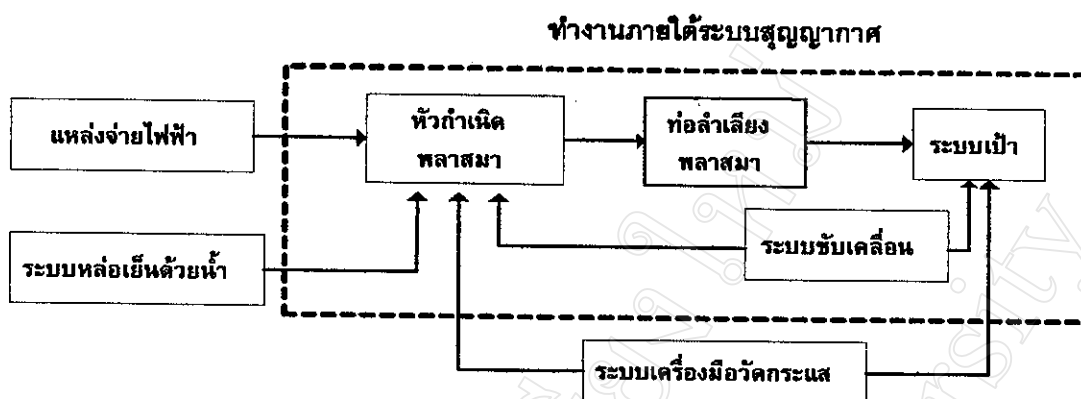


บทที่ 3

วัสดุและอุปกรณ์

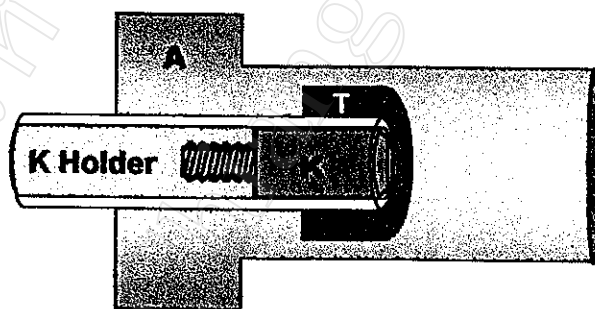
ระบบ PIII ที่ใช้ MEVVA เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมานั้นจะทำงานภายใต้ความดันสุญญากาศระดับ 10^{-6} Torr โดยมีส่วนประกอบสำคัญพื้นฐานสองส่วน ดังรูปที่ 3.1 คือส่วนที่อยู่ในระบบสุญญากาศและนอกกระบบสุญญากาศ สำหรับอุปกรณ์ที่อยู่ในระบบสุญญากาศจะประกอบด้วยหัวกำเนิดพลาสมา ท่อลำเลียงพลาสมา เป่า และระบบขับเคลื่อนซึ่งมีหน้าที่เลื่อนตำแหน่งของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบสุญญากาศ เช่น เป่าหรือระบบโฟกัสทำให้ประหยัดเวลาในการทดลองสำหรับส่วนที่อยู่นอกกระบบสุญญากาศประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้า ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำมีหน้าที่ช่วยลดอุณหภูมิจากการอาร์กของโลหะแคโทดและแอโนดภายในหัวกำเนิดพลาสมา และระบบเครื่องมือวัดกระแส ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นความสนใจไปที่การวัดกระแสอาร์กและกระแสไอออนที่ตกกระทบบเป่า เพื่อเป็นข้อมูลบ่งชี้ในการพัฒนาระบบโฟกัสที่หัวกำเนิด ระบบลำเลียง และระบบเป่า ระบบหลักพื้นฐานหลายส่วน อาทิ หัวกำเนิดพลาสมา แหล่งจ่ายไฟ ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ ระบบสุญญากาศ และระบบไบอัสเป่าที่สามารถไบอัสเป่าได้สูงสุด ± 80 โวลต์ ได้รับการออกแบบไว้แล้วในหน่วยวิจัย แต่ทั้งนี้ยังไม่สามารถทดสอบการทำงานได้ต้องอาศัยอุปกรณ์เสริมอีกบางส่วน อาทิ ท่อลำเลียงพลาสมา ระบบเป่า ระบบขับเคลื่อนและระบบวัดกระแสจึงจะทำงานได้ รวมทั้งการศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ วัสดุแคโทด กระแสไอออน ค่าไบอัสที่ทำให้กระแสอิมิตัว จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบต่างๆ มีแต่ส่วนที่สำคัญพื้นฐานซึ่งในการใช้งานนั้นจะต้องเข้าใจกลไกจริงทุกส่วน ดังนั้นจึงจะขอกล่าวรายละเอียดของส่วนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แสดงระบบอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1 หัวกำเนิดพลาสมา

ส่วนประกอบของหัวกำเนิดพลาสมาที่กล่าวไปแล้วในรูปที่ 2.2 (บทที่ 2) คือ ขั้วทริกเกอร์ (trigger electrode) แอโนด (anode) วัสดุโลหะแคโทด (cathode material) และฉนวน (insulator) เป็นเพียงการแสดงโครงสร้างพื้นฐานแต่ส่วนประกอบที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นโครงสร้างที่ได้จากการออกแบบและขึ้นรูปขึ้นงานจริงซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.2

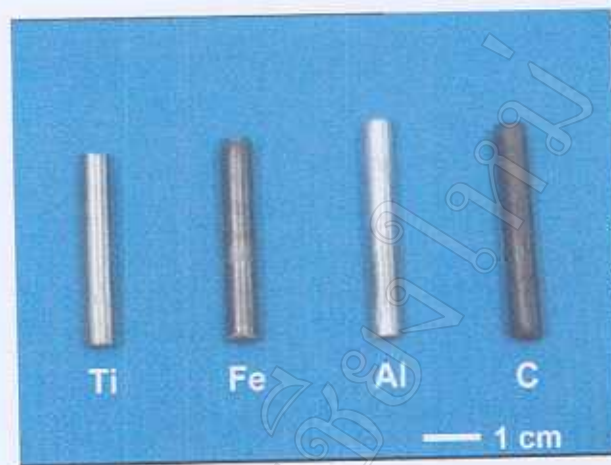


รูปที่ 3.2 แสดงภาพของหัวกำเนิดพลาสมา

3.1.1 ขั้วแคโทด เป็นขั้วที่มีความสำคัญเพราะชนิดของโลหะที่ใช้จะเป็นตัวกำหนด พลาสมาของโลหะนั้นๆ ปกติจะใช้โลหะบริสุทธิ์ ในระดับ 99.99%-99.999% ทั้งนี้เพื่อ ความบริสุทธิ์ของพลาสมา โลหะแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพในการเกิดพลาสมาต่างกัน เช่น โลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง จะเกิดการไอออไนซ์เป็นพลาสมาได้ยากกว่าโลหะที่มีจุด หลอมเหลวต่ำ เพราะในการทริกเพื่อจุดอาร์กแต่ละครั้ง ต้องใช้กำลังไฟฟ้าที่มากกว่า โลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ นอกจากนั้นแล้วยังพบว่าโลหะที่มีเลขอะตอม (atomic number) และจุดเดือดสูงจะให้อนุภาคไอออนที่มีประจุ (charge state) สูงกว่า โลหะที่มี เลขอะตอมและจุดเดือดต่ำกว่าด้วย สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้โลหะแคโทด 5 ชนิด คือ คาร์บอน (C) อะลูมิเนียม (Al) ไทเทเนียม (Ti) เหล็ก (Fe) และ ทองแดง (Cu) ซึ่งมี คุณสมบัติพื้นฐานดังตารางที่ 3.1 ในการใช้งานนั้นต้องนำโลหะแคโทดแต่ละชนิดมาขึ้นรูป ให้เป็นทรงกระบอกตันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร พร้อมทั้งทำเกลียวตัวผู้ขนาด 3 มิลลิเมตร x 0.1 มิลลิเมตร ยาว 6 มิลลิเมตร เพื่อเป็นเกลียวยึดกับขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของธาตุไทเทเนียม เหล็ก อะลูมิเนียม และ คาร์บอน

โลหะแคโทด	คุณสมบัติ			
	เลขอะตอม	จุดหลอมเหลว °C	จุดเดือด °C	พลังงานไอออไนซ์ ลำดับที่ 1 (kJ/mol)
C	6	3,727	3,642	1.093
Al	13	660	2,450	0.584
Ti	22	1,660	3,287	0.664
Fe	26	1,535	2750	0.766
Cu	29	1,085	2,572	0.752



(ก)



(ข)

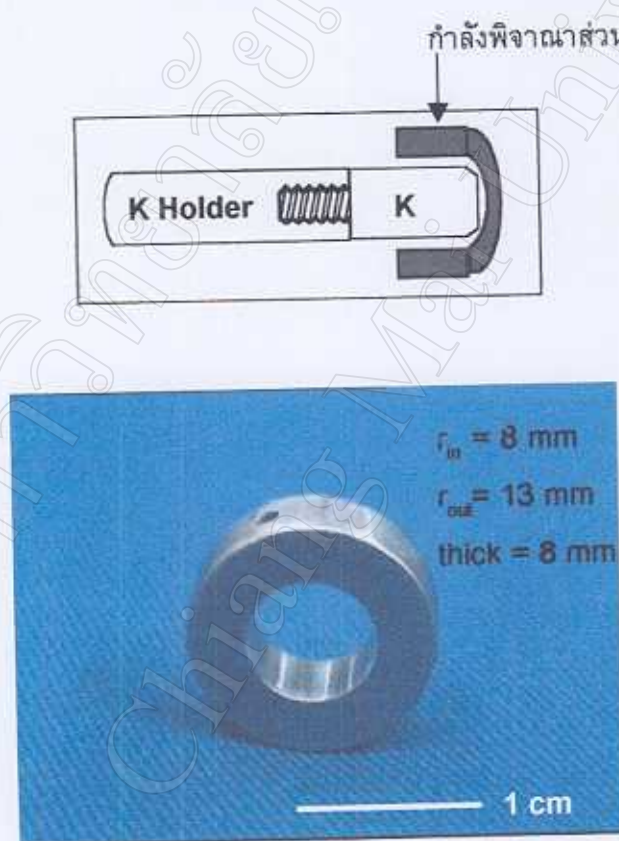
รูปที่ 3.3 แสดงธาตุแคโทดต่าง ๆ

(ก) ธาตุแคโทดต่าง ๆ ที่ยังไม่ได้ขึ้นรูป

(ข) แคโทดที่ขึ้นรูปจากธาตุต่าง ๆ มีความยาวประมาณ 10 mm

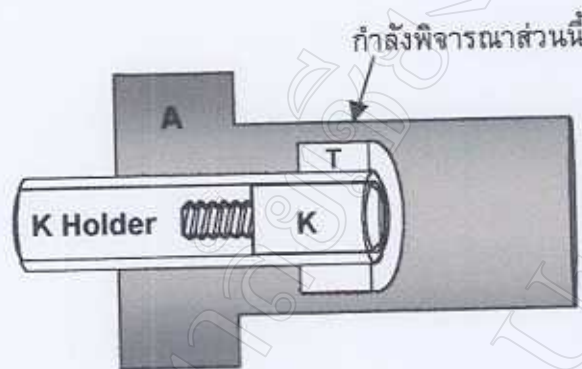
เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm

3.1.2 ขั้วทริกเกอร์ เป็นขั้วที่ทำหน้าที่จุดประกาย อันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าแรงสูง (บทที่ 2 หัวข้อ 2.21) การพัฒนาในยุคต้นๆ ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าปลายแหลมเป็นทริกเกอร์และกระบวนการเป็นอาร์กในสุญญากาศจริง ระหว่างขั้วทริกกับแคโทด แต่ว่าข้อเสียของระบบดังกล่าวคือ จะเกิดอาร์กเฉพาะบริเวณใกล้ๆ กับขั้วทริกเกอร์เท่านั้น ซึ่งการพัฒนาในยุคหลังได้แก้ปัญหาโดยใช้ ทริกเกอร์วงแหวน ทำให้การเกิดอาร์กสามารถเกิดขึ้นบริเวณรอบๆ ผิวแคโทดได้ ในงานวิจัยนี้จึงใช้ทริกเกอร์วงแหวนที่ทำจากสแตนเลส มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเป็น 8 mm และ 13 mm ตามลำดับหนา 8 mm ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงโลหะทริกเกอร์วงแหวนที่ทำจากสแตนเลส

3.1.3 ขั้วแอโนด เป็นขั้วไฟฟ้าหลักใช้คู่กับแคโทด ขณะอาร์กกระแสนีเล็กตรอนจะวิ่งจากแคโทดมาครบวงจรที่แอโนด เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณหรือ ความหนาแน่นของพลาสมาให้มากขึ้น ขั้วแอโนดที่ใช้ทำจากโลหะอะลูมิเนียม มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงรัศมีภายใน 29 mm ยาว 44 cm และมีฐานเป็นเกลียวเพื่อให้สามารถปรับระยะได้ประมาณ 12 mm ดังรูปที่ 3.5



มองด้านบน

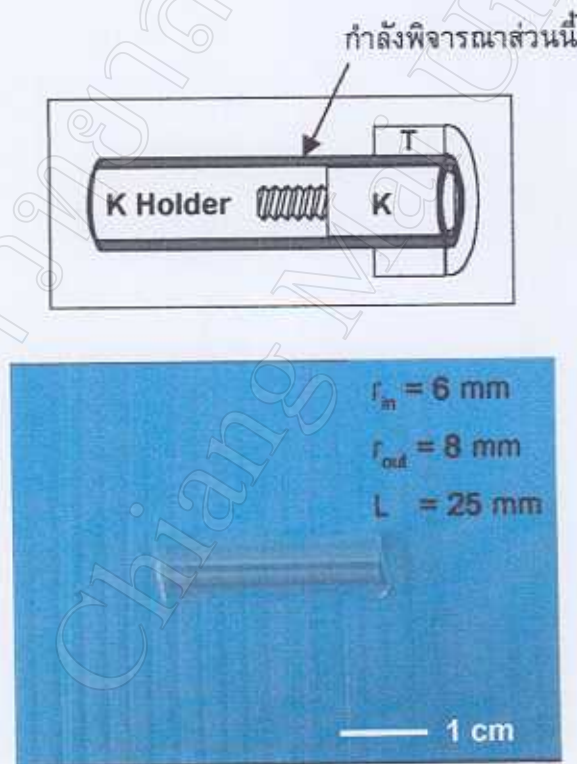


มองด้านข้าง

รูปที่ 3.5 แสดงขั้วแอโนดที่เป็นโครงสร้างจริง

3.1.4 ฉนวนคั่นระหว่างโลหะแคโทดกับขั้วทริกเกอร์

ฉนวนคั่นระหว่างโลหะแคโทดกับขั้วทริกเกอร์ มีความสำคัญโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการอาร์ก หรือทริก จากหัวข้อที่ผ่านมา (3.1.2) ได้มีการเปลี่ยน จากทริกเกอร์ ปลายแหลมมาเป็นวงแหวน เพื่อกระจายพื้นที่ของการอาร์ก แต่ก็ยังคงต้องใช้สนามไฟฟ้าค่อนข้างสูงเพราะยังเป็นการอาร์กในสุญญากาศจริง ในภายหลังได้เลือกใช้วิธีอาร์กผ่านผิวฉนวน แทนการอาร์กในสุญญากาศ ทำให้สามารถใช้สนามไฟฟ้าที่มีค่าระดับ สิบกิโลโวลต์ได้ แต่ก็ยังคงใช้ชื่อเดิมคือ การอาร์กในสุญญากาศ (Vacuum Arc) สำหรับหัวกำเนิดพลาสมาที่ห้องวิจัยโซลิตสแตดและอิเล็กทรอนิกส์ออกแบบนั้น จะใช้ไพเร็กซ์เป็นฉนวน โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง เส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเป็น 6 mm และ 8 mm ตามลำดับ ยาว 25 mm ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงไพเร็กซ์ที่ใช้เป็นฉนวนคั่นระหว่างขั้วโลหะแคโทดกับทริกเกอร์

3.1.5 ระบบฟลักซ์ เป็นระบบที่ช่วยเพิ่มกระแสไอออนที่ผลิตโดยการใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในบริเวณที่เกิดการอาร์ก จึงใช้ชื่อกันว่า ฟลักซ์ ต่อมาพบว่าบทบาทที่แท้จริงของสนามแม่เหล็กบริเวณจุดกำเนิดพลาสมาคือช่วยเพิ่มประจุของอนุภาคไอออน และงานวิจัยส่วนใหญ่จะสนใจแต่ความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกนของโซลินอยด์ สำหรับในงานวิจัยนี้จะเน้นความสนใจที่ แกรเดียนต์ (gradient) ของเส้นแรงแม่เหล็กจึงทำการแปรค่าการวางตำแหน่งของแม่เหล็กถาวรและโซลินอยด์ฟลักซ์ที่มีลักษณะของกราฟโปรไฟล์ที่แตกต่างกันดังรูปที่ 3.7 เพื่อหาตำแหน่งของระบบฟลักซ์ที่เหมาะสมและเปรียบเทียบผลการเพิ่มกระแสไอออนจากแม่เหล็กฟลักซ์ทั้งสอง

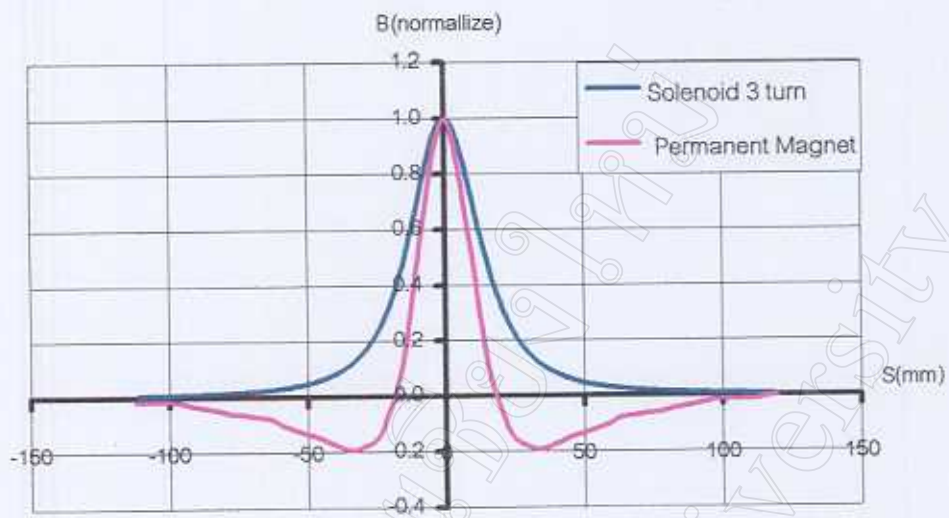
ก) โซลินอยด์ฟลักซ์ ระบบฟลักซ์ส่วนใหญ่จะใช้โซลินอยด์ฟลักซ์เพราะสามารถต่ออนุกรมกับวงจรอาร์กได้โดยไม่ต้องสร้างระบบจ่ายกระแสแยก ซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กในแนวแกนกลางของโซลินอยด์มีค่าแปรไปตามค่ากระแสอาร์ก สำหรับโซลินอยด์ฟลักซ์ที่ใช้จะมีลักษณะและคุณสมบัติดังนี้

- ลักษณะทั่วไปของโซลินอยด์ แสดงดังรูปที่ 3.8

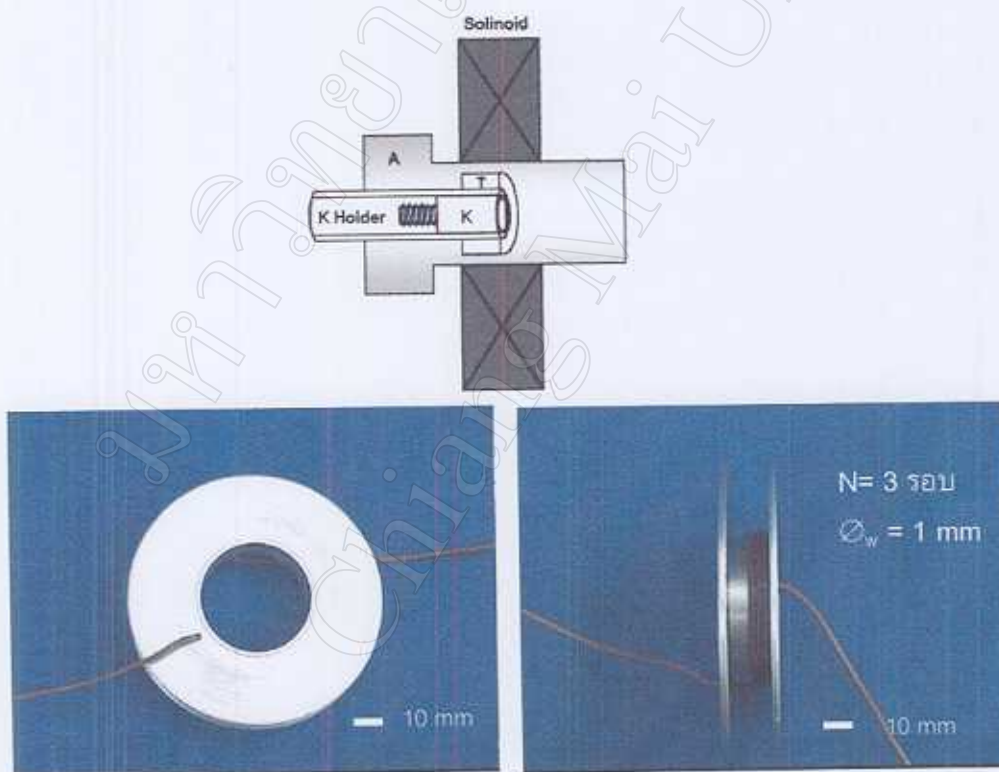
วัสดุที่ใช้ (material)	เงิน (Ag) ผสม
เส้นผ่านศูนย์กลางลวด (ϕ_w)	1 มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อโซลินอยด์	38 มิลลิเมตร
จำนวนรอบ	3 รอบ
จำนวนรอบต่อความยาว	6.7 รอบ/เซนติเมตร

- คุณสมบัติเมื่อมีกระแสไฟฟ้า $I(A)$ ไหลผ่าน

ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดในแนวแกนกลาง	0.011 mT
--	----------



รูปที่ 3.7 แสดงโปรไฟล์ของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรและโซลินอยด์ไฟกัส

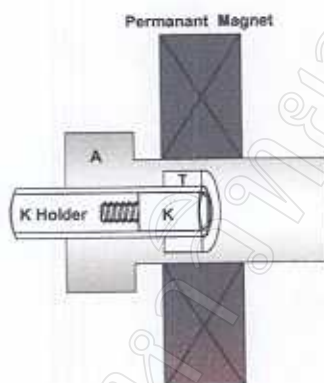


รูปที่ 3.8 แสดงโซลินอยด์ไฟกัส 3 รอบ

ข) แม่เหล็กถาวร การใช้แม่เหล็กถาวรจะลดความยุ่งยากเกี่ยวกับระบบจ่ายไฟ และมีผลดีต่อการศึกษาเพราะสามารถคงค่าสนามแม่เหล็กได้ขณะที่กระแสอาร์กเพิ่มขึ้น สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้แม่เหล็กกล้าโพง ซึ่งมีขนาดที่เหมาะสมกับหัวกำเนิดพลาสมา โดยมีลักษณะและคุณสมบัติดังนี้

- ลักษณะทั่วไปของแม่เหล็กกล้าโพง แสดงดังรูปที่ 3.9

รูปทรง	ทรงกระบอกกลวง
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	36 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	80 mm
ความหนาของแม่เหล็ก	13 mm



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของแม่เหล็กถาวรที่ใช้

- คุณสมบัติ

ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดในแนวแกนกลาง 30 mT

3.2 ระบบจ่ายไฟ (Power supply)

3.2.1 ระบบจ่ายไฟทริกเกอร์ (Trigger power supply)

ระบบจ่ายไฟทริกเกอร์ เป็นระบบจ่ายไฟฟ้าชนิดพัลส์ตักยสูง ที่ต่ออยู่ระหว่าง ขั้วแคโทดกับขั้วทริกเกอร์ เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้เกิดการอาร์กเริ่มต้นที่ขั้วแคโทด สำหรับระบบจ่ายไฟทริกเกอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นการนำคอยล์จุดระเบิดรถยนต์ (ignition coil) มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์หรือไทรสเตอร์ (thyristor) โดยมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องทริกเกอร์

Electrical Parameters	Wave shape	Formula (peak)	Value (peak)
Open circuit output voltage V_{oo}	Half cosine	$V_{DC} \times N$	16 kV
Switch current when :- - secondary open I_{pk} - secondary close I_{cpk}	Half sine Half sine	$V_{DC} / \sqrt{L_{mag} / C}$ $V_{DC} / \sqrt{L_L / C}$	6 A 12.5 A
Close circuit output current I_{co}	Half sine	I_{cpk} / N	0.16 A
Current period output open T_{zo}	-	$\pi \sqrt{L_{mag} C}$	0.5 ms
Current period output close T_{zc}	-	$\pi \sqrt{L_L C}$	77 μs

3.2.2 ระบบจ่ายไฟอาร์ก (Arc power supply)

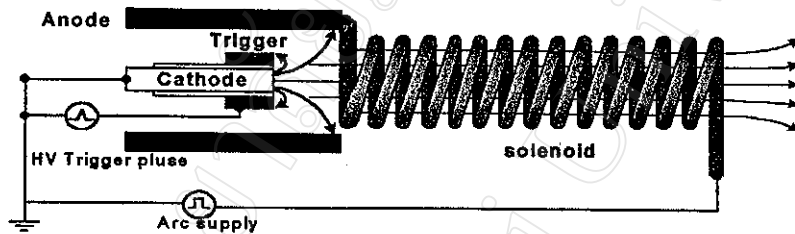
ระบบจ่ายไฟอาร์ก เป็นระบบจ่ายไฟที่ต่ออยู่ระหว่างขั้วโลหะแคโทดกับแอโนด เพื่อทำหน้าที่จ่ายกำลังในรูปของกระแสอาร์กแบบพัลส์ให้กับขั้วแอโนด ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณการเกิดพลาสมา โดยจะเริ่มทำงานเมื่อมีการจุดทริก เพื่อให้เกิดพลาสมาเริ่มต้นจากพลังงานของแหล่งจ่ายไฟทริกเกอร์ สำหรับระบบจ่ายไฟอาร์กที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิด LC delay line โดยมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องจ่ายไฟอาร์ก

Major parameters	Circuit type	LC delay line
	No. of section n	8
	Inductance L (each)	$78 \mu H$
	Capacitance C (each)	$50 \mu F$ 1,320 V
	Power resister R	170Ω 250 W
Minor parameters	Power diode D	1200 V 300 A
	Adjustable V_{DC}	0-700 V
Circuit performance	Arc current I_A	$500 A_{max}$ at $V_{DC} = 700 V$
	Pulse width $\tau = 2n\sqrt{LC}$	1 ms
	Repetition rate $\gamma = 1/4nRC$	≈ 4 pps max (air cool)
	Impedance $Z = \sqrt{L/C}$	1.3Ω

3.3 ท่อลำเลียงพลาสมาทำจากโซลินอยด์

เป็นอุปกรณ์สำคัญมาก เพราะธรรมชาติของการผลิตพลาสมาจากการอาร์กในสุญญากาศของ MEVVA จะมีอนุภาคนิวเคลียสจำนวนมากปะปนมากับพลาสมาด้วย ในการใช้งานเชิงประยุกต์ส่วนใหญ่ไม่ต้องการอนุภาคนิวเคลียสจำนวนมากดังกล่าวเพราะทำให้พื้นผิวของชิ้นงานไม่เรียบ โซลินอยด์ลำเลียงจึงมีความสำคัญ 2 ประการคือ ประการแรก สามารถใช้ โซลินอยด์โค้งเป็นท่อลำเลียงเพื่อกำจัดอนุภาคนิวเคลียสขนาดใหญ่ เนื่องจากอนุภาคนิวเคลียสขนาดใหญ่มีอัตราส่วนมวลต่อประจุค่ามากจึงเคลื่อนที่ในแนวตรง ส่วนอนุภาคไอออนจะเคลื่อนที่ตามสนามแม่เหล็กในแนวกลางของโซลินอยด์จนออกจากปลายท่อโซลินอยด์ ประการที่สองในกรณีที่มีข้อจำกัดของพื้นที่บริเวณหัวกำเนิดสามารถใส่โซลินอยด์ตรงลำเลียงไปยังเป้าที่อยู่ระยะไกลได้



รูปที่ 3.10 แสดงการเชื่อมต่อขดลวดโซลินอยด์เข้ากับวงจรของหัวแอโนดแบบอนุกรม

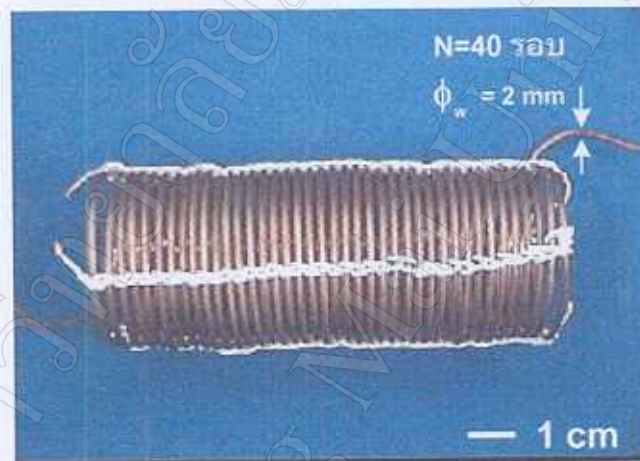
ในการใช้งานจริงนั้นถ้าสามารถแยกแหล่งจ่ายไฟของโซลินอยด์ให้เป็นอิสระจะเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะสามารถคงค่าสนามแม่เหล็กที่กระแสอาร์กต่าง ๆ ได้ แต่แหล่งจ่ายไฟของโซลินอยด์นั้นออกแบบยากเพราะเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง ในงานวิจัยนี้จึงมีความพยายามที่จะนำแม่เหล็กถาวรหลาย ๆ ตัวมาต่อกันเป็นระบบลำเลียง แต่เนื่องด้วยโปรไฟล์ของสนามแม่เหล็กถาวรมีการกลับทิศของสนาม จึงลดความยุ่งยากโดยใช้ขดลวดโซลินอยด์ต่อเข้ากับวงจรของหัวแอโนดแบบอนุกรม ดังรูปที่ 3.10 คือ เมื่อแอโนดมีกระแสไฟฟ้าไหลก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์และทำให้มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นในแนวแกนภายในขดลวด โดยค่าความเข้มสนามแม่เหล็กนี้จะมีค่าแปรผันตามค่าของกระแสอาร์ก จากการต่อขดลวดโซลินอยด์อนุกรมเข้ากับแอโนด ทำให้ขดลวดโซลินอยด์เป็นเสมือนตัวเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจรอาร์กด้วย แต่เนื่องจากมีจำนวนรอบไม่มากนัก จึงไม่มีผลกระทบต่อวงจรอาร์กโดยรวม สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบทั้งโซลินอยด์ตรงและโซลินอยด์โค้ง เพื่อใช้ในการลำเลียงพลาสมา โดยมีคุณลักษณะและคุณสมบัติดังนี้

โซลินอยด์ตรง

- ลักษณะทั่วไปของโซลินอยด์ตรง (รูปที่ 3.11)

วัสดุที่ใช้ (material)	Cu
เส้นผ่านศูนย์กลางลวด (ϕ_w)	2 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อโซลินอยด์ (ϕ_a)	47 mm
จำนวนรอบ	40 รอบ
จำนวนรอบต่อความยาว	3.3 รอบ/เซนติเมตร

- คุณสมบัติของโซลินอยด์ตรงเมื่อมีกระแสไฟฟ้า $I(A)$ ไหลผ่าน
ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดในแนวแกนกลาง 0.041 mT

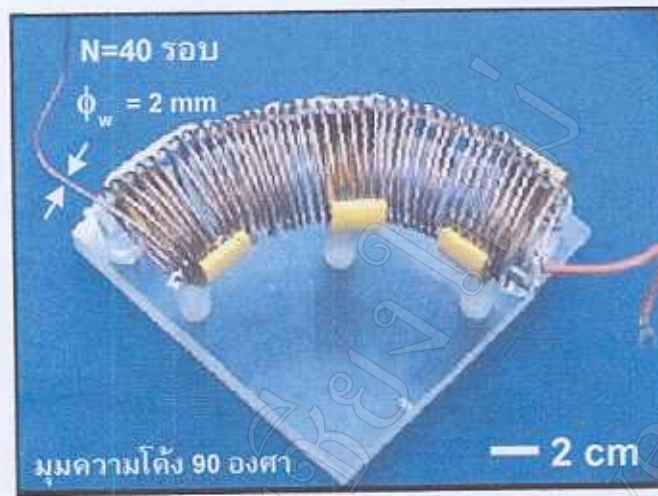


รูปที่ 3.11 แสดงโซลินอยด์ตรง

โซลินอยด์โค้ง

- ลักษณะทั่วไปของโซลินอยด์โค้ง (รูปที่ 3.12)

วัสดุที่ใช้ (material)	Cu
เส้นผ่านศูนย์กลางลวด (ϕ_w)	2 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อโซลินอยด์ (ϕ_a)	47 mm
รัศมีความโค้งของโซลินอยด์	
มุมความโค้ง	90 องศา
จำนวนรอบ	40 รอบ
จำนวนรอบต่อองศา	0.44 รอบ/องศา



รูปที่ 3.12 แสดงโซลินอยด์โค้ง

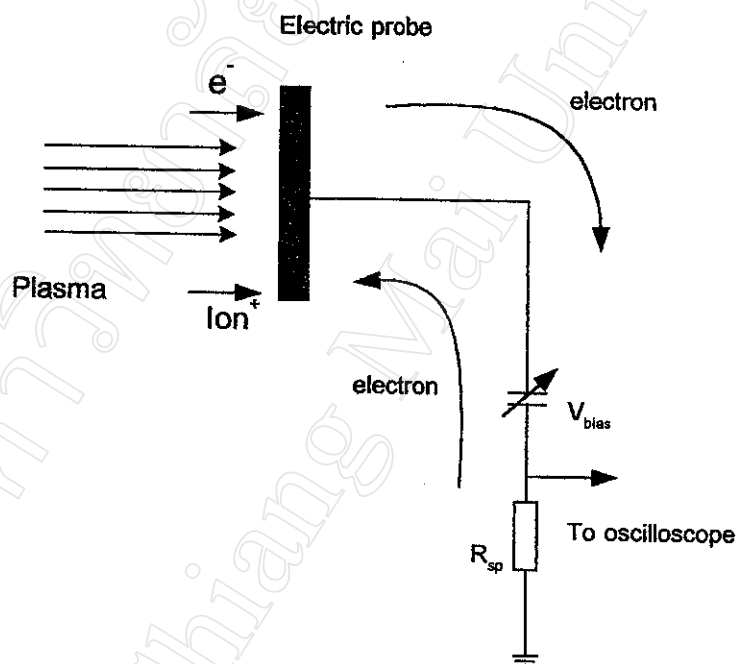
- คุณสมบัติของโซลินอยด์โค้งเมื่อมีกระแสไฟฟ้า $I(A)$ ไหลผ่าน
ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดในแนวแกนกลาง 0.041 mT

3.4 ระบบวัดกระแส ระบบเครื่องมือวัดจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ

- โพรบวัดกระแสและแหล่งจ่ายไบอัสเป่า ใช้สำหรับวัดกระแสพลาสมา กระแสอิเล็กตรอน และกระแสไอออน
- ทอรอยด์วัดกระแส ใช้สำหรับวัดกระแสอาร์กของ MEVVA
- โปรแกรมที่พัฒนาเพื่อช่วยในการเก็บข้อมูลจากภาพถ่ายสัญญาณ

3.4.1 โพรบวัดกระแส (Electrical probe หรือ Charge collecting plate) เป็นแผ่นโลหะเรียบกลมทำหน้าที่รับกระแสไอออนและอิเล็กตรอนที่มาจากหัวกำเนิดพลาสมา และครบวงจรที่กราวด์ ซึ่งมีวิธีในการอ่านค่ากระแสได้หลายวิธี สำหรับในงานวิจัยนี้จะหาค่ากระแสจากการวัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานชั้นที่ โดยการต่อสายจากโพรบอนุกรมกับวงจรไบอัสเป่าและตัวต้านทานชั้นที่ (R_{sp}) ที่ต่อลงกราวด์ ดังรูปที่ 3.13 ถ้ามีอนุภาคอิเล็กตรอนมาตกกระทบบ่าจะทำให้โพรบมี

ศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่จากโพรบผ่านความต้านทานลงกราวด์ และถ้ามีอนุภาคไอออนมาตกกระทบบโพรบจะทำให้โพรบมีความต่างศักย์เป็นบวก อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่จากกราวด์ผ่านตัวต้านทานมายังโพรบ การเคลื่อนที่จากศักย์ต่ำไปยังศักย์สูง ของอิเล็กตรอนดังกล่าวจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานชั้น (R_{sp}) ทำให้สามารถทราบค่ากระแสจากการตกกระทบบเข้าของอิเล็กตรอนและไอออนได้ โดยการวัดความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทาน (R_{sp}) นอกจากนั้นแล้วยังสามารถเลือกวัดกระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออนได้ โดยการไบแอสโพรบให้มีความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกหรือลบมากๆ สำหรับการวัดกระแสในทางปฏิบัตินั้นต้องออกแบบโพรบให้มีขนาดใหญ่เพื่อให้สามารถเก็บกระแสอิเล็กตรอนและไอออนได้หมด ตลอดจนช่วงลดการสปาร์กที่โพรบ เมื่อกระแสมีค่าสูง



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรโพรบวัดกระแสพลาสมา

3.4.2 ระบบไบอัส เป็นระบบแหล่งจ่ายไฟที่ใช้ไบอัสโพรบวัดกระแสดังรูปที่ 3.13 โดยใช้หลักการชาร์จประจุจากแหล่งจ่ายไฟตรงปรับค่าได้ ให้แก่ตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกับวงจรโพรบและใช้สวิตช์ช่วยเลือกในการไบอัสศักย์บวกหรือศักย์ลบ ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังตารางที่ 3.4

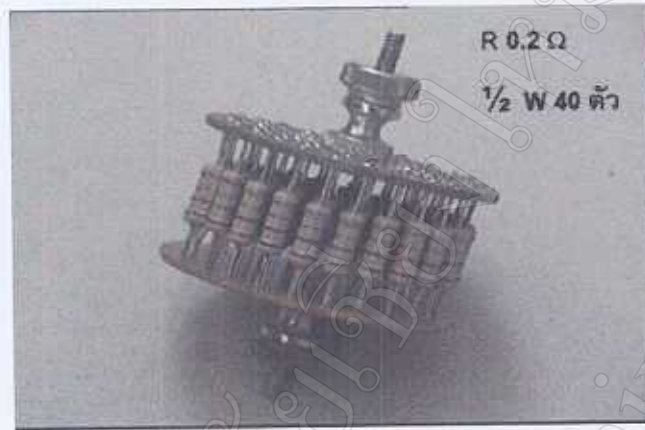
ตารางที่ 3.4 แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าของระบบไบอัสโพรบ

Major parameters	Circuit type	RC
	Capacitance C (each)	10,000 μF 200 V
	Power resistor R	500 Ω 20 W
Minor parameters	Adjustable V_{DC}	300 V
Circuit performance	Volt	-200 to +200

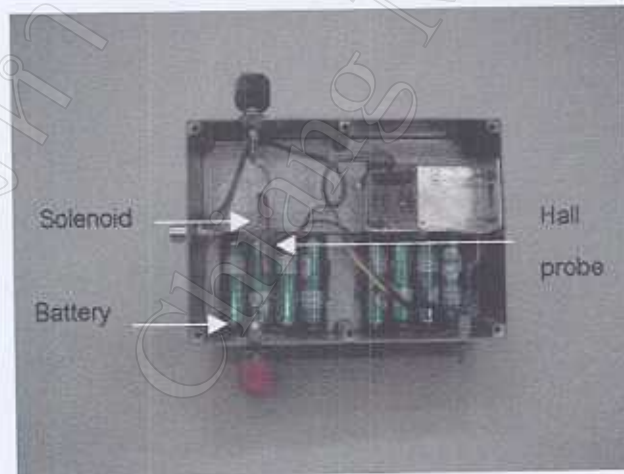
3.4.3 ตัวตรวจวัดกระแส (Current sensor)⁽³¹⁾

ในระยะแรกของการทดลองใช้ความต้านทานชั้นที่ 5 m Ω ที่ทำจากตัวต้านทานคาร์บอน 0.2 Ω $\frac{1}{2}$ W จำนวน 40 ตัวต่อขนานกันดังรูปที่ 3.15 เป็นตัววัดกระแสอาร์กแต่มีกพบปัญหาสัญญาณรบกวนร่วมกราวด์เมื่อกระแสอาร์กมีค่ามากกว่า 400 แอมแปร์ และถ้าเกิดความผิดปกติขึ้นกับตัวต้านทานตัวใดตัวหนึ่งจะไม่สามารถทราบได้เลย ดังนั้นจึงพัฒนาระบบวัดกระแสเป็นแบบไม่สัมผัสกับวงจร เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาสัญญาณรบกวนร่วมกราวด์โดยใช้สมบัติของ Hall probe มาประยุกต์เป็นตัววัดกระแสตามหลักการที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.62 พบว่าใช้งานได้ดีในช่วงกระแส 100 แอมแปร์ขึ้นไป และเพื่อให้เกิดสัญญาณรบกวนต่ำที่สุด จึงประกอบไว้ในกล่องโลหะ และทำงานด้วยแบตเตอรี่ (ดังรูปที่ 3.15) แต่ไม่สะดวก เพราะถ้าแบตเตอรี่กำลังอ่อนลงจะทำให้กระแสควบคุมมีค่าเปลี่ยนไปด้วย นอกจากนี้แล้วยังได้พัฒนาทอรอยด์วัดกระแสควบคู่กันไป พบว่า สามารถทำงานได้ดี ทั้งนี้ได้สอบเทียบ (calibrate) ตัวตรวจวัดกระแสทั้ง 2 ชนิดกับตัวต้านทานชั้นที่ สุดท้ายเราเลือกใช้ทอรอยด์วัดกระแส (ดังรูปที่ 3.16) ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษคือ ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟและสามารถทำงานร่วมกับระบบ High Voltage ได้ในระดับที่สูงกว่า 25 keV โดยไม่มี High Voltage transient ผ่านทางกราวด์ มาถึงเครื่องมือวัดอีกด้วย ดังนั้นจึงทำการพัฒนา

และออกแบบให้สามารถวัดกระแสพัลส์อาร์กในช่วง 100 แอมแปร์ ถึง 600 แอมแปร์
ความกว้างของพัลส์ 1 มิลลิวินาที ซึ่งมีขนาดแกนและคุณสมบัติดังรูปที่ 3.17



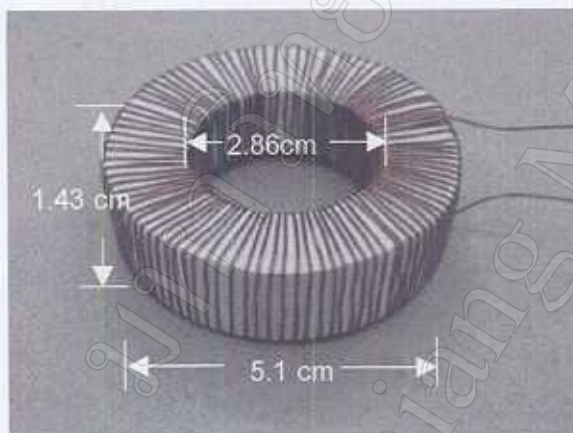
รูปที่ 3.14 แสดงความต้านทานชั้นที่ใช้วัดกระแสอาร์ก



รูปที่ 3.15 แสดงระบบหัววัดฮอลล์ที่ใช้วัดกระแสอาร์ก



รูปที่ 3.16 แสดงระบบทอรอยด์วัดกระแสที่ใช้วัดกระแสอาร์ก



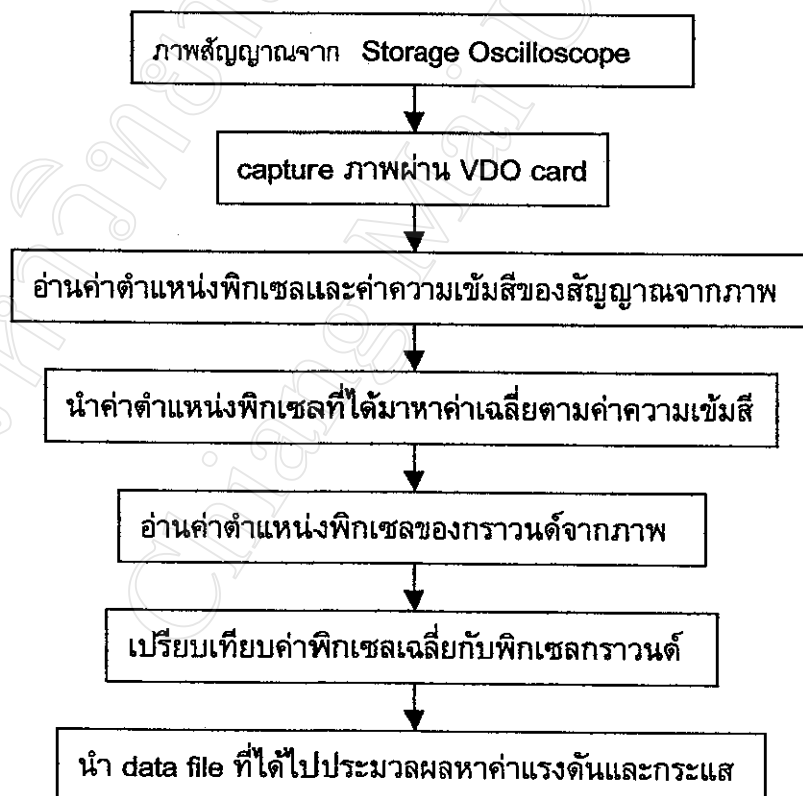
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.43 cm
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.55 cm
- ความสูง 1.43 cm
- จำนวนรอบ 600 รอบ
- ค่าคงที่ของทอรอยด์ $0.166 \times 10^{-4} \text{ Tcm}^2/\text{A}$

รูปที่ 3.17 แสดงทอรอยด์แกนอากาศที่ใช้

เพื่อความสะดวกในการวัดค่ากระแสอาร์กจึงใช้วงจรอาร์ชีฟาสซีฟในการอินทิเกรตค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดกระแสอาร์กของทอรอยด์โดยใช้ค่าความต้านทาน 15 กิโลโอห์ม ตัวเก็บประจุ 2.2 ไมโครฟารัดซึ่งมีเวลาคงค่าของวงจรอาร์ชีฟมากกว่าความกว้างพัลส์ของกระแสอาร์ก 30 เท่า

3.4.4 โปรแกรมอ่านค่ากราฟ

เนื่องจากสัญญาณกระแสอาร์กและกระแสพลาสมาเป็นกระแสพัลส์ที่มีความกว้างของพัลส์แคบอยู่ในระดับ 1 มิลลิวินาที จึงต้องใช้ดิจิตอลสโตเรจออสซิลอโคปเป็นตัววัดและบันทึกสัญญาณเพื่อนำค่าของสัญญาณมาประมวลผล แต่ในหน่วยงานวิจัยมี Storage Oscilloscope ชนิดอนาลอกเท่านั้น ไม่สามารถเชื่อมต่อตรงยังคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลได้ จึงอาศัยกระบวนการ capture ภาพผ่าน VDO card ในรูปของ graphic file แล้วใช้โปรแกรมประมวลผลที่พัฒนาขึ้นแปลง graphic file ของรูปคลื่นให้เป็น data file หรือ text file สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์อ่านค่ากราฟนั้น ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นจากโปรแกรมวิชวลเบสิก (ภาคผนวก ข) โดยใช้หลักการอ่านค่าตำแหน่งพิกเซลและความเข้มของสีกราฟ และนำค่าตำแหน่งพิกเซลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยตามค่าความเข้มดังไดอะแกรมในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงลำดับการประมวลผลสัญญาณ

3.5 ระบบขับเคลื่อนภายในสุญญากาศ

เป็นระบบที่ใช้ในการเลื่อนตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในสุญญากาศเพื่อช่วยลดเวลาหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากในการทดลองภายใต้ความดันสุญญากาศ ต้องใช้เวลาในการปรับความดันในระบบให้อยู่ในย่านที่ต้องการ นาน 3-4 ชั่วโมง ดังนั้นในการทดลองเพื่อปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น การเคลื่อนตำแหน่งโพรบวัดกระแสเพื่อวัดกระแสที่ระยะต่างๆ เคลื่อนตำแหน่งของระบบโฟกัสเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสม เป็นต้น จะเห็นว่าสามารถได้ข้อมูลเพียงแค่ 2 จุดต่อวัน ถ้าการทดลอง 1 ชุด ต้องการ 10 จุด จะต้องทำงานอย่างต่อเนื่องอย่างน้อย 5 วัน โดยปราศจากอุปกรณ์เสริมด้านไฟฟ้า การออกซิเดชันของโพรบ อีกทั้งกรณีที่ต้องการยืนยันข้อมูลการทดลองโดยการทดลองซ้ำยังทำได้ลำบาก ซึ่งจากการใช้ระบบขับเคลื่อนภายในสุญญากาศพบว่าสามารถลดระยะเวลาในการทดลองบางการทดลองได้ถึง 8-10 เท่าซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมการหมุนของสเตปมอเตอร์โดยส่งสัญญาณควบคุมผ่านพอร์ตขนานเข้าไปยังวงจรถรานซิสเตอร์เพื่อขยายขนาดของสัญญาณควบคุมและส่งสัญญาณไปควบคุมการหมุนของมอเตอร์ เพื่อหมุนแกนหมุนเกลียวขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่างๆ ให้สามารถเคลื่อนที่ทั้งไปและกลับได้ ดังรูปที่ 3.19



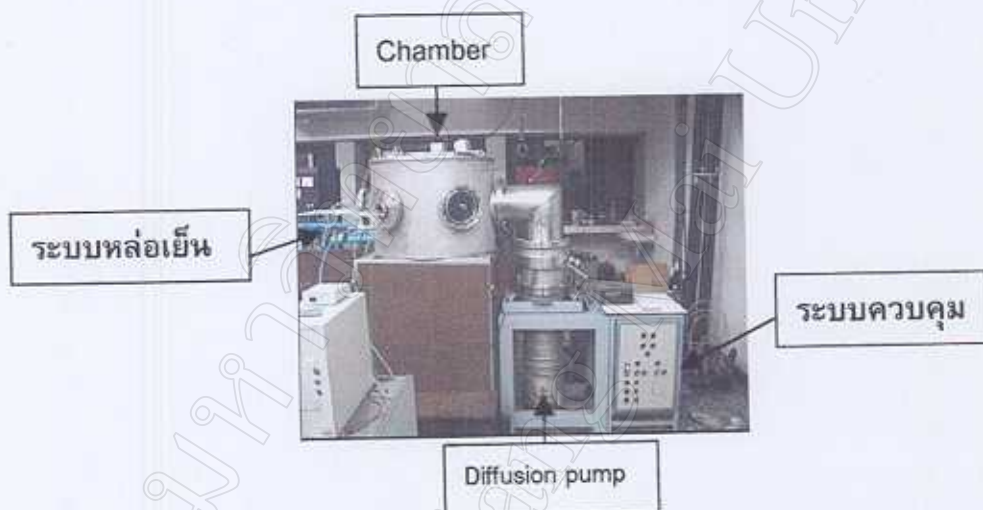
รูปที่ 3.19 แสดงระบบขับเคลื่อนภายในสุญญากาศ

3.6 ระบบสนับสนุน

ระบบสนับสนุนเป็นระบบที่สำคัญระบบหนึ่ง เพราะถ้าระบบมีปัญหาจะไม่สามารถทำการทดลองได้ ประกอบกับทางห้องวิจัยไม่มีช่างเทคนิค ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องเข้าใจระบบและดูแลระบบได้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.6.1 ระบบสุญญากาศ

การเคลือบฝังไอออน (PIII) ต้องปฏิบัติการที่ความดันต่ำ ระดับ 10^{-6} Torr ระบบสุญญากาศจะเป็นระบบที่ใช้ปรับความดันให้ต่ำลงถึงระดับที่ต้องการ ซึ่งประกอบด้วย แคมเบอร์ (chamber) ปั๊มกลโรตารี (Mechanical rotary pump) และปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Vapor diffusion pump) ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แสดงระบบสุญญากาศ

3.6.2 ระบบสนับสนุนอื่นๆ

ในงานวิจัยนี้นอกจากจะมีระบบหลักๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีระบบต่างๆ ที่มาสนับสนุน เช่น ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ ระบบผลิตน้ำไร้ประจุ ซึ่งมีแผนผังดังภาคผนวก ง