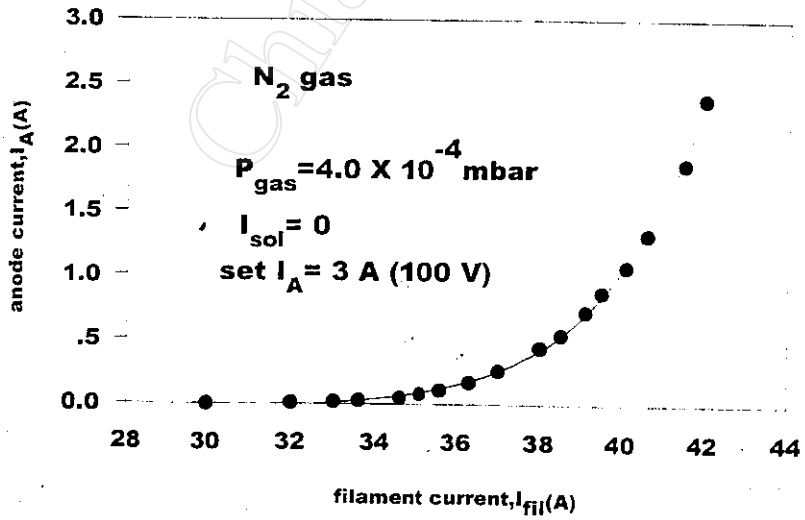
บทที่ 4

ผลการทดสอบแหล่งกำเนิดไอออนแบบ Nielsen

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ในการศึกษาคุณลักษณะในการทำงานของแหล่งกำเนิดไอออนโดยปกติจะทำการวัดปริมาณพื้นฐานทางไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ปริมาณ คือ กระแสแอโนดหรือกระแสดิสชาร์จและกระแสไอออน หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการศึกษาคุณสมบัติการดิสชาร์จและศึกษาการดึงไอออน

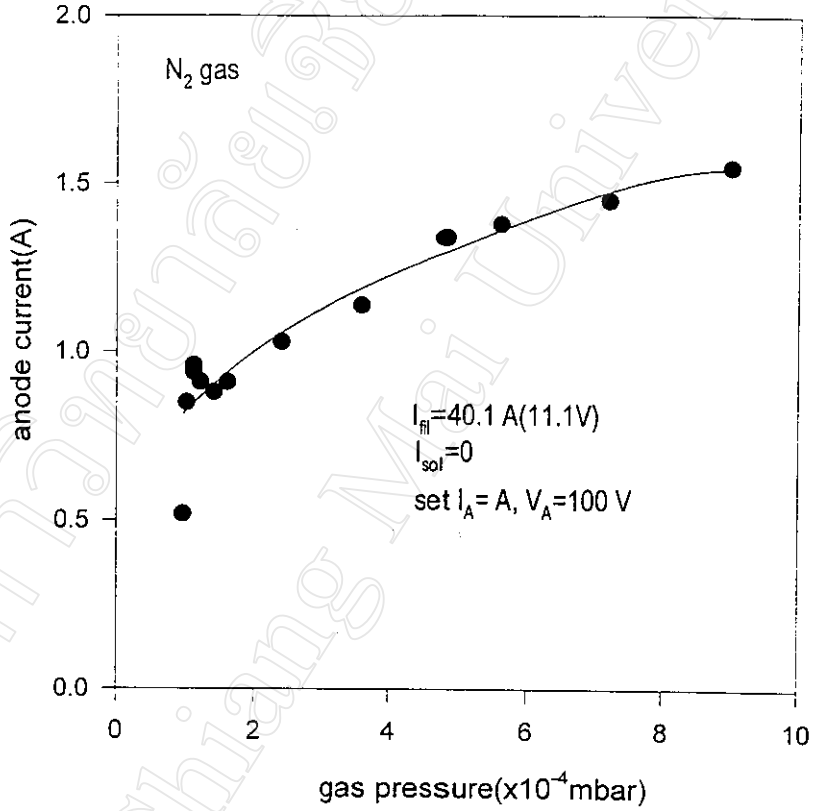
4.1 ผลการทดสอบการดิสชาร์จ

ในรูปที่ 4.1 เป็นการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไส้หลอด(filament) ที่มีผลต่อความสามารถในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนของไส้หลอด โดยในการทดสอบจะใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวกลางในการสร้างการดิสชาร์จที่ใช้ในการศึกษาเพราะง่ายและสะดวก โดยคงค่าความดันก๊าซที่ใช้ไว้ที่ 0.4 ธอรร์ วัดโดยใช้หัววัดสูญญากาศแบบ pirani บริเวณท่อส่งก๊าซดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยตั้งค่ากระแสแอโนดบนแหล่งจ่ายไฟไว้ที่ 3 แอมแปร์และแรงดันแอโนดไว้ที่ 100 โวลท์ ในที่นี้ไม่ใช้แม่เหล็กโซลินอยด์(soleniod magnet) จากนั้นเพิ่มกระแสไส้หลอดขึ้นไปเรื่อยๆจากกราฟรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าในช่วงที่กระแสไส้หลอดมีค่าต่ำกว่า 35 แอมแปร์ กระแสแอโนดมีค่าต่ำมากสามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากไส้หลอดสามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาได้น้อยมากสอดคล้องกับกราฟรูปที่ 1.3 ที่อุณหภูมิต่ำๆไส้หลอดสามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้น้อยทำให้อิเล็กตรอนที่สามารถวิ่งเข้าสู่แอโนดน้อยมาก แต่หลังจากเมื่อเพิ่มค่ากระแสไส้หลอดขึ้นไปอีกอุณหภูมิของไส้หลอดเพิ่มขึ้นทำให้ไส้หลอดสามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้มากขึ้นก็ทำให้กระแสแอโนดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยและเมื่อค่ากระแสไส้หลอดมีค่ามากกว่า 40 แอมแปร์ขึ้นไป กระแสแอโนดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแสดงว่าจำนวนอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมาจากไส้หลอดมีจำนวนมากพอที่จะทำให้เกิดการดิสชาร์จได้ ดังนั้นกระแสไส้หลอดที่สามารถทำให้เกิดการดิสชาร์จจะต้องมีค่ามากกว่า 38 แอมแปร์ขึ้นไปซึ่งจะไปสอดคล้องกับความดันก๊าซตามกราฟรูปที่ 4.2



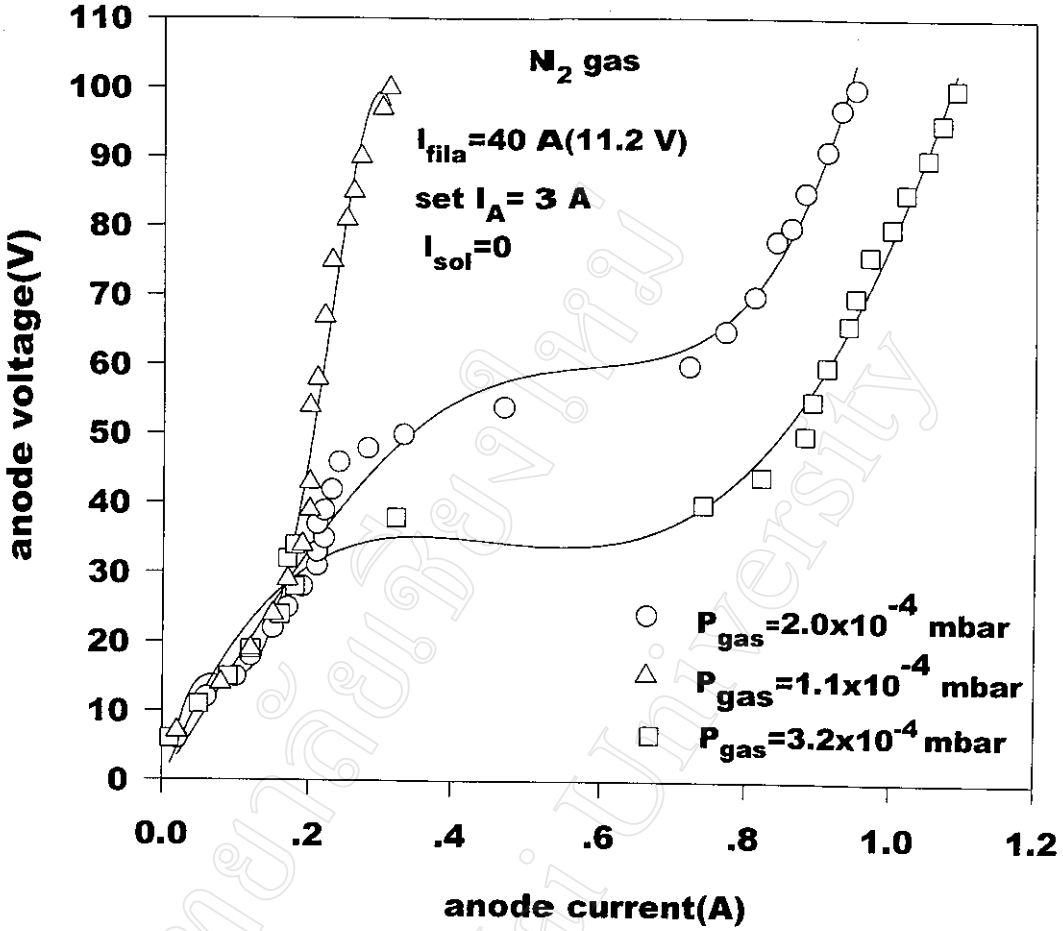
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไส้หลอดกับกระแสแอโนด

ความดันก๊าซจะแสดงถึงปริมาณของก๊าซที่จ่ายให้กับแหล่งกำเนิดไอออน ถ้าความดันก๊าซมาก แสดงว่าปริมาณของก๊าซที่จ่ายให้กับแหล่งกำเนิดไอออนมีจำนวนมาก ซึ่งปริมาณของก๊าซที่จ่ายให้กับแหล่งกำเนิดไอออนนี้จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการแตกตัวของก๊าซ นั่นคือถ้าจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซในห้องดิสชาร์จมากจะทำให้โอกาสในการแตกตัวของก๊าซมีค่ามากขึ้นด้วย ค่าความดันก๊าซที่มีผลต่อการดิสชาร์จแสดงในกราฟรูปที่ 4.2 ในการทดสอบจะคงค่ากระแสไส้หลอดไว้ที่ 40.1 แอมแปร์ (11.1 โวลท์) และแรงดันแอโนดไว้ที่ 100 โวลท์ โดยไม่มีแม่เหล็กโซลินอยด์ จะเห็นว่าที่ความดันก๊าซต่ำกว่า 1.0×10^{-4} mbar วัดจากหัววัดสูญญากาศแบบ penning บริเวณตัวล็อคสูญญากาศ(vacuum lock) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 กระแสแอโนดจะลดต่ำลงมาก ตรงจุดที่กระแสแอโนดลดลงนี้เรียกว่าความดันวิกฤติหรือความดันต่ำสุดสำหรับการดิสชาร์จ ในการทดสอบพบว่าความดันก๊าซต่ำสุดที่สามารถทำงานได้คือ 1.0×10^{-4} mbar



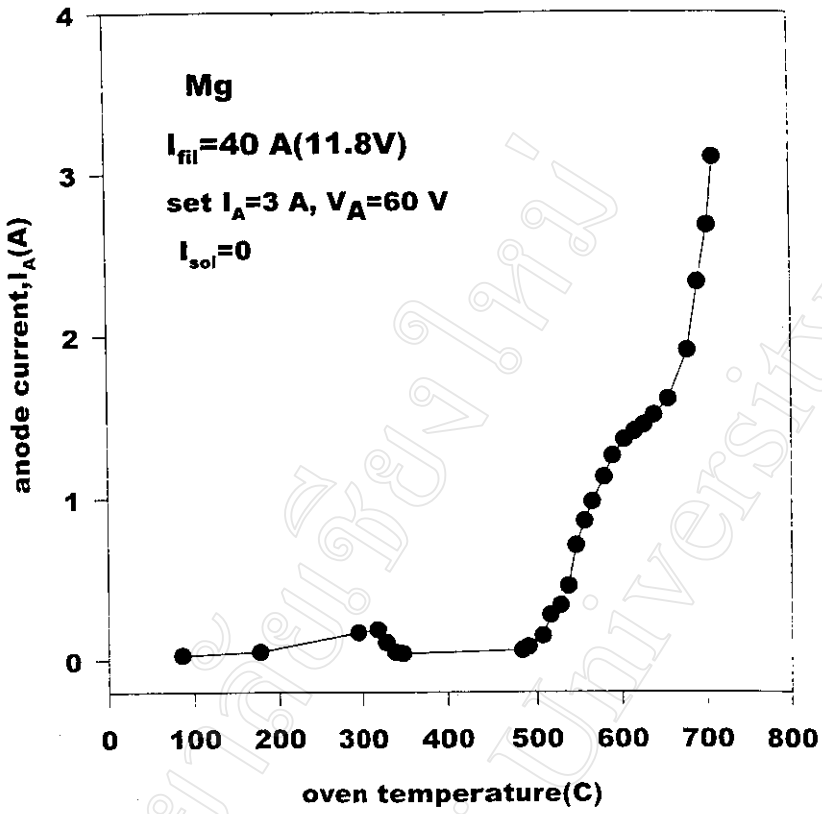
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอโนดกับความดันก๊าซ

ต่อไปพิจารณาสมบัติการดิสชาร์จจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแอโนดและกระแสแอโนด จากการเปลี่ยนความดันก๊าซไปที่ 1.1×10^{-4}, 2.0×10^{-4} และ 3.2×10^{-4} ตามลำดับ โดยตั้งค่ากระแสแอโนดไว้ที่ 3 แอมแปร์ แล้วค่อยๆเพิ่มแรงดันแอโนดขึ้นไปเรื่อยๆ จากกราฟรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าส่วนที่แหล่งกำเนิดไอออนแสดงสมบัติทางไฟฟ้าที่มีความต้านทานเป็นลบตามกราฟรูปที่ 3.1 ไม่สามารถสังเกตุเห็นได้จากการทดสอบ อาจเนื่องมาจากค่า ΔV มีค่าต่ำมาก แต่กราฟจะแสดงช่วง BC และช่วง CD ชัดเจน สำหรับที่ความดันก๊าซมีค่าเท่ากับ 1.1×10^{-4} mbar กระแสแอโนดมีค่าต่ำมากแสดงว่าการดิสชาร์จไม่สามารถเกิดขึ้นได้ สอดคล้องกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอโนดและความดันก๊าซในกราฟรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแอโนดกับกระแสแอโนด ณ ที่ความดันก๊าซเท่ากับ 1.1, 2.0 และ3.2×10^{-4} mbar

สำหรับในการสร้างไอออนจากของแข็งนั้นสมบัติการดิสชาร์จพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอโนดกับค่าแรงดันที่อ่านจากเทอร์มอคัปเปิล(thermocouple)หรือกล่าวได้ว่าเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอโนดกับอุณหภูมิของเตาเผา(oven)ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.4 ซึ่งในการทดสอบนี้วัสดุที่ใช้ทำเทอร์มอคัปเปิลทำจาก Chromel-Alumel(Ni-CrและNi-Al) สามารถเทียบหาอุณหภูมิได้จากในภาคผนวก (ง) จากกราฟจะเห็นว่าที่แรงดันเทอร์มอคัปเปิลมีค่าต่ำกว่า 20 mV ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิของเตาเผาประมาณ 500 C° กระแสแอโนดที่วัดได้มีค่าต่ำมากการดิสชาร์จไม่เกิดขึ้น แต่หลังจากอุณหภูมิเตาเผามีค่ามากกว่า 500 C° กระแสแอโนดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแสดงว่าช่วงนี้น่าจะมีการดิสชาร์จเกิดขึ้น ในการทดสอบกับโลหะแม็กนีเซียมจะตั้งค่ากระแสไส้หลอดไว้ที่ค่าที่เหมาะสมตามกราฟรูปที่ 4.1 คือ 40 แอมแปร์ และตั้งค่ากระแสแอโนดบนแหล่งจ่ายไฟไว้ที่ 3 แอมแปร์ แรงดันเท่ากับ 60 โวลท์ จากนั้นค่อยเพิ่มกระแสของเตาเผาอุณหภูมิของเตาเผาจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามกราฟรูปที่ 4.4



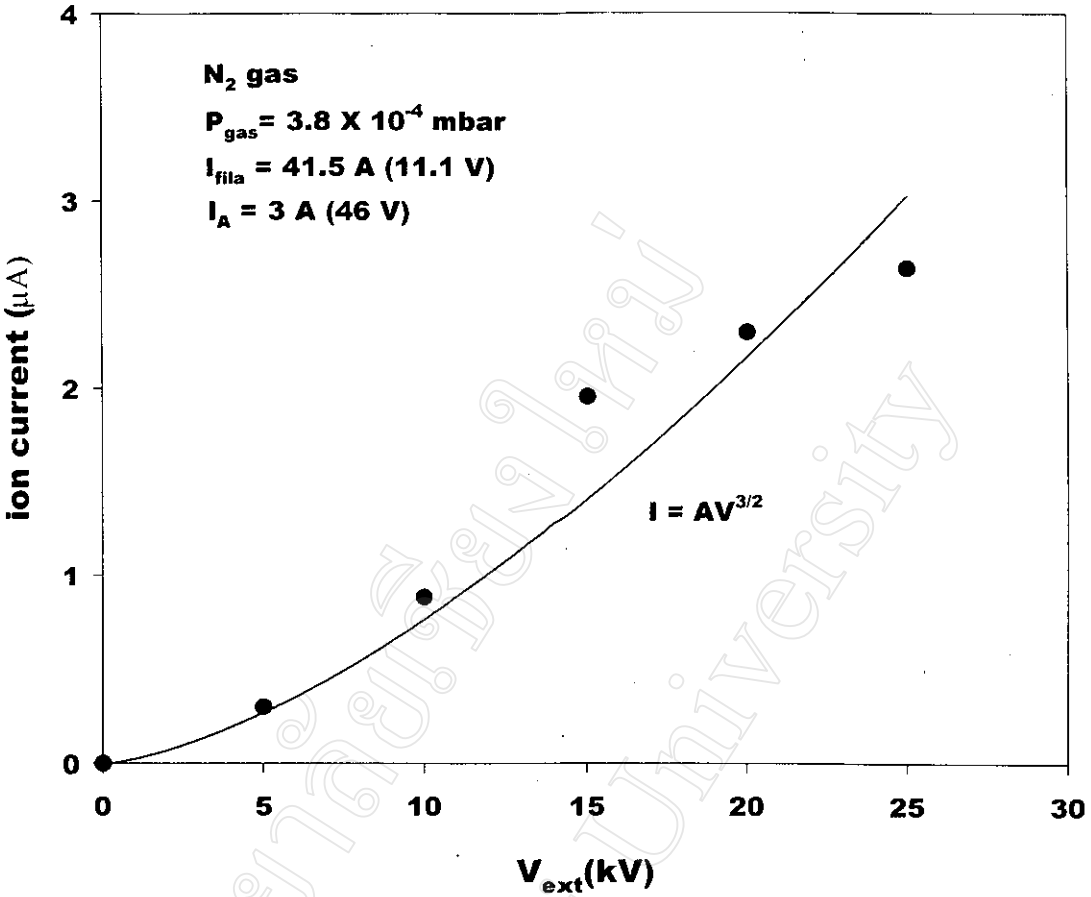
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอโนดกับอุณหภูมิของเตาเผาสำหรับการสร้างไอออนจากของแข็ง

4.2 ผลการทดสอบการวัดกระแสไอออนโดยไม่มีแม่เหล็กวิเคราะห์มวล

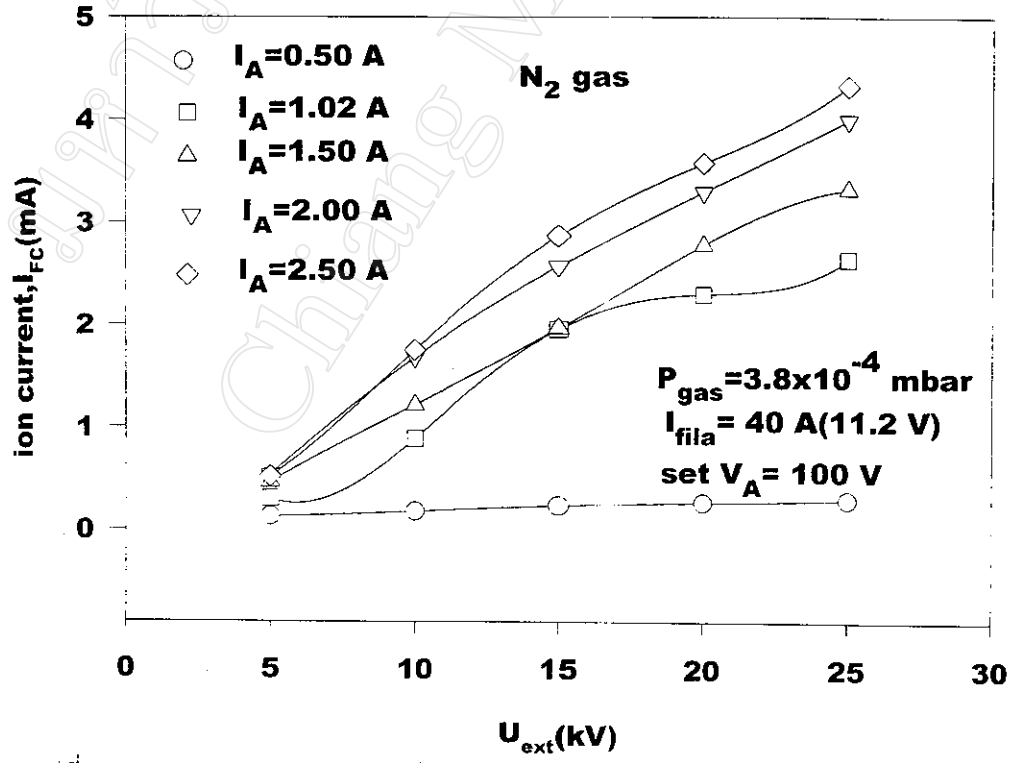
จากบทที่ 1 เราทราบว่ากระแสไอออนที่ถูกดึงออกมาจากพลาสมามีค่าขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าดึง (extraction voltage) ตามความสัมพันธ์

$$I \propto V^{3/2} \tag{4.1}$$

กราฟรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนของไนโตรเจนและศักย์ไฟฟ้าดึง จะเห็นได้ว่าที่ศักย์ไฟฟ้าดึงมีค่ามากขึ้นจะสามารถดึงกระแสไอออนได้มากยิ่งขึ้นสอดคล้องกับความสัมพันธ์ในสมการ (4.1) และในกราฟรูปที่ 4.6 แสดงถึงการขึ้นอยู่กับกระแสแอโนดของกระแสไอออน จากกราฟจะเห็นว่าที่กระแสแอโนดมีค่าเท่ากับ 0.5 แอมแปร์ กระแสไอออนที่วัดได้มีค่าต่ำมากๆและกระแสไอออนจะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสแอโนดมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่ากระแสแอโนดที่เหมาะสมนั้นจะต้องมีค่ามากกว่า 1 แอมแปร์ขึ้นไป ในการทดสอบให้คงค่ากระแสไส้หลอดและค่าความดันก๊าซให้เหมาะสมตามกราฟรูปที่ 4.1 และ4.2 ตามลำดับ โดยตั้งค่ากระแสแอโนดบนแหล่งจ่ายไฟไว้ที่ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0และ 2.5 แอมแปร์ ตามลำดับ จากนั้นค่อยๆเพิ่มแรงดันแอโนดขึ้นไป

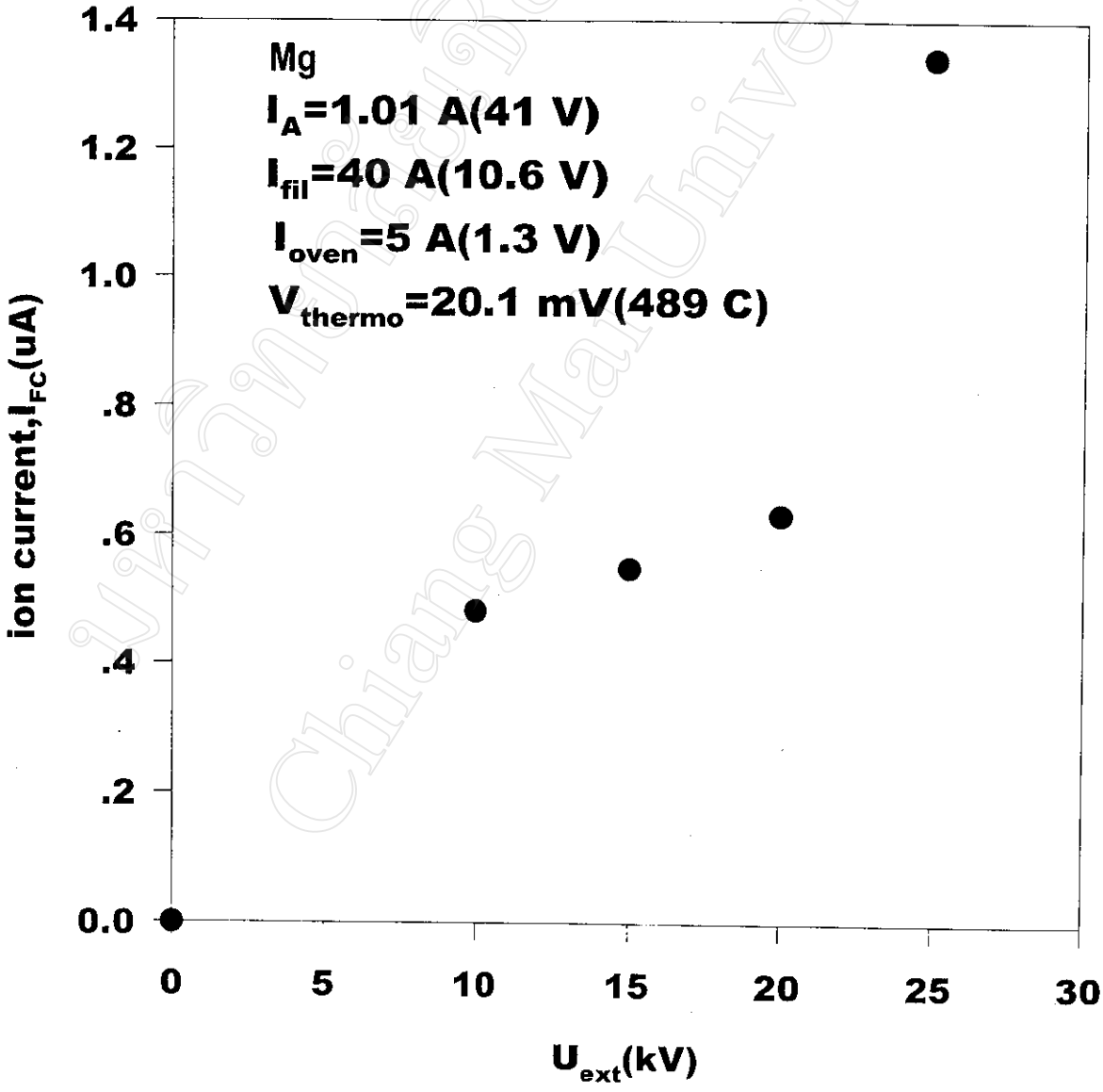


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนของไนโตรเจนกับศักย์ไฟฟ้าดึง ที่กระแสแอโนดเท่ากับ 1.02 แอมแปร์ โดยยังไม่ได้คัดแยกไอออนและไม่มี electron suppressor



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนของไนโตรเจนกับศักย์ไฟฟ้าดึงที่กระแสแอโนดเท่ากับ 0.5, 1.02, 1.5, 1.0และ2.5 แอมแปร์ โดยยังไม่ได้คัดแยกไอออนและไม่มี eletron suppressor

สำหรับกราฟรูปที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนของแม็กนีเซียมกับศักย์ไฟฟ้าดึงจากกราฟจะเห็นว่าที่ศักย์ไฟฟ้าดึง 20-25 kV กระแสไอออนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไม่สอดคล้องกับสมการ (4.1) สาเหตุเนื่องมาจากข้อมูลในช่วงต้นๆมีน้อยเกินไปและอาจมาจากชนิดของไอออน ไอออนจากโลหะจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิสูง ในการทดสอบจะตั้งค่ากระแสไส้หลอดไว้ที่ 40 แอมแปร์ และตั้งค่ากระแสแอโนดไว้ที่ 1.01 แอมแปร์ แรงดัน 100 โวลท์แล้วค่อยๆเพิ่มกระแสเตาเผาไปเรื่อยๆจนกระทั่งแรงดันที่อ่านจากเทอร์มอคัปเปิลมีค่า 20 mV หรืออุณหภูมิเตาเผาประมาณ 500 C° ซึ่งสอดคล้องกับกราฟรูปที่ 4.4 ตอนนี้กระแสแอโนดจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่ตั้งไว้คือ 1.01 แอมแปร์แล้วแรงดันแอโนดจะลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 60 โวลท์ซึ่งก็คือแรงดันดิสชาร์จที่เกิดขึ้น



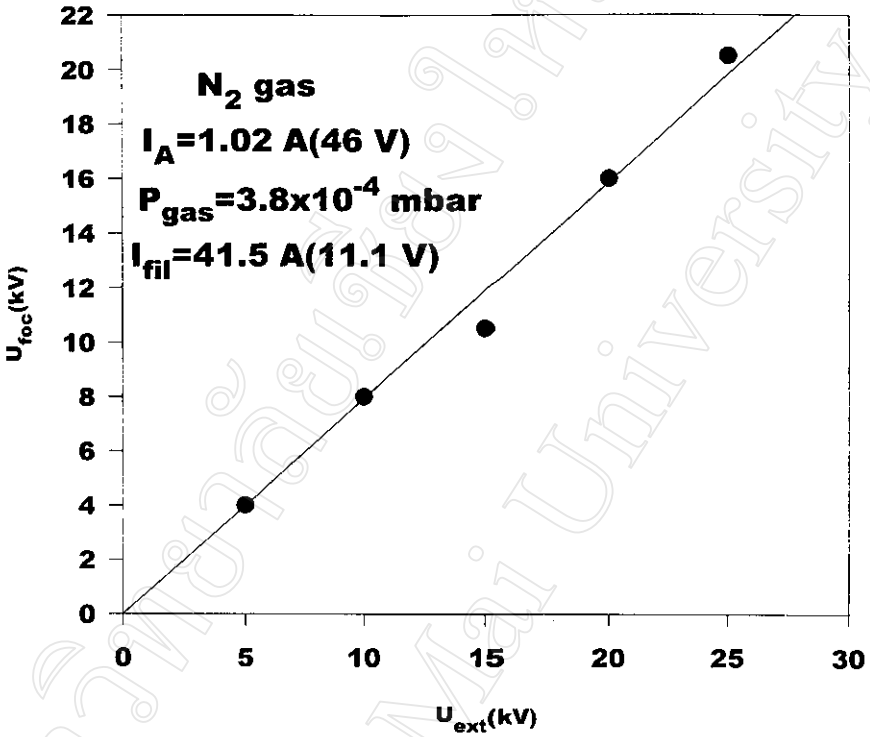
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออนของแม็กนีเซียมกับศักย์ไฟฟ้าดึงที่กระแสแอโนดเท่ากับ 1.01 แอมแปร์ โดยไม่มี electron suppressor

ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าดึงกับศักย์ไฟฟ้าของเลนส์(Einzel lens) แสดงได้ในกราฟรูปที่ 4.8 พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นสอดคล้องกับสมการ

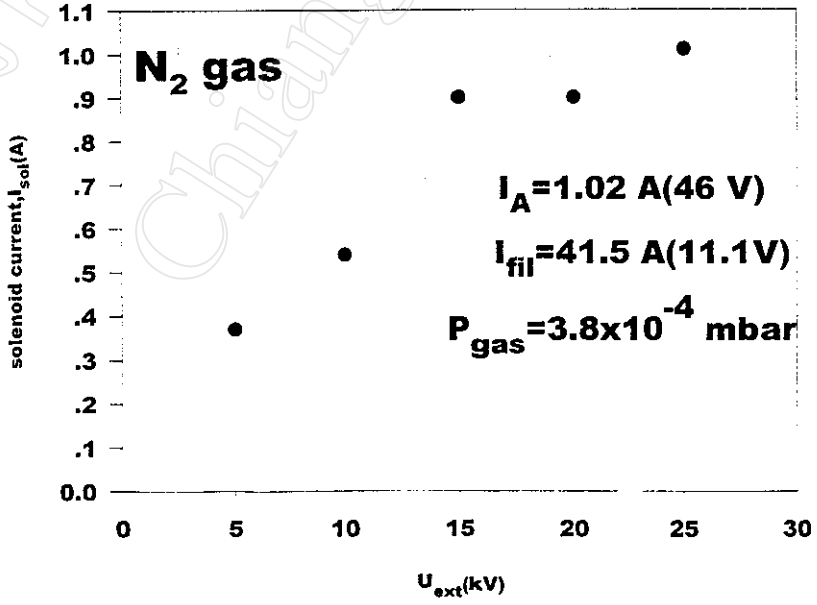
$$E_l = \alpha E_{ext} \tag{4.2}$$

เมื่อ E_l คือ ศักย์ไฟฟ้าของเลนส์

E_{ext} คือ ศักย์ไฟฟ้าดึงและ α คือ ค่าคงที่

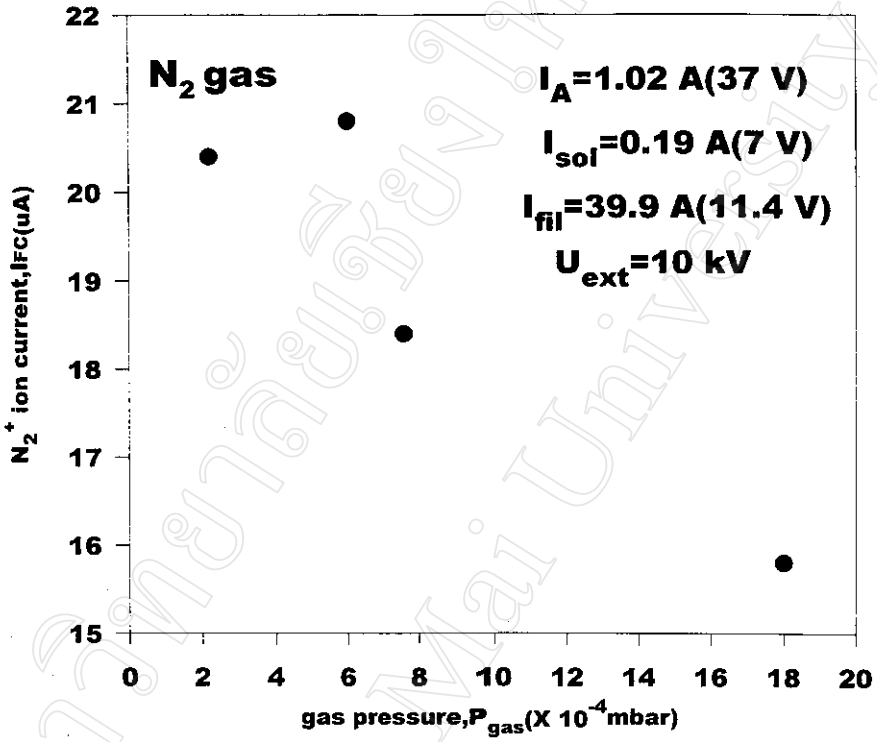


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าดึงกับศักย์ไฟฟ้าของเลนส์



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขดลวดโซลินอยด์กับศักย์ไฟฟ้าดึง

จากการทดสอบดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.8 ค่าคงที่ α ก็คือค่าความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 0.8 และรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าดึงกับกระแสแม่เหล็กโซลินอยด์ จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าดึงมากขึ้นจะต้องใช้กระแสแม่เหล็กโซลินอยด์มากขึ้นหรือต้องใช้สนามแม่เหล็กเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแตกตัวให้มากขึ้น เพราะว่าเมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าดึงมากขึ้นไอออนสามารถดึงออกมาได้มากขึ้นดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างไอออนเพื่อมาทดแทนมากขึ้นเพื่อรักษาสภาพพลาสมาให้คงอยู่

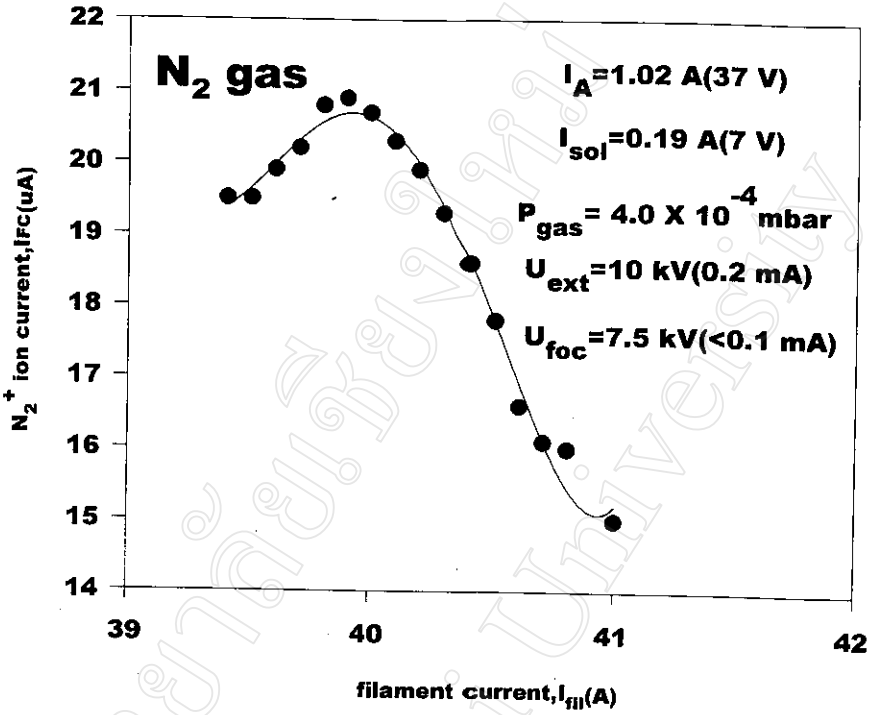


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออน N_2^+ กับความดันก๊าซที่ศักย์ไฟฟ้าดึง 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ กระแสแอโนดเท่ากับ 1.02 แอมแปร์ โดยไม่มี electron suppressor

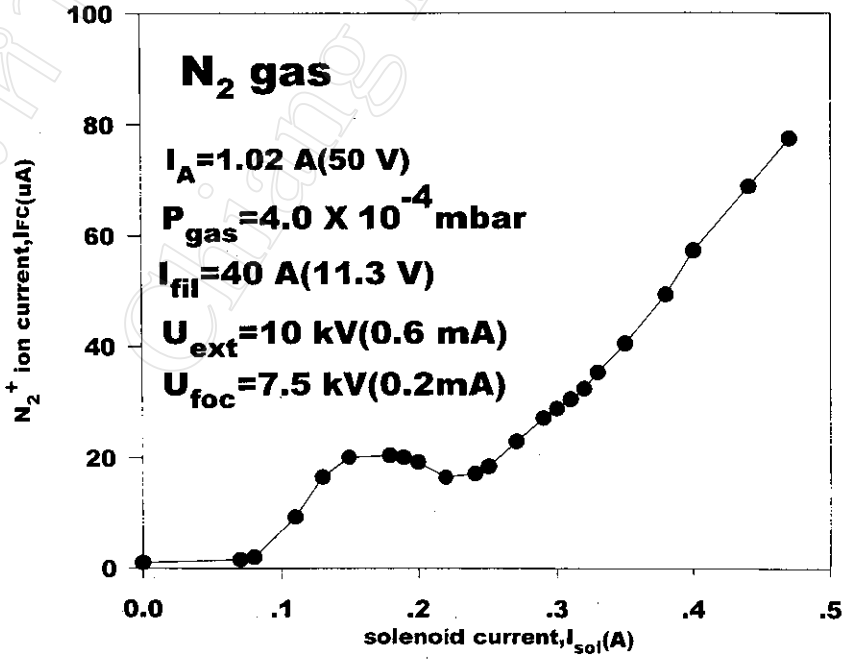
4.3 ผลการทดสอบการวัดกระแสไอออนโดยมีแม่เหล็กวิเคราะห์มวล

ในรูปที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงการขึ้นอยู่กับความดันก๊าซของกระแสไอออน พบว่าช่วงความดันก๊าซที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 0.35 -0.40 ธอรร์(วัดจากหัววัด pirani) หรือระหว่าง $2\text{-}4\times10^{-4}$ mbar(วัดจากหัววัด penning) และเมื่อความดันก๊าซมากกว่าหรือต่ำกว่าช่วงความดันก๊าซนี้กระแสไอออนจะลดลงทันที โดยในการทดสอบจะคงค่าพารามิเตอร์อื่นๆไว้ที่ค่าเหมาะสมตามที่ได้ทดลองไว้เรียบร้อยแล้ว ส่วนกระแสไอออนที่ขึ้นอยู่กับกระแสไส้หลอดแสดงในกราฟรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าผลลัพธ์จะคล้ายๆกับของความดันก๊าซเพราะพารามิเตอร์ทั้งสองมีผลต่อประสิทธิภาพการแตกตัวของก๊าซ จากกราฟค่ากระแสไส้หลอดที่เหมาะสมจะอยู่ที่ช่วงประมาณ 39-40 แอมแปร์ เมื่อกระแสไส้หลอดมีค่ามากหรือต่ำกว่านี้กระแสไอออนจะลดลงทันที สำหรับกราฟรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแม่เหล็กโซลินอยด์กับกระแสไอออนของไนโตรเจนโดยพารามิเตอร์อื่นๆจะคงไว้ที่ค่าเหมาะสมเหมือนกัน สนามแม่เหล็กจะมีผล

ต่อวงโคจรของอิเล็กตรอน ถ้าสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยเกินไปรัศมีวงโคจรของอิเล็กตรอนจะมีค่ามากกว่ารัศมีของห้องดิสชาร์จ

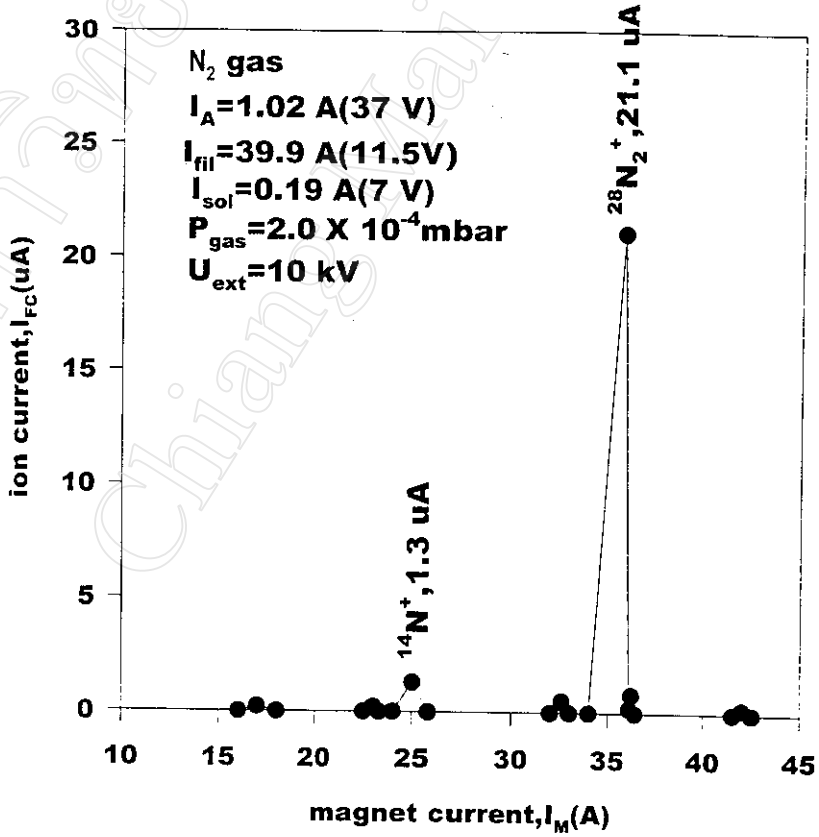


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออน N_2^+ กับกระแสไส้หลอดที่ศักย์ไฟฟ้าดึง 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ กระแสแอโนดเท่ากับ 1.02 แอมแปร์ โดยไม่มี electron suppressor

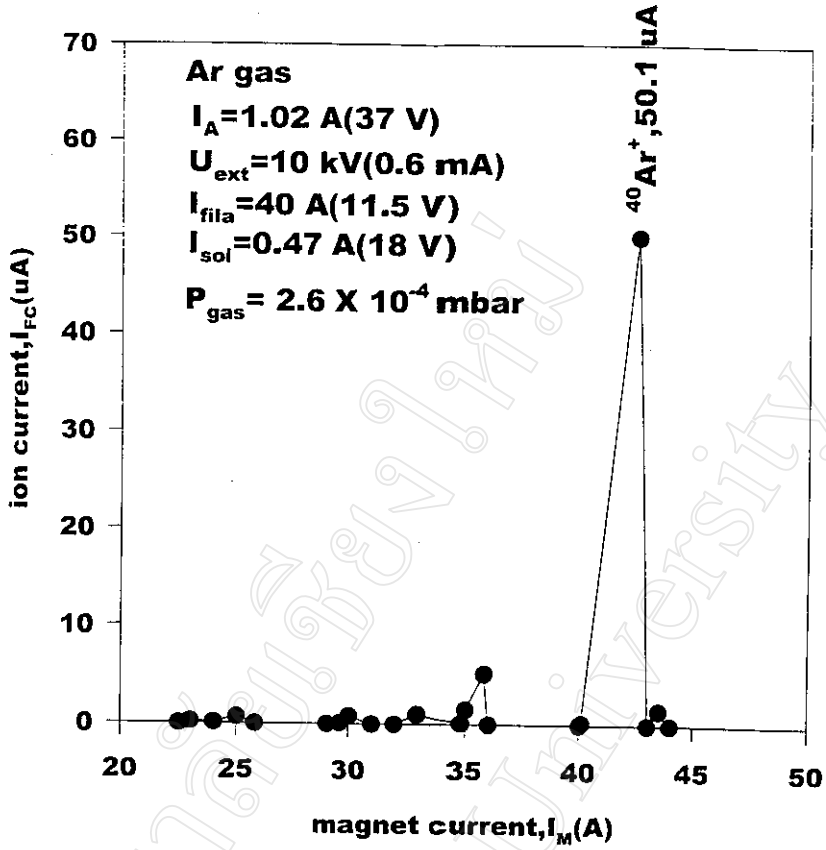


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไอออน N_2^+ กับกระแสขดลวดโซลินอยด์ ที่ศักย์ไฟฟ้าดึง 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ กระแสแอโนดเท่ากับ 1.02 แอมแปร์ โดยไม่มี electron suppressor

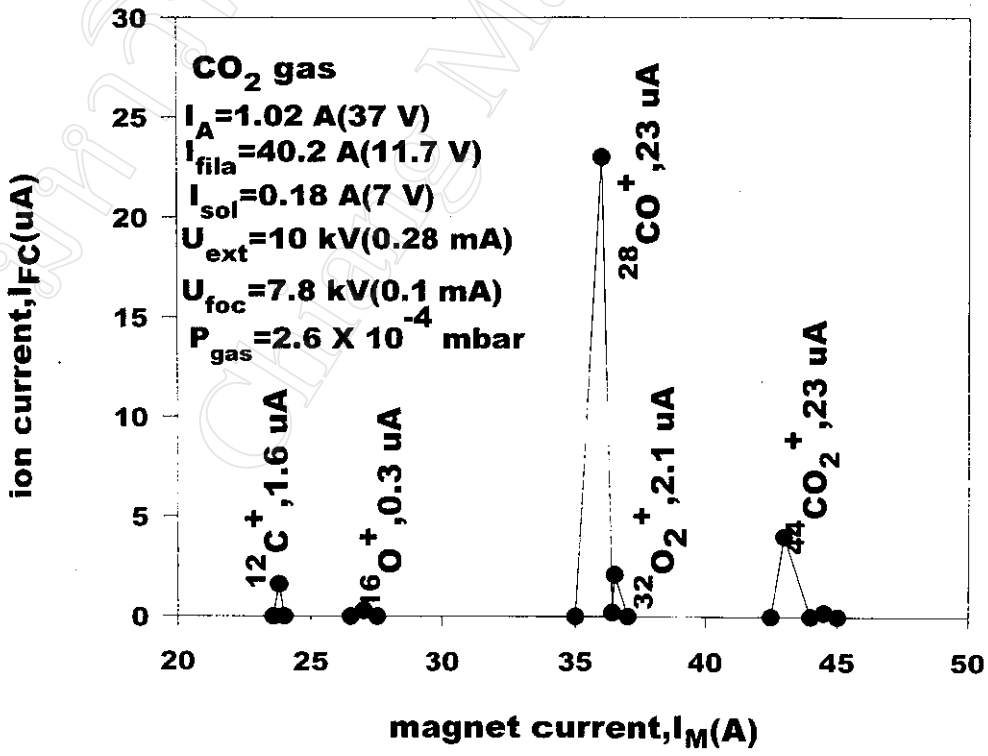
ในการทดสอบการแยกไอออนโดยใช้แม่เหล็กวิเคราะห์มวลดังแสดงในรูปที่ 4.13 ถึง 4.16 โดยรูปที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงไอออนของไนโตรเจน สำหรับก๊าซไนโตรเจนไอออนที่สามารถแยกออกมาได้ชัดเจนมากที่สุดคือ ไอออน N_2^+ และ ไอออน N^+ โดย ไอออน N_2^+ จะพบมากกว่า ไอออน N^+ ดังอธิบายในบทที่ 1 ถ้าเปรียบเทียบกับตารางที่ 3 ในภาคผนวก (ค) จะพบว่าที่พลังงานไอออน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ ที่กระแสแม่เหล็กประมาณ 25 แอมแปร์ จะตรงกับมวลไอออนประมาณ 14 amu ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าไอออนที่ตรวจพบน่าจะเป็นไอออน N^+ และที่กระแสแม่เหล็กประมาณ 36 แอมแปร์ กระแสไอออนที่วัดได้น่าจะเป็นไอออน N_2^+ สำหรับก๊าซอาร์กอนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อย ไอออนที่พบโดยทั่วไปจะพบเพียงไอออน Ar^+ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.14 ที่กระแสแม่เหล็กประมาณ 44 แอมแปร์ เทียบกับตารางที่ 3 ในภาคผนวก (ค) ตรงกับมวลไอออนที่ประมาณ 40 amu แต่จากกราฟรูปที่ 4.14 กระแสไอออน Ar^+ ตรงกับกระแสแม่เหล็กประมาณ 42 แอมแปร์ ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้อาจมาจากความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและกระแสไม่เป็นแบบเชิงเส้น สำหรับก๊าซคาร์บอนไดอ๊อกไซด์(CO_2) โดยทั่วไปสามารถแยกไอออนได้ 5 ชนิดดังนี้คือ C^+, O^+, O_2^+, CO^+ และ CO_2^+ จากการทดสอบและเทียบกับตารางที่ 3 ในภาคผนวก (ค) แสดงไอออนจากก๊าซ CO_2 ได้ดังกราฟรูปที่ 4.15 ซึ่งจะเห็นว่าไอออน CO^+ จะมีค่ามากที่สุด และไอออนของแม็กนีเซียม(Mg) แสดงในกราฟรูปที่ 4.16



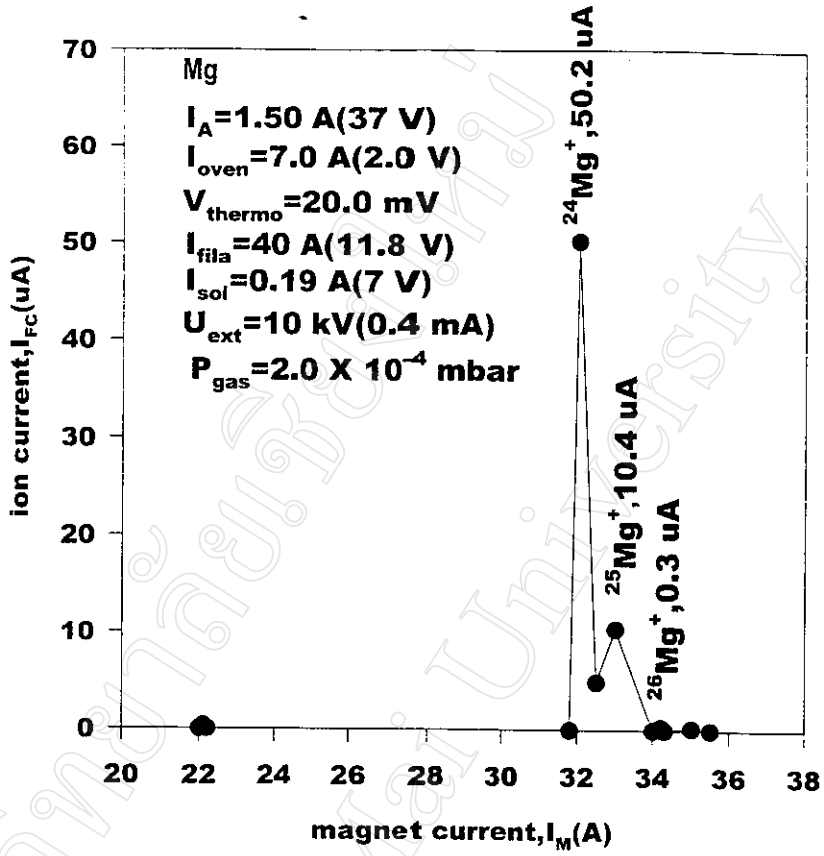
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงชนิดของไอออนที่ได้จากก๊าซไนโตรเจนที่พลังงานไอออน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ กระแสแอโนดเท่ากับ 1.02 แอมแปร์ โดยไม่มี electron suppressor



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงไอออนที่ได้จากก๊าซอาร์กอนที่พลังงานไอออน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ กระแสแอโนดเท่ากับ 1.02 แอมแปร์ โดยไม่มี electron suppressor



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงชนิดของไอออนที่ได้จากก๊าซคาร์บอนไดอ๊อกไซด์ที่พลังงานไอออน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ กระแสแอโนดเท่ากับ 1.02 แอมแปร์ โดยไม่มี electron suppressor



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงไอออนจากโลหะแม็กนีเซียมที่พลังงานไอออน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ กระแสแอโนดเท่ากับ 1.02 แอมแปร์ โดยไม่มี elctron suppressor