

บทที่ 4

ผลการทดลอง

เนื่องจากความต้องการของงานปรับปรุงคุณสมบัติเชิงผิววัสดุประกอบไปด้วย ความสามารถในการปรับปรุงคุณสมบัติที่หลากหลาย ความหนา บาง การติดแน่นของฟิล์ม ความ Uniform และความเรียบของฟิล์ม ซึ่งในระบบ PIII ที่มี MEVVA เป็นหัวกำเนิดนั้นความต้องการดังกล่าวจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติต่างๆ เช่น ประสิทธิภาพในการผลิตพลาสมาของโลหะต่างๆ ปริมาณความหนาแน่นและพลังงานในการตกกระทบเป้าของอนุภาคไอออน ความ Uniform ของลำพลาสมา และปริมาณอนุภาคนิวตรอนในพลาสมา ดังนั้นก่อนที่จะนำระบบไปประยุกต์ใช้งาน จำเป็นจะต้องเก็บรวบรวมคุณสมบัติเฉพาะของระบบเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนา ให้มีความเชื่อถือได้ โดยคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้จะสัมพันธ์กับสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางแสง สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้จะเป็นการทดลองเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลคุณสมบัติทางไฟฟ้าของระบบ PIII ที่มี MEVVA เป็นหัวกำเนิดพลาสมา โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการทดลองเพื่อพัฒนาระบบหม้อแปลงทอรอยด์วัดกระแสสำหรับวัดกระแสอาร์กของ MEVVA แล้วนำระบบที่ได้รับการพัฒนาแล้วไปใช้เป็นเครื่องมือในการวัดกระแสอาร์กในการทดลอง ขั้นตอนต่อไป สำหรับการทดลองขั้นตอนที่ 2 นั้น เป็นการทดลองเพื่อศึกษาและพัฒนาใช้ MEVVA ในระบบ PIII โดยเริ่มที่การหาค่าศักย์ไบอัสซึ่งให้กระแสไอออนอิมิต์จากคุณสมบัติของ IV curve แล้วนำค่าศักย์ไบอัสที่ได้ไปใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพ หรือความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์กกับกระแสไอออนอิมิต์ของโลหะแคโทด 5 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม ไททาเนียม นิกเกิล ทองแดง และเหล็ก ศึกษาแนวโน้มการลดลงของกระแสไอออนอิมิต์ที่ระยะต่างๆ ปรับตำแหน่งโฟกัสเพื่อหาดำแหน่งแม่เหล็กถาวรโฟกัสและโซลินอยด์โฟกัสที่ได้กระแสไอออนสูงสุด ทดลองใช้โซลินอยด์ลำเลียง 2 แบบ คือโซลินอยด์โค้งและตรง เพื่อเปรียบเทียบผลที่มีต่อการลำเลียงพลาสมาของโซลินอยด์ลำเลียงแต่ละแบบ และหาดำแหน่งแม่เหล็กโฟกัสซึ่งให้กระแสไอออนสูงสุดของโซลินอยด์ลำเลียงแต่ละแบบ ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนการทดลองและผลการทดลองดังนี้

4.1 การพัฒนาระบบวัดกระแสอาร์กด้วยหม้อแปลงทอรอยด์วัดกระแส

ในการพัฒนาระบบวัดกระแสอาร์ก ได้พัฒนาระบบวัดกระแสที่ไม่สัมผัสกับวงจร 2 ระบบ คือ หม้อแปลงทอรอยด์วัดกระแส และฮอลล์โพรบ โดยทำการทดลองเทียบกับ ตัวต้านทานชนิด เมื่อใช้ตัวต้านทานชนิดเป็นตัวอ้างอิงพบว่าใช้งานได้ดีทั้งสองระบบ แต่ในการใช้งานจริง ระบบหม้อแปลงทอรอยด์จะใช้งานได้สะดวกกว่า เพราะมีขนาดเล็กและไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟ ในการทดลอง จึงใช้ระบบทอรอยด์วัดกระแสอาร์กเป็นหลัก ดังนั้นในส่วนของการพัฒนาระบบวัดกระแสอาร์ก จึงขอเสนอเพียงการทดลองเพื่อพัฒนาระบบทอรอยด์วัดกระแสและในส่วนของฮอลล์โพรบจะมีรายละเอียดในภาคผนวก ค

4.1.1 การทดลองหาค่าจำนวนรอบของทอรอยด์ที่เหมาะสมกับการอินทิเกรตด้วยโปรแกรม

จากทฤษฎีของทอรอยด์วัดกระแสในบทที่ 2 (หัวข้อ 2.6.3) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านทฤษฎีของทอรอยด์ จะแปรผันโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของกระแสไฟฟ้าที่ต้องการวัดหรือกระแสที่ไหลในแนวแกนกลางของทอรอยด์ ดังสมการที่ 4.1

$$\mathcal{E}_{\text{sec ond}} = -KN_2 \frac{di_1}{dt} \quad \text{..... (4.1)}$$

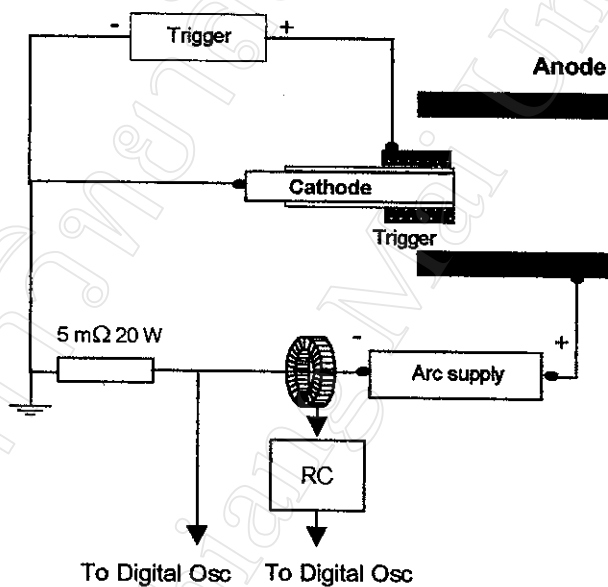
เมื่อ $K = \left(\frac{\mu_0 h}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \right)$ คือ ค่าคงที่ของทอรอยด์
 $N_2 =$ จำนวนรอบของทอรอยด์

จากสมการที่ 4.1 ถ้ากำหนดขนาดแกนของทอรอยด์ให้คงที่ ค่าที่จะกำหนดช่วงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้อยู่ในช่วงที่เครื่องมือวัดหรือออสซิลโลสโคปสามารถอ่านค่าได้ คือจำนวนรอบของทอรอยด์และอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลา ดังนั้น การทดลองเพื่อหาค่าจำนวนรอบของทอรอยด์ที่เหมาะสมกับช่วงกระแสที่ต้องการวัดจึงมีความสำคัญ สำหรับการกำหนดขนาดของแกนทอรอยด์ ได้ออกแบบให้มีขนาดเล็ก แต่มีที่

วางเพียงพอกับจำนวนรอบของทอรอยด์และฉนวนที่หุ้มเสริมซึ่งมีขนาด ดังรูปที่ 3.17 (บทที่ 3)

4.1.11 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

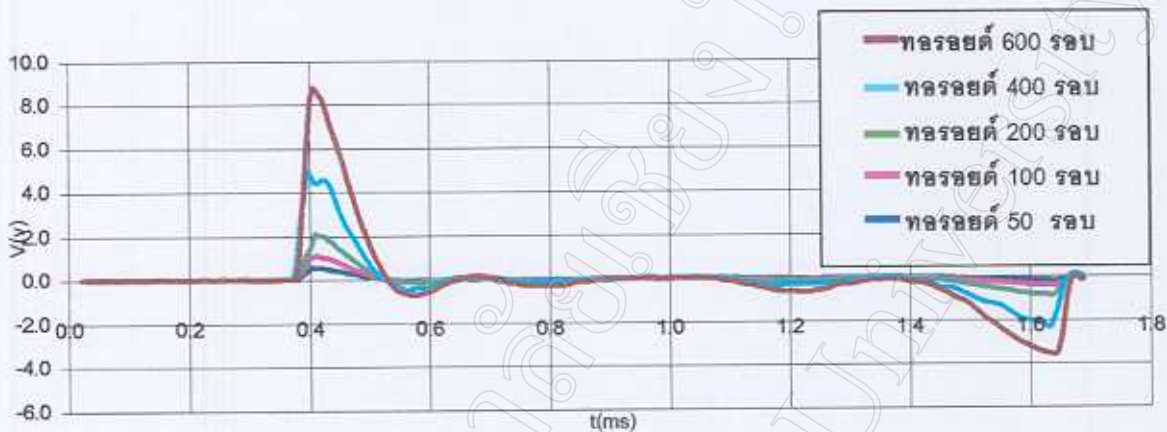
ต่อความต้านทานชั้น 5 มิลลิโอมห์ 20 วัตต์และระบบทอรอยด์วัดกระแสอนุกรมกับวงจรอาร์กของ MEVVA ดังรูปที่ 4.1 ทำการอาร์กในสุญญากาศที่ศักย์อาร์ก 500 โวลต์และวัดความต่างศักย์ตกคร่อมความต้านทานชั้นและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของทอรอยด์ 50 100 200 400 และ 600 รอบตามลำดับ ด้วยดิจิตอลออสซิลโคปและเชื่อมต่อสัญญาณเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์และประมวลผล



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรอย่างง่ายของการทดลองหาค่าจำนวนรอบที่เหมาะสมของทอรอยด์

4.1.12 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองจะได้สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่วัดได้จาก
ทอรรอยด์จำนวนรอบต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.2

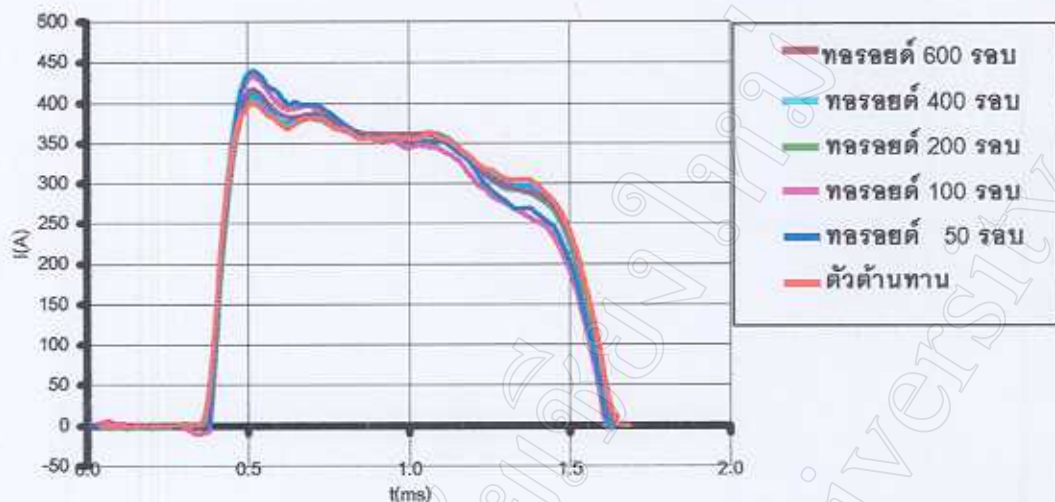


รูปที่ 4.2 แสดงกราฟแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่วัดได้จากทอรรอยด์วัดกระแสจำนวนรอบต่าง ๆ

จากรูปกราฟที่ 4.2 จะพบว่าสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่วัดจากทอรรอยด์จำนวน 50 รอบ และ 100 รอบมีขนาดของสัญญาณค่อนข้างต่ำ และเมื่อนำสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งหมดมาอินทิเกรตด้วยโปรแกรมอินทิเกรต (ภาคผนวก ข) และแทนค่าคงที่และจำนวนรอบของทอรรอยด์เพื่อหากระแสดังสมการที่ 4.2

$$i_1 = \frac{1}{KN_2} \int \mathcal{E}_{\text{second}} dt \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

จะได้กราฟของสัญญาณกระแสดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟสัญญาณกระแสอาร์กที่ได้จากการอินทิเกรตทอรอยด์จำนวนรอบต่าง ๆ

จากกราฟจะพบว่าสัญญาณกระแสอาร์กที่ได้จากทอรอยด์จำนวนตั้งแต่ 200 รอบขึ้นไปจะมีลักษณะเหมือนกันและมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณที่วัดได้จากตัวต้านทานชนิด ดังนั้นสรุปได้ว่าจำนวนรอบของทอรอยด์ที่เหมาะสมควรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 200 รอบขึ้นไป

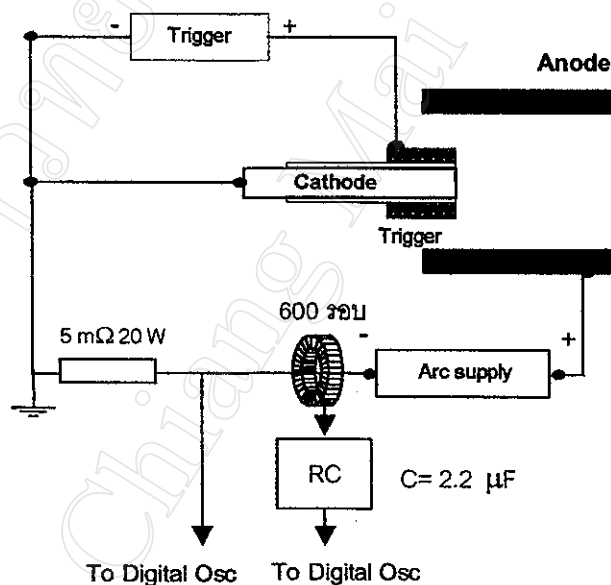
4.1.2 การทดลองหาเวลาคงค่าของวงจรอาร์ซี (Time constant) ที่เหมาะสมในการอินทิเกรตด้วยวงจรอาร์ดแวนร์

การอินทิเกรตด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะมีความแม่นยำค่อนข้างสูงแต่ต้องใช้เวลาในการประมวลผลข้อมูล สำหรับการอินทิเกรตด้วยวงจรอาร์ซีพาสซีฟนั้นสัญญาณที่วัดได้จะเป็นสัญญาณที่อินทิเกรตแล้วจึงมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณกระแสอาร์กแต่ต้องหาเงื่อนไขที่เหมาะสมได้แก่ จำนวนรอบของทอรอยด์และเวลาคงค่า (time constant) ของวงจรอาร์ซี ในส่วนของจำนวนรอบนั้น เนื่องจากค่าคงที่ของการอินทิเกรตค่อนข้างต่ำเป็นผลให้สัญญาณเอาต์พุตต่ำด้วย ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้ทอรอยด์ 600 รอบ (ซึ่งมาก

กว่า 200 รอบตามที่สรุปใน 4.1.1) เพื่อไม่ให้สัญญาณที่อินทิเกรตด้วยวงจรรารชีฟาสซีฟ
แล้วมีค่าต่ำเกินไป

4.1.2.1 การทดลอง

ต่อความต้านทานชั้นดี 5 มิลลิโอมห์ 20 วัดต์และทอรอยด์วัดกระแส 600 รอบ
อนุกรมกับวงจรอาร์กของ MEVVA ต่อขลวดลวดขั้วขั้วของทอรอยด์เข้ากับวงจรอาร์กซีฟาส
ซีฟท์ที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ 2.2 ไมโครฟารัดและตัวต้านทาน 3 กิโลโอมห์ ดังรูปที่ 4.1
ทำการอาร์กในสุญญากาศที่ศักย์อาร์ก 500 โวลต์และวัดความต่างศักย์ตกคร่อมความ
ต้านทานชั้นดีและตัวเก็บประจุของวงจรอาร์กซีฟาสซีฟท์ด้วยดิจิตอลออสซิลอสโคปและ
เชื่อมต่อสัญญาณเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนเวลาคงค่า หรือ
ความต้านทานของวงจรอาร์กซีฟาสซีฟท์เป็น 3.8 กิโลโอมห์และ 6.8 กิโลโอมห์ตามลำดับ



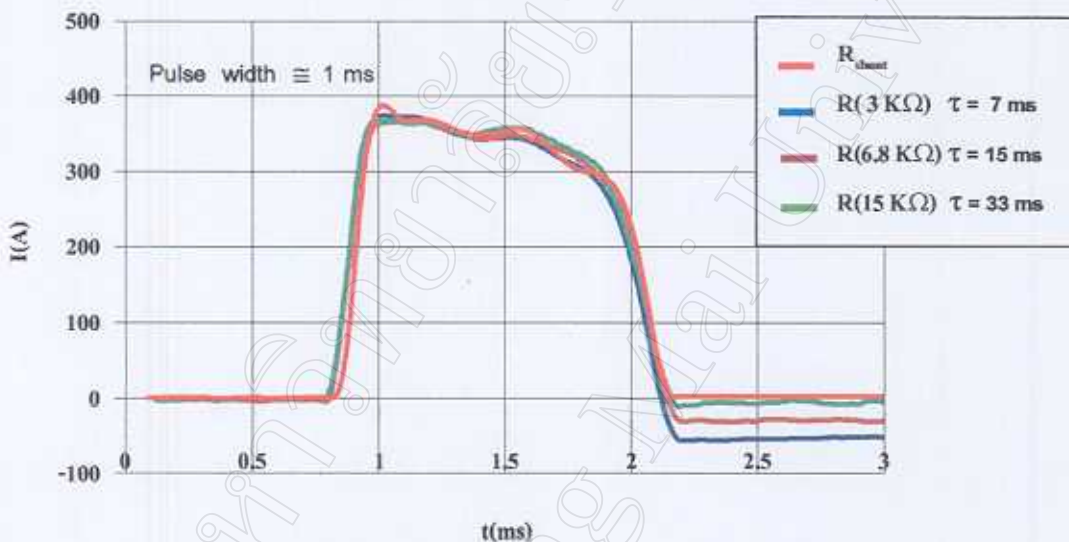
รูปที่ 4.4 แสดงวงจรอย่างง่ายของการทดลองหาค่า RC หรือเวลาคงค่าที่เหมาะสม

4.1.2.2 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อนำสัญญาณที่วัดได้มาคำนวณหาค่ากระแสอาร์ก ดังสมการที่ 4.3

$$i_1 = V_{out} \frac{RC}{KN_2} \dots\dots\dots (4.3)$$

จะได้กราฟกระแสอาร์กดังรูปที่ 4.5



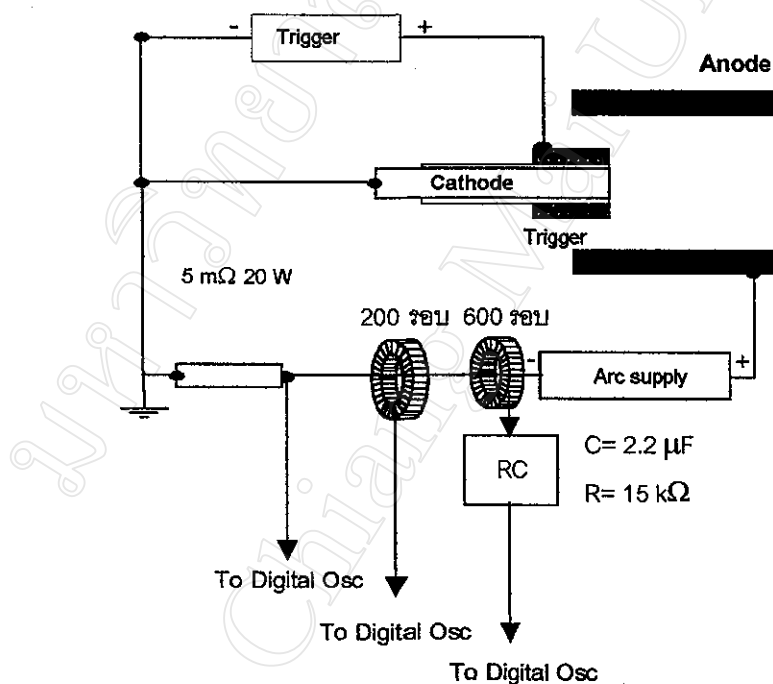
รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณกระแสที่วัดได้จากการอินทิเกรตแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของทอรอยด์ 600 รอบ ด้วยวงจร RC passive ที่มีค่าความต้านทานหรือเวลาคงค่าค่าต่างๆ

จากกราฟจะพบว่าเมื่อใช้ค่าความต้านทานหรือค่าเวลาคงค่าต่ำๆ กราฟจะมีช่วงลบมาก แต่เมื่อเพิ่มค่าเวลาคงค่ามากขึ้น กราฟช่วงลบจะลดลง และเมื่อใช้ค่าความต้านทาน 15 กิโลโอห์ม หรือค่าเวลาคงค่าเป็น 30 เท่า ของความกว้างพัลส์ของกระแสอาร์ก กราฟช่วงลบจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นในการอินทิเกรตด้วยวงจรอาร์ชีเวอร์ใช้วงจรที่มีค่าเวลาคงค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 30 เท่าของความกว้างพัลส์กระแสที่ต้องการวัด

4.1.3 การทดลองเพื่อสอบเทียบทอรอยต์วัดกระแสที่อินทิเกรตด้วยโปรแกรม และวงจรอาร์ชีฟาสซีฟ

4.1.3.1 การทดลอง

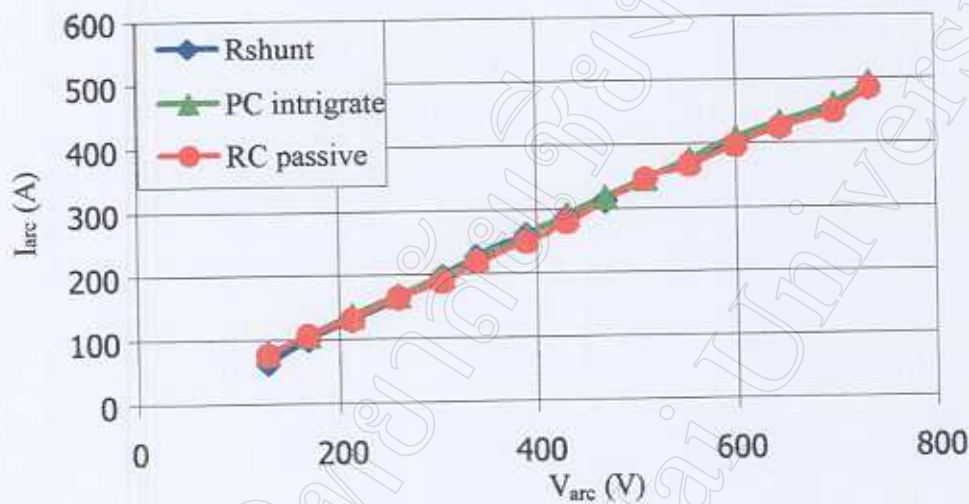
ต่อความต้านทานชั้น 5 มิลลิโห์ม 20 วัตต์ ทอรอยต์วัดกระแส 200 รอบ และทอรอยต์ 600 รอบที่ประกอบกับวงจรอาร์ชีฟาสซีฟที่มีตัวต้านทาน 15 กิโลโห์มและตัวเก็บประจุ 2.2 ไมโครฟารัด อนุกรมกับวงจรอาร์คของ MEVVA ดังรูปที่ 4.1 ทำการอาร์กในสุญญากาศที่ศักย์อาร์ก 130 โวลต์ ถึง 735 โวลต์พร้อมกับวัดความต่างศักย์ตกคร่อมความต้านทานชั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของทอรอยต์ 200 รอบและตัวเก็บประจุของวงจรอาร์ชีฟาสซีฟด้วยดิจิตอลออสซิลโคปและเชื่อมต่อสัญญาณเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.6 แสดงวงจรอย่างง่าย ในการทดลองสอบเทียบทอรอยต์วัดกระแส

4.1.32 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอาร์กโวลเตจและกระแสอาร์กได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอาร์กโวลเตจและกระแสอาร์ก

จากกราฟในรูปที่ 4.7 จะพบว่า กระแสอาร์กที่วัดได้จากตัวต้านทานชนิด และทอรอยด์ วัดกระแสทั้งที่อินทิเกรตด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และวงจรรีซีฟาสซีฟมีค่าแตกต่างกันน้อยกว่า 3 % ซึ่งถือว่าสามารถนำมาใช้วัดกระแสพัลส์ในการทดลองได้

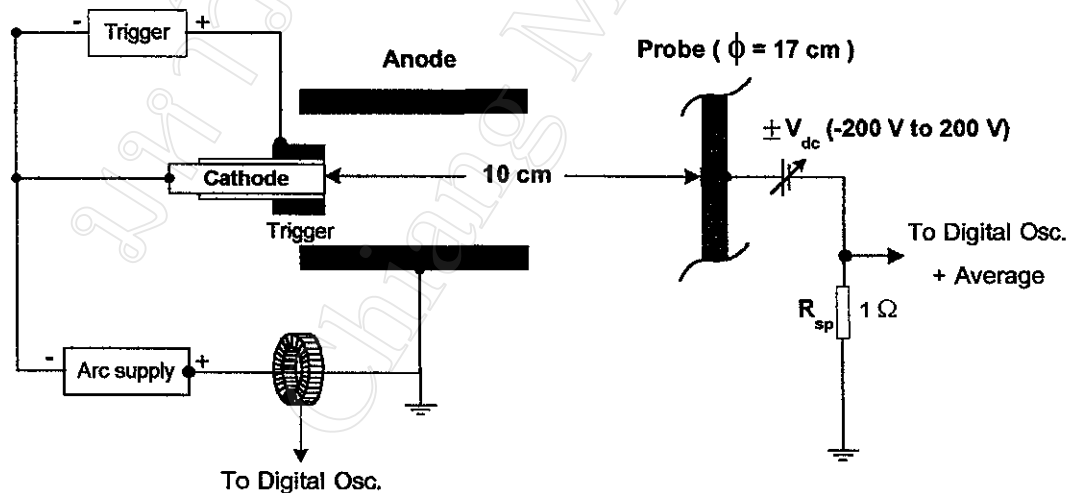
4.2 การทดลองเพื่อศึกษาและพัฒนาการใช้ MEVVA ในระบบ PIII

4.2.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ของกระแสพลาสมา กับ ศักย์ไฟฟ้าไบอัสเป้า

เนื่องจากกระแสไอออนอ้อมตัวเป็นปริมาณหนึ่งที่มีความสำคัญในระบบ PIII เพราะปริมาณดังกล่าวจะแปรผันตรงกับควมหนาแน่นและความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคไอออน นั่นคือ ถ้าปริมาณกระแสไอออนอ้อมตัวสูง ความหนาแน่นและความเร็วของอนุภาคไอออนที่ตกกระทบบเป้าจะสูงไปด้วย ดังนั้นการทดลองนี้จะเป็นการหาศักย์ไฟฟ้าไบอัสเป้าซึ่งให้กระแสไอออนอ้อมตัวของพลาสมาที่ผลิตจากโลหะแคโทด 5 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน อะลูมิเนียม ไทเทเนียม เหล็ก และทองแดง จากคุณสมบัติของ IV curve

4.2.11 การทดลอง

สำหรับการทดลองจะใช้โพรบวัดกระแส (electric probe) วางแทนตำแหน่งอุปกรณ์เป้าที่ระยะห่าง 10 cm จากแคโทด และต่อสายจากโพรบอนุกรมกับวงจรไบอัสเป้า และตัวต้านทานชั้นท์ (R_{sp}) ที่ต่อลงกราวด์ ดังรูปที่ 4.8

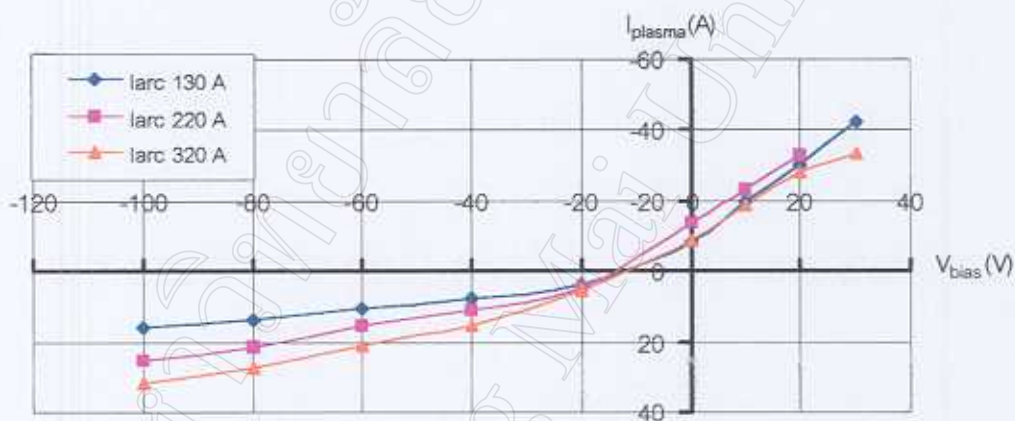


รูปที่ 4.8 แสดงวงจรอย่างง่ายที่ใช้ในการทดลองหาความสัมพันธ์ของกระแสพลาสมา กับ ศักย์ไฟฟ้าไบอัสเป้า (IV curve)

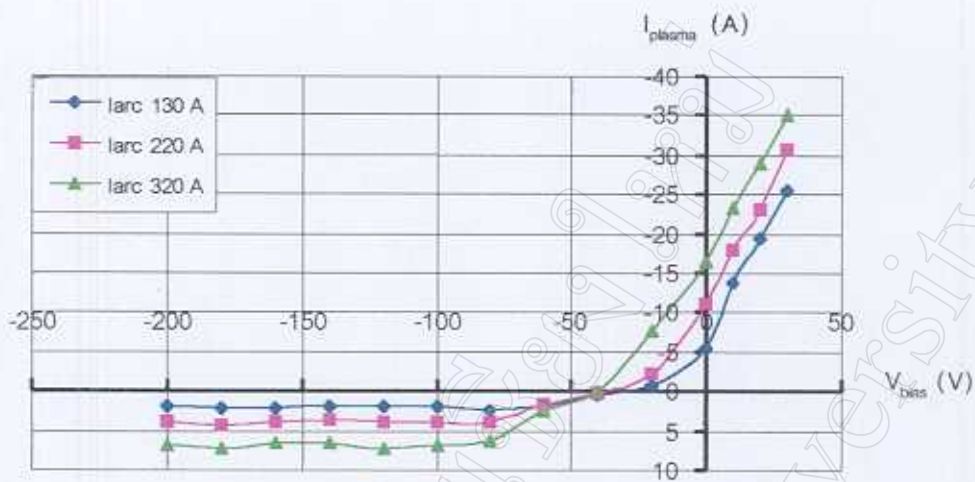
ทำการแปรค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสโพรบพร้อมทั้งวัดและบันทึกค่ากระแสพลาสมาที่ผลิตจากธาตุแคโทดแต่ละชนิด ที่กระแสอาร์ก 130 แอมแปร์ 220 แอมแปร์ และ 320 แอมแปร์ตามลำดับ นำค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสโพรบและกระแสพลาสมาที่ได้มาเขียนกราฟ IV curve

4.2.12 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

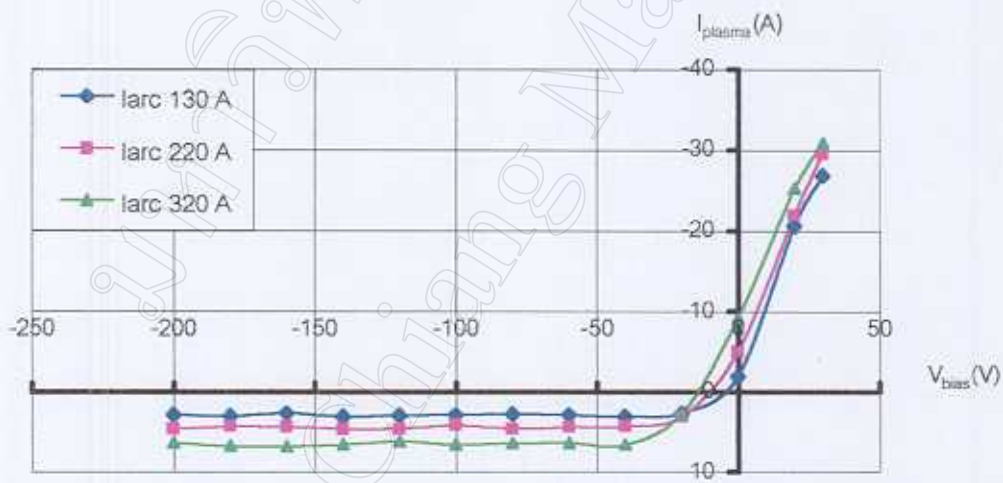
จากผลการทดลองสามารถนำข้อมูลมาเขียนกราฟ IV curve ได้ดังรูปที่ 4.9-4.13



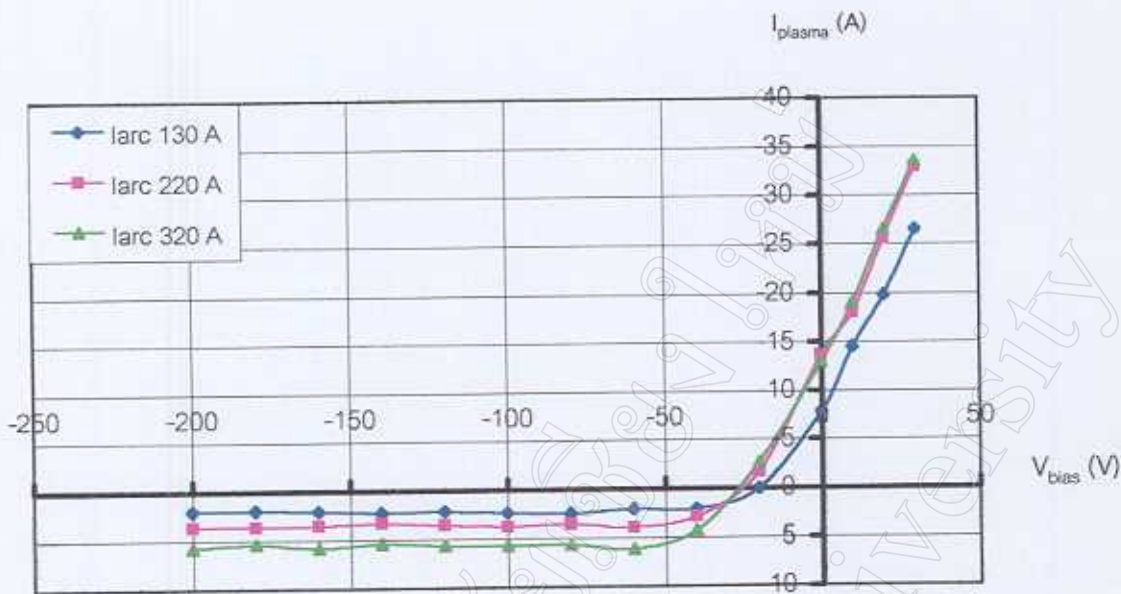
รูปที่ 4.9 แสดงกราฟ IV curve ของแคโทดคาร์บอน (C)



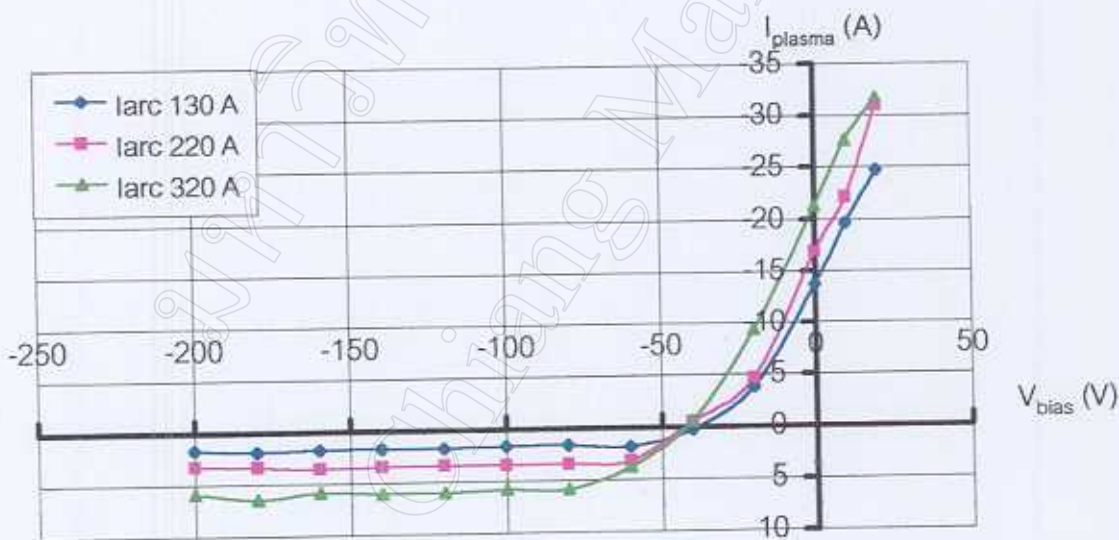
รูปที่ 4.10 แสดงกราฟ IV curve ของโลหะแคโทด อะลูมิเนียม (Al)



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟ IV curve ของโลหะแคโทดไทเทเนียม (Ti)



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟ IV curve ของโลหะแคโทดเหล็ก (Fe)



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟ IV curve ของโลหะแคโทดทองแดง (Cu)

ผลการทดลองวัดค่าความสัมพันธ์ของกระแสพลาสมากับศักย์ไฟฟ้าไบอัสเป้าที่ผลิตจากโลหะแคโทดทั้ง 5 ชนิด สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความสัมพันธ์ของกระแสพลาสมากับศักย์ไฟฟ้าไบอัสเป้าที่ผลิตจากโลหะแคโทดทั้ง 5 ชนิด

โลหะแคโทด	กระแสอาร์ก (A)	V_{bias} ต่ำสุดที่ได้ I_{ionsat} (V)	I_{ionsat} (A)
คาร์บอน (C)	130	-	-
	220	-	-
	320	-	-
อะลูมิเนียม (Al)	130	-60	2.00
	220	-80	3.82
	320	-80	6.44
ไททาเนียม (Ti)	130	-20	2.68
	220	-40	4.28
	320	-60	6.35
เหล็ก (Fe)	130	-40	2.10
	220	-60	3.90
	320	-80	5.60
ทองแดง (Cu)	130	-60	1.80
	220	-60	3.67
	320	-80	5.84

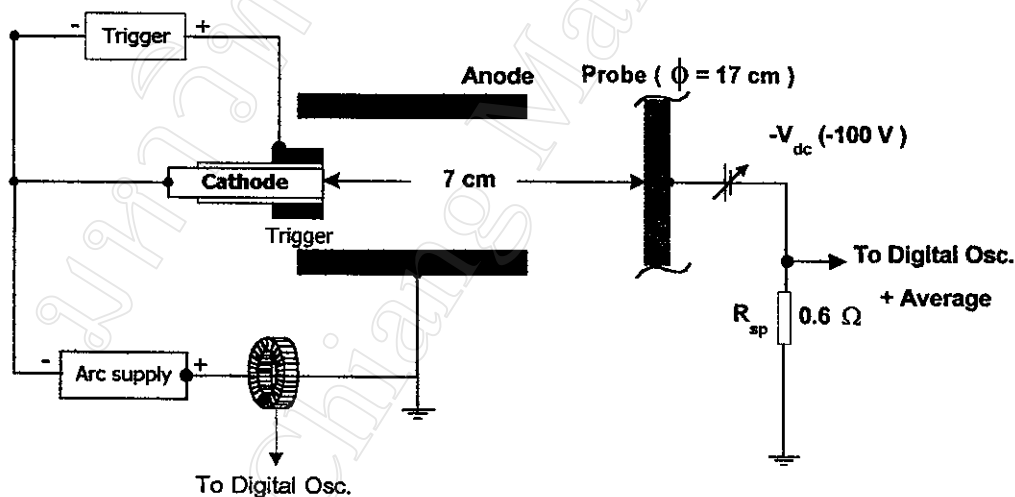
จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่ากระแสไอออนอิ่มตัวของโลหะแคโทด คือ Al, Ti, Fe และ Cu มีค่าอยู่ในระดับแอมแปร์ และกระแสไอออนที่ผลิตจากกระแสอาร์กต่ำจะอิ่มตัวเร็วกว่าที่ผลิตจากกระแสอาร์กสูง นอกจากนี้ยังพบว่า ศักย์ไบอัสที่ทำให้กระแสไอออนของโลหะ Al, Ti, Fe และ Cu แต่ละชนิดที่ผลิตจากกระแสอาร์กช่วง 130 แอมแปร์ถึง 320 แอมแปร์อิ่มตัวจะต้องมีค่าเป็นลบมากกว่า -80 โวลต์ขึ้นไป ในส่วนของคาร์บอน พบว่า ไม่สามารถหาค่าศักย์ไบอัสที่ทำให้กระแสอิ่มตัวได้ เนื่องจากกระแสไอออนที่ผลิตได้มีค่าสูงจึงทำให้เกิดการสปาร์กที่โพรบ เมื่อทำการไบอัสค่าสูงกว่า -100 โวลต์

4.2.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์กกับกระแสไอออนอิมตัวของโลหะแคโทดชนิดต่าง ๆ

การทดลองนี้จะเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์กกับกระแสไอออนอิมตัวของโลหะแคโทด 5 ชนิด คือ Al, Ti, Ni, Cu และ Fe

4.2.2.1 การทดลอง

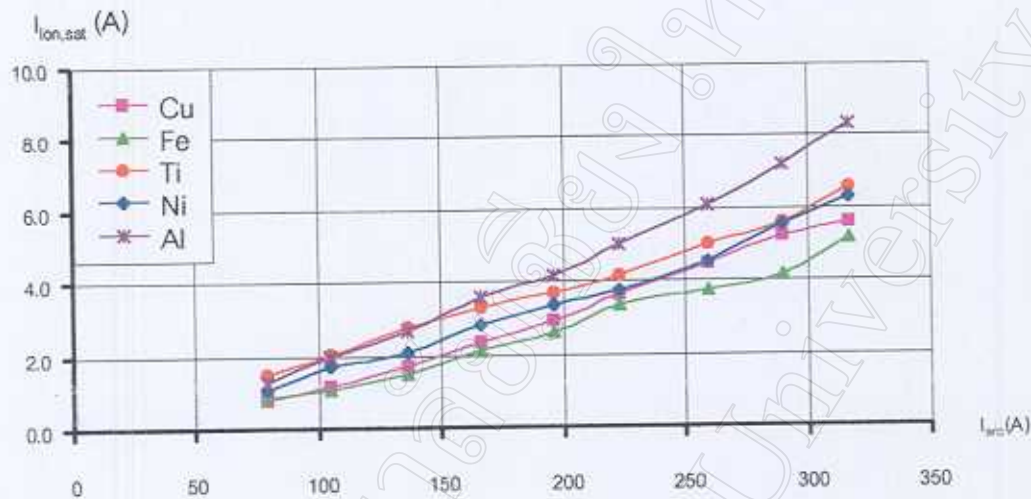
ทำการทดลองโดยนำโพรบวัดกระแส (electric probe) วางแทนตำแหน่งอุปกรณ์เป้าที่ระยะห่าง 7 cm จากโพรบและติดตั้งระบบทอรรอยด์วัดกระแสเข้ากับวงจรอาร์กดังรูปที่ 4.14 โป้สเป้าด้วยศักย์ไฟฟ้า -100 V แปรค่ากระแสอาร์กพร้อมทั้งวัดค่ากระแสไอออนอิมตัวของโลหะแคโทดแต่ละชนิด นำค่ากระแสอาร์กและกระแสไอออนอิมตัวที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์กและกระแสไอออนอิมตัว ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 แสดงวงจรอย่างง่ายที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์กกับไอออนอิมตัวของโลหะแคโทดแต่ละชนิด

4.2.2.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างไอออนอิมิตัวกับกระแสอาร์กของโลหะแคโทดแต่ละชนิด

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกระแสไอออนอิมิตัวต่อกระแสอาร์กของโลหะแคโทด 5 ชนิด

โลหะแคโทด	IE_1 (kJ/mol)	อัตราส่วนระหว่างกระแสไอออนอิมิตัวต่อกระแสอาร์ก %
Al	0.584	2.19
Ti	0.664	1.95
Ni	0.743	1.69
Cu	0.752	1.47
Fe	0.766	1.32

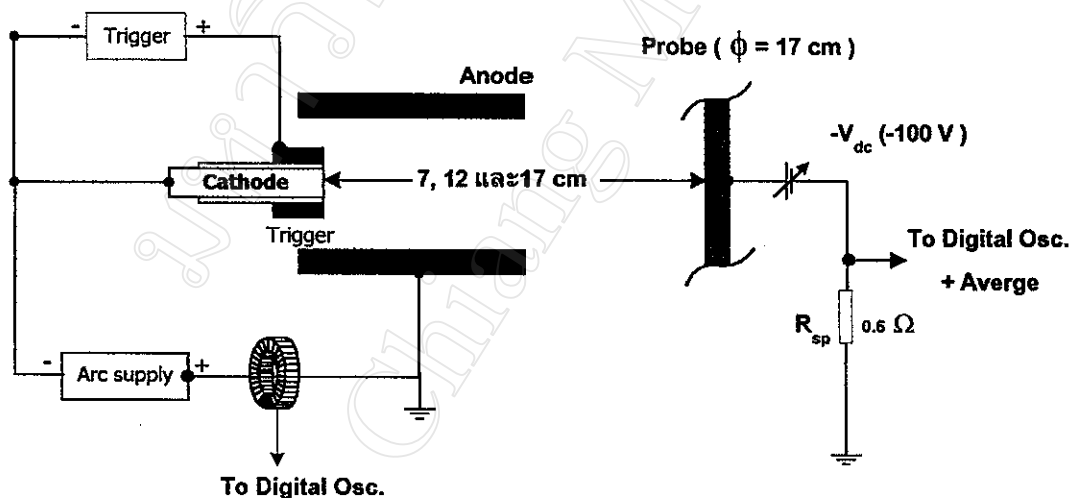
จากรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.2 พบว่าอัตราส่วนระหว่างกระแสไอออนอิมิตัวของโลหะแคโทดทั้ง 5 ชนิดจะมีค่าแปรผกผันกับพลังงานไอออนไนต์เซชันลำดับที่ 1

4.2.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนอิมิต์กับกระแสอาร์กของโลหะแคโทดทั้ง 4 ชนิด ที่ตำแหน่งต่างๆ

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์กและกระแสไอออนอิมิต์ที่ตำแหน่งต่างๆ เป็นการทดลองเพื่อให้รู้ถึงความสามารถในการผลิตกระแสไอออน นอกจากนั้นแล้วยังสามารถดูแนวโน้มการลดลงของกระแสไอออนอิมิต์เมื่อเป้าอยู่ห่างจากโลหะแคโทดออกไป

4.2.31 การทดลอง

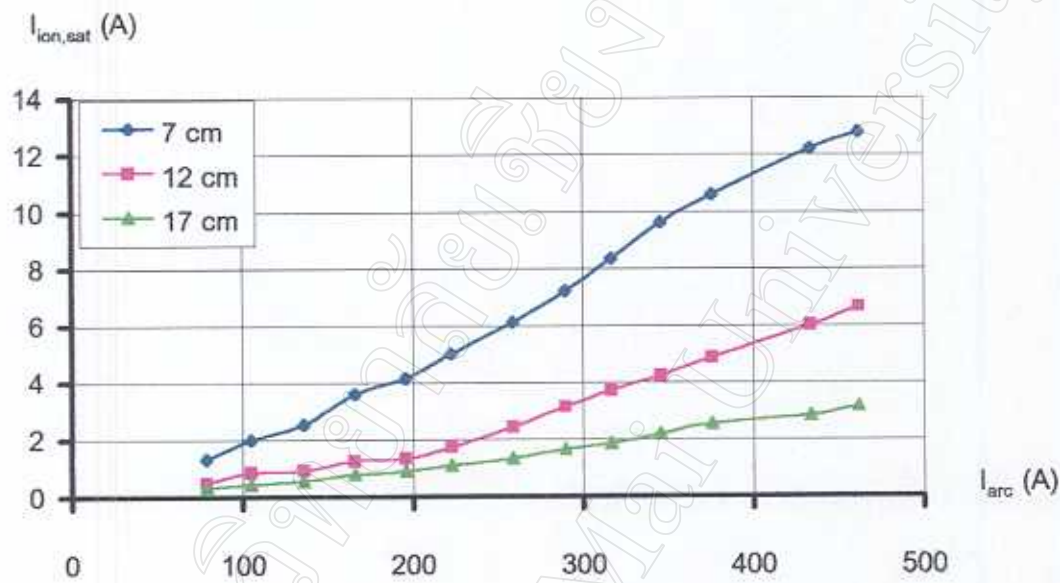
การทดลองนี้จะติดตั้งระบบการทดลองเหมือนกับการทดลองที่ 4.2.2 แต่จะแปรค่าระยะทางจากเป้าถึงโลหะแคโทดเป็น 7 cm, 12 cm และ 17 cm ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.16) โดยที่ระยะต่างๆ จะทำการแปรค่ากระแสอาร์ก พร้อมทั้งวัดกระแสไอออนอิมิต์ และนำกระแสไอออนอิมิต์ที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์กและกระแสไอออนอิมิต์ที่ระยะต่างๆ



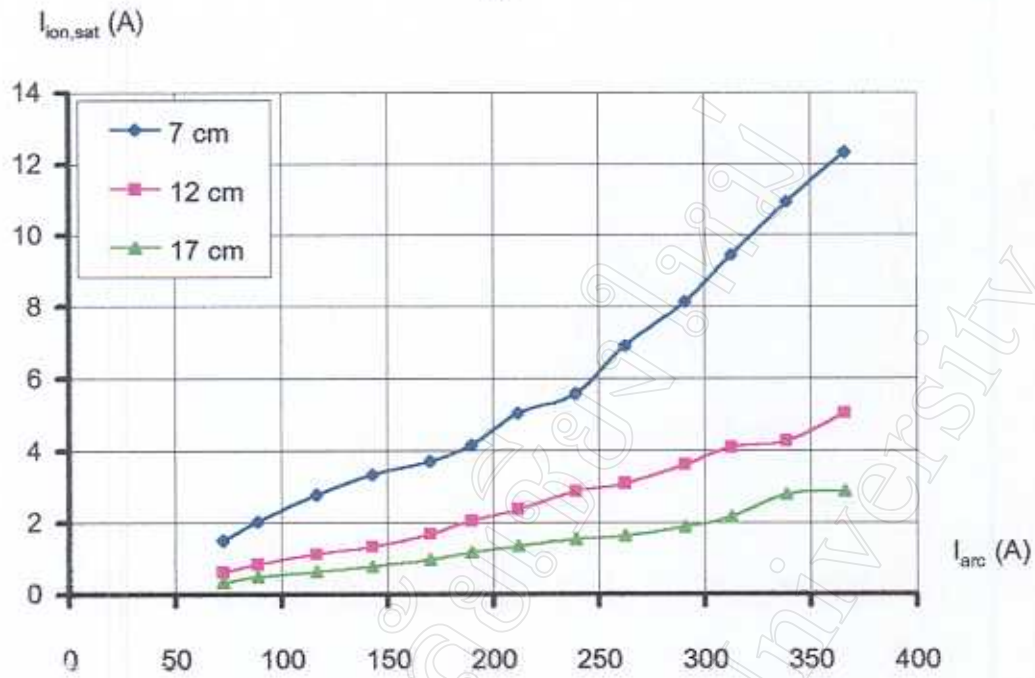
รูปที่ 4.16 แสดงวงจรอย่างง่ายที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนอิมิต์กับระยะห่างจากเป้าถึงแคโทด

4.2.32 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

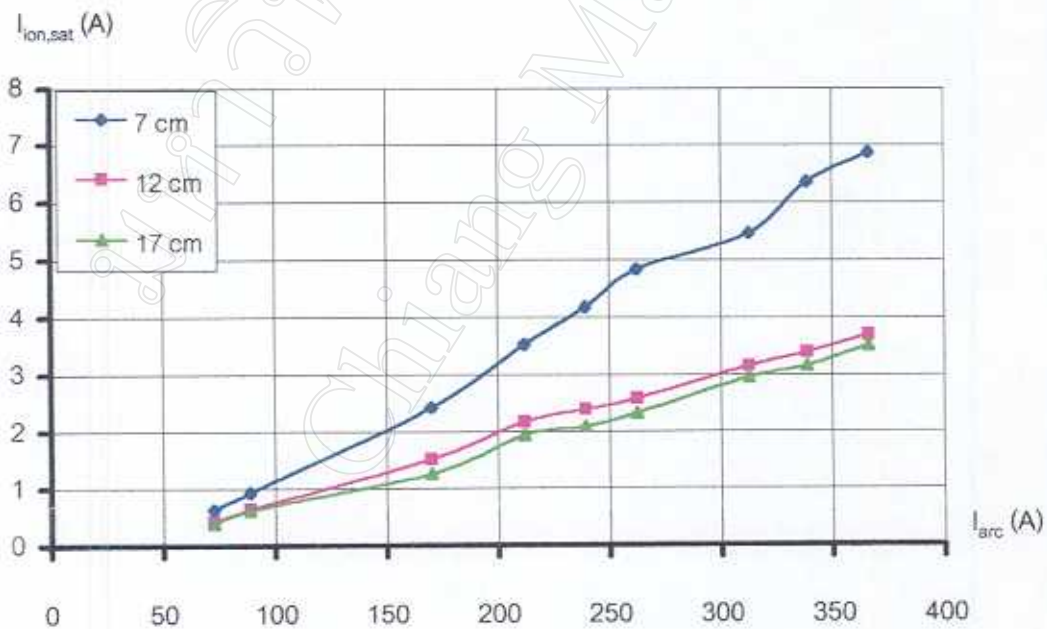
จากการทดลองสามารถนำค่ากระแสอาร์กและกระแสไอออนอิมิตัวของโลหะแคโทดแต่ละชนิดมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.17 - 4.20



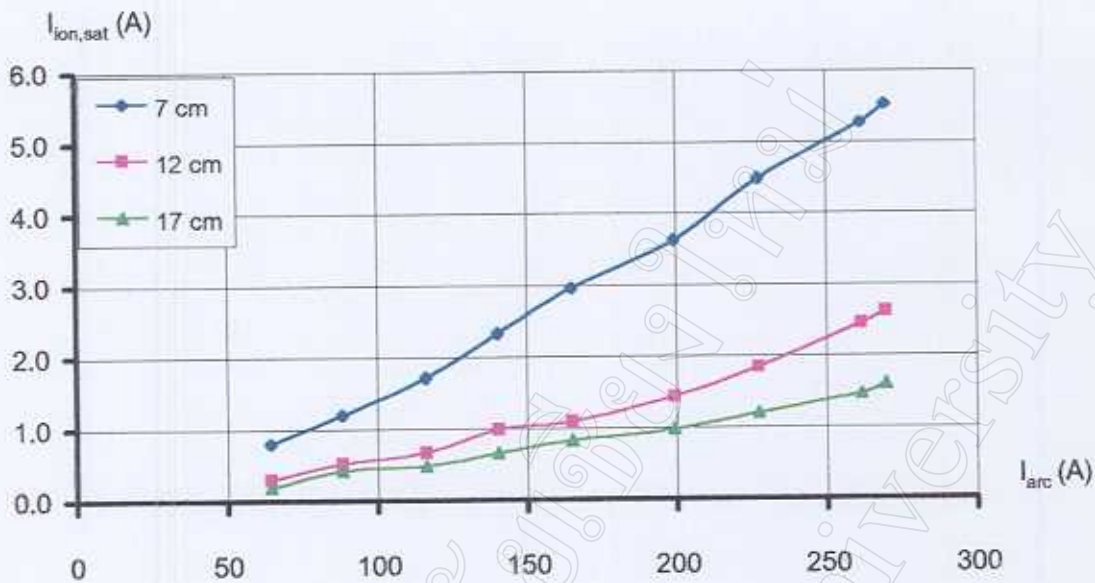
รูปที่ 4.17 ค่ากระแสอาร์กและกระแสไอออนอิมิตัวของโลหะแคโทดอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.18 ค่ากระแสอาร์กและกระแสไอออนอิ่มตัวของโลหะแคโทดไทเทเนียม



รูปที่ 4.19 ค่ากระแสอาร์กและกระแสไอออนอิ่มตัวของโลหะแคโทดเหล็ก



รูปที่ 4.20 ค่ากระแสอาร์กและกระแสไอออนอิ่มตัวของโลหะแคโทดทองแดง

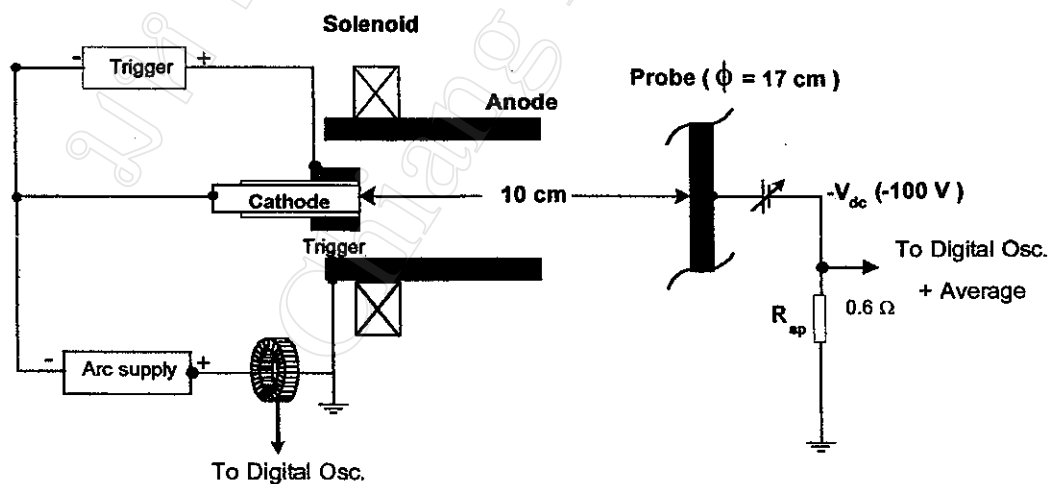
จากกราฟที่ 4.17 – 4.20 พบว่า กระแสไอออนอิ่มตัวของโลหะแคโทดทั้ง 4 ชนิด ที่ระยะ 7 cm 12 cm และ 17 cm จะมีค่าแปรผันตรงกับกระแสอาร์ก ($I_{ion,sat} \propto I_{arc}$) โดย กระแสไอออนอิ่มตัวที่ผลิตจากโลหะแคโทด Al, Ti, Ni, Cu และ Fe ที่ระยะ 7 cm จะมีค่า เป็น 2.2%, 2.0%, 1.7%, 1.5% และ 1.3% ของกระแสอาร์กตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบ ว่า เมื่อระยะโพรบเพิ่มขึ้นเป็น 12 cm และ 17 cm กระแสไอออนอิ่มตัวจะมีค่าลดลง ประมาณ 50% และ 70% ของกระแสไอออนอิ่มตัวที่วัดได้ที่ระยะ 7 cm ตามลำดับ

4.2.4 การทดลองเพิ่มปริมาณกระแสไอออนอ้อมตัวด้วยการเลื่อนตำแหน่งโซลินอยด์ไฟกัสจากบริเวณผิวหน้าโลหะแคโทด

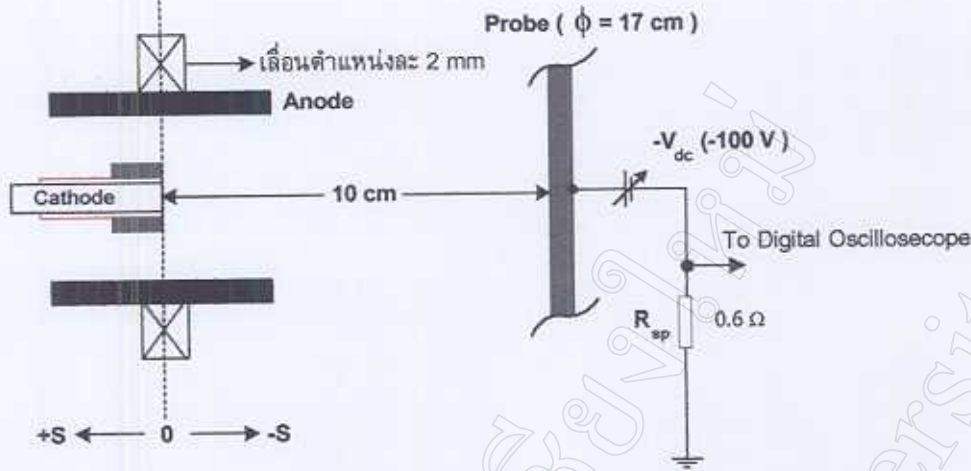
โซลินอยด์ไฟกัสเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีงานวิจัยหลายงานนำมาใช้ช่วยเพิ่มปริมาณกระแสไอออนอ้อมตัวของ MEVVA แต่งานวิจัยส่วนใหญ่จะให้ความสนใจกับขนาดของความเข้มสนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว สำหรับงานวิจัยนี้จะมุ่งความสนใจไปที่เกรเดียนต์ (gradient) ของเส้นแรงแม่เหล็ก ภายใต้สมมติฐานที่ว่า การติดตั้งตำแหน่งโปรไฟล์แม่เหล็กที่เหมาะสมกับตำแหน่งการจุดอาร์กจะสามารถเพิ่มปริมาณกระแสไอออนอ้อมตัวได้สูงสุด

4.2.41 การทดลอง

สำหรับการทดลองนี้ จะวางโพรบวัดกระแสห่างจากผิวหน้าโลหะแคโทด Fe 10 cm และไบอัสศักย์ไฟฟ้า -100 V ติดตั้งโซลินอยด์พร้อมทั้งระบบขับเคลื่อนดังรูปที่ 4.21 ทำการแปรค่าระยะระหว่างโซลินอยด์ไฟกัสกับผิวหน้าของแคโทด โดยเคลื่อนตำแหน่งโซลินอยด์ไฟกัสครั้งละ 2 mm (ดังรูปที่ 4.22) พร้อมทั้งวัดกระแสไอออนอ้อมตัวและกระแสอาร์ก แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนอ้อมตัวกับระยะจากแคโทด



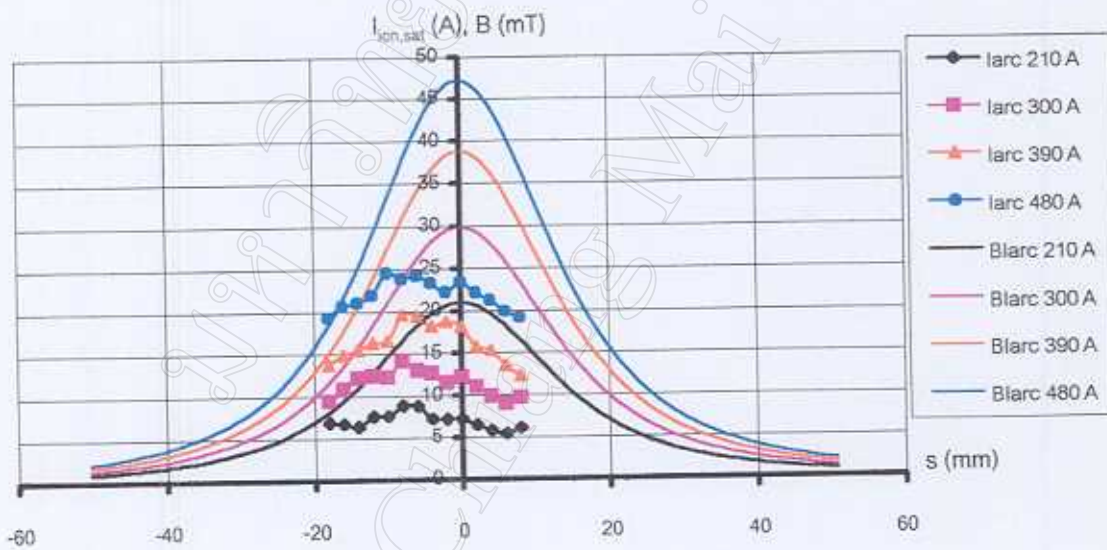
รูปที่ 4.21 แสดงวงจรอย่างง่ายในการทดลองเพิ่มปริมาณกระแสไอออนอ้อมตัวด้วยการเลื่อนตำแหน่งโซลินอยด์ไฟกัส



รูปที่ 4.22 แสดงการเคลื่อนตำแหน่งโซลินอยด์ไฟก๊สที่สัมผัสกับผิวหน้าของโลหะแคโทด

4.2.42 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถนำข้อมูลมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงผลการทดลองเพิ่มปริมาณกระแสไอออนอิมิตต์ด้วยการเคลื่อนตำแหน่งแม่เหล็กไฟก๊สจากผิวหน้าของโลหะแคโทด ซึ่งตำแหน่งที่เหมาะสมมีกระแสไอออนอิมิตต์เป็น 2.4 เท่าของระบบไม่มีไฟก๊ส

I_{arc} หมายถึง กระแสไอออนอิมิตต์ที่กระแสอาร์กตามที่ระบุ

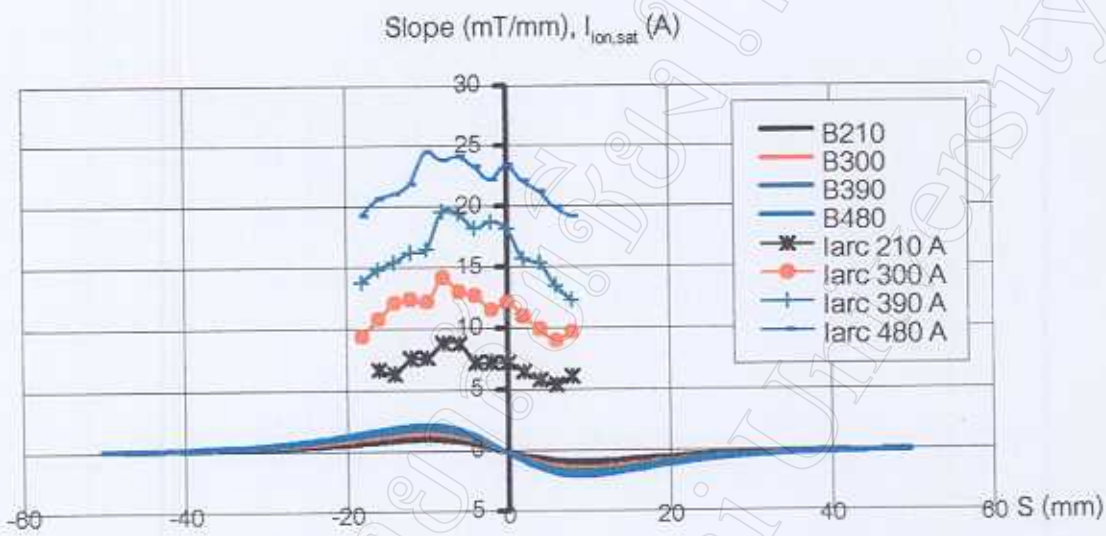
B_{arc} หมายถึง โปรไฟล์สนามแม่เหล็กจากโซลินอยด์ ที่กระแสอาร์กตามที่ระบุ

จากกราฟในรูปที่ 4.23 ระยะบนแกน X คือระยะห่างจากจุดกึ่งกลางโซลินอยด์ แกน Y เป็นแกนร่วมของค่ากระแส (A) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (mT) โดยเส้นกราฟ I_{arc} ค่าต่างๆ แสดงค่ากระแสพลาสมาที่ผลิตจากกระแสอาร์กนั้นๆ และเส้นกราฟ $B_{I_{arc}}$ ค่าต่างๆ แสดงค่าของสนามแม่เหล็กในแนวแกนกลางของโซลินอยด์ เมื่อมีกระแสนั้นไหลผ่าน ซึ่งจะพบว่ากระแสไอออนอิมพัลส์จะมีค่าสูงสุดเมื่อจุดกำเนิดพลาสมาอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางโซลินอยด์ในช่วงระยะ -7 ถึง -10 มิลลิเมตร หรือจากรูปที่ 4.22 ต้องเลื่อนโซลินอยด์ไปทางขวา 7 ถึง 10 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองเพิ่มปริมาณกระแสไอออนอิมพัลส์ด้วยการเลื่อนตำแหน่งโซลินอยด์โฟกัส

I_{arc} (A)	$I_{ion,sat,max}$ (A)	$I_{ion,sat}$ No S focus (A)	$I_{ion,sat,max}/I_{arc}$ %	Slope max (mT/mm)	B ที่จุด อาร์ก (mT)	S of $I_{ion,sat,max}$ (mm)
210	9	4	4.3	0.9	17.2	-7
300	14	6	4.7	1.2	25.7	-8
390	20	8	5.1	1.5	32.5	-8
480	25	10	5.2	1.8	39.4	-10

และจากตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง $I_{ion,sat,max}/I_{arc}$ กับ B ที่จุดอาร์กจะพบว่าค่าของกระแสไอออนอิมพัลส์จะขึ้นกับ B ที่จุดอาร์กนอกจากนั้นแล้วยังพบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมของแม่เหล็กโฟกัสคือ ตำแหน่งที่จุดอาร์กอยู่ตรงกับตำแหน่งบนโปรไฟล์ที่มีความชันหรือเกรเดียนต์สูงสุด ดังรูปที่ 4.24 โดยทำให้ได้กระแสไอออนอิมพัลส์มากกว่าเมื่อไม่ใช้ระบบโฟกัสประมาณ 2.4 เท่า

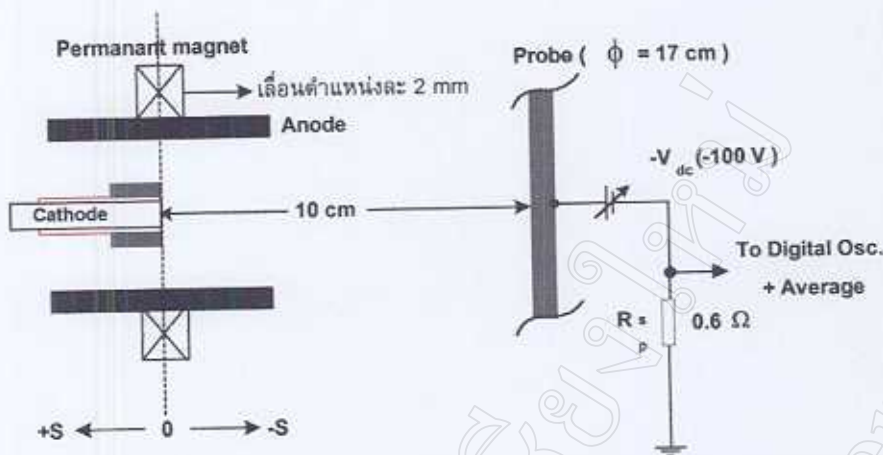


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนอิ่มตัวกับความชันของโปรไฟล์สนามแม่เหล็กในแนวแกนของโซลินอยด์โฟกัส

- I_{arc} หมายถึง กระแสไอออนอิ่มตัวที่กระแสอาร์กตามที่ระบุ
- B หมายถึง ความชันของโปรไฟล์สนามแม่เหล็กจากโซลินอยด์ที่กระแสอาร์กตามที่ระบุ

เนื่องจากโซลินอยด์ไฟฟ้าที่ใช้ต้องต่ออนุกรมกับแอโนดเพื่อให้กระแสอาร์กสร้างสนามแม่เหล็กภายในโซลินอยด์ จึงไม่สามารถถอดค่าของสนามแม่เหล็กได้ เมื่อแปรค่ากระแสอาร์ก เพื่อลดตัวแปรในการศึกษาจึงใช้แม่เหล็กถาวรแทนการใช้โซลินอยด์ไฟฟ้า

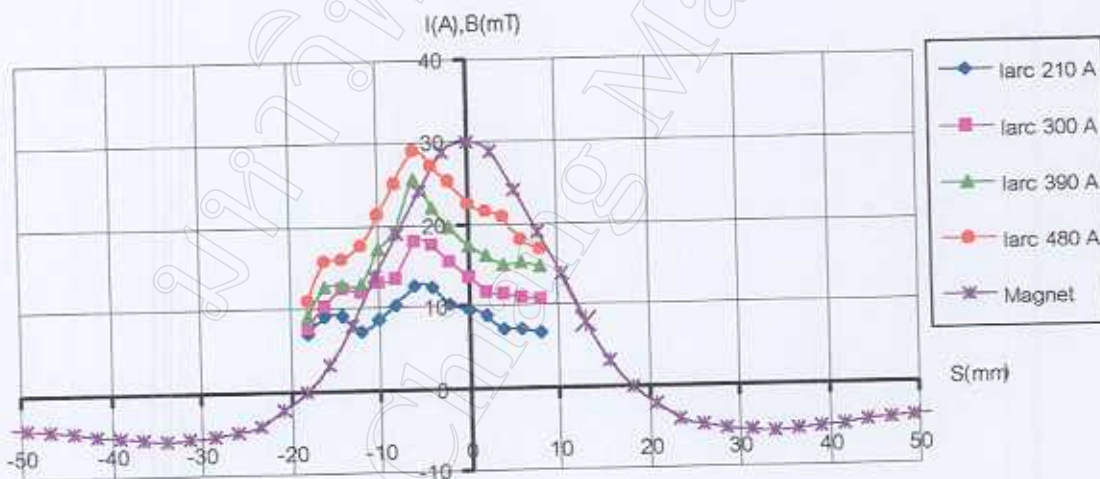
Diagram illustrating the experimental setup. A horizontal tube is shown with a probe (d) at the right end. A distance of 10 cm is marked from the left end of the tube to the probe. An anode is indicated above the tube. A magnet is indicated at the top left.



รูปที่ 4.26 แสดงการเคลื่อนตำแหน่งแม่เหล็กถาวรไฟก๊สที่สัมพันธ์กับผิวหน้าของโลหะแคโทด

4.2.52 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถนำผลการทดลองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและกระแสไอออนอิมิต์ได้ ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผลการทดลองเพิ่มปริมาณกระแสไอออนอิมิต์ด้วยการเคลื่อนตำแหน่งแม่เหล็กถาวรไฟก๊สจากผิวหน้าของโลหะแคโทด ซึ่งตำแหน่งที่เหมาะสมมีกระแสไอออนอิมิต์เป็น 3 เท่าของระบบไม่มีไฟก๊ส

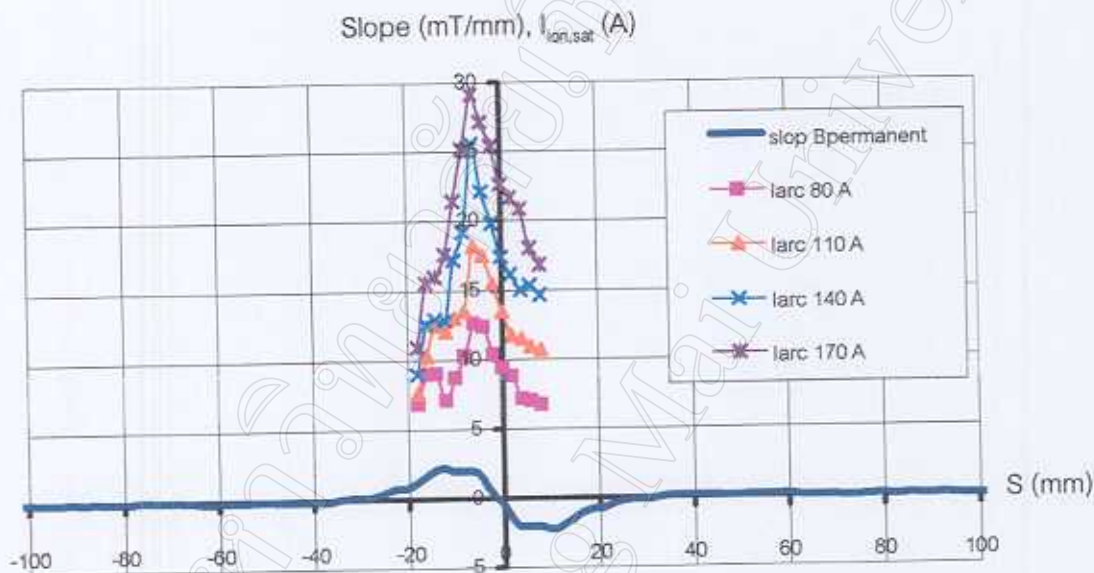
จากกราฟในรูปที่ 4.27 ระยะบนแกน X คือระยะห่างจากจุดกึ่งกลางโซลินอยด์ แกน Y เป็นแกนร่วมของค่ากระแส (A) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (mT) โดยเส้นกราฟ I_{arc} ต่างๆ แสดงค่ากระแสไอออนอ้อมตัวที่ผลิตจากกระแสอาร์กนั้นๆ และเส้นกราฟ Magnet แสดงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกนกลางของแม่เหล็กถาวร ซึ่งจะพบว่า กระแสไอออนอ้อมตัวจะมีค่าสูงสุด เมื่อจุดกำเนิดพลาสมาอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางแม่เหล็ก ในช่วงระยะ -4 ถึง -8 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับกรณีของโซลินอยด์ไฟกัสแต่กระแสไอออนอ้อมตัวสูงสุดที่ได้เมื่อใช้กระแสอาร์กเท่ากัน จะมีค่ามากกว่ากรณีของโซลินอยด์ไฟกัส ถึงแม้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้กระแสอาร์กมากกว่า 317 แอมแปร์ก็ตาม นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นจุดที่ทำให้กระแสไอออนอ้อมตัวจะเลื่อนไปทางซ้ายน้อยมากเมื่อเทียบกับกรณีของโซลินอยด์

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองเพิ่มปริมาณกระแสไอออนอ้อมตัว ด้วยการเลื่อนตำแหน่งแม่เหล็กไฟกัส

I_{arc} (A)	$I_{ion,sat,max}$ (A)	$I_{ion,sat}$ No S focus (A)	$I_{ion,sat,max}/I_{arc}$ %	Slope max (mT/mm)	B ณ จุด อาร์ก (mT)	S of $I_{ion,sat,max}$ (mm)
210	12	4	6	2.0	22	-5
300	18	6	6	1.9	22	-6
390	24	8	6	1.9	22	-6
480	29	10	6	1.9	22	-6

จากตารางที่ 4.4 จะพบว่าอัตราส่วนระหว่างกระแสไอออนอ้อมตัวสูงสุดกับกระแสอาร์กจะมีค่าคงที่ เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ และตำแหน่งของแม่เหล็กถาวรที่ทำให้กระแสไอออนอ้อมตัวสูงสุดคือ ตำแหน่งที่จุดอาร์กอยู่ตรงกับตำแหน่งโปรไฟล์แม่เหล็กที่มีความชันหรือเกรเดียนต์สูงสุด ดังรูปที่ 4.28 นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสไอออนอ้อมตัวสูงสุดในแต่ละกระแสอาร์กที่ได้มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการใช้โซลินอยด์ไฟกัสโดยมีค่ามากกว่าเมื่อไม่ใช้ระบบไฟกัส 3 เท่า ถึงแม้ว่าจะมีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุคน้อยกว่าก็ตาม ดัง

นั้นจึงสรุปได้ว่า ปริมาณกระแสไอออนอิ่มตัวจะขึ้นอยู่กับความชันของโปรไฟล์หรือแกรเดียนต์ และความเข้มข้นแม่เหล็ก โดยผลของความชันของโปรไฟล์จะมีค่ามากกว่าผลของความเข้มข้นแม่เหล็ก สำหรับแม่เหล็กถาวรถึงแม้จะมีค่าความเข้มข้นแม่เหล็กสูงสุดต่ำกว่า โซลินอยด์ แต่ก็มีการเดียนที่สูงกว่า จึงทำให้ได้กระแสไอออนอิ่มตัวสูงกว่า และเป็นที่ยากที่จะออกแบบโซลินอยด์ให้มีแกรเดียนต์เท่ากับหรือมากกว่าแม่เหล็กถาวร ดังนั้นในการใช้งานและการทดลองต่อไปจะใช้แม่เหล็กถาวรเป็นระบบโพกัส



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนอิ่มตัวกับความชันของโปรไฟล์สนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร

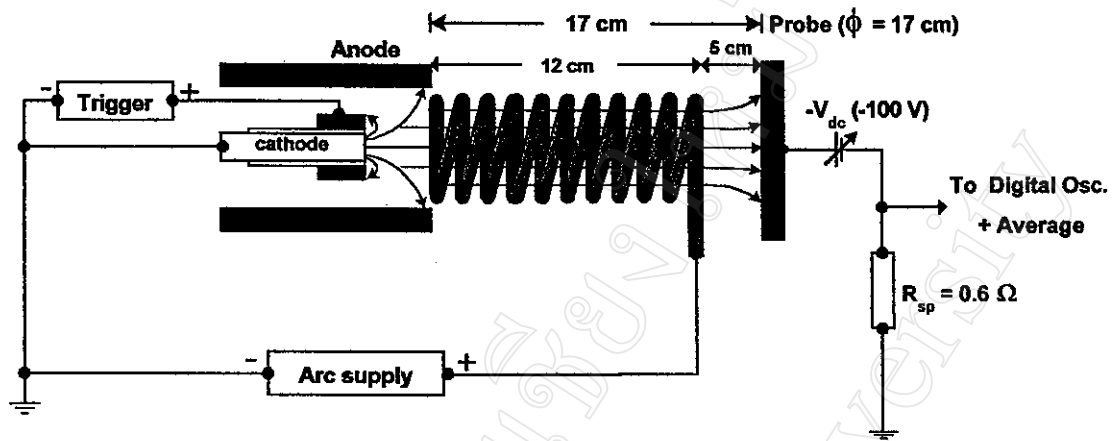
Slop Bpermanent หมายถึง ความชันของโปรไฟล์สนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร

4.2.6 การทดลองใช้โซลินอยด์ตรงและโค้งลำเลียงพลาสมา

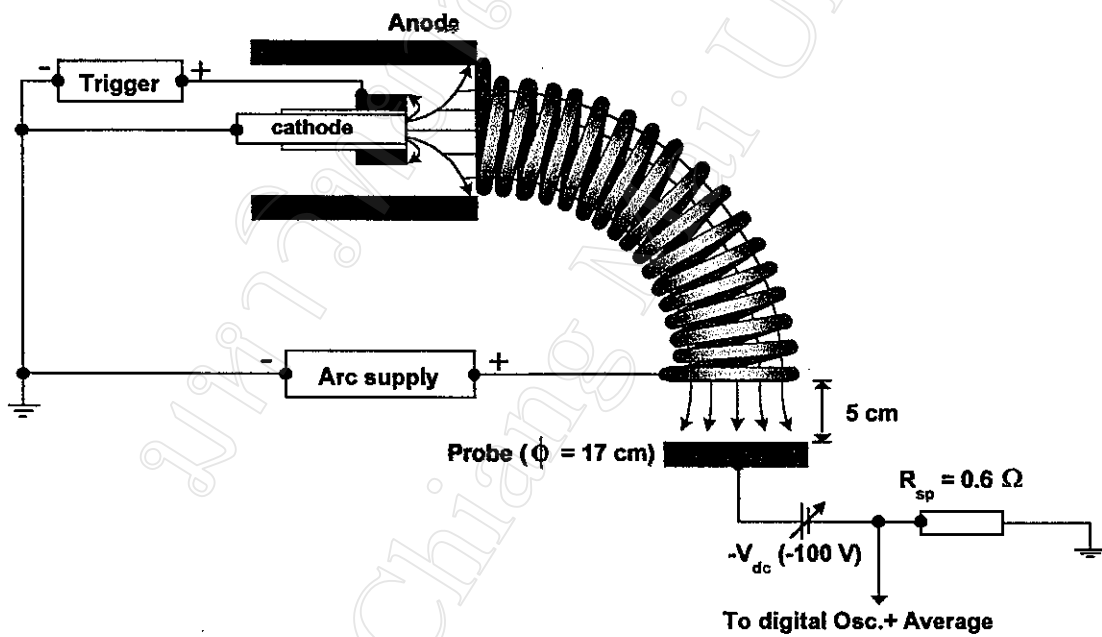
การใช้สนามแม่เหล็กในแนวแกนกลางของโซลินอยด์ลำเลียงไอออน เพื่อนำมาใช้ในระยะที่ไกลจากหัวกำเนิด นอกจากจะช่วยให้ติดตั้งระบบเป่าได้สะดวกแล้ว ยังสามารถบีบลำไอออนให้ตกกระทบบเป่าในตำแหน่งที่ต้องการ ส่วนกรณีของโซลินอยด์โค้งนั้น สามารถช่วยกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ที่มากับลำพลาสมาได้อีกด้วย แต่จะมีอนุภาคไอออนบางส่วนสูญเสียไปกับการลำเลียง สำหรับการทดลองนี้จะเป็นการเปรียบเทียบปริมาณกระแสไอออนอิมพัลส์ที่ได้จากการลำเลียงด้วยโซลินอยด์โค้งและโซลินอยด์ตรงที่มีความยาวและจำนวนรอบที่เท่ากัน

4.2.61 การทดลอง

ติดตั้งระบบโซลินอยด์ลำเลียงอนุกรมกับวงจรอาร์ก ดังรูปที่ 4.29 วางโพรมที่ไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -100 V ในตำแหน่งที่ห่างจากปลายท่อโซลินอยด์โค้งและตรง 5 cm ทำการวัดกระแสไอออนอิมพัลส์ ที่กระแสอาร์กต่าง ๆ



ก)



ข)

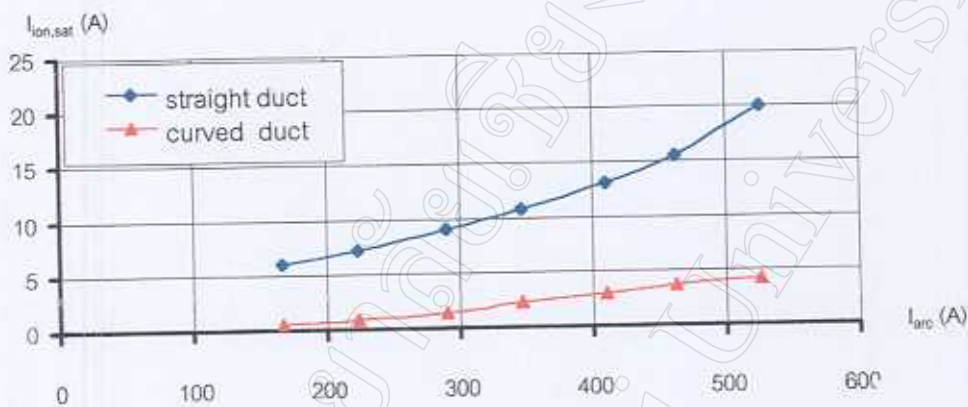
รูปที่ 4.29 แสดงการทดลองใช้โซลินอยด์ตรงและโค้งลำเลียงพลาสมา

ก) โซลินอยด์ตรง

ข) โซลินอยด์โค้ง

4.2.62 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถนำข้อมูลเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์กและกระแสไอออนอิมิต์วได้ดังรูปที่ 2.30 และคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกนกลางของโซลินอยด์ลำเลียงได้ (ซึ่งแสดงใน ภาคผนวก ง)



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนอิมิต์วกับกระแสอาร์ก
เมื่อใช้โซลินอยด์ตรง และโซลินอยด์โค้ง

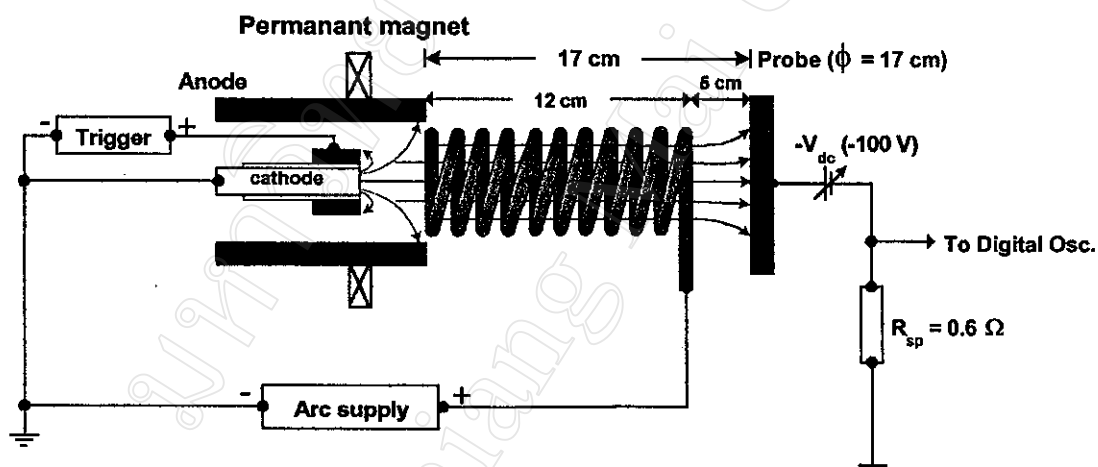
จากกราฟในรูปที่ 4.30 จะพบว่าเมื่อใช้ท่อลำเลียงที่ทำจากโซลินอยด์โค้ง กระแสไอออนอิมิต์วที่ได้จะมีค่าน้อยกว่ากรณีใช้ท่อลำเลียงตรง 5 เท่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่ามีไอออนส่วนสูญเสียไปในกระบวนการลำเลียง

4.2.7 การทดลองหาตำแหน่งแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมกับจุดกำเนิดพลาสมา เมื่อใช้โซลินอยด์ลำเลียงตรงและโค้ง

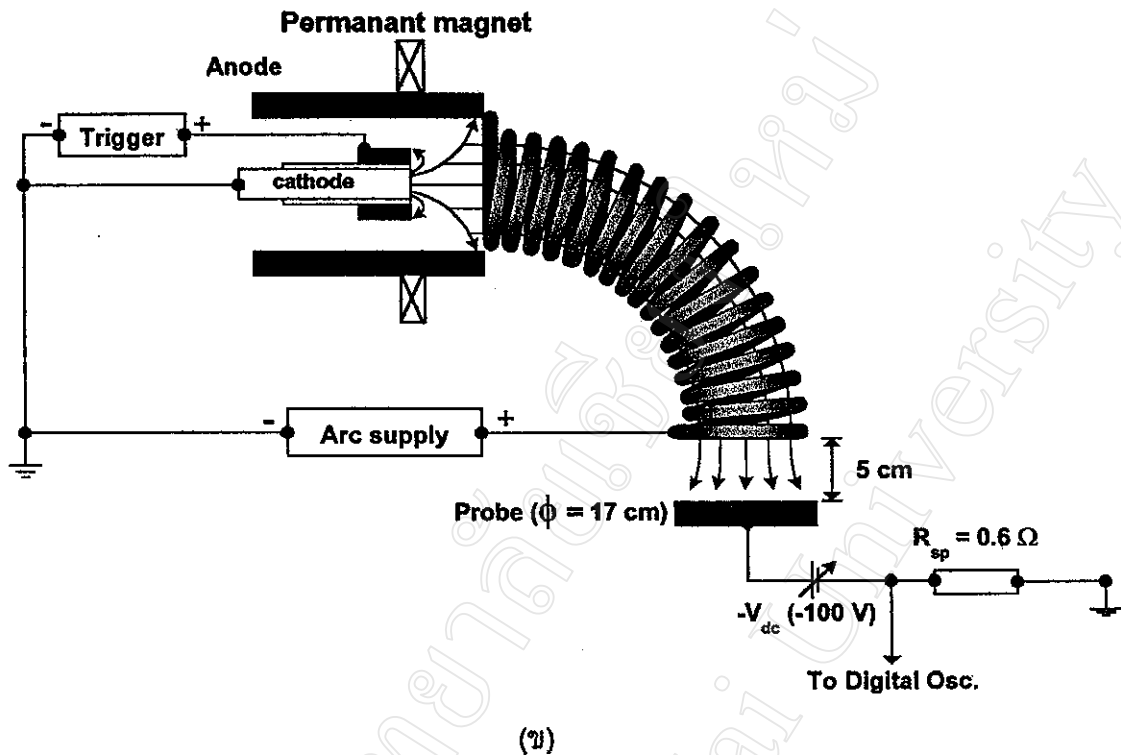
เมื่อใช้แม่เหล็กไฟฟ้าพร้อมกับโซลินอยด์ลำเลียง โปรไฟล์แม่เหล็กจะแตกต่างจากกรณีที่ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ดังนั้นตำแหน่งแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมควรจะเปลี่ยนไป

4.2.7.1 การทดลอง

ทั้งระบบการทดลองเหมือนกับหัวข้อ 4.2.6 แต่เพิ่มแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในระบบดังรูปที่ 4.31 ทำการเลื่อนตำแหน่งแม่เหล็กไฟฟ้าครั้งละ 2 มิลลิเมตร พร้อมทั้งวัดกระแสไอออนอิมิตของแม่เหล็กเมื่ออาร์กด้วยกระแสอาร์กค่าต่างๆ



(ก)

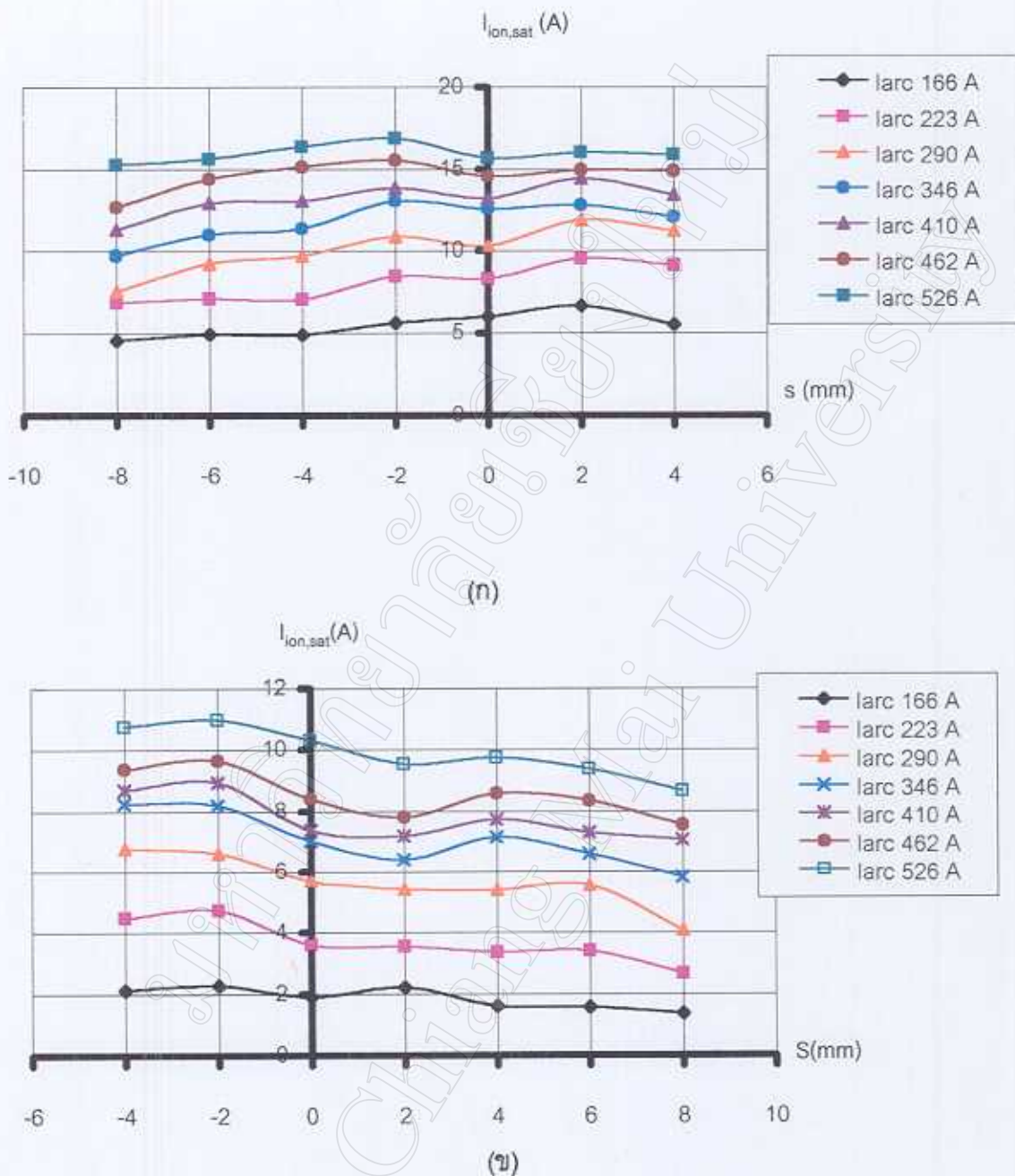


รูปที่ 4.31 แสดงวงจรอย่างง่าย ในการทดลองหาตำแหน่งแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตรงกับจุดกำเนิดพลาสมาเมื่อใช้โซลินอยด์ลำเลียง

ก) ท่อโซลินอยด์ลำเลียงตรง ข) ท่อโซลินอยด์ลำเลียงโค้ง

4.2.72 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแม่เหล็กไฟฟ้าสัมพันธ์กับจุดกำเนิดพลาสมาที่กระแสไอออนอ้อมตัวได้ตั้งกราฟในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแม่เหล็กไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับ
จุดกำเนิดพลาสมาที่กระแสไอออนอิมพัลส์
ก) กรณีของโซลินอยด์ตรง ข) กรณีของโซลินอยด์โค้ง

จากกราฟที่ 4.32 จะพบว่าตำแหน่งของแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้กระแสไอออนอิมพัลส์สูงสุด
เมื่อใช้แม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับท่อโซลินอยด์ลำเลียงตรงและโค้ง คือตำแหน่งที่จุดเกิดอาร์กอยู่ห่าง

จากกึ่งกลางแม่เหล็กเป็นระยะทาง -2 มิลลิเมตร หรือตำแหน่งที่ต้องเลื่อนแม่เหล็กโฟกัสจากจุด
เกิดอาร์กไปทางขวามือ 2 มิลลิเมตร โดยจะสามารถเพิ่มกระแสไอออนอัดตัวจากระบบลำเลียง
ที่ไม่มีโฟกัสได้ 1.2 เท่าเมื่อใช้ร่วมกับโซลินอยด์ตรง และ 3.7 เท่าเมื่อใช้ร่วมกับโซลินอยด์โค้ง

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University