

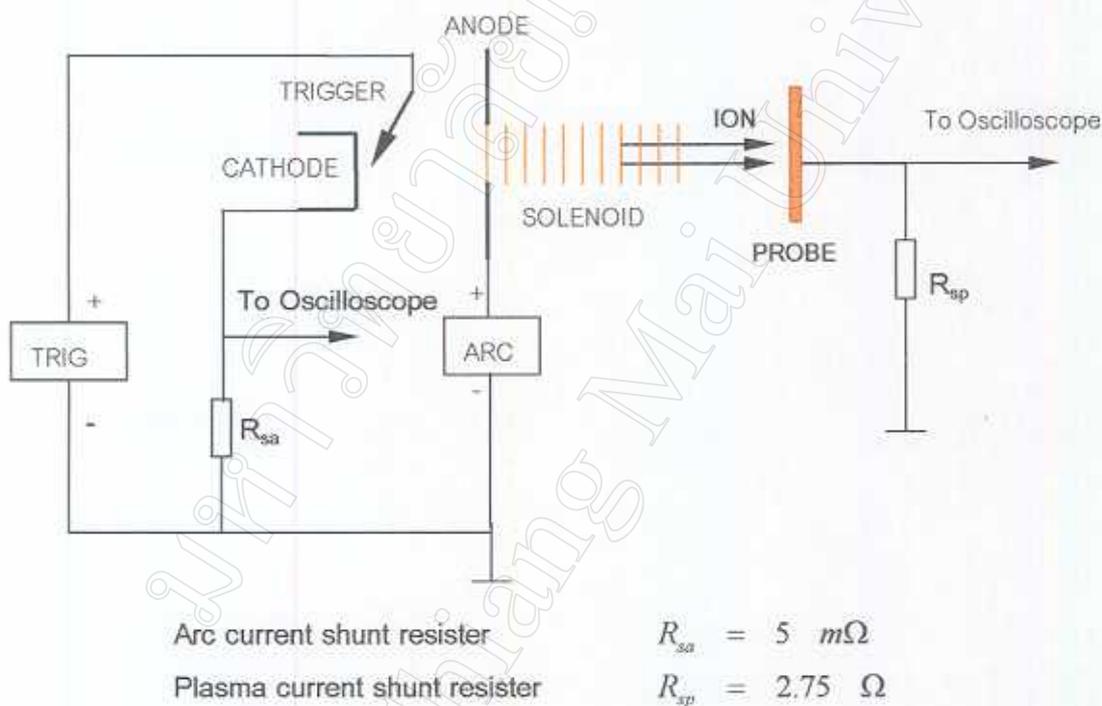
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 การวัดอาร์คและกระแสพลาสมาที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไอออนชนิด เอ็ม อี วี วี เอ

##### 4.1.1 วิธีการวัดกระแสอาร์คและกระแสพลาสมา

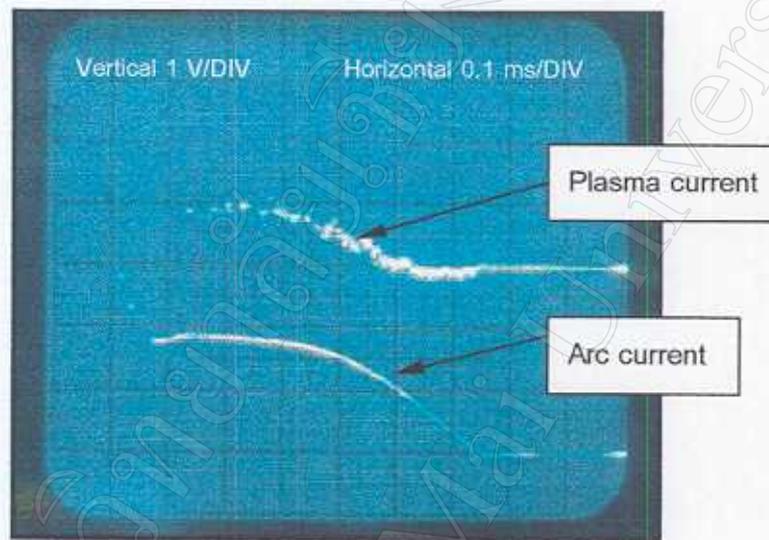
การวัดค่ากระแสของเครื่องกำเนิดไอออน เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดที่ได้พัฒนาขึ้นใช้งาน สามารถทำได้โดยการวัดค่ากระแสพลาสมาที่สามารถผลิตได้ เทียบกับกระแสอาร์คที่ใช้ในการให้กำเนิดพลาสมาขึ้นมา โดยมีลักษณะวงจรสำหรับวัดกระแสอย่างง่าย ดังไดอะแกรมรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมแสดงวงจรอย่างง่ายที่ใช้ในการวัดกระแสอาร์คและกระแสพลาสมา

การวัดค่ากระแสพลาสมาสำหรับการทดลองนี้ ใช้หลักการวัดกระแสแบบฟาราเดย์คัพ (Faraday cup) คือ การใช้โพรบวัดกระแส (current probe) ที่ทำจากโลหะตัวนำ วางแทนตำแหน่งของอุปกรณ์เป่า และต่อสายจากโพรบวัดกระแสผ่านตัวต้านทานชั้นที่ ( $R_{sp}$ ) ไปยังกราวด์ เมื่อมีอนุภาคที่มีประจุมาตกกระทบโพรบวัดกระแส จะทำให้เกิดมีประจุส่วนเกินขึ้นที่โพรบวัดกระแสและประจุเหล่านี้จะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงไปศักย์ไฟฟ้าต่ำผ่านตัวต้านทานชั้นที่ ทำให้สามารถวัดค่ากระแสไอออนที่เกิดขึ้นได้

จากการวัดความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทานชั้นที่ ( $R_{sp}$ ) ส่วนการวัดค่ากระแสอาร์ค จะวัดได้ ด้วยการต่อตัวต้านทานชั้นที่ ( $R_m$ ) บริเวณขั้วแคโทด ดังรูปที่ 4.1 โดยทำการทดลองวัดค่ากระแสพลาสมาเมื่อกระแสอาร์คมีค่าต่างๆ กัน ตั้งแต่ 100 A ถึง 400 A ด้วยการวางโพรบวัดกระแสห่างจากผิวแคโทดเป็นระยะ 8 cm และวัดกระแสพลาสมาเมื่อลำเลียงผ่านโซลินอยด์ตรงและโค้ง  $60^\circ$  จากแนวการเคลื่อนที่เดิม ที่ตำแหน่ง 2 กับ 8 cm ห่างจากปลายท่อโซลินอยด์ ซึ่งค่ากระแสอาร์คและกระแสพลาสมาที่วัดได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 4.2 จากการบันทึกภาพสัญญาณกระแสด้วย storage oscilloscope

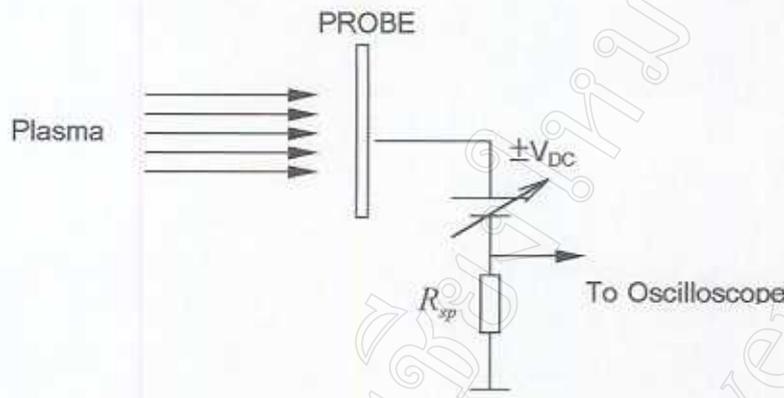


รูปที่ 4.2 แสดงภาพกระแสอาร์คและกระแสพลาสมาที่บันทึกได้จาก storage oscilloscope

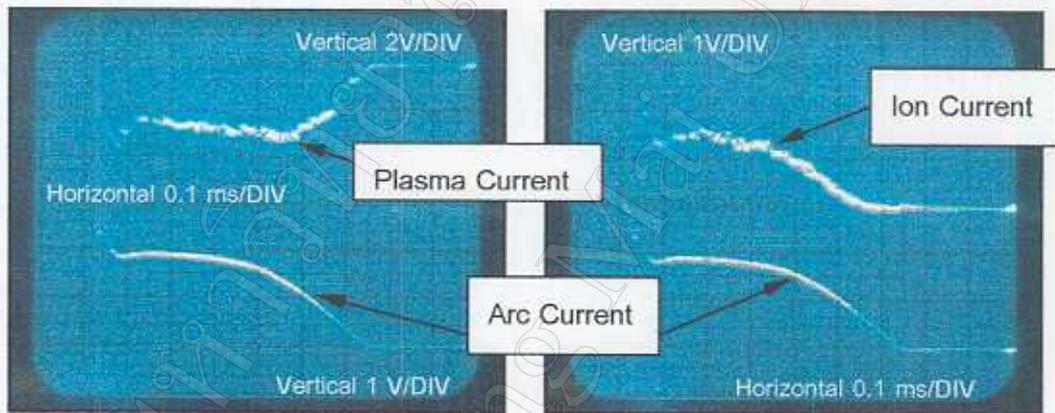
รูปที่ 4.2 เป็นตัวอย่างภาพสัญญาณกระแสอาร์คกับกระแสพลาสมาที่วัดได้จากโพรบวัดกระแส ที่ระยะ 20 mm ห่างจากปลายท่อโซลินอยด์โค้ง พบว่า ค่ากระแสอาร์คและกระแสพลาสมาที่วัดได้มีค่าโดยเฉลี่ย 360 A และ 327 mA ตามลำดับ ซึ่งกระแสทั้งสองเกิดขึ้นในลักษณะเป็นพัลส์ ในช่วงเวลาอันสั้นประมาณ  $600 \mu s$

ค่ากระแสพลาสมาที่วัดได้จากโพรบวัดกระแส ในรูปที่ 4.2 เป็นกระแสที่เกิดจากกระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออนรวมกัน และเนื่องจากปริมาณที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการนำไปในการประยุกต์ใช้งานนั้นเป็นเพียงเฉพาะไอออนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีการไบอัสโพรบวัดกระแสให้มีศักย์ไฟฟ้า ดังรูป 4.3 เพื่อช่วยให้สามารถแยกแยะได้ว่า พลาสมาที่สามารถผลิตได้ ประกอบด้วยปริมาณไอออนหรืออิเล็กตรอนจำนวนเท่าใด กล่าวคือ เมื่อมีการไบอัสโพรบวัดกระแสให้มีศักย์เป็นบวกค่ามาก กระแสที่วัดได้จะเป็นกระแส

อิเล็กตรอน ดังรูปที่ 4.4 ก และในทางกลับกันถ้ามีการไบอัสโพรวัดกระแสให้เป็นลบค่ามาก กระแสที่วัดได้จะเป็นกระแสไอออนเท่านั้น ดังรูปที่ 4.4 ข นอกจากนี้การ



รูปที่ 4.3 แสดงการไบอัสโพรวัดกระแส เพื่อใช้ในการวัดกระแสไอออนและกระแสอิเล็กตรอน



ก. ศักย์ไบอัสที่โพรวัดกระแสเท่ากับ +30 V ข. ศักย์ไบอัสที่โพรวัดกระแสเท่ากับ -30 V

รูปที่ 4.4 แสดงกระแสไอออนและกระแสอิเล็กตรอนที่วัดได้เมื่อมีการไบอัสโพรวัดกระแส

รูปที่ 4.4 เป็นภาพสัญญาณกระแสไอออนกับกระแสอิเล็กตรอน เมื่อวางโพรวัดกระแสห่างจากปลายท่อโซลินอยด์โค้ง เป็นระยะ 20 mm ที่กระแสอาร์ค 360 A พบว่าเมื่อมีการไบอัสโพรวัดกระแสเท่ากับ + 30 V (รูป 4.4 ก) กระแสอิเล็กตรอนที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 A แต่ที่ศักย์ไบอัสนี้กระแสที่ได้ยังคงมีกระแสไอออนปนอยู่ เพราะค่ากระแสที่วัดได้ยังไม่ถึงจุดที่ค่ากระแสมีการอิ่มตัว (saturate) และเมื่อมีการไบอัสโพรวัดกระแสเท่ากับ -30 V (รูปที่ 4.4 ข) กระแสที่วัดได้เป็นกระแสไอออนทั้งหมดเพราะเป็น

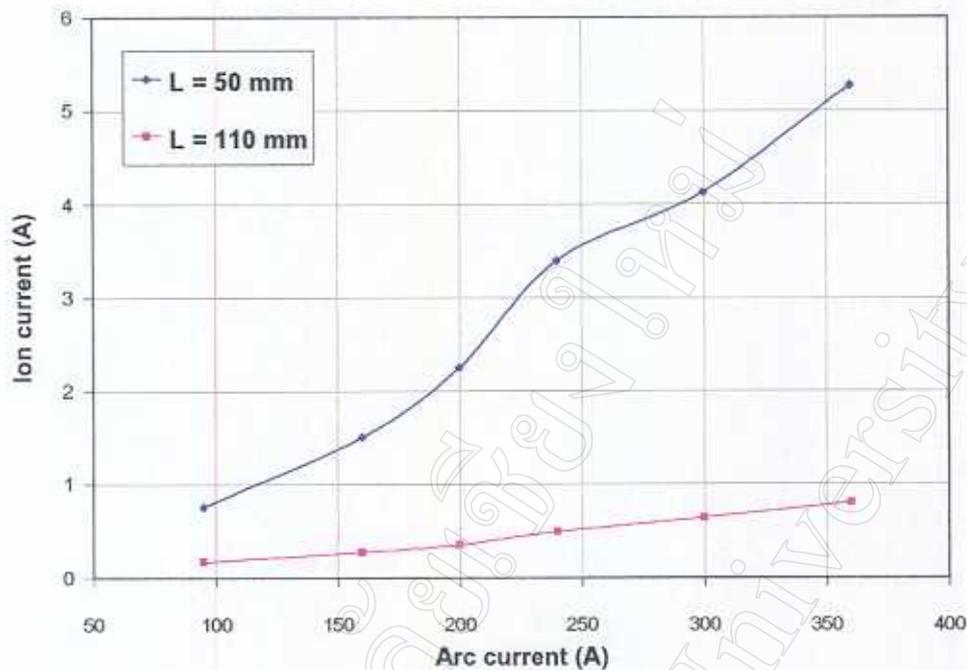
ศักย์ที่กระแสมีค่าอิ่มตัวแล้ว ซึ่งค่ากระแสไอออนนี้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 545 mA โดยกระแสที่ได้ทั้งสองเกิดขึ้นในลักษณะเป็นพัลส์ มีช่วงเวลาในการเกิด 600  $\mu$ s

จากวิธีการวัดดังกล่าวข้างต้น พบว่าสัญญาณของกระแสอาร์คที่วัดได้มีลักษณะค่อนข้างเรียบ (ไม่มี noise) เนื่องจากกระแสอาร์คนั้นมีค่าค่อนข้างสูงมาก แต่กระแสพลาสมาจะมีลักษณะไม่เรียบ (มี noise ความถี่สูงปนอยู่ด้วย) เพราะค่ากระแสที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำ และจากรูปสัญญาณที่ได้ ไม่มีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงเวลาของการอาร์ค ดังนั้น ค่ากระแสที่อ่านได้จะเป็นค่าที่ได้มาจากการหาค่าโดยเฉลี่ยจากพื้นที่ใต้รูปสัญญาณที่ได้ นอกจากนี้ในการทดลองวัดค่ากระแสพลาสมาในการอาร์คแต่ละครั้ง ที่กระแสอาร์คค่าหนึ่ง นั้นพบว่ากระแสพลาสมาที่ได้มีค่าไม่คงที่ จึงมีการทดลองซ้ำกัน 5 ครั้ง และนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อให้ข้อมูลของผลการทดลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

#### 4.1.2 ผลการวัดกระแสอาร์คและกระแสไอออน

##### ก. เมื่อไม่ใช้ท่อโซลินอยด์ลำเลียง

การทดลองวัดค่ากระแสไอออนและกระแสอาร์คเมื่อไม่ใช้ท่อโซลินอยด์ลำเลียงไอออน เป็นการทดลองเพื่อให้รู้ถึงความสามารถในการผลิตกระแสไอออนที่ค่ากระแสอาร์คต่างๆ ตั้งแต่ 100 A ถึง 400 A โดยวางโพรบวัดกระแสที่ระยะ (L) 50 และ 110 mm ห่างจากผิวแคโทด และในกรณีนี้ต้องการทราบเฉพาะปริมาณไอออน จึงมีการไบอัสโพรบวัดกระแสให้มีศักย์เท่ากับ  $-30$  V จากการทดลองจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนกับกระแสอาร์คค่าต่างๆ ดังกราฟรูปที่ 4.5 ซึ่งจากกราฟ พบว่า ทั้ง 2 ระยะมีค่ากระแสไอออนที่ได้จะแปรผันโดยตรงกับกระแสอาร์คที่ใช้ในการผลิตพลาสมา และมีค่ากระแสไอออนแปรผกผันกับระยะห่างจากจุดกำเนิด โดยค่ากระแสไอออนที่ผลิตได้สูงสุดที่ระยะ 50 mm ห่างจากผิวแคโทดมีค่าประมาณ 1.5% ของค่ากระแสอาร์ค เมื่อกระแสอาร์คมีค่า 360 A



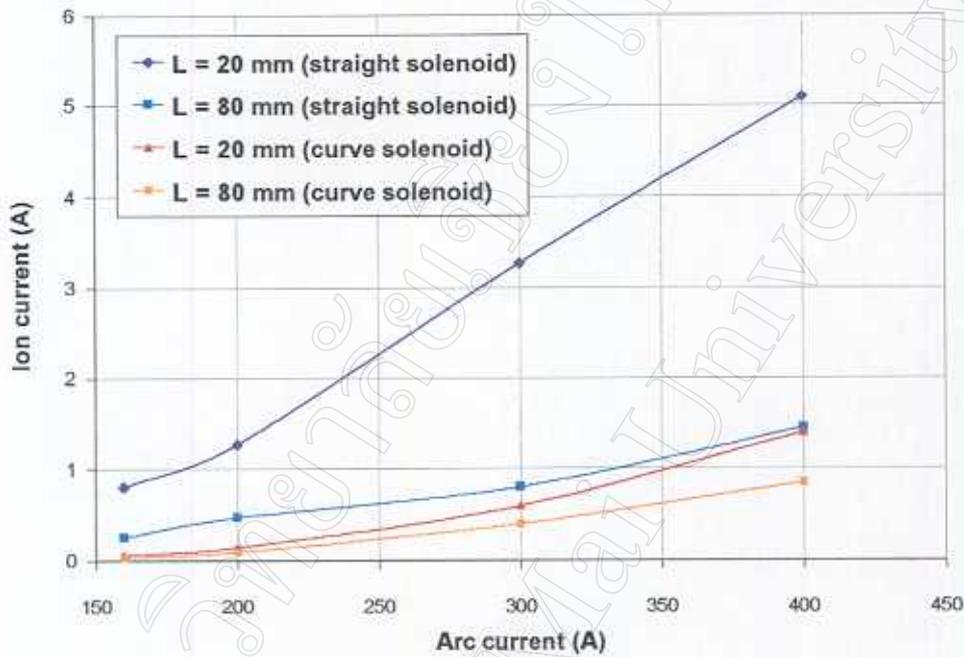
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสอาร์คกับกระแสไอออน  
เมื่อไม่ใช้ท่อโซลินอยด์

#### ข. เมื่อใช้ท่อโซลินอยด์ลำเลียง

การใช้ท่อโซลินอยด์ลำเลียงไอออนนอกจากจะช่วยลดจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ แล้วพบว่ายังช่วยในลำเลียงไอออนออกมาจากบริเวณหัวกำเนิดไอออนได้เป็นระยะไกลยิ่งขึ้น ทำให้สะดวกในการติดตั้งวัสดุเป้า ดังนั้นจึงมีการวัดค่ากระแสไอออนเพื่อเปรียบเทียบความสามารถของการลำเลียงไอออนผ่านท่อโซลินอยด์ตรงและโค้งยาว 210 mm ด้วยการทดลองวัดกระแสไอออนที่ระยะ 20 และ 80 mm ห่างจากปลายท่อโซลินอยด์ และทำการไบอัสโพรมวัดกระแสให้มีศักย์เท่ากับ  $-30$  V เมื่อกระแสอาร์คมีค่าตั้งแต่ 150 A ถึง 400 A โดยผลการทดลองวัดค่ากระแสอาร์คและกระแสไอออนสามารถแสดงได้ดังกราฟรูป 4.6

จากกราฟรูปที่ 4.6 จะพบว่า ค่ากระแสไอออนยังคงมีค่าแปรผันตรงกับค่ากระแสอาร์ค และมีค่าแปรผกผันกับระยะห่างจากปลายท่อโซลินอยด์ และพบว่ากระแสไอออนที่ได้จากการลำเลียงด้วยท่อโซลินอยด์ตรงมีค่ามากกว่าท่อโซลินอยด์โค้ง เช่น ที่กระแสอาร์คมีค่า 400 A ปริมาณกระแสไอออนสูงสุดที่ได้จากท่อโซลินอยด์ตรงมีค่าประมาณ 1.3 % ของกระแสอาร์ค ในขณะที่ปริมาณกระแส

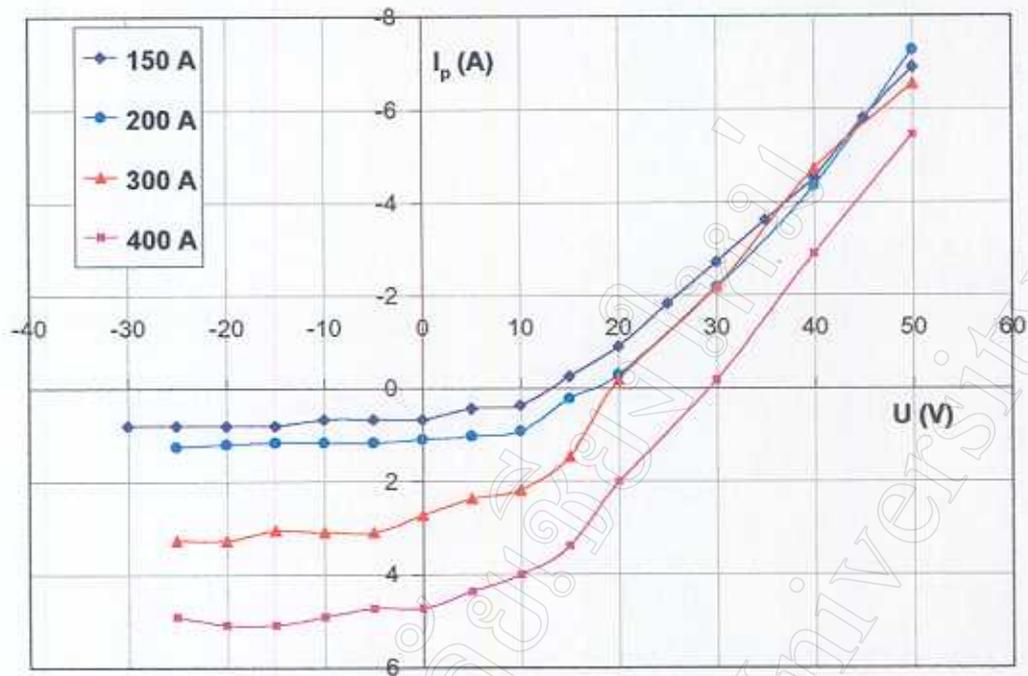
ไอออนสูงสุดที่ได้จากท่อโซลินอยด์โค้งมีค่าประมาณ 0.4 % ของกระแสอาร์ค ซึ่งค่าปริมาณกระแสไอออนสูงสุดที่ได้ท่อโค้งมีค่าลดลงมากกว่า 50 % ของท่อโซลินอยด์ตรง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในท่อโซลินอยด์โค้งมีค่าน้อยกว่าโซลินอยด์ตรง อีกทั้งยังมีการสูญเสียของไอออนที่ผนังท่อโซลินอยด์โค้งมากกว่าท่อโซลินอยด์ตรง



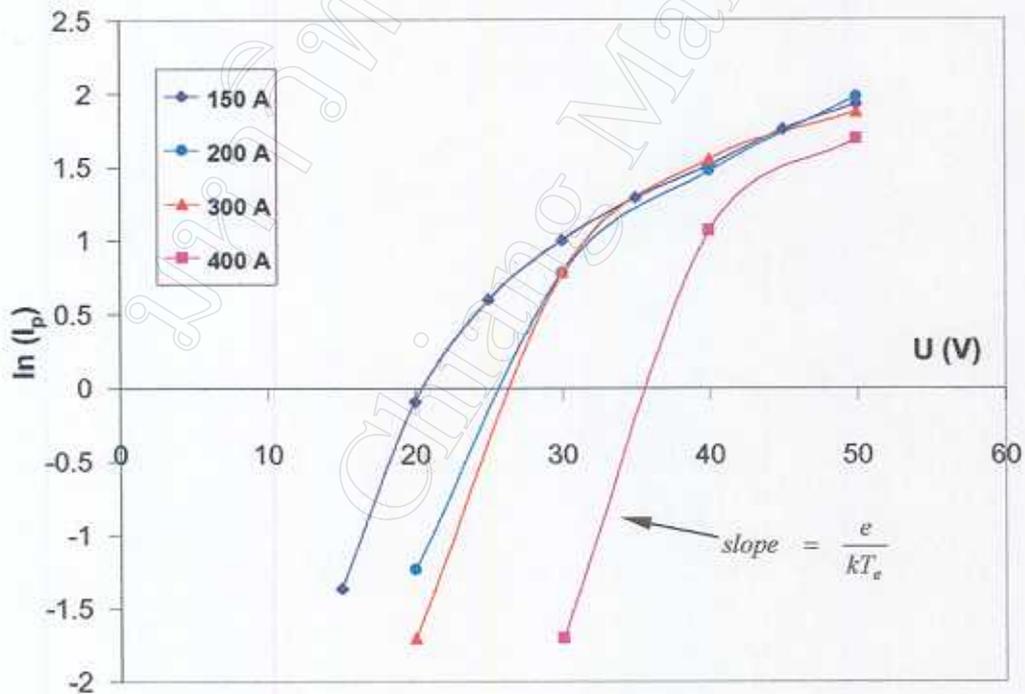
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสอาร์คกับกระแสไอออนเมื่อลำเลียงผ่านท่อโซลินอยด์ตรงและโค้ง

#### 4.2 การหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน

อุณหภูมิของอิเล็กตรอนเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงพลังงานของอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถหาได้จากการทดลองวัดกระแสพลาสมา ( $I_p$ ) และศักย์ไบอัสของโพรบวัดกระแส ( $U$ ) โดยการทดลองวัดกระแสพลาสมา ที่ตำแหน่ง 20 mm ห่างจากปลายท่อโซลินอยด์ตรง เมื่อทำการไบอัสโพรบวัดกระแสให้มีศักย์ ตั้งแต่  $-50$  V ถึง  $+50$  V ของค่ากระแสอาร์คต่างๆ คือ 150, 200, 300 และ 400 A โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสพลาสมา ( $I_p$ ) และศักย์ไบอัสของโพรบวัดกระแส ( $U$ ) ที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 4.7 ก



ก. แสดงสมบัติของกระแสพลาสมา ( $I_p$ ) กับศักย์ไบอัสของโพรบวัดกระแส ( $U$ )



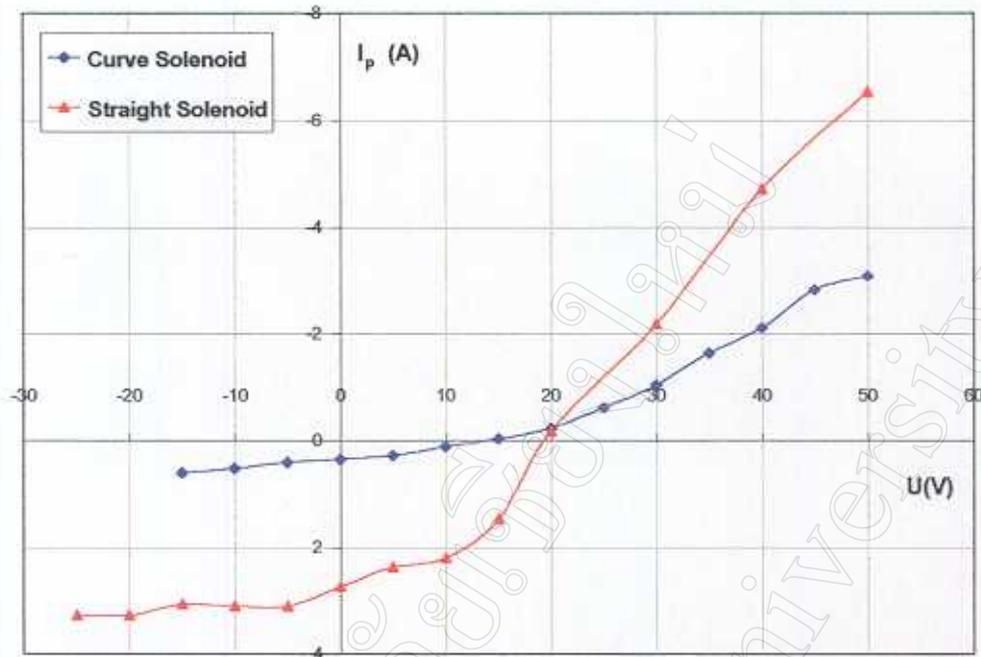
ข. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_p)$  กับ ศักย์ไบอัสของโพรบวัดกระแส ( $U$ )  
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการทดลองหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน ของท่อโซลินอยด์ตรง

จากกราฟสมบัติกระแสพลาสมา ( $\ln I_p$ ) กับศักย์ไบอัสของโพรบวัดกระแส ( $U$ ) ในรูปที่ 4.7 ข สามารถหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้จากสมการ (2.44) คือ

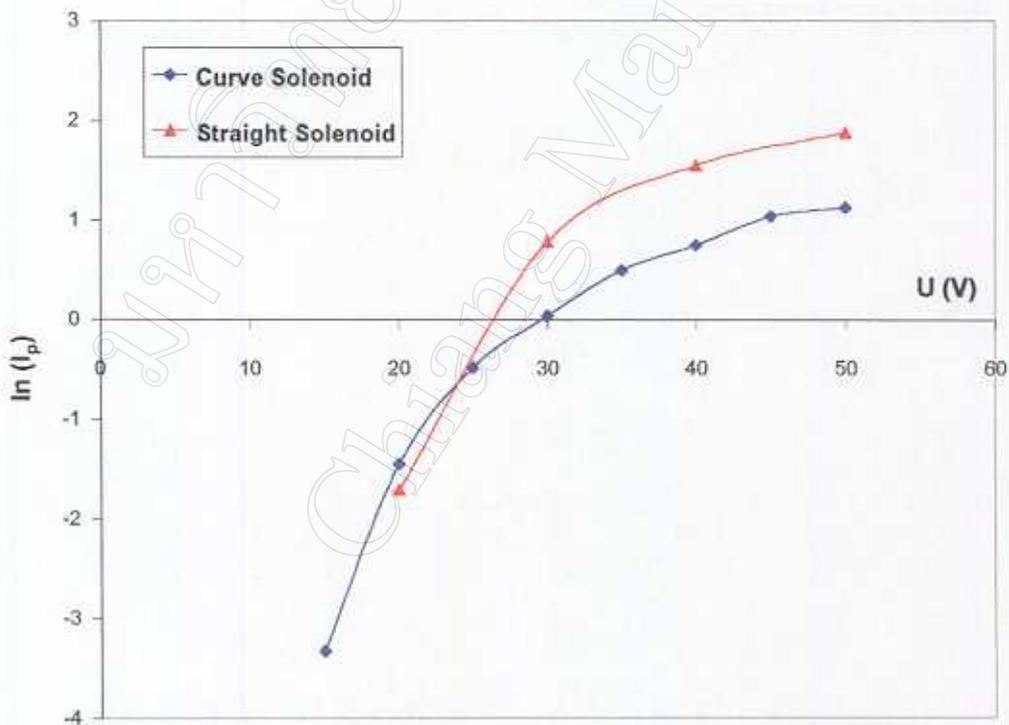
$$kT_e = \frac{e}{slope}$$

จากค่าความชันของเส้นกราฟที่แต่ละค่ากระแสอาร์ค ดังนั้นจะได้ว่าค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนของพลาสมาที่สามารถผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไอออนชนิดนี้มีค่าในช่วง 3.4-4.6 eV ซึ่งค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อกระแสอาร์คมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะที่กระแสอาร์คค่าน้อยจะมีความหนาแน่นของพลาสมา น้อยด้วยทำให้อิเล็กตรอนมีระยะทางเฉลี่ยของการเคลื่อนที่แบบอิสระ (mean free path) สูง กล่าวคือ มีโอกาสเคลื่อนที่ได้ระยะทางมากก่อนจะเกิดการชนกับอนุภาคอื่น ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูง ดังนั้นค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่วัดได้จึงมีค่าสูง สำหรับกรณีของ arc plasma นั้นจะมีค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนประมาณเท่ากับ อุณหภูมิของไอออน ( $T_i \approx T_e$ ) จะได้ว่าอุณหภูมิของไอออนมีค่าในช่วง 3.4-4.6 eV ด้วย

การหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนของท่อโซลินอยด์โค้งเทียบกับโซลินอยด์ตรง สามารถทำได้โดยการวัดกระแสพลาสมา กับศักย์ไบอัสโพรบวัดกระแสที่ตำแหน่ง 20 mm ห่างจากปลายท่อโซลินอยด์ทั้งสอง เมื่อกระแสอาร์คมีค่าเท่ากับ 300 A และผลการทดลองสามารถแสดงได้ ดังกราฟรูปที่ 4.8 ซึ่งจากกราฟจะพบว่า ค่าความชันของกราฟ ในรูปที่ 4.8 ข ของท่อโซลินอยด์ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน และค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 4 eV โดยค่าอุณหภูมิของท่อโค้งมีค่าน้อยกว่าท่อตรงเล็กน้อย เพราะมีการสูญเสียอนุภาคที่มีโมเมนตัมสูงในระหว่างการเคลื่อนที่ผ่านท่อโซลินอยด์โค้งด้วย



ก. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสพลาสมา กับ ศักย์ไบอัสของโพรบวัดกระแส



ข. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_p)$  กับ ศักย์ไบอัสของโพรบวัดกระแส (U)

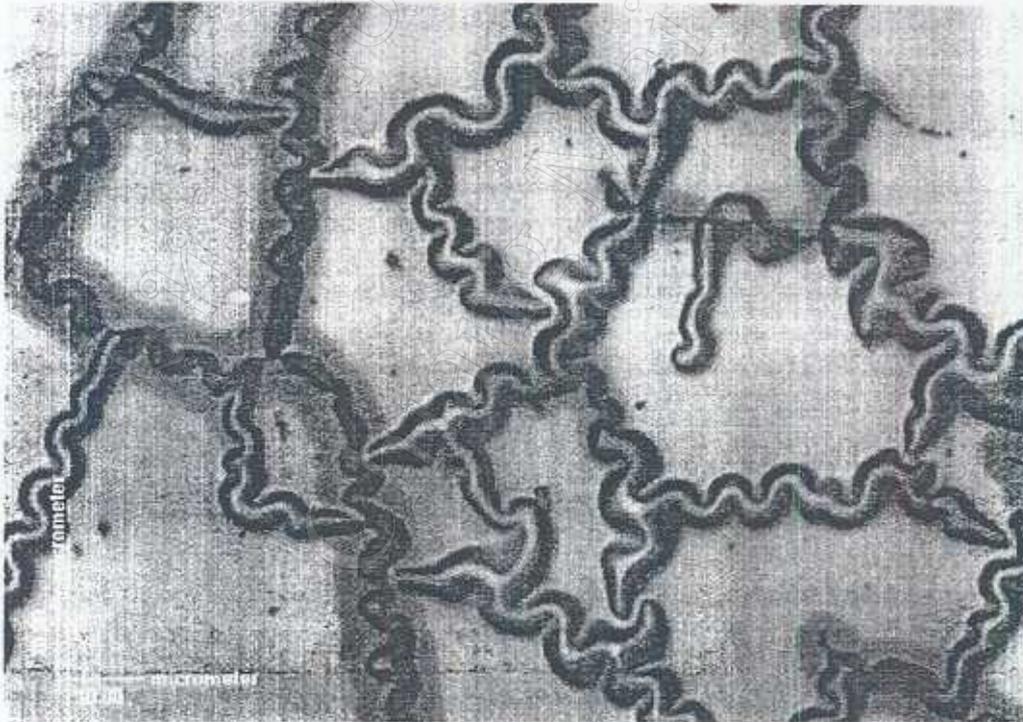
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการทดลองหาค่าอนุกรมของอิเล็กตรอนของท่อโซลินอยด์ตรง และท่อโซลินอยด์โค้ง เมื่อ  $I_{arc} = 300$  A

### 4.3 ผลการนับจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่

การทดลองนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงธรรมชาติการเกิดอนุภาคขนาดใหญ่ของแคโทดทองแดงบริสุทธิ์ จากปัจจัยต่างๆ เช่น กระแสอาร์ค เป็นต้น โดยการนับจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ของฟิล์มทองแดงบนกระจกจากกล้องขยายกำลังสูง ด้วยเงื่อนไขของการ deposition ฟิล์มที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 วิธีการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทำฟิล์ม

การทำฟิล์มทองแดงของงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการทำฟิล์มบนกระจกธรรมดา (ที่มีการใช้งานทั่วไป) ที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยด่างอ่อนๆ (ผงซักฟอก) และการต้มในน้ำเดือดเพื่อกำจัดคราบไขมัน หลังจากนั้นก็ล้างด้วยน้ำสะอาดจำนวนมาก และอบเพื่อไล่ความชื้นออกจากผิวกระจก แต่เมื่อนำกระจกนี้ไปใช้เป็นวัสดุเป้าสำหรับการทำ film deposition พบว่าฟิล์มทองแดงบนกระจกดังกล่าวที่ได้มีลักษณะไม่เรียบ ดังรูปที่ 4.9 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเนื้อกระจกที่เป็นเป่ามีความไม่สม่ำเสมอในขนาดไมครอน ทำให้ฟิล์มของทองแดงเกาะติดกระจกได้ไม่ดีเท่าที่ควร



รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มทองแดงบนกระจกที่มีการใช้งานทั่วไป จากกล้องขยายกำลังสูงขนาด 200 เท่า

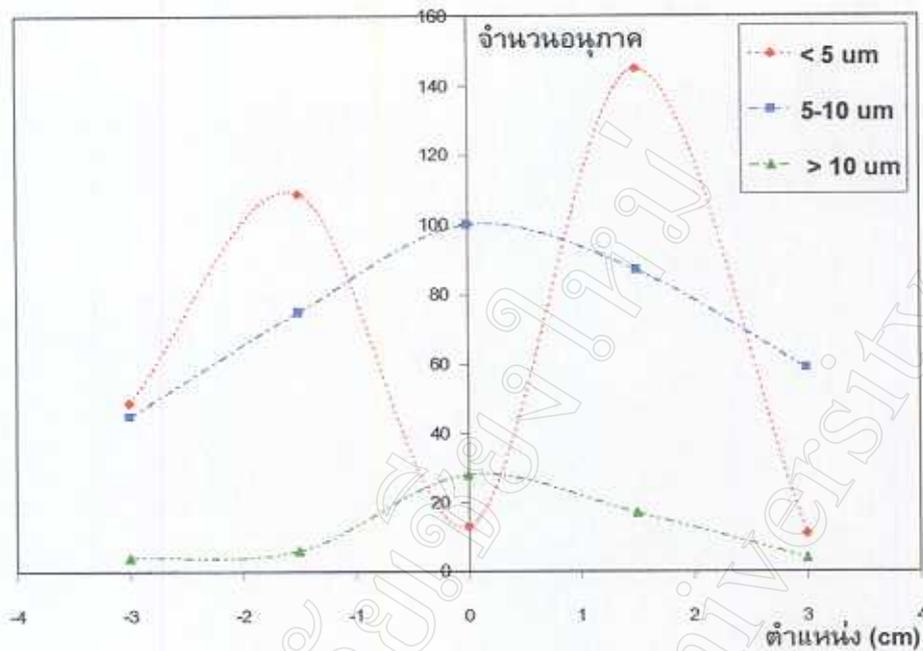
จากลักษณะฟิล์มที่เกิดขึ้นบนกระจก ดังรูปที่ 4.9 นั้น พบว่าวัสดุที่นำมาใช้เป็น เป้ามีความสำคัญฟิล์มของไอออนที่เกิดขึ้น จึงมีการนำกระจกของงานเพาะเนื้อเยื่อ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 cm ซึ่งมีเนื้อกระจกที่ละเอียดกว่า มาใช้เป็นเป้า ทำให้ฟิล์มทองแดงที่ได้มีลักษณะเรียบ โดยมีขั้นตอนในการทำทำความสะอาดกระจกเพาะเนื้อเยื่อ ดังนี้

- นำกระจกไปต้มในด่างเจือจางประมาณ 10 % (NaOH) แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด เพื่อกำจัดคราบไขมัน
- แช่กระจกใน cleaning solution (สารละลายโปรแตสเซียมไดโครเมตในกรดซัลฟูริกเข้มข้น) ประมาณ 1 คืน
- ล้างกระจกด้วยน้ำสะอาดหลาย ๆ ครั้ง และใช้ก๊าซไนโตรเจนไล่คราบน้ำที่เกาะผิวกระจก แล้วนำไปอบให้แห้ง

เมื่อทำความสะอาดกระจกเรียบร้อยแล้ว นำกระจกไปติดตั้งในแชมเบอร์เป้า เพื่อทำ film deposition ภายใต้ความดันบรรยากาศ  $6 \times 10^{-6}$  Torr จำนวน 1000 พัลส์ ที่ค่ากระแสอาร์คเท่ากับ 150 A ด้วยระยะ 80 mm ห่างจากผิวแคโทดและ ที่ค่ากระแสอาร์คเท่ากับ 150, 300 และ 400 A ที่ระยะ 20 mm ห่างจากปลายท่อโซลินอยด์ตรงและโซลินอยด์โค้ง โดยนำฟิล์มทองแดงที่ได้ ไปบันทึกภาพด้วยกล้องขยายที่มีกำลังขยายขนาด 80 เท่า ลงบนฟิล์มสไลด์ เพื่อนำมาตรวจนับจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ที่เกิด โดยแบ่งขนาดของอนุภาคขนาดใหญ่ที่ได้ออกเป็น 3 ขนาด คือ ขนาด  $>5 \mu\text{m}$ , ขนาด  $5-10 \mu\text{m}$  และขนาดใหญ่กว่า  $10 \mu\text{m}$

#### 4.3.2 การแจกแจงของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

การทดลองนี้เพื่อเป็นการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่ที่ได้จากหัวจ่ายพลาสมาในแนวรัศมี ของฟิล์มทองแดงที่ได้จากการ deposition ด้วยค่ากระแสอาร์คเท่ากับ 150 A จำนวน 1000 พัลส์ ที่ระยะ 80 mm ห่างจากผิวแคโทด พบว่าฟิล์มทองแดงที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 80 mm และผลการตรวจนับจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ที่ได้ในรูปกราฟที่ 4.10 เป็นจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่บนพื้นที่ประมาณ  $1400 \times 1000 \mu\text{m}^2$  บริเวณตรงกลางฟิล์ม และที่ตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางฟิล์ม 15 และ 30 mm ทั้งทางซ้ายและขวา



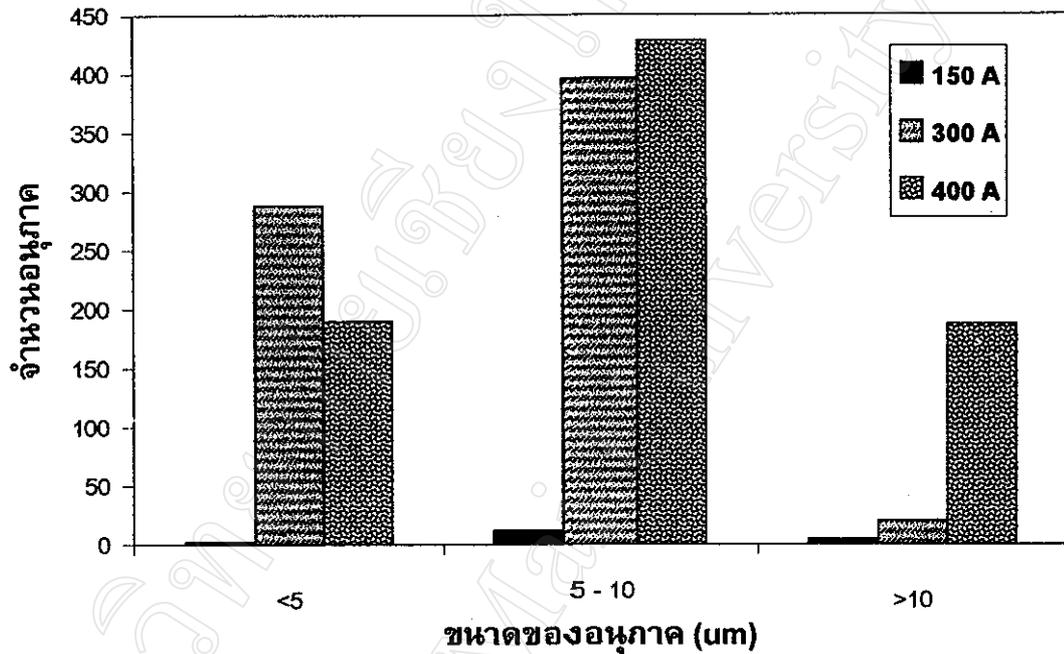
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่บนฟิล์มทองแดง เมื่อ deposition ด้วยกระแสอาร์ค 150 A จำนวน 1000 นัด

จากผลการตรวจนับจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ในกราฟรูปที่ 4.10 พบว่า อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า  $5 \mu\text{m}$  คือ ขนาด  $5-10 \mu\text{m}$  และขนาดใหญ่กว่า  $10 \mu\text{m}$  มีจำนวนมากบริเวณกลางฟิล์ม ซึ่งมีการแจกแจงในลักษณะคล้ายฟังก์ชันโคซายน์ แต่อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีการแจกแจงในลักษณะวงแหวน (hallow beam) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากแรงระหว่างประจุทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กเกิดการกระจายตัวออกในแนวรัศมี ในขณะที่แรงระหว่างประจุไม่ค่อยมีผลกระทบกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ เพราะอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มีค่าโมเมนตัมค่อนข้างสูง

#### 4.3.3 ความสัมพันธ์ของจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่กับกระแสอาร์ค

เมื่อทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่กับกระแสอาร์ค จำนวน 1000 พัลส์ บนพื้นที่  $1400 \times 1000 \mu\text{m}^2$  บริเวณตรงกลางของฟิล์มทองแดง พบว่า ที่กระแสอาร์คค่าเดียวกันมีการแจกแจงของอนุภาคแบบปกติ คือ มีจำนวนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่  $5-10 \mu\text{m}$  มากที่สุด รองลงมาคืออนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า  $5 \mu\text{m}$  และน้อยที่สุดคืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า  $10 \mu\text{m}$  และจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นจะมีค่าแปรผันตรงกับกระแสอาร์ค คือ จะมีจำนวนมากขึ้นเมื่อกระแสอาร์คมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าที่กระแสอาร์คมีค่าเท่ากับ 150 A จะมีจำนวน

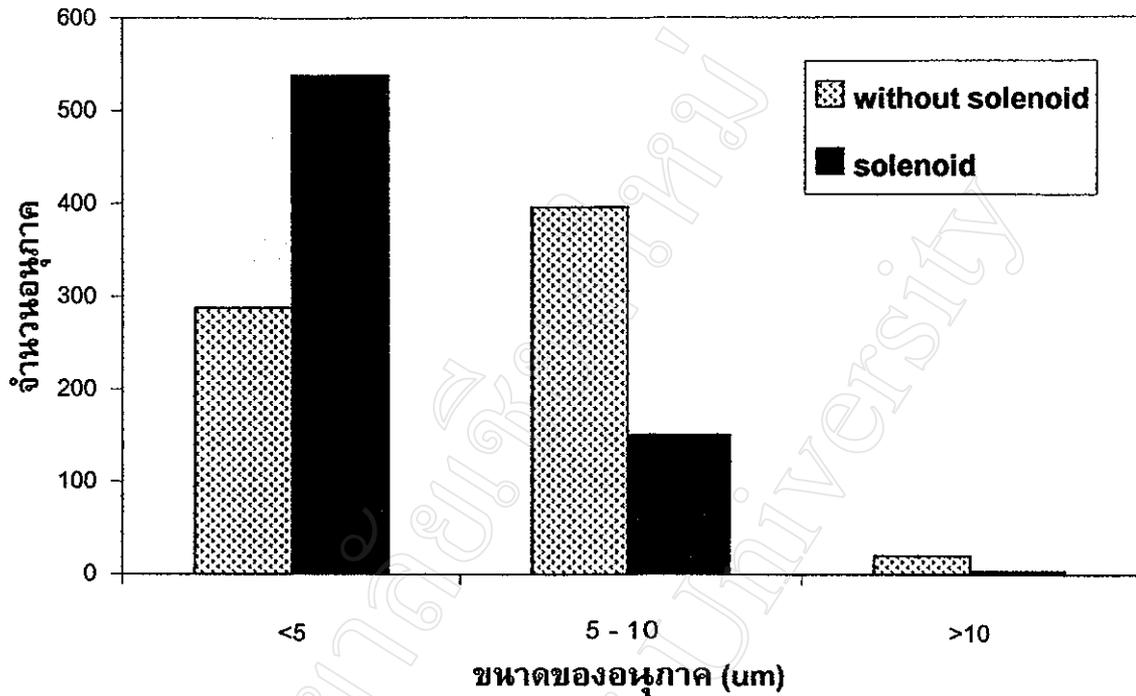
อนุภาคน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสอาร์ค 300 และ 400 A เนื่องจากเมื่อกระแสอาร์คมีค่าสูง จะทำให้เกิดการอาร์คที่รุนแรง เป็นผลให้เกิดมีจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่มากขึ้น ในขณะที่จำนวนอนุภาคขนาดเล็กไม่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่ากระแสอาร์คสูงสุดที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานมีค่าประมาณ 300 A



รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่กับกระแสอาร์คค่าต่างๆ

#### 4.3.4 ผลการใช้โซลินอยด์โค้งในการลดจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่

จากการทดลองนับจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ เมื่อกระแสอาร์คมีค่าเท่ากับ 300 A จำนวน 1000 พัลส์ บนพื้นที่  $1400 \times 1000 \mu\text{m}^2$  บริเวณตำแหน่งตรงกลางของฟิล์มทองแดง ที่ได้จากตำแหน่ง 80 mm ห่างจากฉิวแคโทด และที่ตำแหน่ง 20 mm ห่างจากปลายท่อโซลินอยด์โค้ง พบว่าสามารถลดจำนวนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า  $5 \mu\text{m}$  ได้อย่างชัดเจน ดังแผนภูมिरูปที่ 4.12 โดยเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า  $10 \mu\text{m}$  สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า  $5 \mu\text{m}$  ยังมีจำนวนมากอยู่ เพราะพลังงานของอนุภาคเหล่านี้มีค่าต่ำ และสามารถเคลื่อนที่ตามสนามแม่เหล็กในแนวแกนได้



รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ เมื่อใช้ท่อโซลินอยด์ กับไม่ใช้ท่อโซลินอยด์ ที่กระแสอาร์คเท่ากับ 300 A

การใช้ท่อโซลินอยด์โค้งในงานวิจัยนี้ยังคงมีจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่เหลืออยู่จำนวนมาก แต่จำนวนอนุภาคขนาดใหญ่เหล่านี้มีการแปรผันตรงกับค่ากระแสอาร์ค ดังนั้นเมื่อนำหัวจ่ายพลาสมาไปใช้งานควรจะทำการทดลองที่กระแสอาร์คค่าไม่สูงมาก ร่วมกับการใช้ท่อโซลินอยด์จะทำให้ช่วยลดจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น