

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

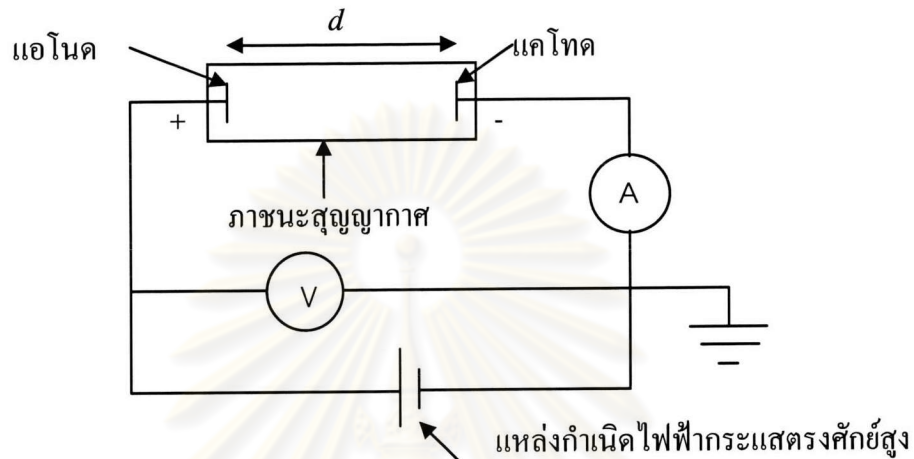
การศึกษาระบบพลาสมาที่เกิดจากการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรง จากภายนอก ไม่อาจสื่อถึงค่าพารามิเตอร์ของพลาสมาได้อย่างแม่นยำ เพราะไม่ได้เป็นการวัดพลาสมาโดยตรง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคนิคการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพลาสมาจากภายในระบบโดยตรง อาทิ เทคนิคหัววัดของลางมัวร์ [9] ซึ่งเป็นการวัดพารามิเตอร์ของพลาสมา โดยการใช้หัววัดที่มีการไบแอส (bias) ศักย์ไฟฟ้าจากภายนอก ใส่เข้าไปในระบบพลาสมา ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของพลาสมาแบบเฉพาะที่และมีความแม่นยำมากขึ้น และจากเทคนิควิธีนี้เอง ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของพลาสมาได้ อาทิเช่น ศักย์ของพลาสมา ความหนาแน่นของพลาสมา และอุณหภูมิของอิเล็กตรอน เป็นต้น อย่างไรก็ตามในระบบพลาสมาที่มีความซับซ้อนขึ้นเช่น ในระบบที่หาจุดอ้างอิงศักย์ไม่ได้ วิธีวัดด้วยหัววัดลางมัวร์แบบปกติซึ่งมีหัววัดเพียง 1 อัน หรือหัววัดลางมัวร์แบบหัววัดเดี่ยว (Langmuir single probe) นั้น ไม่สามารถให้ผลการวัดที่แม่นยำได้ จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคในการวัดขึ้นมา นั่นคือ การใช้หัววัดลางมัวร์แบบหัววัดคู่ (Langmuir double probe) ซึ่งอาศัยหลักการที่ใช้ศักย์ที่ได้จากหัววัดทั้ง 2 เปรียบเทียบกันเอง จึงไม่จำเป็นต้องหาจุดอ้างอิงอื่น เพราะใช้หัววัดใดหัววัดหนึ่งเป็นจุดอ้างอิงเปรียบเทียบกับศักย์ไฟฟ้าแทนได้ ซึ่งทั้งหัววัดลางมัวร์แบบหัววัดเดี่ยว และ แบบหัววัดคู่นั้นจะกล่าวถึงอย่างละเอียดอีกครั้ง ในตอนที่ 2.3.2 และ 2.3.4

ในการทดลองนี้ ผู้ทำการทดลองจะทำการออกแบบชุดอุปกรณ์หัววัดคู่แบบลางมัวร์ ที่สามารถสร้างขึ้นได้เองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ต้นทุนที่ต่ำ และยังคงความสามารถในการวัดระบบพลาสมาไว้ได้ในระดับที่น่าพอใจ เช่นเดียวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการชั้นนำ

ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของพลาสมานั้น เริ่มจากการวัดกระแสของพลาสมาและศักย์ที่จ่ายให้กับหัววัด เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟลักษณะส่อกระแส-ศักย์ (I-V characteristic curve) จะสามารถนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในระบบพลาสมาได้ ตามทฤษฎีและแนวทางการคำนวณซึ่งจะกล่าวต่อไป ในตอนที่ 2.3.3

## 2.1 ระบบดิสชาร์จเรืองแสงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

ระบบดิสชาร์จเรืองแสงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. glow discharge) โดยทั่วไปนั้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

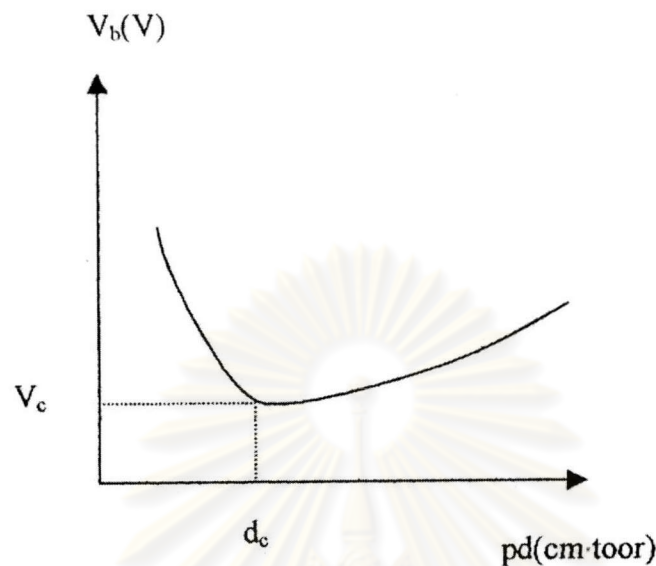


รูปที่ 2.1 ระบบพลาสมาดิสชาร์จเรืองแสงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

โดยระบบพลาสมาดิสชาร์จเรืองแสงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 2.1 นั้น อาศัยหลักการจ่ายไฟฟ้าศักย์สูงให้แก่ขั้วไฟฟ้า คือแอโนดและแคโทด ที่อยู่ห่างกันเป็นระยะ  $d$  ภายในภาชนะสุญญากาศ (vacuum chamber) ซึ่งมีก๊าซบรรจุอยู่ภายใน โดยชนิดของก๊าซที่บรรจุนั้น ขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้ก๊าซชนิดใดเกิดการดิสชาร์จเรืองแสงขึ้น โดยที่ความดันภายในภาชนะสุญญากาศนั้นจะต่ำกว่าความดันบรรยากาศ โดยปกตินิยมใช้ความดันประมาณ  $10^{-2}$  ถึง  $10^{-3}$  torr ในระบบพลาสมาดิสชาร์จเรืองแสงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีค่ามากพอ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความดันภายในและระยะห่างของขั้วไฟฟ้า จะทำให้อิออนภายในเกิดการแตกตัว และเริ่มเรืองแสงขึ้น และจะเรียกศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้ก๊าซเริ่มแตกตัวเรืองแสงออกมานั้นว่า ศักย์ไฟฟ้าแตกตัว (breakdown voltage) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ พาสเชน (Paschen) เป็นผู้สังเกตพบจากการทดลองว่า ศักย์ไฟฟ้าแตกตัว ( $V_b$ ) ของก๊าซใด ๆ นั้น จะเป็นฟังก์ชันของผลคูณระหว่างความดัน ( $p$ ) กับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ( $d$ ) ดังนี้

$$V_b = f(pd) \quad 2.1$$

โดยค่า  $V_b$  นอกจากจะขึ้นกับผลคูณของความดัน กับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแล้ว ยังขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซด้วย ส่วนความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1 นั้น แสดงได้โดย กราฟของพาสเชน (Paschen's curve) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 Paschen's curve [10]

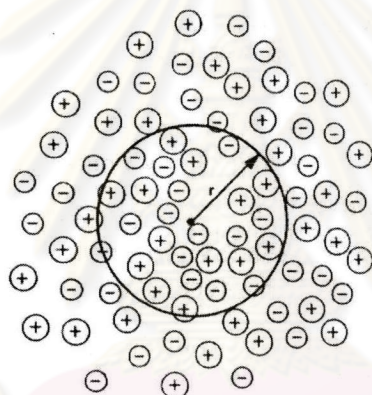
จากรูปที่ 2.2 นั้น จะเห็นว่าสำหรับก๊าซชนิดหนึ่ง ๆ นั้น จะมีเงื่อนไขหนึ่งระหว่างความดันและระยะห่างของขั้วไฟฟ้า นั่นคือตำแหน่ง  $d_c$  ดังรูปที่ 2.2 ที่สามารถจะทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเรืองแสงได้ที่ศักย์ต่ำสุด คือค่า  $V_c$  ดังรูปที่ 2.2 และหลังจากที่ก๊าซในสถานะสุญญากาศเกิดการแตกตัวแล้ว หากเพิ่มศักย์ของการดิสชาร์จต่อไปอีก ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าจะลดลงมาที่ศักย์ค่าหนึ่ง และมีแนวโน้มที่จะคงที่แต่กระแสมิแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเทียบกับศักย์ของการดิสชาร์จที่เพิ่มขึ้น ในช่วงนี้เองที่การเรืองแสงจะมีเสถียรภาพ ซึ่งมีชื่อเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงของการดิสชาร์จเรืองแสงแบบปกติ (normal glow discharge) ซึ่งเป็นรูปแบบของการดิสชาร์จที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ โดยจะแสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ก

## 2.2 ความหมายของพลาสมา

พลาสมา (plasma) จัดได้ว่าเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจากมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างไปจากสถานะอื่นอย่างชัดเจน [2] พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุ ทั้งประจุบวกและลบ ในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ การอยู่รวมกันของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง (quasineutral) ซึ่งหมายความว่าอิเล็กตรอนและไอออนในบริเวณนั้น โดยรวมแล้วมีจำนวนเท่า ๆ กัน ดังรูปที่ 2.3 และแสดงพฤติกรรมร่วม (collective behavior)

พฤติกรรมร่วมนี้นี้หมายถึง การเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมา ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในบริเวณนั้นๆ เท่านั้น แต่เป็นผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่ มากกว่าจะเป็นผลมาจากการชนกันของอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกัน [11,12] เนื่องจากอนุภาคในพลาสมาที่สถานะสมดุล จะมีการสั่นด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่ในการชนกันของอนุภาค 2 ตัวที่อยู่ใกล้กัน [13] ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าพฤติกรรมร่วมนี้นี้เป็นพฤติกรรมที่กลุ่มพลาสมาแสดงออกมาร่วมกัน

พลาสมาสามารถเกิดได้โดย การให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซที่เป็นกลาง เมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอม และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม [14,15] กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากซึ่งจะทำให้ก๊าซแตกตัวและกลายเป็นพลาสมาในที่สุด



รูปที่ 2.3 การอยู่ร่วมกันของไอออนและอิเล็กตรอนอย่างประหนึ่งเป็นกลางในพลาสมา [1]

พลาสมามีความแตกต่างจากสถานะของแข็ง สถานะของเหลว และสถานะก๊าซ โดยมีเงื่อนไข 3 ประการ ในเรื่องดังต่อไปนี้คือ ความยาวคลื่นเดอบาย จำนวนอนุภาค และความถี่พลาสมา ซึ่งทำให้พลาสมามีความจำเพาะเจาะจงที่แตกต่างจากสถานะอื่นออกไป [1,13] ดังรายละเอียดต่อไปนี้คือ

### 2.2.1 ความยาวคลื่นเดอบาย

เมื่อพลาสมาได้รับการรบกวนจากศักย์ภายนอก พลาสมาจะทำการต่อต้านการรบกวนนั้น โดยพลาสมาจะมารวมตัวกันรอบ ๆ สิ่งรบกวน ด้วยรัศมีที่มีค่าประมาณคือระยะความ

ยาวคลื่นเดอบาย (Debye Wavelength,  $\lambda_D$ ) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การกำบังของเดอบาย (Debye shielding) [16,17] (ภาคผนวก จ) จากปรากฏการณ์นี้เอง ทำให้ศักย์ภายในระยะเดอบาย ที่ล้อมรอบสิ่งรบกวนมีค่าเป็นศูนย์ จึงเสมือนว่าไม่มีการรบกวนเกิดขึ้นกับพลาสมาที่อยู่นอกระยะเดอบายออกไปมาก ๆ ดังนั้นเงื่อนไขแรกที่ต้องพิจารณาก็คือ ต้องให้ขนาดของพลาสมาใหญ่กว่าระยะเดอบายมาก ๆ เพื่อให้การรบกวนใดๆที่อาจจะเกิดขึ้น เช่นจากการใส่หัววัดเข้าไปในพลาสมา จะไม่เป็นการรบกวนระบบพลาสมาโดยรวมที่ต้องการศึกษา ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$L \gg \lambda_D \quad 2.2$$

โดย  $L$  = ขนาดของพลาสมา,  $\lambda_D$  = ระยะความยาวคลื่นเดอบาย

### 2.2.2 จำนวนอนุภาคประจุภายในทรงกลมเดอบาย

เงื่อนไขที่สองคือ จำนวนอนุภาคประจุ หรือความหนาแน่นของประจุภายในทรงกลมเดอบาย ( $N_D$ ) ต้องมีค่าสูง

$$N_D \gg 1 \quad 2.3$$

กล่าวคือพลาสมามีความหนาแน่นเพียงพอที่จะทำให้  $L \gg \lambda_D$  เป็นจริงตามเงื่อนไขข้อแรก [16] เมื่อพิจารณาตามสมการ

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT_e \epsilon_0}{N_0 e^2}}, \text{ (ภาคผนวก จ)} \quad 2.4$$

เมื่อ  $k$  เป็นค่าคงที่ของโบลซ์มานน์ (Boltzmann)

$\epsilon_0$  เป็นสภาพยอมสุญญากาศ มีค่า  $8.8542 \times 10^{-12}$  F/m

$T_e$  เป็นอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา

$e$  เป็นค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

### 2.2.3 ความถี่พลาสมา

เงื่อนไขสุดท้ายของการเป็นพลาสมา คือความถี่การสั่นของพลาสมา (plasma frequency) ต้องมีค่ามากเมื่อเทียบกับความถี่ของแหล่งรบกวน ( $\omega$ )

$$\omega_p > \omega \quad 2.5$$

$$\omega_p \tau > 1 \quad 2.6$$

โดยที่  $\omega_p$  คือความถี่พลาสมา และ  $\tau$  คือเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกันของอนุภาค ประจวบกับอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า [16,17]

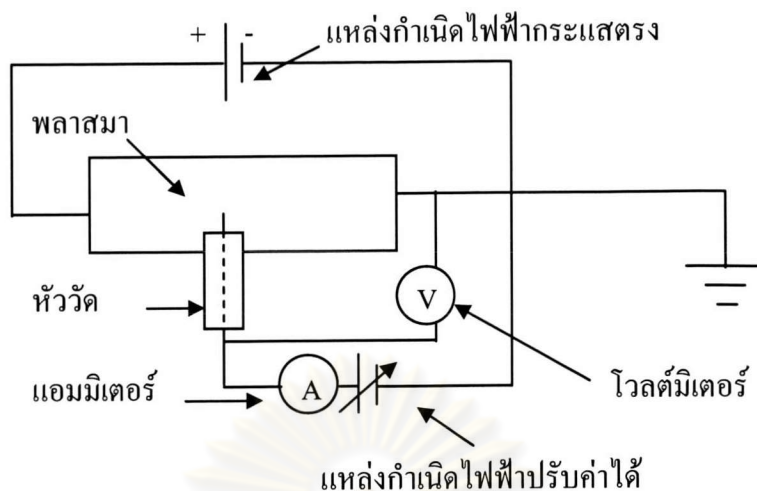
$$\omega_p > \frac{1}{\tau} \quad 2.7$$

นั่นคือ หากพลาสมาได้รับการรบกวนด้วยความถี่ค่าหนึ่งจากแหล่งรบกวนใด ๆ แล้วพลาสมาจะคงความเป็นพลาสมาอยู่ได้ก็ต่อเมื่อความถี่ของพลาสมามีค่ามากกว่าความถี่ของแหล่งรบกวนนั้น ๆ

### 2.3 หัววัดทางไฟฟ้าแบบลางมัวร์

วิธีการวิเคราะห์พลาสมาโดยใช้หัววัดทางไฟฟ้านั้น ได้มีการพัฒนาโดยลางมัวร์ (Langmuir) เป็นคนแรก ในปี ค.ศ. 1923 [18] ซึ่งภายหลังนิยมเรียกหัววัดแบบนี้ว่า หัววัดแบบลางมัวร์ (Langmuir probe) ข้อดีของวิธีนี้คือ ประกอบด้วยชุดเครื่องมือที่ไม่ยุ่งยาก และ ผลที่วัดได้ยังเป็นผลของการวัดค่าพารามิเตอร์ของพลาสมาแบบเฉพาะที่อีกด้วย เทคนิคที่ว่านี้ถือได้ว่าเป็นเทคนิคแรกและเป็นเทคนิคพื้นฐานอันหนึ่งในการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพลาสมา เช่น อุณหภูมิ อิเล็กตรอน ความหนาแน่นของพลาสมา และ ศักย์พลาสมา เป็นต้น

โดยพื้นฐานแล้ว หัววัดทางไฟฟ้าเป็นเพียงขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะขนาดเล็กที่นำไฟฟ้าได้ดีซึ่งสอดเข้าไปในพลาสมา ในขณะที่อีกด้านของหัววัดนั้นจะต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถจ่ายศักย์ต่าง ๆ ให้แก่หัววัดนั้น ๆ ได้ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภาพการวัดพลาสมาโดยใช้หัววัดกลางมีร์แบบหัววัดเดี่ยว

รูปที่ 2.4 นี้เป็นแผนผังวงจรสำหรับหัววัดกลางมีร์แบบหัวเดี่ยว ภายหลังจากที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงทำให้พลาสมาดีสชาร์จเกิดขึ้น ในสถานะที่มีหัววัดใส่อยู่ภายใน เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าบวก และลบต่างกันเทียบกับพลาสมา จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าปรับค่าได้แก่หัววัด โดยใช้แอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์เป็นอุปกรณ์บันทึกค่าของกระแสและศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปของหัววัดควบคู่กันไป ซึ่งจะทำให้ทราบถึงข้อมูลเกี่ยวกับพลาสมาขณะนั้น ๆ และสำหรับพลาสมาพลังงานต่ำ จะสามารถประมาณว่าการแจกแจงความเร็วของอนุภาคเป็นแบบแมกซ์เวล [19] จะทำให้สามารถวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของพลาสมา เช่น อุณหภูมิของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนได้จากกราฟลักษณะส่อกระแส-ศักย์ ของพลาสมาที่ได้จากหัววัดได้

### 2.3.1 ข้อพิจารณาในการสร้างหัววัดแบบกลางมีร์

ในการสร้างหัววัดมีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาอยู่บางประการคือ หัววัดนั้นจะต้องไม่รบกวนสนามโดยรวมในพลาสมา ด้วยเหตุนี้เองที่นำไปสู่เงื่อนไขว่า รัศมีของหัววัด ( $r$ ) ควรจะมีขนาดโตกว่าระยะเดอบาย  $\left(\frac{\lambda_D}{r} < 1\right)$  เพราะหากหัววัดมีขนาดเล็กกว่าระยะก้ำบังของพลาสมา ซึ่งมีขนาดประมาณระยะเดอบาย หัววัดจะสามารถเข้าไปรบกวนพลาสมาได้ โดยที่ระยะเดอบายจากสมการที่ 2.4 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้ [20]

$$\lambda_D = 69 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} \quad 2.8$$

เมื่อ  $T_e$  เป็นอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา มีหน่วย K

$n_e$  เป็นความหนาแน่นของอิเล็กตรอน มีหน่วย  $m^{-3}$

ตัวอย่างเช่น สำหรับพลาสมาที่มีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนประมาณ 1 ถึง 5 eV และมีความหนาแน่นอยู่ในระดับ  $10^{15} m^{-3}$  ระยะโคบายประมาณได้ว่าอยู่ในระดับของ 0.1 mm [21] ซึ่งในการทดลองนี้พบว่า ระยะโคบายมีค่าประมาณ 0.8 ถึง 1 mm

โดยปกติแล้ว เมื่อมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นในพลาสมา พลาสมาจะต่อต้านการรบกวนนั้นโดยการสร้างชีท (sheath) รอบ ๆ สิ่งรบกวนนั้น ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อการกำบังของโคบาย (ภาคผนวก จ) ในการทดลองนี้ เพื่อความสะดวกในการคำนวณ และลดการรบกวนที่จะเกิดขึ้นแก่พลาสมา จึงได้สร้างหัววัดที่มีขนาดไม่เล็กกว่าระยะโคบาย ทำให้สามารถประมาณขนาดของชีทที่เกิดขึ้น ว่ามีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของหัววัด ดังนั้นจึงประมาณพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีการสัมผัสกับพลาสมา (effective area) ได้เท่ากับพื้นที่ผิวของหัววัด

เงื่อนไขที่ต้องพิจารณาคือ ไม่ควรมีการชนเกิดขึ้นรอบ ๆ หัววัด และเพื่อหลีกเลี่ยงการสะสมของประจุที่หัววัด ดังนั้น ระยะห่างอิสระเฉลี่ย (mean free path) ของอนุภาคในพลาสมาต้องใหญ่กว่ารัศมีของหัววัด จากรายงานของ J.D.Swift และ M.J.R.Schwar [22] ระยะห่างอิสระเฉลี่ยของไอออนมีค่าประมาณ 0.1 ถึง 0.2 mm แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ขนาดของหัววัดอาจจะมีขนาดใหญ่กว่าระยะห่างอิสระเฉลี่ยของไอออน ดังที่ปรากฏในงานของ [6,14,23] เพราะนอกจากการสร้างหัววัดขนาดเล็กจะทำได้ยาก สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกประการคือ ประสิทธิภาพในการวัด กระแสนั้นยังขึ้นอยู่กับขนาดของหัววัดด้วย สำหรับระยะห่างอิสระเฉลี่ย สำหรับการทดลองครั้งนี้มีค่าประมาณ 1 cm ซึ่งสัมพันธ์กับช่วงความดันที่ใช้คือ ประมาณ 0.1 torr [24]

หัววัดทางไฟฟ้าสามารถสร้างขึ้นให้มีรูปร่างต่าง ๆ กัน ได้เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก หรือแม้แต่เป็นแผ่นระนาบ [19] แต่รูปทรงของหัววัดที่เป็นที่นิยมคือ หัววัดทรงกระบอก เนื่องจากสามารถสร้างได้ง่ายกว่านั่นเอง [25] โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่นิยมนำมาสร้างหัววัดพลาสมานั้น ควรจะมีความทนทานสูง ทั้งจากความร้อนและจากการชนเนื่องจากอิเล็กตรอน ดังแสดงตัวอย่างสมบัติวัสดุที่ใช้ทำหัววัด ไว้ในตารางที่ 2.1



Material	Atomic weight (g)	Work function (V)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Melting point (°C)	Sputtering rate (g/cm <sup>3</sup> h)
Al	27	4.20	2.699	660.1	1.07
Fe	55.9	4.63	7.87	1535	2.31
Ni	58.7	4.91	8.9	1453	2.4
Mo	96.0	4.24	10.21	2610	3.9
Ta	181.0	4.13	16.6	2996	7.4
W	183.9	4.53	19.4	3395	7.7
Pt	195.2	5.36	21.45	1769	15.8

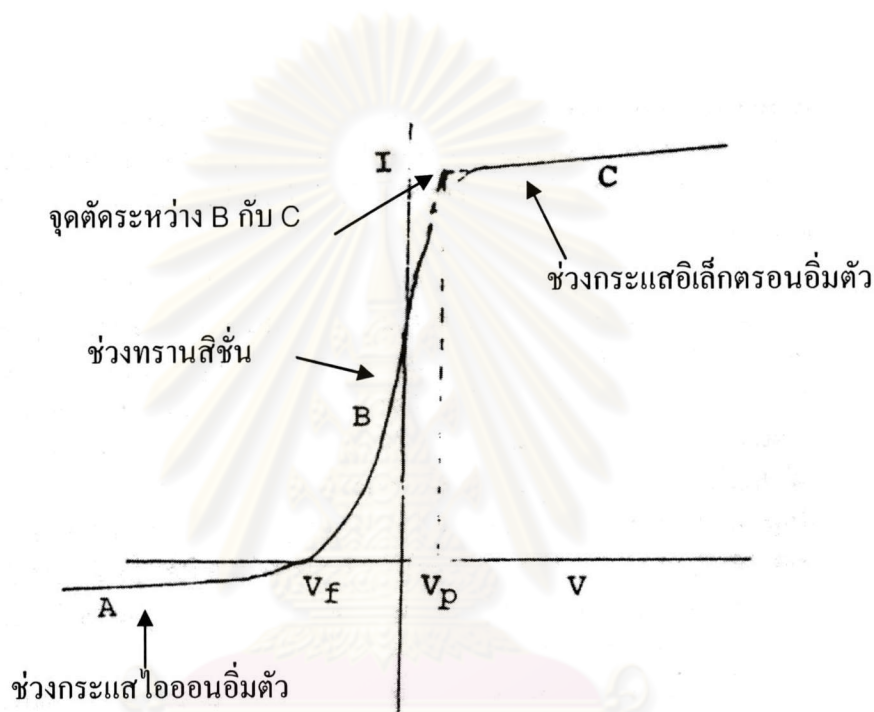
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสมบัติของธาตุต่างๆ [14]

วัสดุที่มีความเหมาะสมมากในการทำหัววัดก็คือ โมลิบดีนัม เพราะมีอัตราการสปัตเตอร์ (sputtering rate) ต่ำ และมีจุดหลอมเหลว (melting point) สูง จึงทนต่อการสึกหรอทั้งจากการชนของอนุภาคในพลาสมาและจากความร้อนขณะที่มีพลาสมาเกิดขึ้นได้ดี วัสดุถัดมาที่เป็นที่นิยมคือทังสเตน เพราะมีจุดหลอมเหลวสูงมาก

นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความไวในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุด้วย เช่น เหล็กมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง มีอัตราการฉาบด้วยโลหะต่ำ แต่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานผิวกับ โมลิบดีนัมและทังสเตน แต่อย่างไรก็ตามวัสดุทั้งสองมีราคาสูง ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานในการทดลองครั้งนี้ เราเลือกวัสดุที่หาได้ง่าย มีต้นทุนการผลิตต่ำ และมีความทนทานดังที่กล่าวมาแล้วด้วย ในการทดลองนี้เราเลือกใช้ลวดความร้อนที่ทำจากโลหะผสมนิกเกิล ซึ่งมีสมบัติในการทนต่อการสึกหรอ และมีจุดหลอมเหลวสูง คือประมาณ 1400°C แทน เพราะราคาต่ำกว่าลวดโมลิบดีนัมมาก คือมีราคาต่างกันประมาณ 100 เท่า

### 2.3.2 หัววัดลงมัวร์แบบหัววัดเดี่ยว

จากแผนภาพการวัดพลาสมาด้วยหัววัดลงมัวร์แบบหัววัดเดี่ยวดังรูปที่ 2.4 เมื่อเราทำการไบแอสศักย์ให้แก่หัววัด แล้วบันทึกค่ากระแสและศักย์ที่ได้เป็นคู่ ๆ ตามค่าศักย์ไบแอสที่เปลี่ยนไป ชุดข้อมูลของคู่กระแสและศักย์เหล่านี้ เมื่อนำมาเขียนรวมกัน จะได้กราฟที่มีชื่อเรียกว่า กราฟลักษณะส่อกระแส-ศักย์ ของหัววัดลงมัวร์แบบหัววัดเดี่ยว [16] ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะสัญญาณพลาสมาที่ได้จากหัววัดเดี่ยว [19]

เมื่อมีการให้ความต่างศักย์แก่หัววัดเป็นค่าลบมาก ๆ เทียบกับจุดอ้างอิงใด ๆ ซึ่งโดยทั่วไปมักจะเป็นผนังที่เป็นโลหะของภาชนะสุญญากาศที่จะทำให้เกิดการดิสชาร์จ สนามไฟฟ้ารอบ ๆ หัววัดจะดึงดูดอนุภาคบวกเข้ามาที่หัววัด แต่สำหรับกรณีของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะถูกผลักให้ออกห่างจากหัววัดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการลดลงของกระแสอิเล็กตรอนเข้าสู่ศูนย์กลางอย่างรวดเร็ว ดังนั้นกระแสที่ได้จากหัววัดในตอนนี้จึงเป็นผลเนื่องจากไอออนบวกเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงเรียกระแสบริเวณนี้ว่ากระแสไอออนอิ่มตัว (ion-saturation current) ดังแสดงไว้ที่จุด A ในรูปที่ 2.5 และเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เป็นบวกมากขึ้นหรือให้เป็นลบน้อยลง จำนวนอิเล็กตรอนที่สามารถเอาชนะแรงผลักทางไฟฟ้าและไปถึงหัววัดได้มีมากขึ้น ก่อให้เกิดกระแสอิเล็กตรอนที่

หัววัดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งกระแสอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นนี้จะไปลดกระแสจากค่ากระแสไอออนอิมิต์วที่มีอยู่เดิม และเมื่อศักย์ไฟฟ้ายังคงมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง กระแสอิเล็กตรอนจะสะสมมากขึ้นจนกระทั่งเท่ากับกระแสไอออนที่จุด  $V_f$  ซึ่งมีชื่อเรียกว่าศักย์ลอย (floating potential,  $V_f$ ) โดยศักย์ของขั้วไฟฟ้าใด ๆ ที่โดดเดี่ยวในพลาสมาจะมีค่าเท่ากับค่าศักย์ลอยนี้ [19] โดยที่  $V_f$  มีค่าเป็นลบเทียบกับศักย์ของพลาสมา (plasma potential,  $V_p$ ) ที่อยู่รอบ ๆ หัววัด เนื่องจากความเร็วอันเนื่องมาจากอุณหภูมิของอิเล็กตรอน (electron thermal velocity) มีค่ามากกว่าของไอออนมาก จึงส่งผลให้ตำแหน่งที่อิเล็กตรอนสมดุลกับไอออน ต้องเป็นตำแหน่งที่ไอออนเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นในขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ช้าลง นั่นคือช่วงที่ศักย์มีค่าเป็นลบ หากการแจกแจงของอิเล็กตรอนนี้เป็นแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwell distribution) ซึ่งเกิดขึ้นกับพลาสมาพลังงานต่ำ [7] กระแสอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างเอกซ์โพเนนเชียลตามการไบแอส ที่เพิ่มขึ้นของหัววัด ดังจะเห็นได้ที่ช่วงทรานสิชัน บริเวณ B ในรูปที่ 2.5 จนในที่สุดศักย์ของหัววัดจะมีค่าเท่ากับศักย์ของพลาสมาที่ตำแหน่ง  $V_p$  นั้น ทำให้ที่ตำแหน่งนี้ไม่มีสนามไฟฟ้าอยู่รอบ ๆ หัววัด ดังนั้นอิเล็กตรอนและไอออนทั้งหมดที่ตำแหน่งนี้ จึงเคลื่อนที่ไปยังหัววัดด้วยความเร็วอันเนื่องมาจากอุณหภูมิของตัวเอง และกระแสส่วนใหญ่ที่ได้จากหัววัดที่จุดนี้ก็คือกระแสอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่มีค่ามากกว่าไอออนนั่นเอง จึงเรียกระแสในบริเวณนี้ว่า กระแสอิเล็กตรอนอิมิต์ว (electron-saturation current) และหากมีการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อไป กระแสอิเล็กตรอนนี้จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ดังแสดงไว้ที่จุด C ในรูปที่ 2.5 และหากหัววัดที่ใช้ใช้นั้นไม่ได้รบกวนระบบพลาสมาจนเกินไป จึงพอที่จะคาดได้ว่าข้อมูลเฉพาะตัวที่ได้จากหัววัดนั้น จะมีความเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพลาสมาด้วย อาทิ ความหนาแน่นของพลาสมา ( $n$ ) อุณหภูมิของอิเล็กตรอน ( $T_e$ ) และศักย์ของพลาสมา ที่บริเวณนั้น ๆ

บริเวณส่วน B ในรูปที่ 2.5 นั้น เรียกว่าเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลง (transition) ซึ่งเป็นช่วงที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงไปสู่ช่วงกระแสอิเล็กตรอนอิมิต์ว โดยที่ความเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้ของอิเล็กตรอน สามารถนำมาหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในตอน 2.3.3.1 และจากอุณหภูมิของอิเล็กตรอน จะสามารถนำมาหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนได้ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในตอน 2.3.3.2 ส่วนค่าอุณหภูมิของไอออน ( $T_i$ ) นั้น ไม่สามารถหาได้โดยตรงจากหัววัด โดยค่าที่สามารถหาได้โดยตรงจากกราฟลักษณะส่อกระแส-ศักย์ ในรูปที่ 2.5 คือ  $V_f$  และ  $V_p$  ดังที่ปรากฏในรูปที่ 2.5

โดยการวิเคราะห์กราฟลักษณะส่อกระแส-ศักย์ ดังในรูปที่ 2.5 นั้น Hoong [21] สามารถหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาฮีเลียมได้ในช่วง 1.7 ถึง 2.0 eV และความหนาแน่นของ อิเล็กตรอนอยู่ในช่วง  $3.56 \times 10^9$  ถึง  $4.67 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$

### 2.3.3 การวิเคราะห์พลาสมาด้วยหัววัดลงมัวร์แบบหัววัดเดี่ยว

ในระบบแก๊สดิสชาร์จส่วนใหญ่ ขั้วไฟฟ้าจะมีการสัมผัสกับพลาสมาโดยตรง ซึ่งสามารถใช้เป็นจุดอ้างอิงในการพิจารณาความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้ากับหัววัดได้ ขั้วไฟฟ้างกล่าวสามารถใช้ขั้วเอโนด ขั้วแคโทดของการดิสชาร์จ หรือผนังโลหะของอุปกรณ์ เป็นจุดอ้างอิงได้ ในกรณีเช่นนี้ การวัดสมบัติต่าง ๆ ของพลาสมาจะนิยมใช้หัววัดชนิดเดียว

#### 2.3.3.1 อุณหภูมิของอิเล็กตรอน

พิจารณาว่ากระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่แบบสุ่มในพลาสมาของไอออนบวกและอิเล็กตรอน [16] คือ

$$I_{i0} = e j_{ri} A = \frac{en_i \bar{v}_i A}{4} \quad 2.9$$

$$I_{e0} = e j_{re} A = \frac{en_e \bar{v}_e A}{4} \quad 2.10$$

โดยที่  $j_{ri}$  และ  $j_{re}$  คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแบบสุ่มสำหรับไอออนบวก

และอิเล็กตรอนตามลำดับ

$A$  คือพื้นที่ผิวของหัววัดที่สัมผัสกับพลาสมา

$m_i$  และ  $m_e$  คือมวลของไอออนบวกและอิเล็กตรอนตามลำดับ

$T_i$  และ  $T_e$  คืออุณหภูมิของไอออนบวกและอิเล็กตรอนตามลำดับ

$\bar{v}_i$  และ  $\bar{v}_e$  คือความเร็วเฉลี่ยของไอออนบวกและอิเล็กตรอนตามลำดับ โดยที่

$$\bar{v}_i = \sqrt{\frac{8kT_i}{\pi m_i}} \quad 2.11$$

$$\bar{v}_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \quad 2.12$$

จากสมมติฐานเบื้องต้น ที่ว่าอิเล็กตรอนมีการแจกแจงพลังงานแบบแมกซ์เวลล์ ดังนั้น กระแสอิเล็กตรอน ( $I_e$ ) ที่หัววัด ในกรณีที่หัววัดมีศักย์ไฟฟ้า  $V$  คือ

$$I_e = \left( \frac{en_e \bar{v}_e A}{4} \right) e^{\left[ \frac{e(V_p - V)}{kT_e} \right]} \quad 2.13$$

ในกรณีที่ศักย์ไฟฟ้าของหัววัด ( $V$ ) มีค่าน้อยกว่าศักย์ไฟฟ้าของพลาสมา ( $V_p$ ) นั่นคือ อิเล็กตรอนจะถูกกั้นไม่ให้เข้าไปใกล้หัววัด ดังนั้นกระแสอิ่มตัวสำหรับกรณี ( $V < V_p$ ) นี้ จึงเป็นกระแสไอออน ( $I_i$ ) ซึ่งมีค่าเป็นเพียง

$$I_i = \frac{en_i \bar{v}_i A}{4} \quad 2.14$$

แต่ในความจริงแล้วยังมีกระแสอิเล็กตรอนบางส่วนไปถึงหัววัดอยู่ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไปถึงหัววัดจึงเป็นกระแสรวมระหว่างกระแสไอออนและอิเล็กตรอน

$$I = \frac{en_i \bar{v}_i A}{4} - \left( \frac{en_e \bar{v}_e A}{4} \right) e^{\left[ \frac{e(V_p - V)}{kT_e} \right]} \quad 2.15$$

และในทำนองเดียวกัน สำหรับกรณีที่  $V > V_p$  เราจะได้กระแสไฟฟ้าที่หัววัดเป็น

$$I = \left( \frac{en_i \bar{v}_i A}{4} \right) e^{\left[ \frac{e(V - V_p)}{kT_i} \right]} - \frac{en_e \bar{v}_e A}{4} \quad 2.16$$

การวิเคราะห์หา  $T_e$  นั้น จะสามารถหาได้จากความชันของกราฟ  $\ln I_e$  กับ  $V$  ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลง (transition region) จากสมการ 2.13 เมื่อกระทำลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการ 2.13 และหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $\ln I_e$  กับ  $V$  โดยที่  $\frac{en_e \bar{v}_e A}{4}$  เป็นค่าคงที่ จะได้ว่า

$$\frac{kT_e}{e} = \frac{\Delta V}{\Delta \ln I_e} \quad 2.17$$

ซึ่งจากสมการนี้ เราสามารถหา  $T_e$  ออกมาได้

### 2.3.3.2 ความหนาแน่นของพลาสมา

ความหนาแน่นของพลาสมานั้น สามารถหาได้โดยตรงจากการที่พลาสมามีสมบัติประหนึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือ  $n_i \approx n_e$  ซึ่งหมายความว่า สนามไฟฟ้าภายในมีค่าน้อยมาก ประมาณว่าเข้าใกล้ศูนย์ได้

$$n_i = n_e = \frac{I_{e0}}{eA} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{kT_e}} \quad 2.18$$

หรืออาศัยการประมาณของ Yaun [25] ซึ่งจะได้ว่า

$$n_i = \frac{4I_{i0}}{eA} \sqrt{\frac{m_i}{kT_e}} \quad 2.19$$

และจากสมการนี้เอง เมื่อเราทราบ  $T_e$  แล้ว เราจะสามารถหาความหนาแน่นของพลาสมาได้เป็นลำดับต่อมา โดยที่หน่วยของ  $I_{e0}$ ,  $n_e$ ,  $A$  และ  $kT_e$  คือ A,  $m^3$ ,  $mm^2$  และ eV ตามลำดับ โดยที่  $I_{e0}$  และ  $I_{i0}$  คือค่ากระแสอิเล็กตรอนอิมิต์ และกระแสไอออนอิมิต์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟระหว่าง  $I - V$  ที่ได้จากหัววัด ในบริเวณที่  $V > V_p$

### 2.3.3.3 ศักย์พลาสมา

ค่าศักย์ของพลาสมา ( $V_p$ ) เป็นค่าที่ศักย์ไฟฟ้าของหัววัดมีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าของพลาสมา ทั้งไอออนบวกและอิเล็กตรอนไม่ถูกดึงดูดหรือผลัดออกจากหัววัด แต่ยังคงมีไอออนและอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังหัววัด เนื่องจากการเคลื่อนที่แบบสุ่ม ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่หัววัดวัดได้ จะเป็นกระแสอิเล็กตรอนเป็นส่วนใหญ่ เพราะอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนมาก

ค่าศักย์พลาสมาสามารถหาได้โดยตรงจากกราฟลักษณะส่อกระแส-ศักย์ ที่ได้จากหัววัด ดังที่ได้อธิบายไว้ในรูปที่ 2.5

### 2.3.3.4 ศักย์ลอย

ศักย์ลอย ( $V_f$ ) คือค่าของศักย์ไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีการไหลเข้าสู่หัววัด และเนื่องจากกระแสไอออนมีขนาดเท่ากับกระแสอิเล็กตรอน จึงส่งผลให้กระแสรวมที่หัววัดมีค่าเป็นศูนย์ ค่าของศักย์ลอยนี้ สามารถหาได้โดยตรงจากกราฟส่อกระแส-ศักย์ที่ได้จากหัววัด ดังที่ได้อธิบายไว้ในรูปที่ 2.5 เช่นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาว่าความเร็วเนื่องจากความอุณหภูมิของอิเล็กตรอน มีค่ามากกว่าของไอออนมาก ๆ ดังนั้นศักย์ลอยจึงมีค่าเป็นลบเมื่อเทียบกับศักย์ของพลาสมา ทำให้กระแสที่สะสมที่หัววัด ที่ตำแหน่งศักย์ลอยนี้ก็คือ กระแสไอออนอิมิต์  $I_{is}$  โดยที่ Yuan [25] ทำการประมาณค่ากระแสไอออนอิมิต์ ไว้ดังนี้

$$I_i(V_f) = \frac{1}{4} n_0 e A \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}} \quad 2.20$$

เมื่อพิจารณาจากสมการ 2.13 กระแสอิเล็กตรอนซึ่งสะสมที่หัววัดขณะนี้จะมีความเป็น

$$I_e(V_f) = n_0 e A \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} e^{\left[ \frac{-e(V_p - V_f)}{kT_e} \right]} \quad 2.21$$

เนื่องจาก  $I_i(V_f) = I_e(V_f)$  ที่จุด  $V_f$  ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$e(V_f - V_p) = \frac{kT_e}{2} \ln\left(\frac{\pi m_e}{8m_i}\right) \quad 2.22$$

และ

$$V_f - V_p = \frac{kT_e}{2e} \ln\left(\frac{\pi m_e}{8m_i}\right) \quad 2.23$$

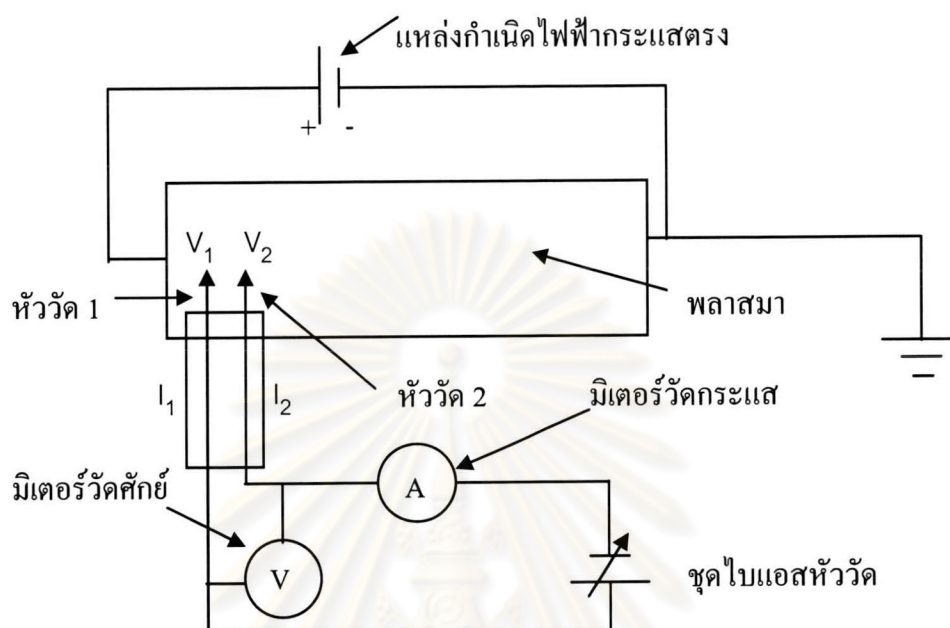
และจากสมการ 2.23 เมื่อทราบค่าของ  $V_f$  และ  $V_p$  ก็จะสามารถหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้ สมการที่ 2.23 แสดงให้เห็นว่า หากอุณหภูมิอิเล็กตรอนคงที่แล้วความแตกต่างระหว่าง  $V_f$  และ  $V_p$  ก็จะคงที่ด้วย

ดังนั้น เราจึงสามารถหา  $T_e$  ได้สองวิธี นั่นคือ คือนอกจากวิธีข้างต้นดังสมการที่ 2.17 แล้ว ยังสามารถใช้วิธีตามสมการที่ 2.23 ได้อีกด้วย

### 2.3.4 หัววัดลงมัวร์แบบหัววัดคู่

ในพลาสมาบางระบบจะไม่มีจุดอ้างอิงศักย์ที่ชัดเจน เช่นในระบบของการดิสชาร์จด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency discharge; RF discharge) [26] หรือพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) นั้น ไม่สามารถหาจุดอ้างอิงศักย์ได้อย่างกรณี 2.3.2 หรือในการดิสชาร์จบางกรณี ศักย์ของพลาสมาอาจจะมีค่าสูงเกินไป หรือมีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา กรณีเช่นนี้ก็เป็นการยากที่จะใช้วิธีหัววัดแบบเดี่ยววัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในพลาสมาออกมา ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคนิคการวัดแบบใหม่ขึ้นมา เรียกว่า หัววัดลงมัวร์แบบคู่ ซึ่งสามารถใช้งานกับระบบพลาสมาดังกล่าว

ได้ดีกว่าหัววัดลางมัวร์แบบเดี่ยว [25] โดยลักษณะทั่วไปของระบบการวัดพลาสมาด้วยหัววัดลางมัวร์แบบคู่ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพการวัดพลาสมาโดยใช้หัววัดลางมัวร์แบบหัววัดคู่

ในระบบหัววัดคู่นั้นจะมีการไบแอสศักย์ไฟฟ้าให้แก่หัววัดทั้ง 2 แต่จะแยกระบบหัววัดนี้ออกจากกราวด์ [23,27,28] นั่นคือระบบทั้งหมดจะอยู่กับพลาสมาในสภาพลอย (float) จากกราวด์ ซึ่งเป็นจุดที่แตกต่างกับกรณีของหัววัดเดี่ยวอย่างชัดเจน ดังนั้นสัญญาณที่หัววัดจึงมีการเปลี่ยนแปลงตามศักย์ของพลาสมาที่เปลี่ยนไป [19] โดยเมื่อทำการไบแอสศักย์จากชุดไบแอสหัววัดซึ่งสามารถไบแอสศักย์หลาย ๆ ค่า ให้แก่หัววัดทั้ง 2 ได้ จากนั้นจึงทำการบันทึกค่าของกระแสและศักย์ที่ได้เป็นคู่ ๆ ตามศักย์ไบแอสที่เปลี่ยนไป โดยใช้มิเตอร์สำหรับวัดกระแสและศักย์ตามลำดับ จากนั้นเมื่อนำชุดข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้ มาเขียนกราฟ จะได้กราฟที่มีลักษณะเฉพาะตัวขึ้นมา เรียกว่ากราฟลักษณะต่อกระแส-ศักย์ ของหัววัดลางมัวร์แบบหัววัดคู่ ดังรูปที่ 2.7 โดยเราสามารถหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา ผ่านทางกราฟต่อกระแส-ศักย์ของหัววัดลางมัวร์แบบหัววัดคู่นี้ได้



### 2.3.5 การวิเคราะห์พลาสมาด้วยหัววัดลงมัวร์แบบหัววัดคู่

ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมา โดยวิธีการใช้หัววัดลงมัวร์แบบหัววัดคู่ นั้น ปริมาณที่สามารถวิเคราะห์ห่อออกมาจากกราฟลักษณะสอกระแส-ศักย์ได้ คืออุณหภูมิของอิเล็กตรอน ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

#### 2.3.5.1 อุณหภูมิของอิเล็กตรอน

เมื่อพิจารณาให้หัววัด 1 และ 2 มีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับพลาสมาภายในบริเวณของหัววัดเป็น  $A_1$  และ  $A_2$  ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีศักย์ไฟฟ้า  $V$  ที่หัววัด 1 และ 2 เป็น  $V_1$  และ  $V_2$  ตามลำดับ ในขณะที่ระบบทั้งหมดไม่ได้มีการต่อกับขั้วไฟฟ้าใด ๆ เลย เพื่อความชัดเจน เราสมมติให้  $V_1$  เป็นบวกเมื่อเทียบกับ  $V_2$  ดังนั้น

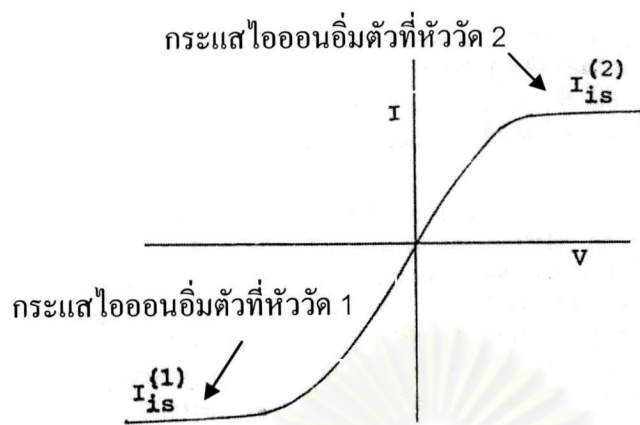
$$V = V_1 - V_2 > 0 \quad 2.24$$

$$I = -I_1 = I_2 > 0 \quad 2.25$$

โดยที่  $I_1$  และ  $I_2$  เป็นกระแสที่ได้จากหัววัด 1 และ 2 ตามลำดับ

$V_1$  และ  $V_2$  เป็นศักย์ที่หัววัด 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับศักย์ของพลาสมา  $V_p$

เนื่องจากความเร็วของอิเล็กตรอนมีค่ามากกว่าความเร็วของไอออนมาก ด้วยเหตุนี้ โดยทั่วไปแล้วหัววัดทั้งสองจึงมีค่าเป็นลบเมื่อเทียบกับบริเวณที่อยู่นอกเขตของพลาสมา เว้นเสียแต่หัววัดใดหัววัดหนึ่งจะมีขนาดใหญ่กว่าอีกหัววัดมาก ๆ ซึ่งจะทำให้กระแสไอออนที่มาสะสมที่หัววัดที่ใหญ่กว่านั้น สามารถหักล้างกับกระแสอิเล็กตรอนอ้อมตัวที่สะสมอยู่ที่หัววัดที่มีขนาดเล็กได้



รูปที่ 2.7 ลักษณะสัญญาณของกระแส-ศักย์ที่ได้จากหัววัดลงมัวร์แบบคู่ [19]

รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของสัญญาณที่ได้จากหัววัดแบบคู่ ซึ่งจะแตกต่างจากสัญญาณที่ได้จากหัววัดแบบเดี่ยวดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 สัญญาณที่ได้ดังรูปที่ 2.7 นั้น เป็นตัวอย่างสัญญาณที่ได้เมื่อ  $A_1 > A_2$  และหากว่าพื้นที่ผิวของหัววัดทั้ง 2 เท่ากัน กราฟที่ได้ก็จะมีคุณสมบัติ

ที่  $I = 0$  จะไม่มีกระแสไหลเข้าสู่หัววัด ศักย์บริเวณนี้จะมีค่าเท่ากับศักย์ลอย ดังที่ได้นิยามไว้ในตอนที่ 2.3.3.4 ซึ่งบอกว่าจะไม่มีกระแสไหลไปสู่หัววัด ถ้า  $V$  มีค่าเป็นบวกแม้เพียงเล็กน้อย  $V_1$  จะมีความเป็นลบน้อยลง ในขณะที่  $V_2$  จะมีความเป็นลบมากขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจะไหลสู่หัววัด 1 มากขึ้น แต่จะไหลสู่หัววัด 2 น้อยลง สิ่งนี้ทำให้เกิดกระแสบวกไหลจากหัววัด 2 ไปสู่หัววัด 1 สำหรับกรณีที่มีความต่างศักย์  $V$  มีค่าเป็นบวกมาก ๆ หัววัด 2 จะมีความเป็นลบมาก ๆ ด้วยเช่นกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดกระแสไอออนอิมิต์ ( $I_{is}$ ) ขึ้นในบริเวณนี้ หัววัด 1 มีความเป็นลบน้อยกว่า จึงสะสมอิเล็กตรอนมากกว่าไอออนเพื่อที่จะไปชดเชยกับกระแสไอออนของหัววัด 2 ดังนั้นลักษณะเฉพาะของหัววัด 1 จึงสามารถสมมติให้มีรูปร่างอย่างเดียวกับลักษณะเฉพาะของไอออนอิมิต์ของหัววัด 2 และเมื่อความต่างศักย์  $V$  เป็นลบ ก็จะเกิดพฤติกรรมโดยทั่วไปแบบเดิมขึ้นเพียงแต่กระแสจะกลับทิศกัน ส่วนขนาดของกระแสอิมิต์ จะแตกต่างกันหากพื้นที่ของหัววัดแตกต่างกัน

เพื่อให้สัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของพลาสมา สามารถเขียน  $I_1$  และ  $I_2$  จากสมการ 2.13 และ 2.14 ได้เป็น

$$I_1 = I_{is}^{(1)} - I_{es}^{(1)} e^{\frac{eV_1}{kT_e}} \quad 2.26$$

$$I_2 = I_{is}^{(2)} - I_{es}^{(2)} e^{\frac{eV_2}{kT_e}} \quad 2.27$$

ที่ตำแหน่งซึ่ง  $V_f$  ซึ่งกระแสไอออนเท่ากับกระแสอิเล็กตรอน จะได้

$$dI_1 = -\frac{e}{kT_e} I_{es}^{(1)} e^{\frac{eV_1}{kT_e}} dV_1 = -\frac{e}{kT_e} I_{is}^{(1)} dV_1 \quad 2.28$$

$$dI_2 = -\frac{e}{kT_e} I_{es}^{(2)} e^{\frac{eV_2}{kT_e}} dV_2 = -\frac{e}{kT_e} I_{is}^{(2)} dV_2 \quad 2.29$$

เนื่องจาก

$$dI = -dI_1 = dI_2 \quad 2.30$$

$$dV = dV_1 - dV_2 \quad 2.31$$

จะได้

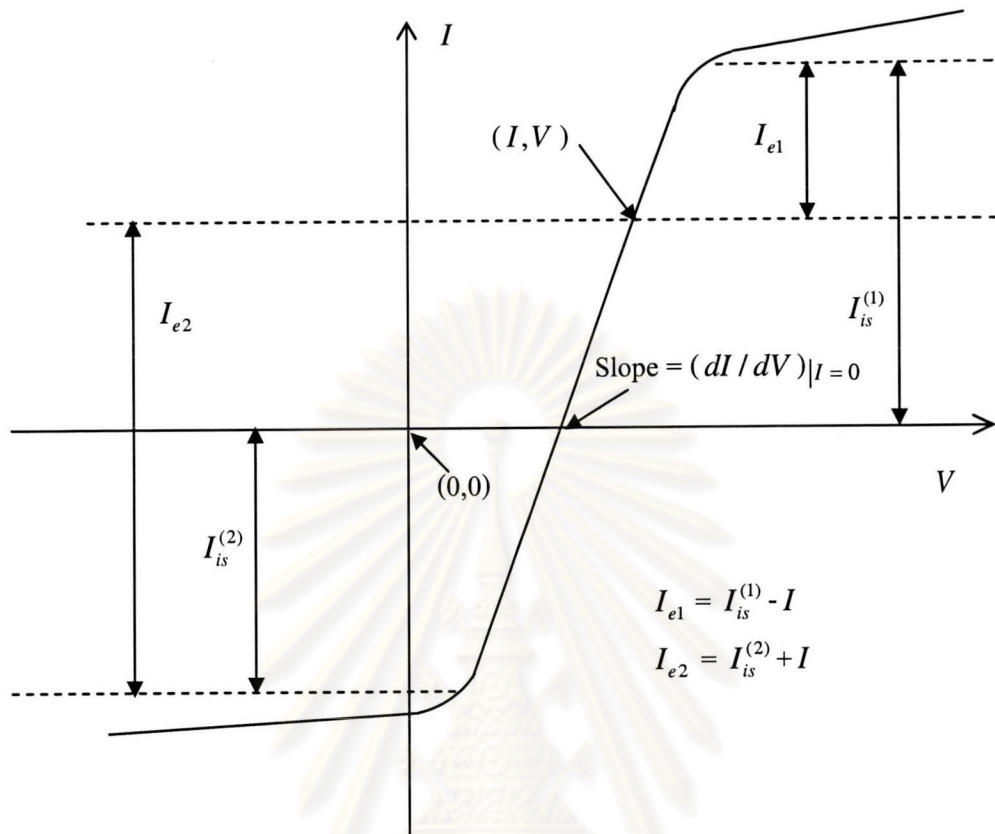
$$dV = \frac{kT_e}{e} \left( \frac{dI_2}{I_{is}^{(2)}} - \frac{dI_1}{I_{is}^{(1)}} \right) \quad 2.32$$

$$dV = \frac{kT_e}{e} \left( \frac{1}{I_{is}^{(2)}} + \frac{1}{I_{is}^{(1)}} \right) dI \quad 2.33$$

ท้ายสุดจะได้

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=0} = \frac{e}{kT_e} \frac{I_{is}^{(1)} I_{is}^{(2)}}{I_{is}^{(1)} + I_{is}^{(2)}} \quad 2.34$$

จากสมการที่ 2.34 เราสามารถหา  $T_e$  ได้ โดยหาค่าความชันที่จุดซึ่ง  $I=0$  และวัดขนาดของ  $I_{is}^{(1)}$  และ  $I_{is}^{(2)}$  ดังรายละเอียดในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากหัววัดคู่และรายละเอียด [14]

รูปที่ 2.8 แสดงวิธีหาค่า  $I_{is}^{(1)}$  และ  $I_{is}^{(2)}$  เพื่อใช้ในการคำนวณ ตามสมการที่ 2.34 ซึ่งมีค่าที่ต้องพิจารณา 3 ตัว นั่นคือ กระแสไอออนอิมิตต์ที่หัววัด 1 ( $I_{is}^{(1)}$ ) และกระแสไอออนอิมิตต์ที่หัววัด 2 ( $I_{is}^{(2)}$ ) และ ความชันของกราฟในช่วง  $I = 0$  โดยเมื่อแทนค่าที่ต้องการซึ่งได้จากรูปที่ 2.6 ลงในสมการที่ 2.34 แล้ว จะทำให้ได้ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนออกมา

### 2.3.5.2 ความหนาแน่นของพลาสมา

สำหรับการคำนวณหาความหนาแน่นของพลาสมานั้น สามารถใช้สมการที่ 2.19 คำนวณได้เช่นเดียวกับ กรณีของหัววัดเดี่ยว