดังนั้น ก๊าซในสภาพแตกตัว ($Ar^+ + e^-$) นี้ คือ บรรยากาศของพลาสมาอาร์กอนนั่นเอง ดังนั้นเมื่อ I_D และ V_D มีความสัมพันธ์แบบ ความต้านทานเชิงลบนั้น ค่า $I_p (U_p < 0)$ มีค่ามากขึ้น ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มปริมาณอนุภาคไอออน ซึ่งเกิดจากการที่โมเลกุลก๊าซมีการแตกตัวเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ซึ่งก็สอดคล้องกับสภาพการเพิ่มมากขึ้นของกระแส $I_p (U_p > 0)$ (กรณีของกราฟผลการทดลอง ซึ่ง $I_D = 55 - 35 \text{ mA}$ และ $100 - 120 \text{ mA}$)

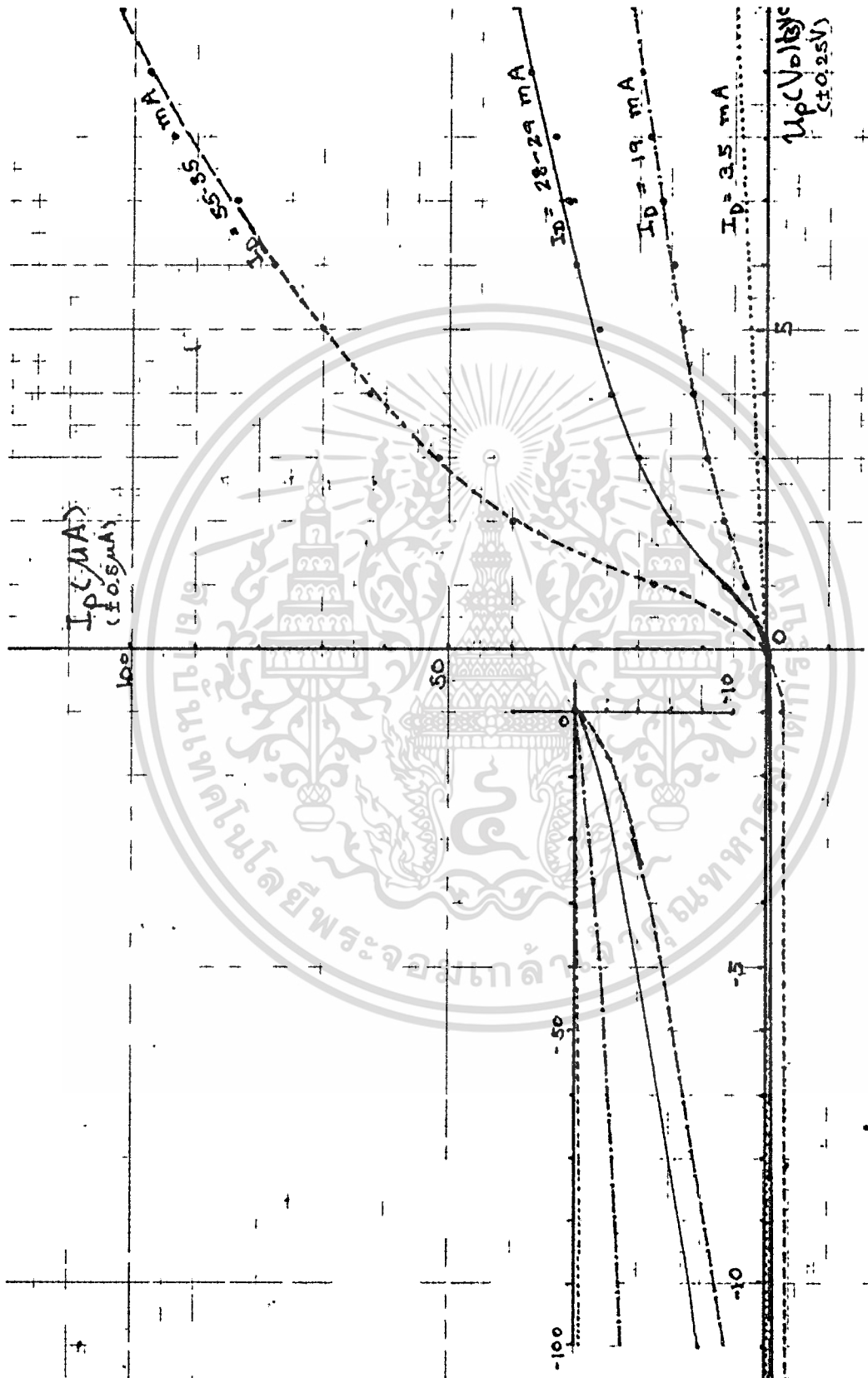
ในทางปฏิบัติ สำหรับเวลาซึ่งกำเนิดในตะแกรงกรีกที่มีรูปทรงกระเปาะ จะอนุโลม (Assume) ใ้ว่า บรรยากาศพลาสมาซึ่งอยู่บริเวณตอนกลางของกระเปาะในแนวแกน มีสภาพเสถียรและเป็นเนื้อเดียว (Stationary and Homogeneous)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 (*) เพื่อไขกระจงในกาซเกิดสภาพแตกตัว ($Ar_2 \rightarrow 2Ar, Ar \rightarrow Ar^+ + e^- ; \Delta E > 15.7 \text{ eV}$) ใ้ใช้



รูปที่ 4.3.1/2

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแส I_D กับ ค่าศักดาไฟฟ้า V_D^{UPP} และ V_D^{Low}
 (ข้อมูลจากตารางที่ 4.3.1-1)



รูปที่ 4.3.1/3
 เปรียบเทียบลักษณะสัมพันธ์ กระแส-ศักดาไฟฟ้าที่วัฏ ของทฤษในกระแสเปาะเมื่อ I_D
 มีค่าต่างๆ (ขอมูลจากตารางที่ 4.3.1/1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3.1-1 เปรียบเทียบข้อมูลกราฟผลการทดลองรูปที่ 4.3.1/3 และ 4.3.2 /1

ชนิดของ ทรานซิสเตอร์	ขนาด		ชนิดของวัสดุ		ค่าของพารามิเตอร์		ค่าของแรงดัน		ค่าของแรงดัน ที่แบ่ง (R_1, R_2) ค.ม.	หมายเหตุ
	P_{R_0} ton	$-P_{A_1}$ toT	TF ok	I_E mA	I_D mA	$V_{D^{top}}$ Volts	$V_{D^{bot}}$ Volts	T_o ok		
A.3.2/1	$<10^{-3}$	7×10^{-3}	(4)2023	4.65	3.5	-2.5	+9	ok	0, -3.7	ไม่มีใช้เครื่องทำเอาน สัตซาร์ต.
	$<10^{-3}$	7×10^{-3}	(4)2023	4.65	19.	+9	+23.5	ok	0, -3.7	
	$<10^{-3}$	7×10^{-3}	(4)2023	4.65	28-26	+38	+51	ok	0, +3.7	
	$<10^{-3}$	7×10^{-3}	(4)2023	4.65	55-35	+28	+42	ok	0, 0	
	$<10^{-3}$	$(11-7) \times 10^{-3}$	(4)2023 (จำนวนควม)	4.65	100-120	+7	+21.8	7.1 x 10 ⁴	0, 0	
										1.9 x 10 ⁴ 8.3 x 10 ¹⁵

4.3.2 เปรียบเทียบกราฟผลการทดลอง รูปที่ 4.3.2/1, 4.3.2/2, และ 4.3.2/3

พิจารณากราฟผลการทดลองทั้ง 3 จะพบว่ามีความสอดคล้องกับทฤษฎี นอกจาก ช่วงกระแสอิเล็กตรอนอิมพัลส์ (บริเวณที่ 5 ของกราฟรูปที่ 2.2.1/1) ซึ่งมีสภาพไม่ชัดเจน (หรืออาจบันทึกข้อมูลไปไม่ถึง) ทั้งนี้ เนื่องจากในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกใช้ หัววัดแรงเมอ (ทรงกระบอก) ที่มีความยาวอนันต์และไม่รบกวนพลาสมาตามข้อสมมุติฐานของทฤษฎี

จากการพิจารณา ค่าขนาดกระแสอิเล็กตรอน ($I_p (U_p > 0)$) และกระแสไอออนในสภาพอิมพัลส์ ($I_p (U_p < 0)$) พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ จึงจำเป็นต้องทดสอบกราฟจากช่วงกระแสไอออนอิมพัลส์มาทางขวามือ เพื่อประมาณค่า กระแสไอออน ($I_i (U_p)$) ที่ตำแหน่งค่าศักกไฟฟ้าหัววัดแต่ละค่า และนำไปหักออกจากค่ากระแสหัววัด (I_p) เพื่อคำนวณค่ากระแสอิเล็กตรอน (I_e) จากความสัมพันธ์

$$|I_e| = |I_p| + |I_i| \quad (4.4)$$

พิจารณากราฟผลการทดลอง รูปที่ 4.3.2/1A , 4.3.2/2A และ 4.3.2/3A (และ 4.3.3/1A , 4.3.3/2A และ 4.3.3/3A) พบว่า $\text{Log} I_e$ และ U_p มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง เมื่อ $U_p \sim U_p'$ ซึ่งลักษณะเช่นนี้ บ่งสภาพของรูปการกระจายความเร็วของอนุภาคอิเล็กตรอนในบรรยากาศพลาสมา ซึ่งถูกจับโดยหัววัดว่า มีสภาพรูปการกระจาย ความเร็วอนุภาคแบบแมกเวล (Max. Vel. Dist.) ทั้งนี้ การคำนวณค่า อุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e) จากสมการ (2.5) จะได้ค่าที่ถูกทอนใกล้เคียง

พิจารณากราฟผลการทดลอง รูปที่ 4.3.2/1A และ 4.3.2/2A พบว่า ช่วงซึ่ง $\text{Log} I_e$ และ U_p มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ซึ่งบ่งสภาพรูปการกระจายอนุภาคอิเล็กตรอนเป็นแบบ แมกเวล (Maxwellian Distribution) นั้น มีสภาพหักงอ ลักษณะเช่นนี้ อธิบายได้คือ อนุภาคอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของพลาสมามีสองกลุ่ม ซึ่งมีพลังงานแตกต่างกัน (10) ทั้งนี้ เมื่อหัววัดมีศักกไฟฟ้าเป็นลบน้อย ๆ (U_p' มีค่าลบน้อย) กลุ่มอนุภาคอิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานน้อย ซึ่งเป็นกลุ่มใหญ่จะสามารถวิ่งไปถึงหัววัดได้ เช่นเดียวกับอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง ทั้งนี้ ค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนซึ่งวัดได้โดยหัววัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในพิธีการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อมีผู้ใดเห็นชอบที่จะใช้เอกสารนี้

รูปที่ A. 3. 2/1

กราฟแสดงลักษณะสัมพันธ์ กระแส-ศักดาไฟฟ้าของหลอดมาอาร์กอน

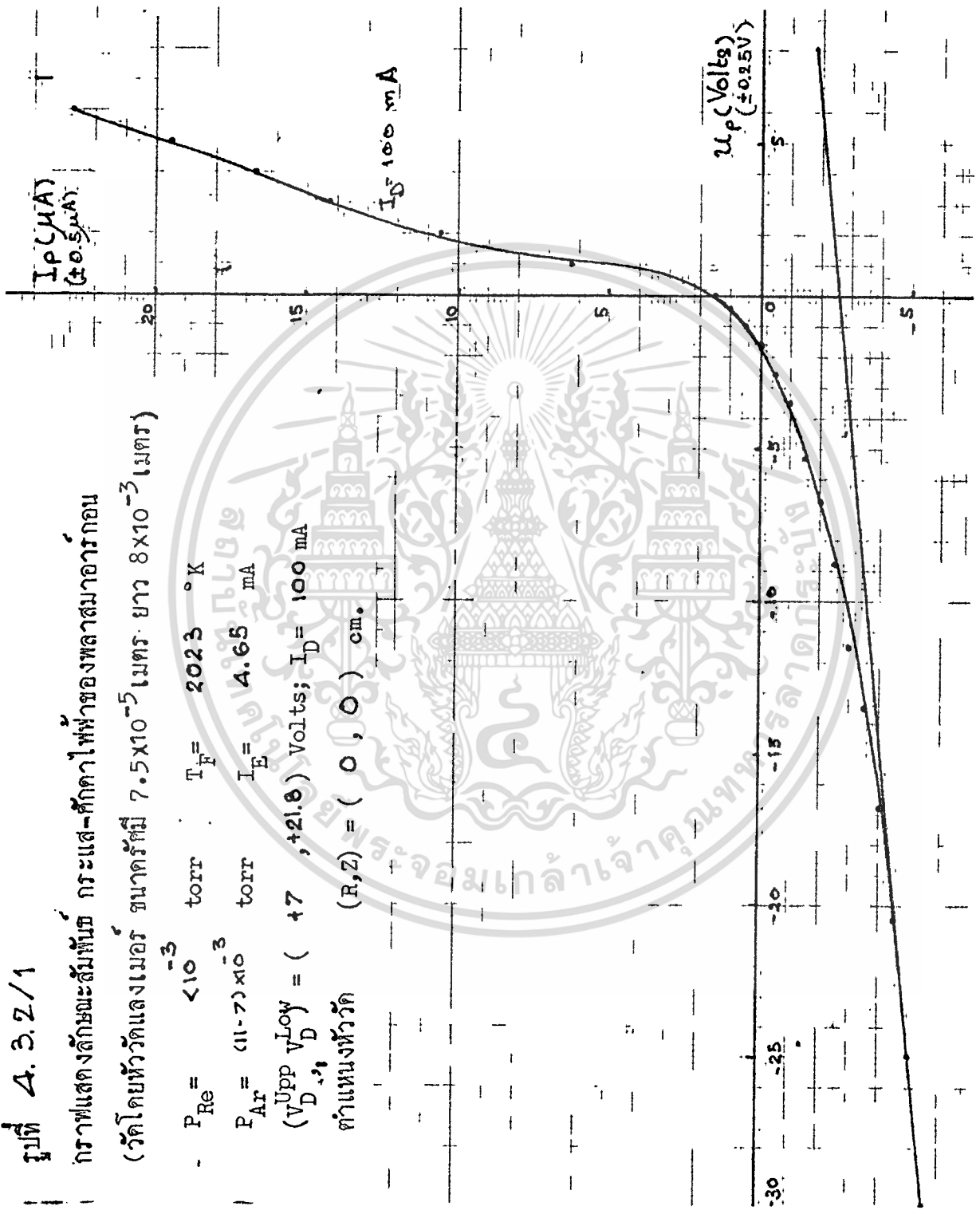
(วัดโดยหัววัดแรงเมออร์ ขนาดรัศมี 7.5×10^{-5} เมตร ยาว 8×10^{-3} เมตร)

$P_{Re} = < 10^{-3}$ torr $T_F = 2023$ °K

$P_{Ar} = (11-7) \times 10^{-3}$ torr $I_E = 4.65$ mA

$(V_{D, High}^{Upp} V_{D, Low}^{Low}) = (+7, +21.8)$ Volts; $I_D = 100$ mA

ตำแหน่งหัววัด $(R, Z) = (0, 0)$ cm.



รูปที่ A.3.2 / 2

กราฟแสดงลักษณะสัมพันธ์ กระแส-ศักดาไฟฟ้าของหลอดสมารากอน

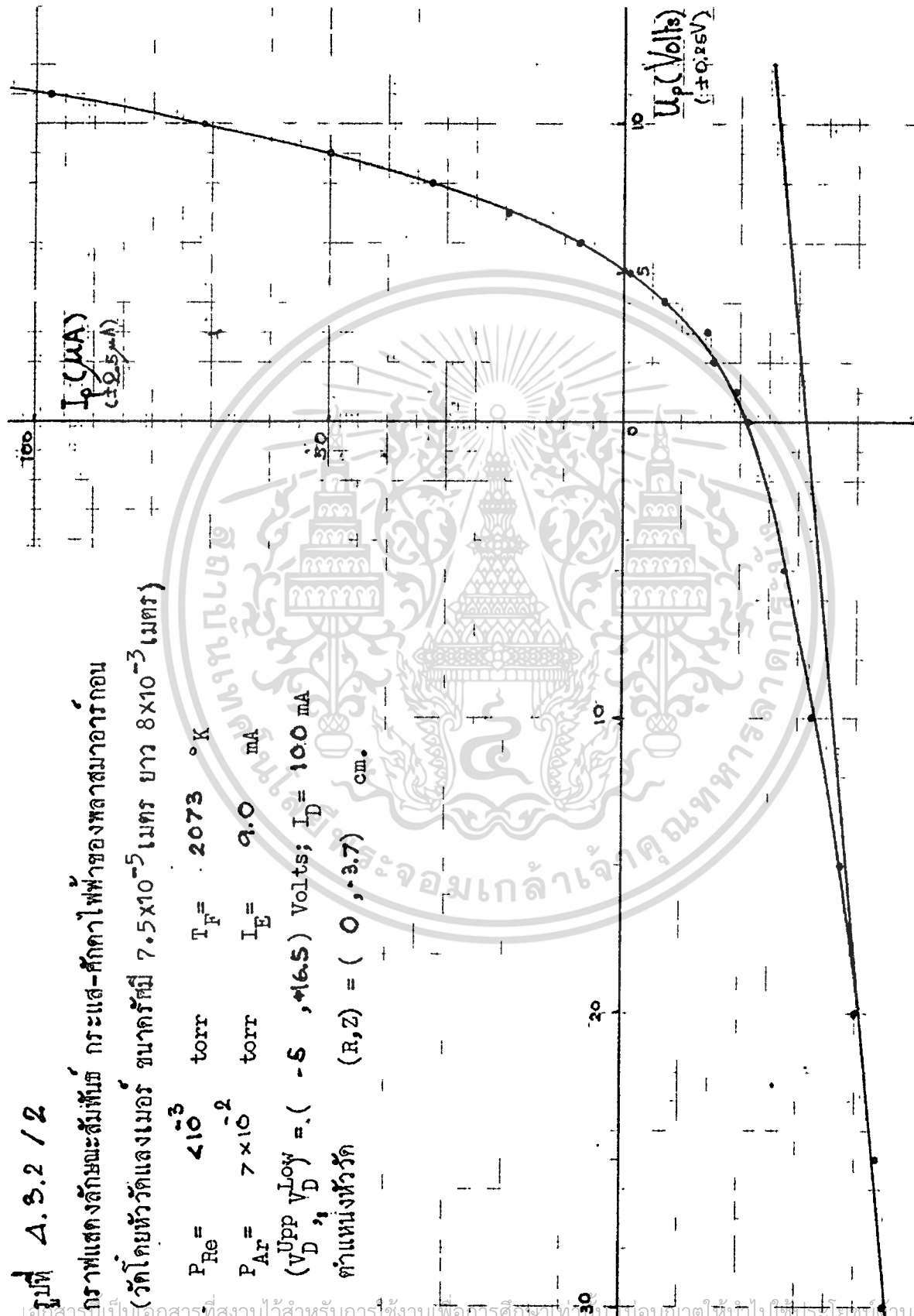
(วัดโดยหัววัดแดงเมอร์ ขนาดรัศมี 7.5×10^{-5} เมตร ยาว 8×10^{-3} เมตร)

$P_{Re} = 4 \times 10^{-3}$ torr $T_F = 2073$ °K

$P_{Ar} = 7 \times 10^{-2}$ torr $I_E = 9.0$ mA

$(V_D^{Low}) = (-5, +6.5)$ Volts; $I_D = 100$ mA

ตำแหน่งหัววัด $(R, Z) = (0, +3.7)$ cm.



รูปที่ A.3.2 / 3

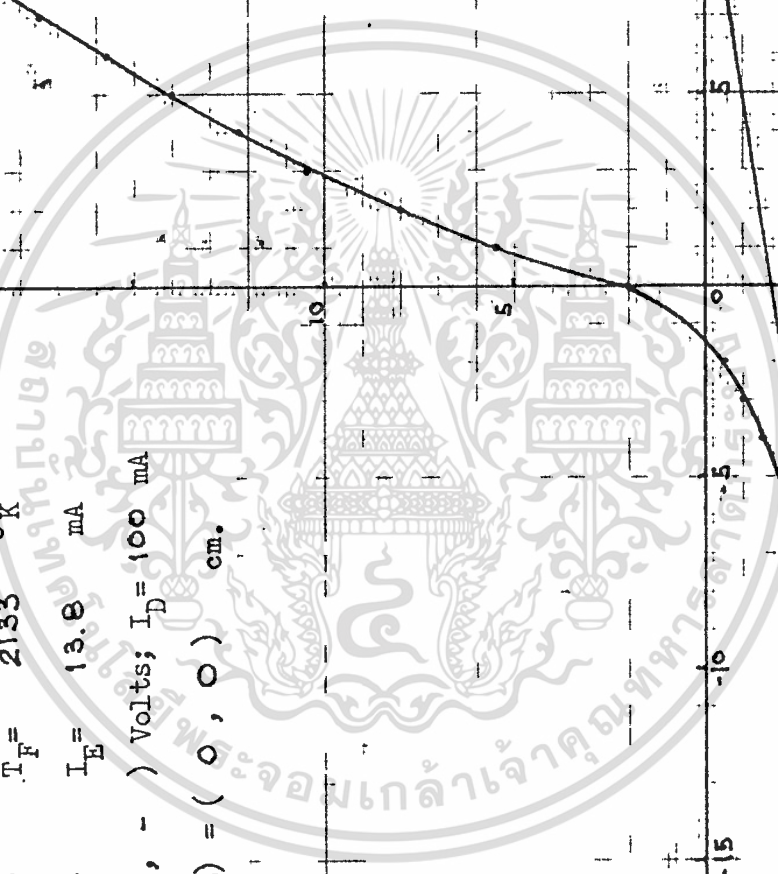
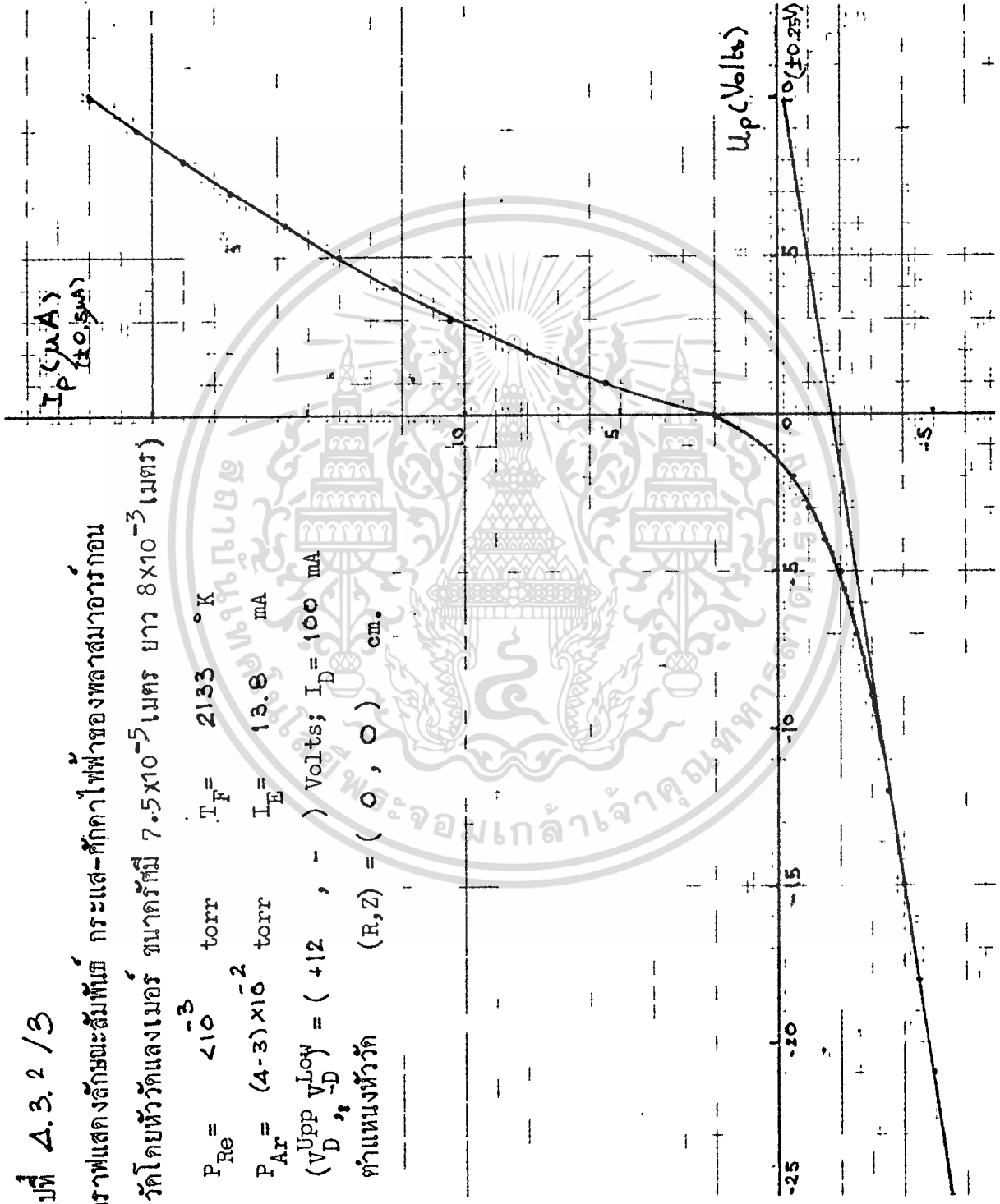
กราฟแสดงลักษณะสัมพันธ์ กระแส-ศักดาไฟฟ้าของหลอดสามารก่อน (วัดโดยหัววัดแดงเมอร์ ขนาดรัศมี 7.5×10^{-5} เมตร ยาว 8×10^{-3} เมตร)

$P_{Re} = 4 \times 10^{-3}$ torr $T_F = 2133$ °K

$P_{Ar} = (4-3) \times 10^{-2}$ torr $I_E = 13.8$ mA

$(V_D^{Up}, V_D^{Low}) = (+12, -)$ Volts; $I_D = 100$ mA

ตำแหน่งหัววัด $(R, Z) = (0, 0)$ cm.



ตารางที่ 4.3.2-1 เปรียบเทียบข้อมูลรายละเอียดของรูปที่ 4.3.2/1 4.3.2/2 และ 4.3.2/3

พารามิเตอร์	ค่าเริ่มต้น		จุดด่างพร้อม		วงจรรัดวงจร			ข้อมูลเฉพาะ		ค่าแนว	หมายเหตุ	
	P_{e0} torr	P_{Av} torr	T_f °K	I_E mA	I_D mA	V_P^{UPP} Volts	V_D^{LOW} Volts	T_a (eV)°K	T_a (eV)			η_e %
4.3.2/1	$<10^{-3}$	$(11-7) \times 10^{-3}$	(A) 2023	4.65	100-120	+7	+21.8	7.1×10^4 (1.6 eV)	1.9×10^{15}	8.3×10^{15}	0, 0	ดูภาพ A.3.2/1A
4.3.2/2	$<10^{-3}$	7×10^{-3}	(A) 2073	9.0	100	-5	+16.5	9.2×10^4 (4. eV)	4.6×10^{15}	4.4×10^{16}	0, -3.7	ดูภาพ A.3.2/2A
4.3.2/3	$<10^{-3}$	$(4-3) \times 10^{-2}$	(3) 2133 (หมายเหตุ)	13.8	100	+12	-	1.9×10^4 2.8×10^4	2.8×10^{15}	6.2×10^{15}	0, 0	ดูภาพ A.3.2/3A

หมายเหตุ ค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอน (Effective Electron Temperature, T_e^{eff}) อยู่ต่ำกว่า $T_e^{Low} \lesssim T_e^{eff} < T_e^{High}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเห็นาเบใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงแสดงค่าพลังงานของอนุภาคอิเล็กตรอนกลุ่มที่มีพลังงานต่ำ (T_e^{Low}) เมื่อศักกไฟฟ้าของหัววัดมีค่าเป็นลบเพิ่มมากขึ้น (V_p มีค่าลบมาก) อนุภาคอิเล็กตรอนกลุ่มใหญ่ซึ่งมีพลังงานน้อยจะไม่สามารถเอาชนะสนามกั้น (Retard Field) อันเนื่องมาจากศักกไฟฟ้าของหัววัดได้ คงเหลือแต่กลุ่มอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงเท่านั้นที่ยังสามารถวิ่งไปถึงผิวหัววัดได้ ดังนั้น ค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนซึ่งวัดโดยหัววัดจึงแสดงค่าพลังงานของอนุภาคอิเล็กตรอนกลุ่มที่มีพลังงานสูง (T_e^{High})

การที่เกิดขึ้นมีกลุ่มอนุภาคอิเล็กตรอน 2 กลุ่ม ซึ่งมีพลังงานต่างกัน ในบรรยากาศพลาสมาที่กำลังกำเนิดขึ้นนั้น สันนิษฐานว่า กลุ่มที่มีพลังงานสูงเป็นผลจากมีอิมิชชันอิเล็กตรอนบางส่วนที่เคลื่อนที่มาถึงหัววัดโดยไม่เกิดการชน (สูญเสียพลังงาน) กับโมเลกุลก๊าซ

4.3.3 ศึกษาสภาพความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogenous) ของพลาสมาที่ตำแหน่งกึ่งกลางในแนวแกนของกระเปาะ จากกราฟผลการทดลองรูปที่ 4.3.3/1, 4.3.3/2 และ 4.3.3/3 ซึ่งเป็นกรณีการกำเนิดพลาสมา โดยอาศัยความต่างศักกไฟฟ้าระหว่างปลายลวดความร้อน

เนื่องจากลักษณะการออกแบบกระเปาะ ทำให้ลวดความร้อนที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายอนุภาคอิเล็กตรอนโดยขบวนการเทอร์โมไออนิก มีขนาดยาว ($16.25 \times 35 \times 10^{-2}$ เมตร) ดังนั้น ขณะทำการทดลองค่าศักกไฟฟ้าคร่อมระหว่างกริดก็มีหลายแนวของลวดความร้อน (V_D^{upp}) และค่าศักกไฟฟ้าคร่อมระหว่างกริด กับปลายล่างของลวดความร้อน (V_D^{Low}) จึงมีค่าต่างกันมาก จึงเป็นไปได้ที่จะอาศัยค่าศักกไฟฟ้าคร่อมระหว่างปลายลวดความร้อนทำหน้าที่เป็น ศักกไฟฟ้ากั้นกั้นชารด์ โดยไม่ของอาศัยเครื่องจ่ายไฟวงจรชารด์ (Discharge Power Supply) เลย ซึ่งถ้าเลือกใช้ค่าความต้านทาน R_D ให้เหมาะสม และลวดความร้อนซึ่งถูกเผาด้วยกระแส I_F มีอุณหภูมิสูงพอ สนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความต่างศักกไฟฟ้า V_D จะสูงเพียงพอที่จะเพิ่มพลังงานให้กับ อิมิชชันอิเล็กตรอน (Emission Electrons) จนสามารถจะกระเด็นจากซึ่งอยู่ในบริเวณระหว่างกริด และลวดความร้อน เกิดสภาพแตกตัว (Ionization) ได้ ดังกราฟผลการทดลองที่ 4.3.3/1, 4.3.3/2 และ 4.3.3/3 ซึ่งเป็นกรณีการวัดคุณสมบัติพลาสมาที่กำลังกำเนิดอยู่ตอนกลางของกระเปาะที่ตำแหน่ง (0, +3.7), (0,0) และ (0, -3.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ A.3.3/1

กราฟแสดงลักษณะสัมพันธ์ กระแส-ศักดาไฟฟ้าของพลาสมาอาร์กอน

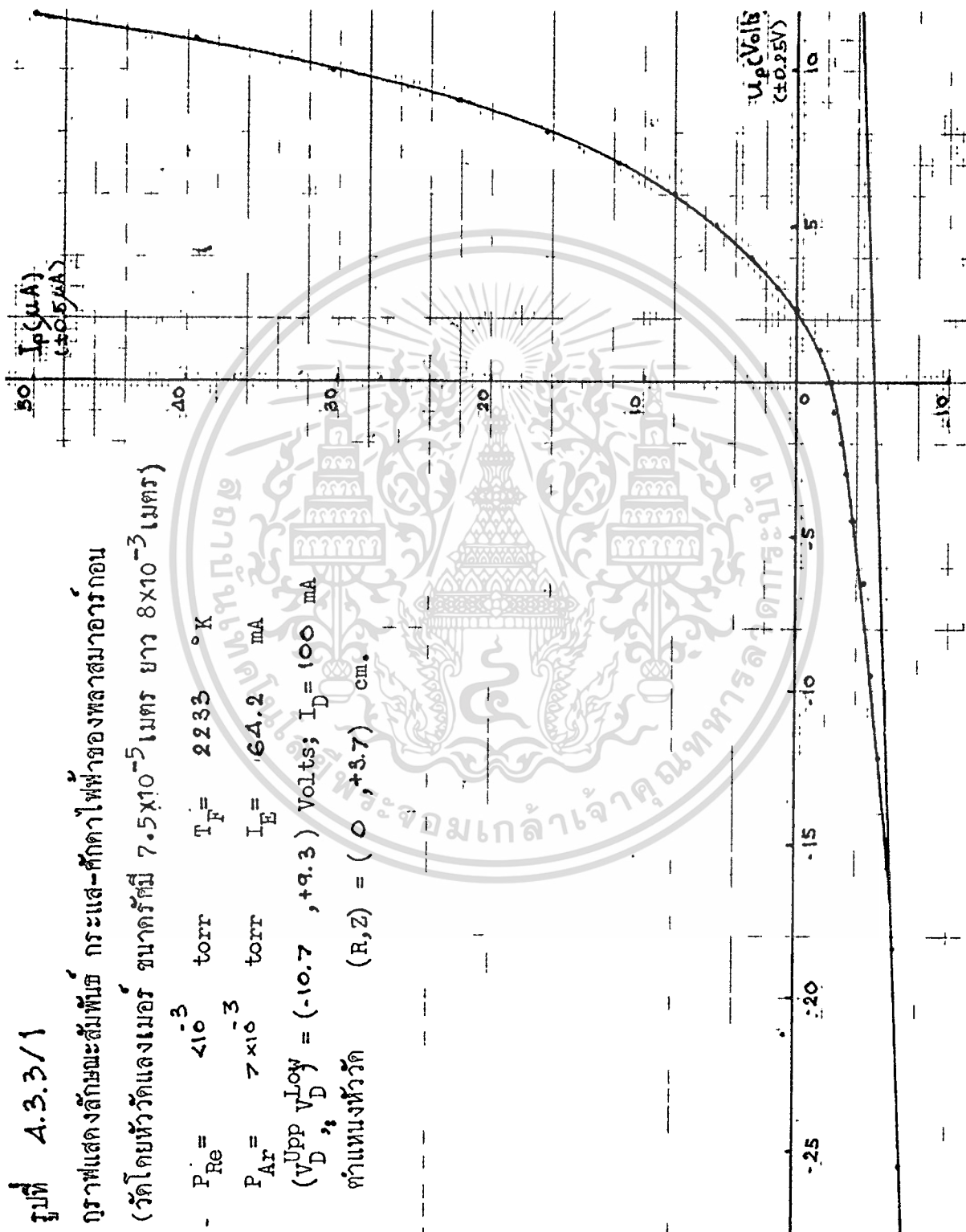
(วัดโดยหัววัดแสงเมอร์ ขนาดรัศมี 7.5×10^{-5} เมตร ยาว 8×10^{-3} เมตร)

$P_{Re} = 4 \times 10^{-3}$ torr $T_F = 2233$ °K

$P_{Ar} = 7 \times 10^{-3}$ torr $I_E = 64.2$ mA

$(V_D^{Upp}, V_D^{Loy}) = (-10.7, +9.3)$ Volts; $I_D = 100$ mA

ตำแหน่งหัววัด $(R, Z) = (0, +3.7)$ cm.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3.3/2

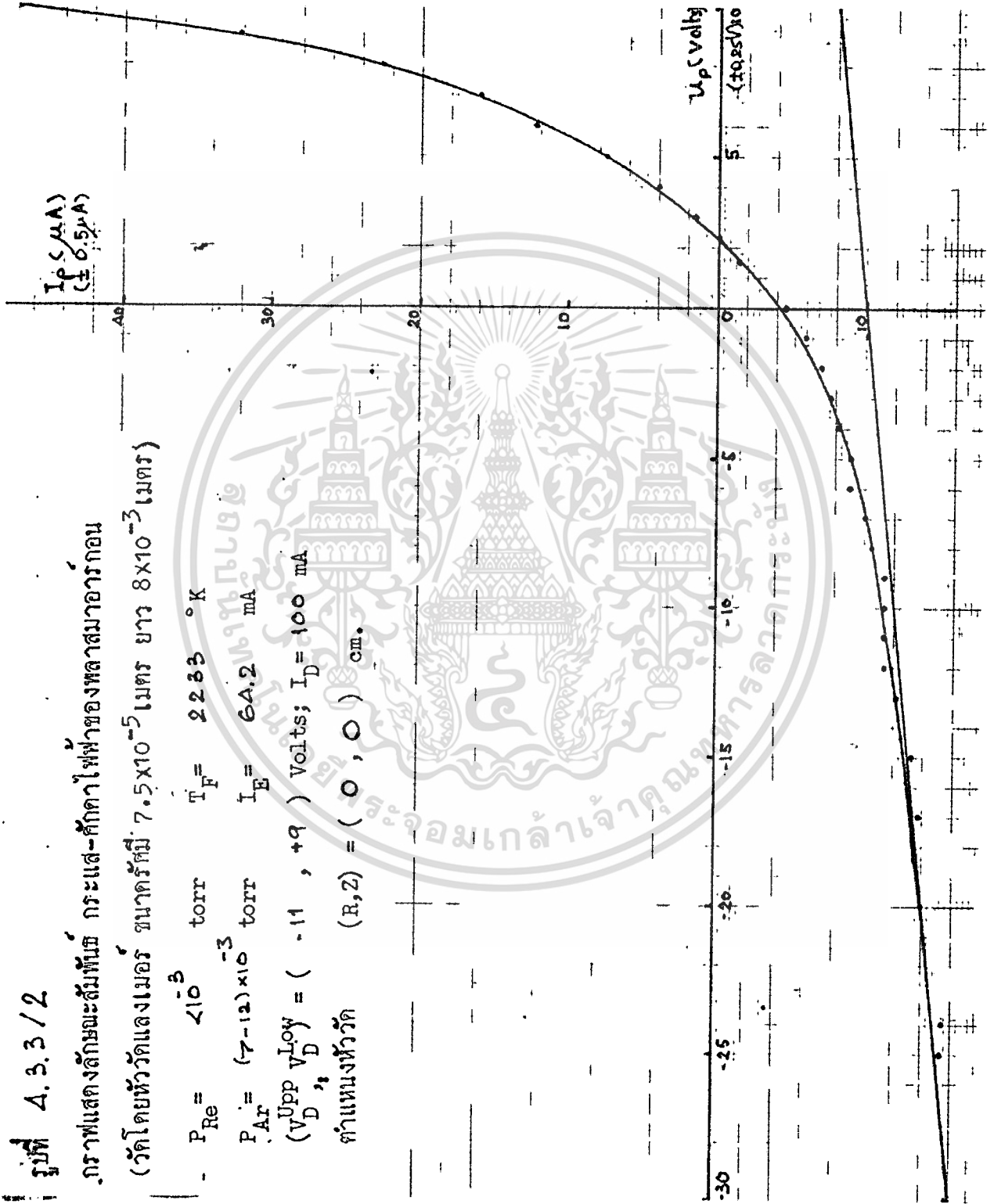
กราฟแสดงลักษณะสัมพันธ์ กระแส-ศักดาไฟฟ้าของหลอดสามอาร์ทกรอน (วัดโดยหัววัดแดงเมอร์ ขนาดรัศมี 7.5×10^{-5} เมตร ยาว 8×10^{-3} เมตร)

$P_{Re} = 4 \times 10^{-3}$ torr $T_F = 2233$ °K

$P_{Ar} = (7-12) \times 10^{-3}$ torr $I_E = 64.2$ mA

$(V_D^{Upp}, V_D^{Low}) = (-11, +9)$ Volts; $I_D = 100$ mA

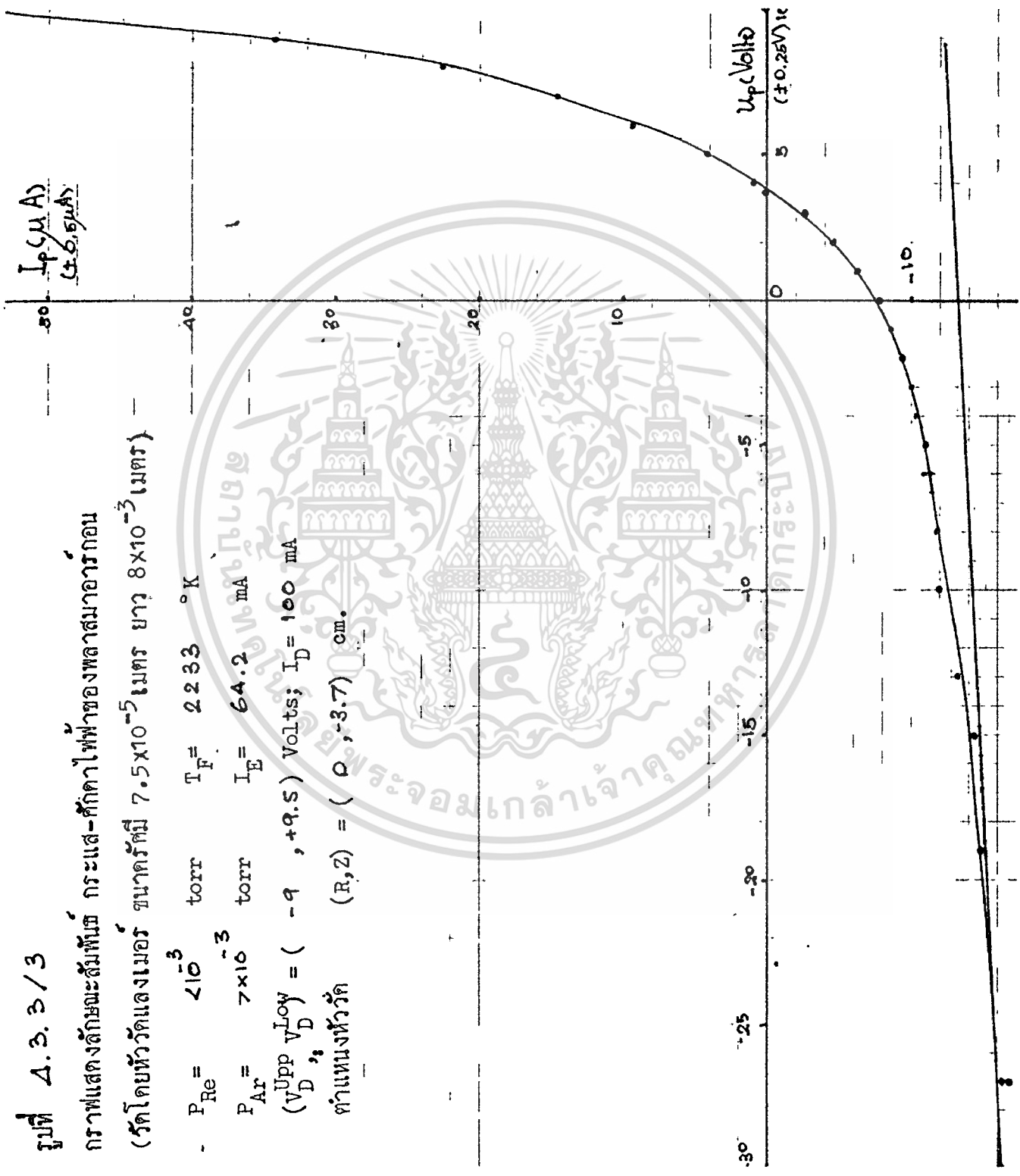
ตำแหน่งหัววัด (R,Z) = (0, 0) cm.



รูปที่ 4.3.3/3

กราฟแสดงลักษณะสัมพันธ์ กระแส-ศักดาไฟฟ้าของพลาสมาอาร์กอน (วัดโดยหัววัดแดงเมอร์ ขนาดรัศมี 7.5×10^{-5} เมตร ยาว 8×10^{-3} เมตร)

$P_{Re} = 4 \times 10^{-3}$ torr $T_F = 2233$ °K
 $P_{Ar} = 7 \times 10^{-3}$ torr $I_E = 64.2$ mA
 $(V_D^{Upp}, V_D^{Low}) = (-9, +9.5)$ Volts; $I_D = 100$ mA
 ตำแหน่งหัววัด $(R, Z) = (0, -3.7)$ cm.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3.3-1 เปรียบเทียบข้อมูลกราฟผลการทดลองรูปที่ 4.3.3/1 4.3.3/2 และ 4.3.3/3

หมายเลขการวัด	สถานะ		ขีดจำกัด		วงจรถ่ายรูป			ข้อมูลลักษณะ		ค่าแนววัด (R, Z) ซม.	หมายเหตุ
	Pre test	Post test	TF	IF	ID	V _D Vpp	V _D V _{avg}	T ₀ (eV) OK	n ₀ m ⁻³		
A.3.3/1	<10 ⁻³	7x10 ⁻³	(A)2233	64.2	100	-10.7	+9.3	(4.2eV) 4.6x10 ⁻⁴	7.1x10 ¹⁵	0, +3.7	รูปถ่าย A.3.3/1A
A.3.3/2	<10 ⁻³	(7-12)x10 ⁻³	(A)2233	64.2	100	-11	+9.	(5.2eV) 6.0x10 ⁻⁴	1.4x10 ¹⁶	0, 0	รูปถ่าย A.3.3/2A
A.3.3/3	<10 ⁻³	7x10 ⁻³	(A)2233 (ทวนผล)	64.2	100	-9	+9.5	7.9x10 ⁻⁴ (4.4eV) 5.1x10 ⁻⁴	1.6x10 ¹⁶	0, -3.7	รูปถ่าย A.3.3/3A

พิจารณา ค่า อุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e) และค่าความหนาแน่นพลาสมาโดยประมาณ (n_0) ในการวาง
 ที่ 4.3.3 - 1 จะพบว่า บริเวณกึ่งกลาง (0,0) และส่วนตอนล่าง (0, -3.7) ของกระเปาะ มีค่าอุณหภูมิ
 อิเล็กตรอนสูงกว่าส่วนตอนบน (0, +3.7) โดยที่ตำแหน่งกึ่งกลางกระเปาะ อุณหภูมิอิเล็กตรอนมีค่ามากที่สุด
 ($4.6 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{K} < 5.1 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{K} < 6.0 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{K}$) ซึ่งอธิบายได้คือ ในทางปฏิบัติเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้า
 คงที่ค่าหนึ่งตามลวดความร้อนซึ่งซึ่งเป็นเส้นตรงนั้น ค่าอุณหภูมิของลวดจะไม่ร้อนสม่ำเสมอทั้งเส้น แต่จะมีอุณหภูมิ
 สูงที่สุดบริเวณตอนกลางของลวด และจากลักษณะการจี้วงจรพิเศษารค์ โดยที่กริดเชื่อมวงจรกับเครื่องจ่ายไฟ
 เพลลวดความร้อน (Filament Power Supply) ก้านขั้ววานั้น ทำให้กึ่งกลางของความยาวลวดความร้อน
 มีอุณหภูมิสูงกว่าชีกตอนบนของลวด (Ehlers and Leung, 1979) อีกทั้งสภาพที่ตำแหน่งรัศมีใกล้ระบ
 ขั้วไฟฟ้าและสภาพซึ่ง $v_D^{\text{Upp}} < v_D^{\text{Low}}$ ในขณะที่ทำการทดลอง ดังนั้นอนุภาคอิเล็กตรอนบริเวณตอนกลาง
 ชีกส่วนตอนล่างของกระเปาะได้รับพลังงานหนุนต่อเบื้องมากกว่าอนุภาคอิเล็กตรอนซึ่งอยู่ชีกตอนบนของกระ
 เปาะ ซึ่งทำให้ค่า $T_e(0,0), T_e(0,-3.7) > T_e(0,+3.7)$

ในทำนองเดียวกัน เนื่องจากในส่วนตอนล่างของกระเปาะ (0, -3.7) v_D^{Low} และอุณหภูมิลวด
 มีค่ามาก จึงเป็นบริเวณที่มีการกระตุ้นให้โมเลกุลก๊าซเกิดการแตกตัว (Ionization) มากกว่าบริเวณอื่น
 ค่าความหนาแน่นพลาสมาจึงมีค่าสูง ($1.6 \times 10^{16} > 1.4 \times 10^{16} > 7.1 \times 10^{15}$ เมตร⁻³)
 และด้วยเหตุผลเดียวกัน บริเวณส่วนตอนล่างของกระเปาะนี้ จะมีแนวโน้มที่จะพบสภาพพลาสมาที่มีกลุ่มอนุภาค
 อิเล็กตรอน ซึ่งมีพลังงานแตกต่างกันเป็นองค์ประกอบ ดังกราฟผลการทดลองรูปที่ 4.3.2/2 และ 4.3.3/3

บทที่ 5

สรุป วิจารณ์ และข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

การศึกษาวิจัยเรื่องนี้ เป็นการวิจัยเพื่อสร้างชุดทดลองเพื่อใช้ในงานวิจัยทางด้านพลาสมา ก๊าซ นัมแทกการออกแบบ การคัดเลือก คัดแปลงและจัดท้าววัสดุที่เหมาะสมโดยสร้างขึ้นเอง อีกทั้งทำการ - ทดลองกำเนิดพลาสมาอาร์กอนในสภาพไร้นามรบกวน (Field Free Ar - Gas Plasma) เพื่อทราบ ถึงเงื่อนไขข้อจำกัดของเครื่องมือในการกำเนิดพลาสมา โดยวิธีอาศัยหัววัดไฟฟ้าแบบแลงเมอร์วัดคุณสมบัติ บรรยากาศพลาสมาที่กำเนิดขึ้น ซึ่งผลการวิจัยสามารถแยกสรุป วิจารณ์ และมีข้อเสนอแนะ คือ

5.2 สรุปและวิจารณ์ชุดเครื่องมือวิจัย

จากการออกแบบกระเปาะ มีขนาดเล็ก (เนื่องจากข้อจำกัดในการจัดท้าววัสดุ) นอกจากทำให้ กังวลออกแบบระบบขับไล่ทำให้กระเปาะและเต้าน้อย ยังทำให้ทองออกแบบขนาดของสิ่งต่าง ๆ ที่จะ ผลลัพธ์สัสมบรรยากาศพลาสมาให้ขนาดเล็ก (เมื่อเทียบกับ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของกริด) ด้วย เพื่อลด สภาพรบกวน (perturbation) ที่จะเกิดกับพลาสมา แต่ในทางปฏิบัติ ด้วยข้อจำกัดในการลดขนาดของ อุปกรณ์ (หัววัด) และอื่น ๆ จึงเป็นเงื่อนไขสำคัญที่ทำให้ ผลการทดลองแตกต่างไปจากทฤษฎีซึ่งจำกัดอยู่กับ ขอบสมมุติฐานที่ไม่คำนึงถึง สภาพรบกวนที่เกิดกับพลาสมา (perturbation) อิทธิพลขอบ (End Effect) ของลวดหัววัดและอื่น ๆ

จากการที่ชุดวิจัยจำเป็นต้องสะดวกในการดัดแปลง ทยดแก้ไข และการประกอบชิ้นใหม่ จึงจำเป็นต้อง ซักซ้อมข้อต่อมากขึ้น ห้อยางหนา (ซึ่งทดสอบพบว่า มีอัตราการรั่ว (Leak) สูง) ในบางจุด แทนการ ประกอบเชื่อมอย่างถาวร และจากการติดตั้งปั๊มชนิดแพร่กระจายและกระเปาะกักไอ ห่างจากกระเปาะ สูญญากาศ ทำให้กำลังลูกอากาศ (Pumping Speed) มีการสูญเสียในส่วนต่าง ๆ ของระบบมาก ดังนั้น การลดความดันเพื่อให้ได้ค่า ความดันต่ำสุด (Ultimate Pressure) และค่า ความดันตกค้าง (Residual Pressure, P_{Re}) ที่กระเปาะมีค่าค่ามาก ๆ จึงทำไม่ได้ ซึ่งมีผลทำให้ทองเลือก กำเนิดพลาสมาอาร์กอน ที่ค่าความดันอาร์กอน (Ar. Pressure, P_{Ar}) ไม่ต่ำนัก (เพราะในทางปฏิบัติ จะกำหนด ค่าความดัน ทำงาน ≥ 10 เท่าของค่าความดันตกค้าง เพื่อให้ปริมาณก๊าซซึ่งตกค้างในกระเปาะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ ปริมาณก๊าซอาร์กอนซึ่งใช้งาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับช่องกุ (window) ซึ่งใช้เพื่อส่องวัดค่าอุณหภูมิของลวดความร้อนด้วยเครื่องไพโรมิเตอร์ (Optical Pyrometer) มีขนาดเล็ก ทำให้ไม่สามารถใช้รังสีเอกซ์ของระบบขั้วไฟฟ้าในกระเปาะ ขณะทำการทดลอง นอกจากนี้ ในช่วงแรกของการเริ่มลดความดัน บ่อยครั้งที่พบว่า เกิดการรั่ว (Leak) ที่บริเวณช่องกุ ซึ่งแก้ไขโดยวิธีเพิ่มความหนาแน่นของวงแหวน (O - ring) ของช่องคู่มือการปิดวง ขณะออกแรงกด

สำหรับระบบวัด ความเร็วที่ไต่ระหว่างเก็บข้อมูลมีการ เปลี่ยนลวดความร้อนบ่อยครั้ง ทำให้ หลอดแก้วหุ้มหัววัด ซึ่งยึดติดกับแกนขอทอมบนแผ่นฝาได้รับแรงบิด เนื่องจากการเคลื่อนย้าย เกิดเป็นรอยร้าว ที่ปลายหลอดแก้วส่วนที่จับยึดกับแกนขอทอมของแผ่นฝา ผลทำให้หลัง เปลี่ยนลวดความร้อน เกิดสภาพลวดความดัน ไม่คงโดยไม่ทราบสาเหตุ ซึ่งแก้ไขโดยการ ักปลายหลอดแก้วส่วนร้าวทิ้ง ในการ คัดต่อวงจรมิให้ปลาย ลวดหัววัดซึ่งบอบบาง เกิดการชำรุด ซึ่งในการทำการคัดแก้แล้ว ปรากฏว่าหัววัดปลายโลหะทรงกลมเกิดการ ชำรุด ทำให้ไม่สามารถ จักหาใหม่ได้ทันจึงมีใช้หลอดวัดคุณสมบัติพลาสมาโดยหัววัดโลหะทรงกลมตามที่ได้ ศึกษามาไว้

ส่วนระบบระบายความร้อน ซึ่งอาศัยเครื่องทำน้ำเย็นนั้นใช้งานได้ แต่ไม่สะดวกเนื่องจากห้องคอย ระบายรังสีในการ เปลี่ยนน้ำถึงใหม่ทุก ๆ ประมาณ 30-45 นาที สำหรับการระบายความร้อนกระเปาะ ผู้ดูแลรักษาขอยอมจากพัคคอม 2 เครื่องนั้น ถึงแม้จะไม่ถี่เท่าการระบายความร้อนด้วยน้ำ แต่ก็พอใช้ได้ (ทดสอบโดยวิธีสัมผัสด้วยมือ) เนื่องจากระเปาะสูงๆจากหัวขนาดเล็ก ทำให้กำลังกระแสไฟฟ้า (Power Dissipation) ที่จ่ายเพื่อเผาผลาญความร้อนมีค่าไม่สูงนัก

5.3 สรุปและวิจารณ์ เงื่อนไขที่จำกัดของเครื่องมือ และผลที่มีต่อบรรยากาศพลาสมาที่กำลังเกิด ในกระเปาะ

เนื่องจากระเปาะที่สร้างมีขนาดเล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 15.6 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร) จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยค่ากระแสไอซ์ขึ้นสูงมากในการกำเนิดพลาสมา ดังนั้น ขนาดกำลังกระแสไฟฟ้า (Power Dissipation) ที่ใช้เพื่อเผาผลาญความร้อนจึงมีค่าไม่สูงมากนัก (< 300 วัตต์) และจากลักษณะการออกแบบระบบขั้วไฟฟ้าในกระเปาะที่มีกริหารทรงกระบอก และ ลวดความร้อนซึ่งซ้อนเป็นวงในแนวคิ่ง ($\phi_s = 10,2$ เซนติเมตร, $\phi_p = 16.2 \pm 4$ เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีขนาดยาวทำให้ขณะกำเนิกพลาสมา ศักดาไฟฟ้าพร้อมลวดความร้อนมีค่ามาก (> 10 โวลต์) ดังนั้นค่าศักดาไฟฟ้าพร้อมระหว่างกริดกับส่วนปลายบนของลวดความร้อน (V_D^{UPP}) และค่าศักดาไฟฟ้าพร้อมระหว่างกริดกับส่วนปลายล่างของลวดความร้อน (V_D^{Low}) จะมีค่าต่างกันมาก (> 10 โวลต์) นั่นคือ อนุภาคอิมีซันอิเล็กตรอนซึ่งหลุดจากลวดความร้อน ส่วนปลายล่างจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานมากกว่าอนุภาคอิมีซันอิเล็กตรอน ซึ่งหลุดจากลวดความร้อนส่วนปลายบนมาก และจากสภาพซึ่งอุณหภูมิของลวดความร้อนที่ตำแหน่งกึ่งกลางและส่วนปลายล่างของลวดมีค่าสูงกว่าส่วนปลายบนของลวดความร้อน ดังนั้นทำให้บริเวณตอนกลางและส่วนตอนล่างของกระเปาะไคร้รับพลังงานหนักต่อเนื่องที่จ่ายจากระบบขั้วไฟฟ้ามากกว่าส่วนตอนบนของกระเปาะ บวกกับกระเปาะเป็นรูปทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็ก จึงมีผลทำให้พลาสมาที่กำเนิกในกระเปาะมีสภาพไม่เป็นเนื้อเดียว (Inhomogeneous) ดังสังเกตได้จากค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนของพลาสมาที่ตำแหน่งตอนบน กึ่งกลางและตอนล่างในแนวแกนกลางของกระเปาะมีค่าไม่เท่ากัน คือ $T_e(0, 0) > T_e(0, -3.7) > T_e(0, +3.7)$ นอกจากนี้ยังสันนิษฐานได้ว่า การพบพลาสมาที่ประกอบด้วยอนุภาคอิเล็กตรอนสองกลุ่มพลังงานในบริเวณตอนกลาง(0,0)และส่วนล่าง(0,-3.7)ของกระเปาะนั้น เนื่องจากกระเปาะมีขนาดเล็ก ทำให้บริเวณตอนกลาง(ซึ่งวัดคุณสมบัติพลาสมา)และบริเวณระบบขั้วไฟฟ้าอยู่ใกล้กันเกินไป ทำให้มีอิมีซันอิเล็กตรอนบางส่วนเคลื่อนที่มาถึงผิวหัววัดโดยไม่เกิดการชน(การสูญเสียพลังงาน)กับอนุภาคอื่น

อนึ่ง จากสภาพซึ่งศักดาไฟฟ้าพร้อมลวดความร้อนมีค่ามาก (ขณะผ่านกระแสไฟฟ้าเผาลวดความร้อน) จึงเป็นไปได้ที่จะอาศัยค่าศักดาไฟฟ้าระหว่างลวดความร้อนทำหน้าที่เป็นศักดาไฟฟ้ากิชซาร์ค โดยไม่ต้องอาศัยเครื่องจ่ายไฟวงจรกิชซาร์คเลย แต่มีข้อไม่สะดวกเนื่องจากไม่สามารถเปลี่ยนเงื่อนไขกำหนดสภาพพลาสมา ($I_D, V_D; T_F, I_E; P_{AR}$) ให้เป็นอิสระจากกัน

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาว่า λ_D, N_D (จากภาคผนวกที่ 4) ; ค่า T_e, n (จากตาราง 4.3.2 - 1, 4.3.3 - 1) และกราฟรูปที่ 1.1/1 จะพบว่า พลาสมาที่กำเนิกในแต่ละเงื่อนไขการทดลองมีความสอดคล้องตามสมบัติพื้นฐานของพลาสมา คือมีค่า $\lambda_D \ll L$; $N_D \gg 1$ และ เกณฑ์ทั่วไปสำหรับกรณีพลาสมาที่กำเนิกในห้องปฏิบัติการ คือมีค่า $\sim 10^4 \text{ }^\circ\text{K} \leq T \leq 10^6 \text{ }^\circ\text{K}$ และ $(8.1 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}) \leq n \leq (1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3})$ โดยประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้จากค่า $\lambda_{en}, \lambda_{in}$ (ภาคผนวกที่ 6) และค่า n_e/n_{Ar} (ภาคผนวกที่ 5) ทำให้สามารถประมาณได้ว่า ในบริเวณโดยรอบหัววัดซึ่งถูกรบกวนด้วยสภาพศักดาไฟฟ้าของหัววัด มีสภาพเป็นบริเวณไร้การชน⁽¹¹⁾ คือมีค่า $\lambda_{in}, \lambda_{en} \gg |ค่าขนาด \lambda_D| + \gamma_p$ และมีสภาพแตกตัวแบบอ่อน ($n_e/n_{Ar} \leq 4 \times 10^{-4}$) ซึ่งสอดคล้องตามเงื่อนไขของทฤษฎีหัววัดไฟฟ้า นอกจากนี้ การที่ค่า $\log I_e$ และ U_p มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงในช่วง $U_p \sim U_f$ (ภาคผนวกที่ 1) และ ข้อมูล $(I_p, U_p), (\log I_e, U_p)$ มีสภาพไม่กระจาย (กราฟรูปที่ 4.3.2/1 - /3, 4.3.3/1 - /3, ภาคผนวกที่ 1) ยิ่งบ่งว่าพลาสมาที่กำลังกำเนิดในแต่ละเงื่อนไขการทดลองนี้มีรูปกระจายความเร็วของอนุภาคแบบแมกเวล และมีสภาพนิ่ง (Quiescent) ตามลำดับอีกด้วย ส่วนสภาพความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพลาสมาในแนวแกนกลาง (ตารางที่ 4.3.3 - 1) นั้น หากพิจารณาสภาพความสอดคล้องของข้อมูลกับทฤษฎีหัววัด และสภาพไร้การชนในบริเวณเล็ก ๆ โดยรอบหัววัด จะอนุมานได้ว่า บริเวณเฉพาะเล็ก ๆ ที่ทำการวัดพลาสมามีสภาพเป็นเนื้อเดียว

อนึ่ง การวัดคุณสมบัติพลาสมาโดยวิธีหัววัดไฟฟ้าถึงแม้จะได้รายละเอียดของพลาสมาที่บริเวณต่าง ๆ ซึ่งไม่สามารถจะวัดได้โดยวิธีอื่น แต่ก็เป็นที่รบกวนสภาพพลาสมาให้แตกต่างไปจากเดิม เนื่องจากจำเป็นต้องสอดหัววัดผ่านไปในบรรยากาศพลาสมา ดังนั้นค่าอุณหภูมิ และค่าความหนาแน่นของพลาสมาซึ่งวัดโดยวิธีนี้จึงมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ถูกต้อง ซึ่งโดยทั่วไปถือว่า ค่าอุณหภูมิอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ถึง 40% ส่วนค่าความหนาแน่นซึ่งประมาณโดยอาศัยความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.2 นั้น สัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิพลาสมา และ กระแสไอออนอิมิต์เท่านั้น โดยไม่มีเทอมของศักดาไฟฟ้าหัววัดอยู่เลย จึงเป็นการประมาณค่าขนาด (Order of Magnitude) ของค่าความหนาแน่นพลาสมาเท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัติ หากต้องการทราบค่าความหนาแน่นที่ถูกต้องใกล้เคียงมากขึ้น มักนิยมอาศัยการวัดคุณสมบัติโดยวิธีอื่น และอาศัยการวัดมากกว่าหนึ่งวิธี เพื่อเปรียบเทียบยืนยันผล

5.4 ข้อเสนอแนะเพื่อการดำเนินงานวิจัยต่อ โดยอาศัยชุดเครื่องมือที่สร้าง

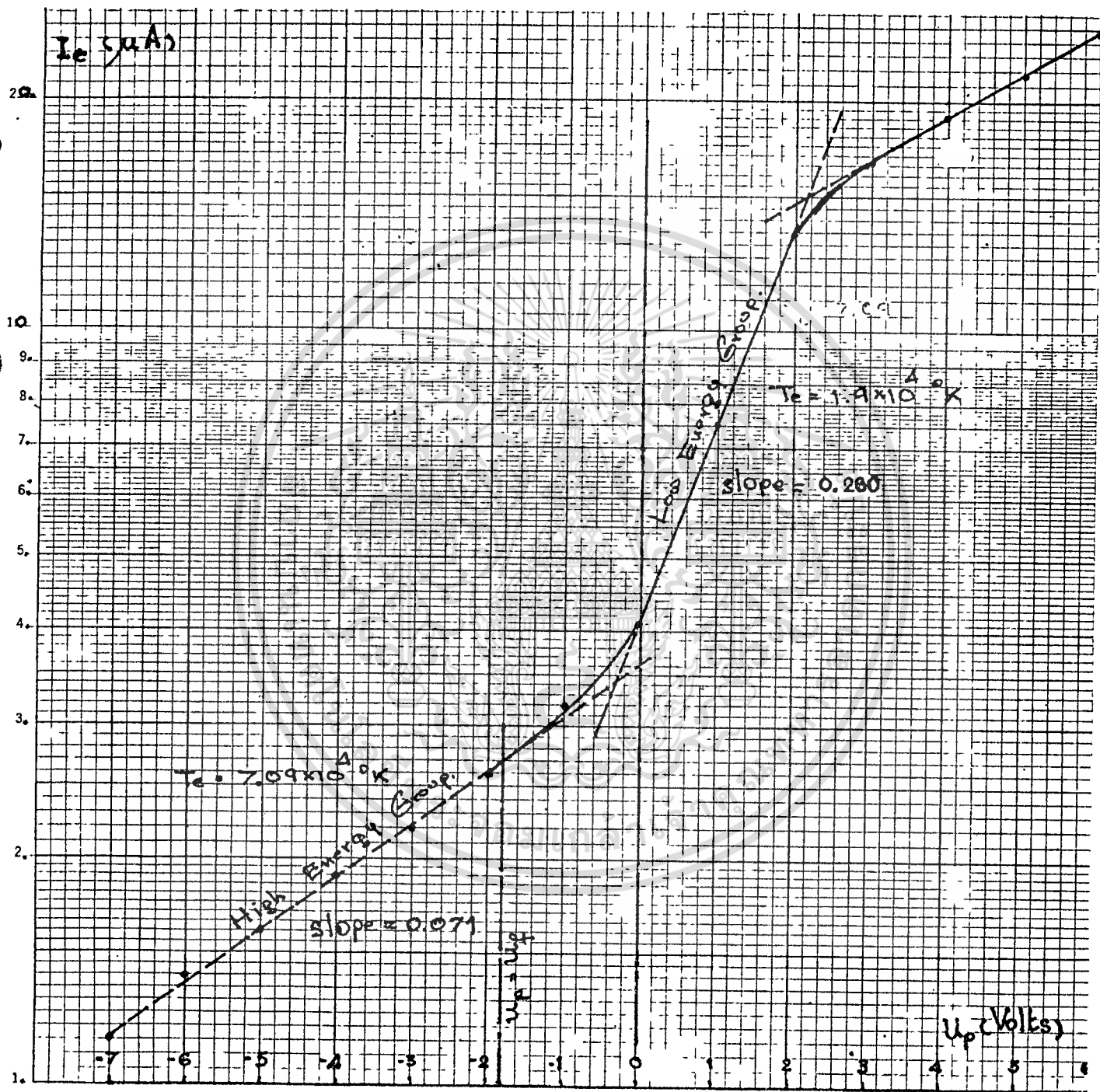
ด้วยเหตุที่ พลาสมาอาร์กอนที่กำเนิดขึ้นเพื่อทำการศึกษาสมบัติของพลาสมาในโครงการวิจัย เป็นเพียงสถานะภาพเงื่อนโซ่หนึ่งของพลาสมาอาร์กอน ซึ่งมีสภาพเป็น พลาสมาอาร์คแบบอ่อน (ซึ่งกระแส และศักดาไฟฟ้าคิซซาร์คมีความสัมพันธ์แบบความต้านทานเชิงลบ ขนาดของกระแสคิซซาร์ค (0.03 - 0.12) แอมแปร์ และก๊าซมีสภาพแตกตัวต่ำ) เท่านั้น ในการต่อไป ชุดเครื่องมือที่สร้างสามารถใช้เพื่อ ศึกษาสมบัติพลาสมาอาร์กอนที่สถานะภาพเงื่อนโซ่อื่น เช่น สภาพเงื่อนโซ่ซึ่งพลาสมามีสภาพเป็น พลาสมา อาร์คแบบรุนแรง (ซึ่งให้ค่ากระแสคิซซาร์คสูง และก๊าซมีสภาพแตกตัวมาก) หรือ อาจใช้เพื่อศึกษาสมบัติ ของพลาสมาก๊าซชนิดอื่น (เช่น N_2) ที่สถานะภาพเงื่อนโซ่ต่าง ๆ ได้ด้วย ทั้งนี้โดยไม่จำเป็นต้อง เปลี่ยนแปลงแก้ไขเครื่องมือ นอกจากการเปลี่ยนประเภทของก๊าซที่จ่ายให้กับกระแสเป่าเท่านั้น

อนึ่ง จากลักษณะการออกแบบกระแสเป่า และระบบชีวไฟฟ้าในกระแสเป่า มีหลายส่วนที่สามารถนำไปใช้หรือดัดแปลงเพื่อให้ชุดเครื่องมือนี้สามารถใช้ศึกษาวิจัยเรื่อง พลาสมาสเปกเตอร์ (Plasma Sputtering) ได้ ซึ่งมีประโยชน์ในงานพัฒนาทางวัสดุศาสตร์ (Material Science) และจากการที่ ชุดเครื่องมือนี้สามารถใช้เพื่อ การกำจัดความชื้น หรือ ก๊าซภายใต้สุญญากาศ (Vacuum Drying or Outgassing) จึงอาจใช้ประโยชน์ในงานวิจัยเพื่อพัฒนาคุณภาพของความเป็นฉนวนไฟฟ้าของสารได- อิเล็กทริก หรืออื่น ๆ นอกจากนี้ อาจดัดแปลงชุดเครื่องมือเพื่อศึกษาเรื่อง หลอดสุญญากาศ (Vacuum Tubes) หลอดคิซซาร์ค (Discharge Tubes) การฉาบผิวภายใต้สุญญากาศ (Vacuum Coating) การทำฟิล์มบาง (Thin Films) การลดอุณหภูมิภายใต้สุญญากาศ และอื่น ๆ และยังสามารถดัดแปลงเพื่อ ใช้งานร่วมกับโคมแก้ว (Bell Jar) ได้ โดยเพียงแต่เปลี่ยนแผ่นฝาของกระแสเป่าให้เหมาะสมเท่านั้น

เอกสารอ้างอิง - บรรณานุกรม

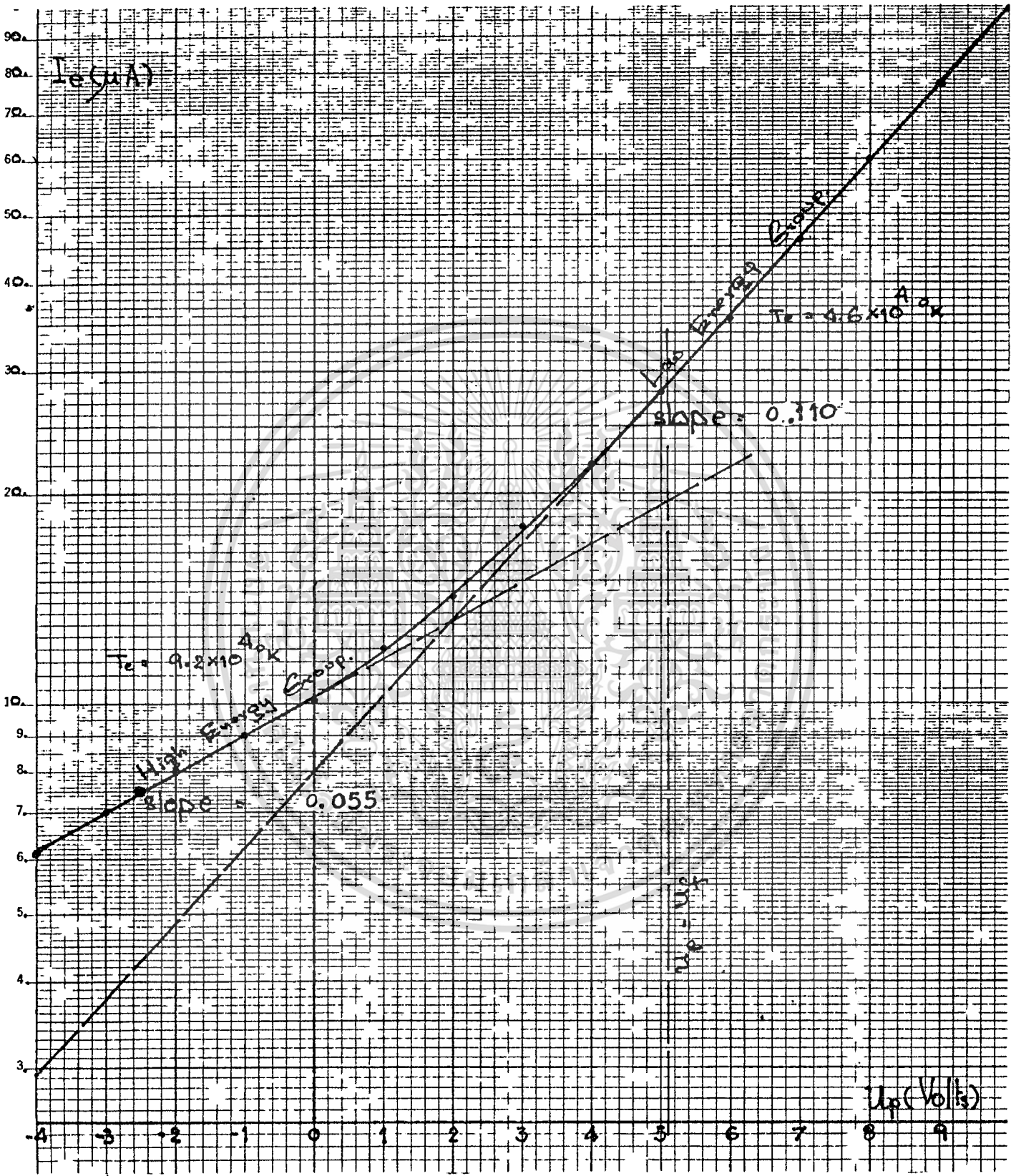
- 1 Delcroix J.L., " Plasma Physics "John Wiley&Sons Limited, London, 1965.
- 2 Guthrie A., " Vacuum Technology "John Wiley&Sons, New York, 1963.
- 3 Beck A.H., " Handbook of Vacuum Physics, "Vol.3, New York, 1965.
- 4 Roth A., " Vacuum Sealing Techniques, "Pergamon Press Ltd., London, 1966
- 5 Weast R.C., " Handbook of Chemistry and Physics, " 55th Edition, CRC Press, 1975.
- 6 Jenkins R.O., " A review of Thermionic Cathodes, " Vacuum, 19, 1969.
- 7 Ehlers K.W. and Leung K.N., " Some Characteristics of Tungsten Filaments Operated as Cathodes in a gas Discharge, " Rev.Sci.Instrum., 50(3), Mar., 1979.
- 8 Uman M.A., " Intro. to Plasma Physics, " McGraw-Hill, Inc., New York, 1964.
- 9 Tanenbaum B.S., " Plasma Physics, " McGraw-Hill, New York, 1967.
- 10 Huddleston R.H., Leonard S.L., " Plasma Diagnostic Techniques, "Academic Press, New York, 1963.
- 11 Venugopalan, " Reaction, "John Wiley & Sons ,Inc., Vol. 1, 1971.
- 12 Lowchte W.-Holtgreven, " Plasma Diagnostics, " North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1968.
- 13 Thompson W.B., " An Intro. to Plasma Physics, "Addison-Wesley Pub.Co., Inc., London
- 14 Spitzer L., " Physics of Fully Ionized Gases, " John Wiley&Sons, New York, 1967.
- 15 Eubank Harold P., " Instrumentation For Plasma Diagnostics, " Physics Today, July, 1966.
- 16 Oskam H.J., et al., " Studies of The Dynamic Properties of Langmuir Probes III, " Physica, 30, 1964.
- 17 Hoog A. C. De, " Production of An Extended Spherical Field-Free Plasma and Its Application to The Measurement of The Diamagnetic Effect, M.Sc.Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Report PPL-26, 1969.

ภาคผนวกที่ 1
(ข้อมูลเพิ่มเติม)



รูปที่ 4.3.2/1 A

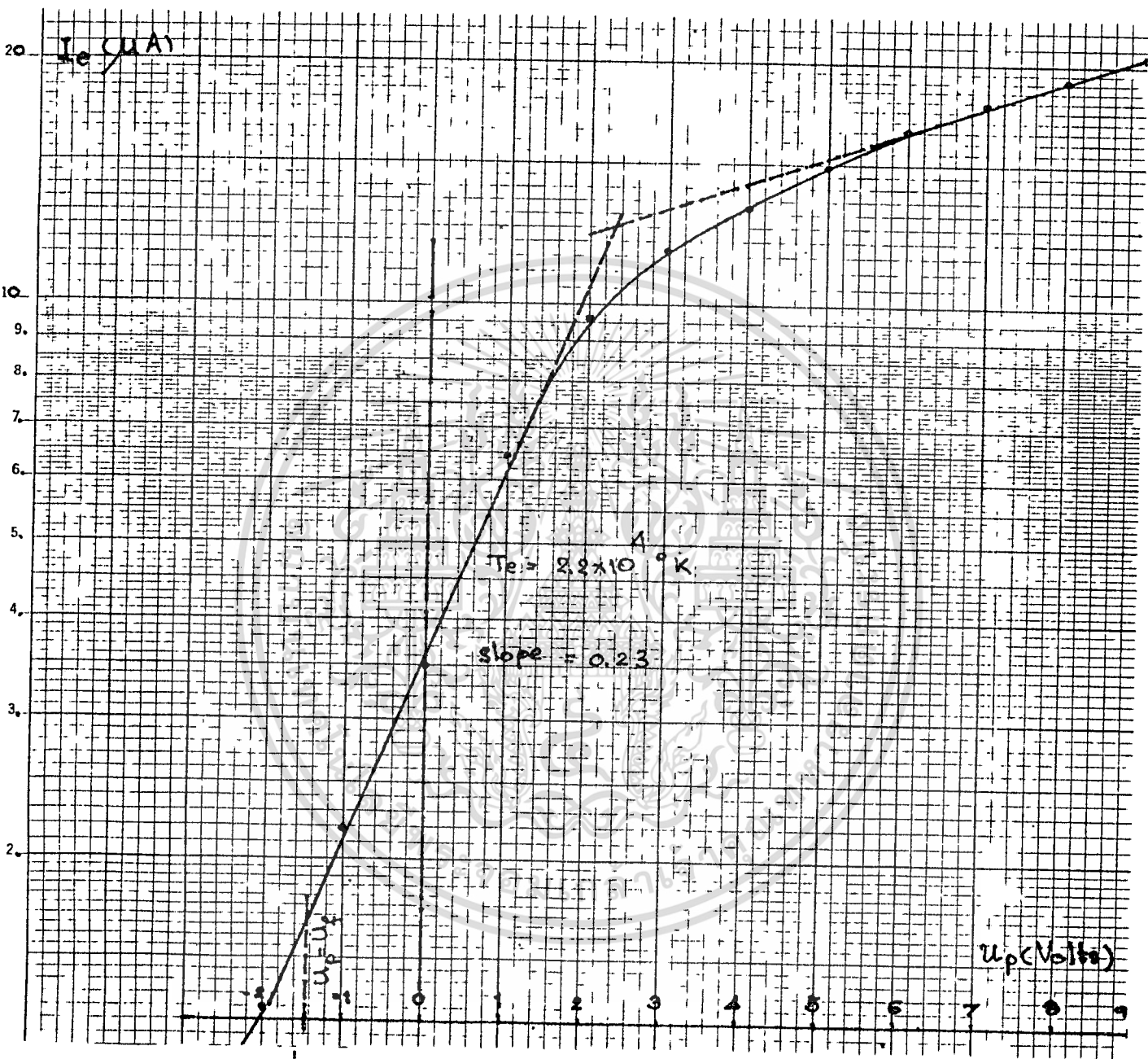
กราฟแสดงลักษณะสัมพันธ์ $\log I_c$ และ U_p ซึ่งมีเงื่อนไขกำหนดดังกราฟรูป 4.3.2/1



รูปที่ 4.3.2/2A

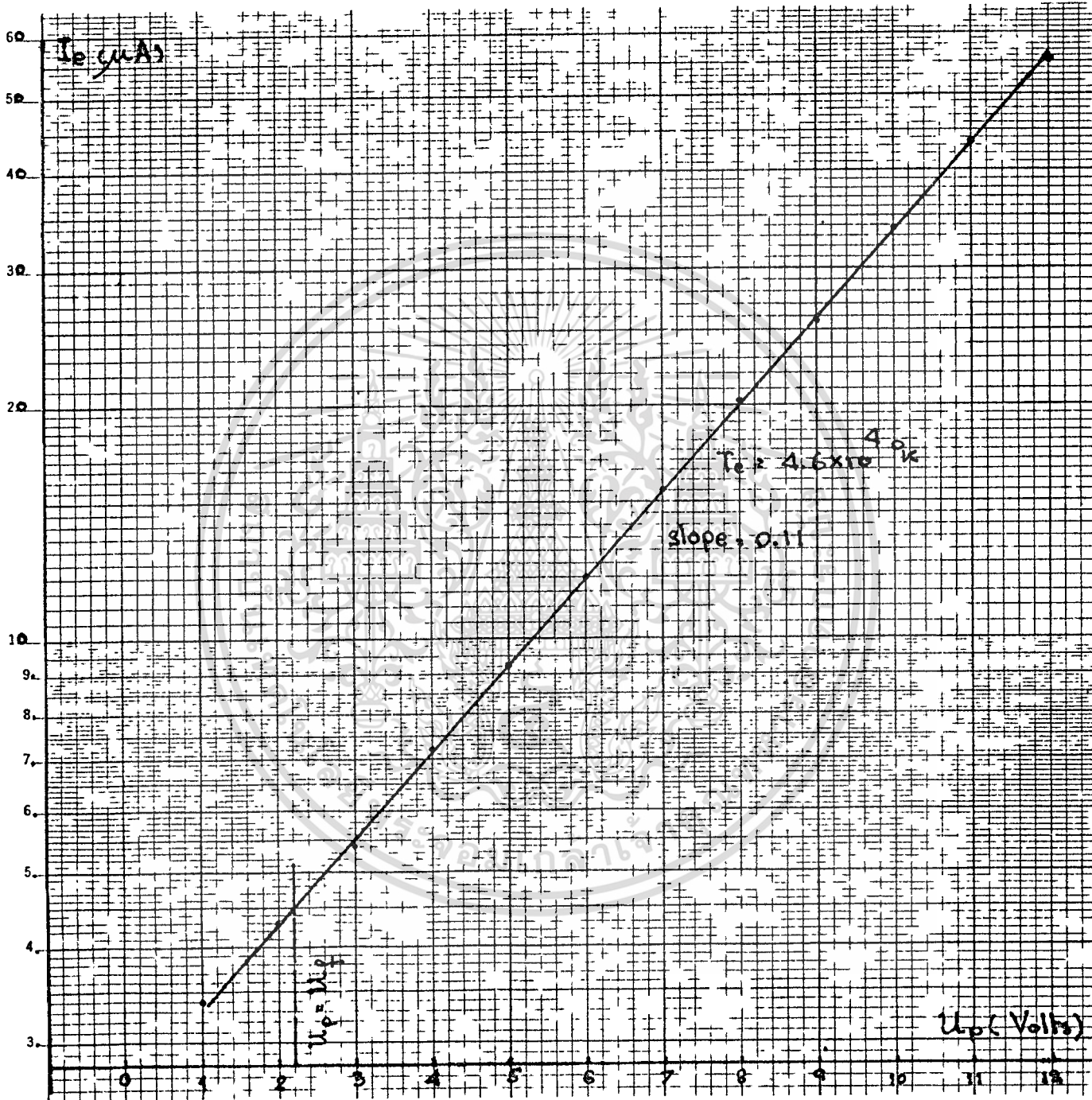
กราฟแสดงลักษณะสัมพันธ์ $\log I_e$ และ U_p ซึ่งมีเงื่อนไขกำหนดดังกราฟรูป 4.3.2/2. เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



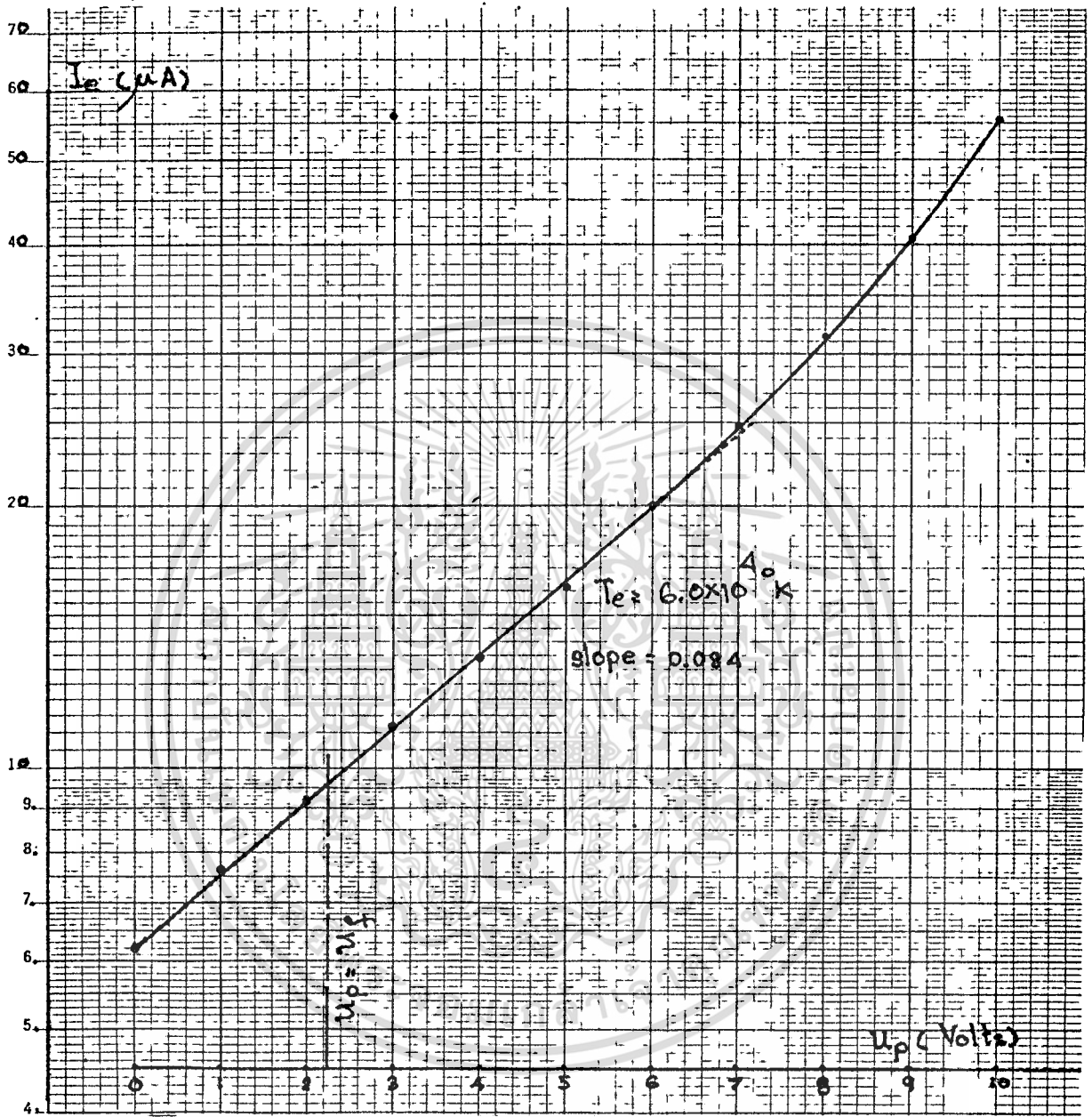
รูปที่ 4.3.2/3A

กราฟแสดงลักษณะสัมพันธ์ $\text{Log } I_c$ และ U_p ซึ่งมีเงื่อนไขกำหนดดังกราฟรูป 4.3.2/3



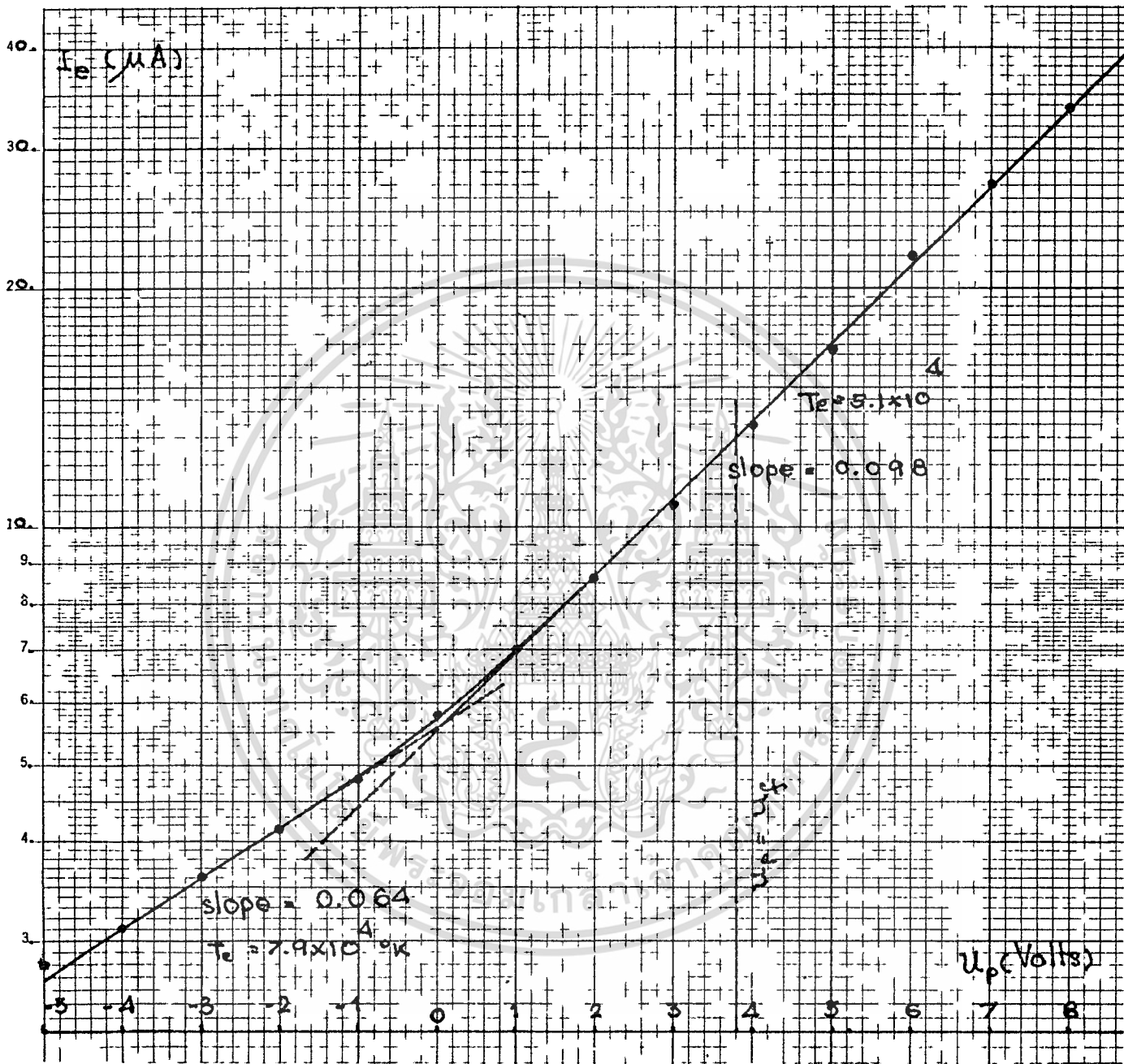
รูปที่ 4.3.3/1A

กราฟแสดงลักษณะสัมพันธ์ $\log I_e$ และ U_p ซึ่งมีเงื่อนไขกำหนดดังกราฟรูป 4.3.3/1



รูปที่ 4.3.3 / 2A

กราฟแสดงลักษณะสัมพันธ์ $\log I_e$ และ U_p ซึ่งมีเงื่อนไขกำหนดดังกราฟรูป 4.3.3 / 2



รูปที่ 4.3.3 / 3A

กราฟแสดงลักษณะสัมพันธ์ $\log I_e$ และ U_p ซึ่งมีเงื่อนไขกำหนดดังกราฟรูป 4.3.3/3

ภาคผนวกที่ 2
(ค่าคงที่)

มวลอนุภาคอิเล็กตรอน (m)	=	9.1×10^{-31}	กิโลกรัม
มวลอนุภาคออนอาร์กอน (M)	=	6.625×10^{-26}	กิโลกรัม
ค่าประจุของอนุภาคอิเล็กตรอน (e)	=	1.6×10^{-19}	คูลอมบ์
ค่าคงที่ของโบลท์แมน (k)	=	1.38×10^{-23}	จูล/เคลวิน
รัศมีของหัววัดแลงเมออร์ (r_p)	=	7.5×10^{-3}	เซนติเมตร
ความยาวหัววัดแลงเมออร์	=	0.8	เซนติเมตร
พื้นที่ผิวของหัววัดแลงเมออร์ (A)	=	3.77×10^{-6}	เมตร ²
ความยาวของลวดความร้อน	=	16.25 ± 0.35	เซนติเมตร
เส้นผ่าศูนย์กลางลวดความร้อน	=	0.015 ± 0.001	เซนติเมตร
พื้นที่ผิวลวดความร้อนแต่ละเส้น	=	0.766	เซนติเมตร ²
1 eV	=	11600 °K	

ภาคผนวกที่ 3
(สูตรคำนวณ)

จากสมการ 2.5

$$T_e (^{\circ}\text{K}) = \frac{e \cdot \log e}{k \frac{d(\log I_e)}{dU_p}} = 5035/d \log I_e$$

จากสมการ 4.3

$$n_o = 2.3 \times 10^{23} I_{io} / (T_e)^{1/2} \quad \text{อนุภาค.เมตร}^{-3}$$

จากสมการ 1.2

$$\lambda_D = 69.0 (T/n_e)^{1/2} \quad \text{เมตร}$$

จากสมการ 1.3

$$N_D = \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 n_e \quad \text{อนุภาค.เมตร}^{-3}$$

กระแสไอออน

$$I_E = j_E \cdot \text{Area} \quad \text{แอมแปร์, } j_E = \text{ความหนาแน่นกระแสไอออน (แอมแปร์.เมตร}^{-2}\text{)}$$

ค่าช่วงปลอกการชนของก๊าซ

$$\lambda_{\text{gas}} \quad (\text{เซนติเมตร}) = 5 / (\text{ค่าความดันในหน่วยไมครอน})$$

ค่าช่วงปลอกการชนระหว่างอนุภาคอิเล็กตรอน-อะตอมอาร์กอน (8)

$$\lambda_{en} = 1 / 6_{en} \cdot n_{Ar} \quad \text{เมตร}$$

$$n_{Ar} = P/kT_{\text{gas}} = 9.66 \times 10^{24} \cdot \frac{P(\text{torr})}{T(^{\circ}\text{K})} \quad \text{อนุภาค.เมตร}^{-3}$$

ค่าช่วงปลอกการชนระหว่างอนุภาคอิเล็กตรอน-อะตอมอาร์กอน

$$\lambda_{in} = \frac{\lambda_o}{P(\text{torr})} \cdot \frac{(T_i)^{3/2}}{(T_o)^{3/2}}$$

$$(\text{เมื่อ } \lambda_o = 3.09 \times 10^{-3} \text{ cm.torr}^{-1}; T_i \approx T_{\text{gas}}^{\circ}\text{K}; T_o = 273^{\circ}\text{K})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวกที่ 4

(คำนวณค่า λ_D และ N_D เปรียบเทียบ สมบัติพื้นฐานของพลาสมา)

กราฟผดพร ทดลองรูป ที่	ข้อมูลค่าต่าง.		λ_D m	N_D ม ⁻³
	T_e °K	n_e ม ⁻³		
A.3.2/1	7.1×10^4	8.3×10^{15}	1.04×10^{-4}	3.9×10^4
	1.9×10^4			
A.3.2/2	9.2×10^4	4.4×10^{16}	7.05×10^{-5}	6.5×10^4
	4.6×10^4			
A.3.2/3	2.2×10^4	6.2×10^{15}	1.3×10^{-4}	5.7×10^4
A.3.3/1	4.6×10^4	7.1×10^{15}	1.76×10^{-4}	1.6×10^5
A.3.3/2	6.0×10^4	1.4×10^{16}	1.43×10^{-4}	1.7×10^5
A.3.3/3	7.9×10^4	1.6×10^{16}	1.23×10^{-4}	1.2×10^5
	5.1×10^4			

พิจารณาค่า λ_D และ N_D ของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง พบว่า λ_D และ N_D มีค่า $7 \times 10^{-5} < \lambda_D < 1.76 \times 10^{-4}$ เมตร และ $3.9 \times 10^4 < N_D < 1.7 \times 10^5$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่า λ_D กับ คาชานกเล็กส่วนความยาวปริมาตรของพลาสมา (L) ซึ่งในกรณีนี้คือค่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (10.2 เซนติเมตร) และค่าความสูง (20 เซนติเมตร) ของตะแกรงกริด และเปรียบเทียบค่า N_D กับค่า 1 จะได้ว่าความสัมพันธ์

$$\lambda_D \ll L \quad \text{และ} \quad N_D \gg 1$$

ซึ่งยืนยันสอดคล้องตามเงื่อนไขคุณสมบัติพื้นฐานของพลาสมา (สมการ 1.1 และสมการ 1.3)

ภาคผนวกที่ 5

(ค่าประมาณ ขนาดสัดส่วนการแตกตัวของก๊าซ)

	P_{Av} torr	n_e m^{-3}	$T_{GAS} = 600^\circ K$		$T_{GAS} = 300^\circ K$	
			n_{AV} m^{-3}	n_e/n_{AV}	n_{AV} m^{-3}	n_e/n_{AV}
4.3.2/1	$(11-7) \times 10^{-3}$	8.3×10^{-15}	$\begin{cases} 1.77 \times 10^{20} \\ 1.13 \times 10^{20} \end{cases}$	$\begin{cases} 4.7 \times 10^{-5} \\ 7.3 \times 10^{-5} \end{cases}$	$\begin{cases} 3.54 \times 10^{20} \\ 2.26 \times 10^{20} \end{cases}$	$\begin{cases} 2.3 \times 10^{-5} \\ 3.7 \times 10^{-5} \end{cases}$
4.3.2/2	7×10^{-3}	4.4×10^{-16}	1.13×10^{20}	3.9×10^{-4}	2.26×10^{20}	1.9×10^{-4}
4.3.2/3	$(4-3) \times 10^{-2}$	6.2×10^{-15}	$\begin{cases} 6.4 \times 10^{20} \\ 4.8 \times 10^{20} \end{cases}$	$\begin{cases} 9.7 \times 10^{-5} \\ 1.3 \times 10^{-5} \end{cases}$	$\begin{cases} 12.8 \times 10^{20} \\ 9.6 \times 10^{20} \end{cases}$	$\begin{cases} 5 \times 10^{-6} \\ 6 \times 10^{-6} \end{cases}$
4.3.3/1	7×10^{-3}	7.1×10^{-15}	1.13×10^{20}	6.3×10^{-5}	2.26×10^{20}	3×10^{-5}
4.3.3/2	$(7-12) \times 10^{-3}$	1.4×10^{-16}	$\begin{cases} 1.93 \times 10^{20} \\ 1.13 \times 10^{20} \end{cases}$	$\begin{cases} 7 \times 10^{-5} \\ 1.2 \times 10^{-4} \end{cases}$	$\begin{cases} 3.86 \times 10^{20} \\ 2.26 \times 10^{20} \end{cases}$	$\begin{cases} 3.6 \times 10^{-5} \\ 6 \times 10^{-5} \end{cases}$
4.3.3/3	7×10^{-3}	1.6×10^{-16}	1.13×10^{20}	1.4×10^{-4}	2.26×10^{20}	7×10^{-5}

กรณีที่อยู่เหนืออุณหภูมิก๊าซ มีค่า $300 < T_{gas} < 600^\circ K$ ค่าประมาณขนาดสัดส่วนการแตกตัวของก๊าซ (Degree of Ionization, n_e/n_{gas}) ของแต่ละเงื่อนไขการทดลองมีค่า $\leq 10^{-4}$ (โดยทั่วไป) ซึ่งเป็นกรณีของการแตกตัวแบบอ่อน (Weakly Ionized Gas) (1) นอกจากกรณีขอมูล 4.3.2/2 และ 4.3.3/3 ซึ่งมีค่า $\geq 10^{-4}$ (ใกล้เคียง)

(หมายเหตุ เงื่อนไขซึ่ง $n_e/n_{gas} < 10^{-4}$ อนุมาน (Assume) เป็นสภาพการแตกตัวแบบอ่อน และ เงื่อนไขซึ่ง $n_e/n_{gas} > 10^{-4}$ อนุมานเป็นสภาพการแตกตัวแบบรุนแรง (Strongly Ionized Gas) (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ภาคผนวกที่ 6

(ค่าความเปรียบเทียบกับ n_{en} , n_{in} และ n_D)

กรณีของ $\frac{n_{in}}{n_{en}}$	P_{H_2} torr	T_e °K	T_{gas} °K	$\langle n_{en} \rangle$ eV	ϕ_{en} m^2	(8) IF $T_{gas} = 600^\circ K$			IF $T_{gas} = 300^\circ K$			n_D cm	
						n_{Ar} m^{-3}	n_{en} cm	n_{in} cm	n_{Ar} m^{-3}	n_{en} cm	n_{in} cm		
4.3.1/3	7×10^{-3}			-		1.13×10^{20}							
4.3.2/1	$(11-7) \times 10^{-3}$	$\begin{cases} 7.1 \times 10^4 \\ 1.9 \times 10^4 \end{cases}$	$600^\circ K < T_{gas} < 600^\circ K$	1.6	2.4×10^{-20}	$\begin{cases} 1.77 \times 10^{20} \\ 1.13 \times 10^{20} \end{cases}$	24	1.42	12			.01	
4.3.2/2	7×10^{-3}	$\begin{cases} 9.2 \times 10^4 \\ 4.6 \times 10^4 \end{cases}$		4		6.2×10^{-20}	14	1.42	7			.007	
4.3.2/3	$(4-3) \times 10^{-2}$	4.3×10^4		1.9		2.7×10^{-20}	6	0.25	3			.013	
4.3.3/1	7×10^{-3}	4.6×10^4		4		6.2×10^{-20}	8	0.33	4			.018	
4.3.3/2	$(7-12) \times 10^{-3}$	6.0×10^4		5.2		8.2×10^{-20}	6	0.83	3			.014	
4.3.3/3	7×10^{-3}	$\begin{cases} 7.9 \times 10^4 \\ 5.1 \times 10^4 \end{cases}$		4.4		1.13×10^{-20}	11	1.42	5.5			.014	
						7.0×10^{-20}	13	1.42	6.5			.012	

เมื่ออนุมาณ (Assume) ในอุณหภูมิของก๊าซ (ซึ่งประมาณใหม่ค่าเท่าค่าอุณหภูมิไอออน) มีค่า $600^\circ K < T_{gas} < 300^\circ K$ โดยประมาณ จะพบว่า n_{in} และ n_{en} มีความยาวที่มากและรัศมีที่กว้างมากขึ้นจึงอนุมาณได้ว่า การไหลที่วัดได้ใช้ค่า $n_D = 0.0075$ เทคนิคเมทริกทาสมาในกระเปาะในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง สำหรับบริเวณในเบสของพลาสมาของหัววัด (Space Charge Region) จะขึ้นอยู่กับสภาพที่ไรการชน (Spatial Collisionless Plasma) และไม่มีผลกระทบของก๊าซในบริเวณดังกล่าว (12)

ภาคผนวกที่ 7

(การออกแบบและการเลือกใช้วัสดุ)

ชุดเครื่องมือวิจัยที่ประกอบสร้างขึ้น มีส่วนสำคัญที่ต้องสร้าง 3 ส่วน ได้แก่ กระจาเปาะสูญญากาศ ระบบชีวไฟฟ้าในกระจาเปาะและหัววัด ซึ่งมีรายละเอียด คือ

กระจาเปาะสูญญากาศ : จากลักษณะการออกแบบให้กระจาเปาะมีช่องทูล 4 ช่อง ก้านข้อต่อซึ่งติดตั้งในแนวแกน 2 แห่ง และแนวรัศมีอีก 1 แห่ง ทำให้สามารถดัดแปลงกระจาเปาะเพื่อใช้ทคดองได้ ในหลายลักษณะ การเลือกเหล็กสแตนเลสเบอร์ 304 เป็นวัสดุสร้างกระจาเปาะ เพื่อจะสามารถใช้กับงานวิจัยในสภาพความร้อนสูง หรือเกี่ยวข้องกับสารเคมีอันตรายแม่เหล็กจากภายนอกได้ อีกทั้งยังไม่ก่อให้เกิดสภาพเประอะเปื้อน (Contamination) กับระบบทคดอง ส่วนปีกวงแหวน และก้านข้อต่อซึ่งยื่นห่างจากผนังกระจาเปาะจะลดปริมาณความร้อนที่จะเกิดกับยางวงกลม ซึ่งทำหน้าที่กันอากาศรั่ว (O-Ring Sealing) จึงเป็นการลดสภาพคายก๊าซ (Outgassing) ของยางวงกลม ซึ่งอาจจะมีขึ้นในขณะที่ทำการทคดอง แผ่นฝาปิดซึ่งเป็นแผ่นแบนและยึดติดปีกวงแหวนของกระจาเปาะด้วยน๊อต (Nuts) 8 อัน ทำให้กระจาเปาะสูญญากาศนี้สามารถดัดแปลงเป็นกระจาเปาะอีกความตัน เพื่อใช้ใน งานทคดองได้

หัววัด : การออกแบบหัววัดเป็นระบบบังคับเคลื่อนในสูญญากาศด้วยอำนาจเหนี่ยวนำจากแม่เหล็กภายนอก ทำให้สามารถเปลี่ยนตำแหน่งหัววัดในกระจาเปาะได้โดยไม่เกิดการรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่กระจาเปาะ การทคความยาวของหลอดเซรามิกด้วยการยึดกับหลอดแก้วไพเรชโดยใช้ปูนปลาสเตอร์ ทำให้สามารถลดความยาวของหลอดเซรามิกที่จำเป็นต่อการใช้ให้สั้นลง การดัดปลายลวดค้ำที่เหลือของหัววัดเป็นเกลียวสปริง ทำให้สามารถเคลื่อนหัววัดไปมาในระบบได้โดยไม่เกิดการพันของลวด เข็มฉีดยาซึ่งนำมาเชื่อมวงจรไฟฟ้าจากลวดหัววัดออกสู่ชีวไฟฟ้าภายนอก (โดยอาศัยการทคย้าเนื้อโลหะเกาะกัน) ทำให้ไม่ต้องอาศัยการบัดกรี หรือวิธีอื่นในการเชื่อมวงจรซึ่งอาจทำให้เกิดสภาพคายก๊าซ (Outgassing) กับระบบสูญญากาศจากสารที่ใช้ นอกจากนี้ ขนาดรูสวมของเข็มฉีดยายังมีขนาดพอดีกับปลั๊กไฟฟ้าที่มีใช้ในห้องปฏิบัติการ

สำหรับส่วนประกอบอื่น ซึ่งอยู่ในส่วนใต้กระจาเปาะสูญญากาศ และใต้บีมชนิกแพร่กระจาย ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความตันไม่ต่ำมากขณะทำงาน จะใช้วัสดุที่เป็น ทองเหลือง และทองยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบชีวไฟฟ้าในกระเปาะ : เนื่องจากกระเปาะที่สร้างมีขนาดค่อนข้างเล็ก ทำให้เป็นปัญหาในการออกแบบระบบชีวไฟฟ้า ส่วนที่ติดตั้งในกระเปาะ ซึ่งจะต้องสิ้นเปลืองเนื้อที่น้อยที่สุดเท่าที่ความจำเป็นต้องใช้ (เพื่อให้เหลือเนื้อที่สำหรับเป็นบริเวณของพลาสมามากที่สุด) และ ต้องสามารถประกอบเข้าและถอดออกได้ง่าย โดยอาศัยการทำงานของมือข้างเดียว การเลือกเหล็กเส้นและตะแกรงสเตนเลสเบอร์ 304 แก้วไพเรซ และ เซรามิก เป็นวัสดุที่นำมาสร้างส่วนประกอบของระบบชีวไฟฟ้า ทำให้ส่วนประกอบดังกล่าวสามารถทนความร้อนจากการเผาผลาญความร้อนได้ และไม่เกิดสภาพเปื้อน (Contamination) กับระบบสูญญากาศ สำหรับแผงวงแหวนที่ทำหน้าที่ยึกลวความร้อน ซึ่งสร้างจากตะแกรงสเตนเลสทำให้สะดวกในการคัดเป็นวงกลม สิ้นเปลืองเนื้อที่น้อย และสามารถยึกลวความร้อนได้จำนวนและตำแหน่งตามต้องการ ส่วนฉนวนรูปถ้วย และฉนวนรูปประฆังที่ออกแบบ เพื่อให้ทำหน้าที่พยุงและยึดระบบชีวไฟฟ้าแก่ท่อหลวม ทำให้สามารถจำกัดเนื้อที่ของระบบชีวไฟฟ้าให้น้อยลงได้ และลดโอกาสการเกิดสภาพลัดวงจร (Short Circuit) ซึ่งอาจเกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดลอง