

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้ จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในบทที่ 3 โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ผลของระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ ความดัน และกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความหนาของฟิล์ม จากนั้นวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มโดยใช้เทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe) และเทคนิคฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall effect measurements) โดยศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความเข้มข้นของพาหะ วิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดค่าการส่งผ่านแสง (UV – visible spectrometer) แบบลำแสงคู่ เพื่อตรวจสอบค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม แล้วศึกษาพื้นผิวของฟิล์มบางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) และอะตอมมิก ฟอซ ไมโครสโคป (Atomic Force Microscope : AFM) วิเคราะห์ค่าเฮซ (Haze) สมบัติทางไฟฟ้าและพื้นผิวของฟิล์มบางอีกครั้งหลังจากที่กัดฟิล์มให้ขรุขระด้วยกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric : HCl) ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-ray diffraction: XRD) และสุดท้ายศึกษาองค์ประกอบของฟิล์มด้วยเทคนิคไอเจย์ อิเล็กตรอน (Auger Electron Spectroscopy: AES)

4.1 ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ ความดัน และกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความหนาของฟิล์ม

จากการใช้เป้าเซรามิกส์ AIZO เพื่อเตรียมฟิล์มบาง AIZO ด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง นั้น พบว่าทุกเงื่อนไขการสปีดเตอริงจะได้ฟิล์มบางโปร่งใสบนแผ่นรองรับ โดยมีความหนาต่างกันซึ่งขึ้นกับเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มดังนี้

4.1.1 ผลของระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับและความดันที่มีต่อความหนาของฟิล์ม

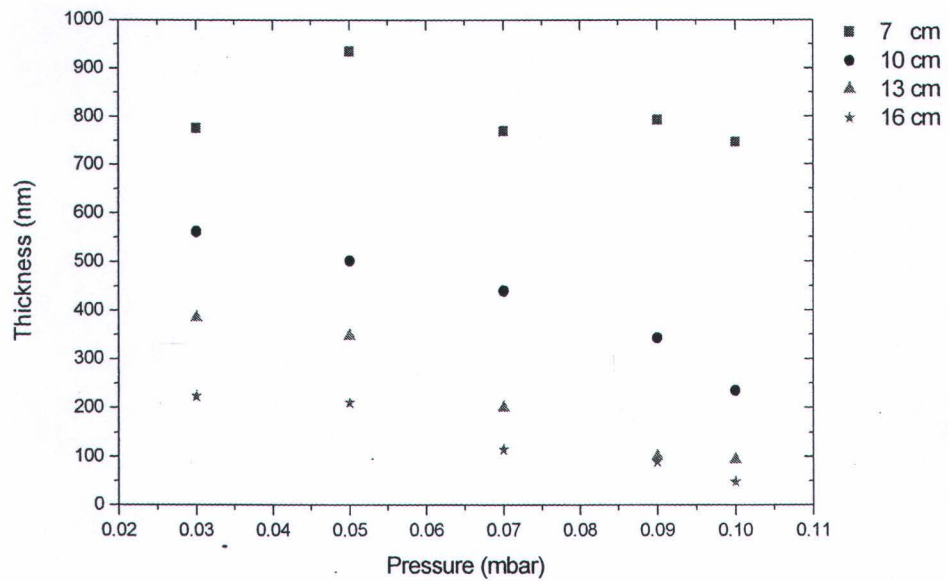
อันดับแรกวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติและการทับถมของฟิล์ม จากภาพประกอบ 4.1 แสดงถึงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับและความดันขณะสปีดเตอริงที่ส่งผลต่อการทับถมของฟิล์ม พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มมีแนวโน้มลดลง โดยเห็นได้ชัดเจนเมื่อระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 13 และ 16 cm ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้จากเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าระหว่างอาโนดและคาโทดจนถึงแรงดันพังทลาย พลังงานของประจุถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น สามารถชนกับโมเลกุลของก๊าซอาร์กอนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยในภาชนะสุญญากาศทำให้โมเลกุลของก๊าซอาร์กอนเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนและไอออนบวก เกิดการไอออไนซ์ก๊าซอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณมาก ไอออนบวกจะเข้าไปชนกับเป้าซึ่งอยู่ที่ขั้วคาโทด

เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมทำให้อะตอมของเป้าถูกสปีดเตอร์ออกมาและตกลงบนแผ่นรองรับ เมื่อความดันเพิ่มขึ้นทำให้ไอออนของอาร์กอนในพลาสมาเพิ่มขึ้น จึงทำให้อะตอมของเป้าที่ถูกสปีดเตอร์ออกมาชนกับไอออนของอาร์กอนในพลาสมาและสูญเสียพลังงานเนื่องจากการชน และมีพลังงานไม่พอที่จะตกลงบนแผ่นรองรับ ทำให้อัตราการทับถมลดลง ความหนาของฟิล์มจึงลดลงตามลำดับ และระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่ต่างกันยังส่งผลต่อค่าความหนาของฟิล์ม โดยระยะห่างมาก ความหนาของฟิล์มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากระยะห่างมาก อะตอมของเป้าที่ถูกสปีดเตอร์ออกมามีโอกาสสูญเสียพลังงานจากการชนกับ ไอออนของอาร์กอนในพลาสมามากกว่าที่ระยะใกล้ทำให้อัตราการทับถมลดลง ความหนาของฟิล์มจึงลดลง โดยที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 7 cm จะให้อัตราการทับถมดีที่สุด (25-32 nm/min) โดยฟิล์มมีความหนาระหว่าง 750-950 nm เมื่อความดันขณะสปีดเตอร์อยู่ในช่วง 0.03-0.1 mbar ทั้งนี้เนื่องจากระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับใกล้กัน ทำให้อะตอมของเป้าที่ถูกสปีดเตอร์ออกมาตกลงบนแผ่นรองรับโดยไม่สูญเสียพลังงานเนื่องจากการชนกับ ไอออนของอาร์กอนจึงให้อัตราการทับถมดี จากผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับและความดันขณะสปีดเตอร์นั้นมีผลต่ออัตราการทับถมของฟิล์มซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการก่อเกิดฟิล์มบาง [42] โดยสามารถปรับเงื่อนไขเพื่อให้ได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการได้

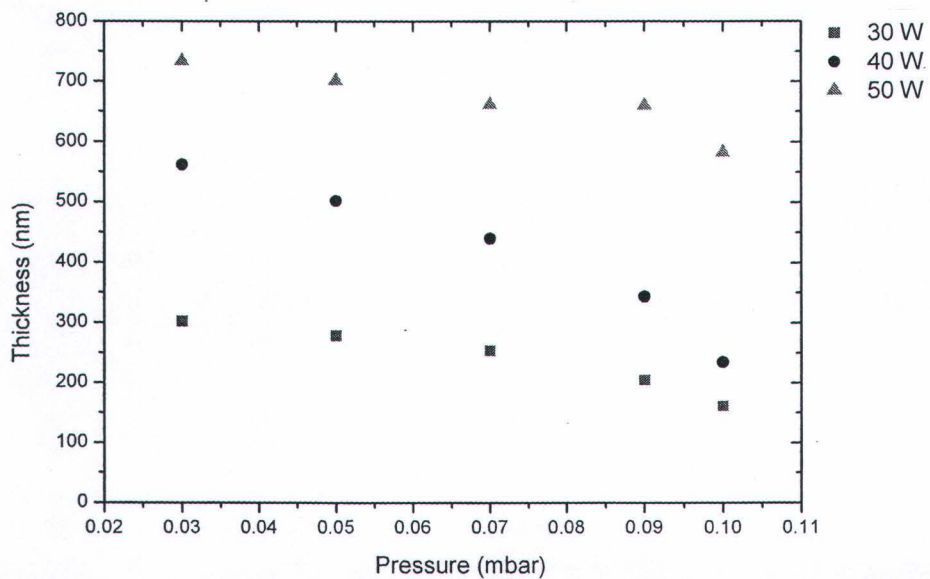
4.1.2 ผลของกำลังไฟฟ้าและความดันที่มีต่อความหนาของฟิล์ม

จากภาพประกอบ 4.2 แสดงถึงอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าและความดันที่มีต่อการทับถมของฟิล์ม โดยเตรียมฟิล์มที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm ด้วยกำลังไฟฟ้า 30 40 และ 50 W ที่ความดันต่างๆ พบว่าตัวอย่างที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 30 W เมื่อเพิ่มความดันความหนาของฟิล์มจะลดลงตามลำดับ โดยมีผลการทดลองที่สอดคล้องกันทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นการเตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 40 หรือ 50 W และสอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.1.1

จากการทดลองกำลังไฟฟ้าส่งผลต่อความหนาของฟิล์มเช่นกัน โดยฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าสูงกว่าจะมีความหนาเพิ่มขึ้นตามลำดับในทุกตัวอย่างที่เตรียมด้วยความดันเดียวกัน เนื่องจากการเพิ่มกำลังไฟฟ้าจะช่วยเร่งไอออนให้เคลื่อนที่ด้วยพลังงานสูงเมื่อเกิดการชนและถ่ายเทโมเมนตัมกับอะตอมผิวหน้าเป้าจะส่งผลให้อะตอมผิวหน้าเป้ามียุทธศาสตร์การเคลื่อนที่ที่สูงขณะตกเคลือบบนแผ่นรองรับ [48] ทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนากว่าตัวอย่างที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าต่ำซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการกลืนดิซซาร์จ โดยจากการทดลองฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W ที่ความดันต่ำในช่วง 0.03-0.05 mbar จะให้ฟิล์มที่มีความหนาสูงสุด (>700 nm) โดยมีอัตราการทับถมในช่วง 24 nm/min



ภาพประกอบ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเปตเตอริงที่มีต่อความหนาของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 7 10 13 และ 16 cm ตามลำดับ



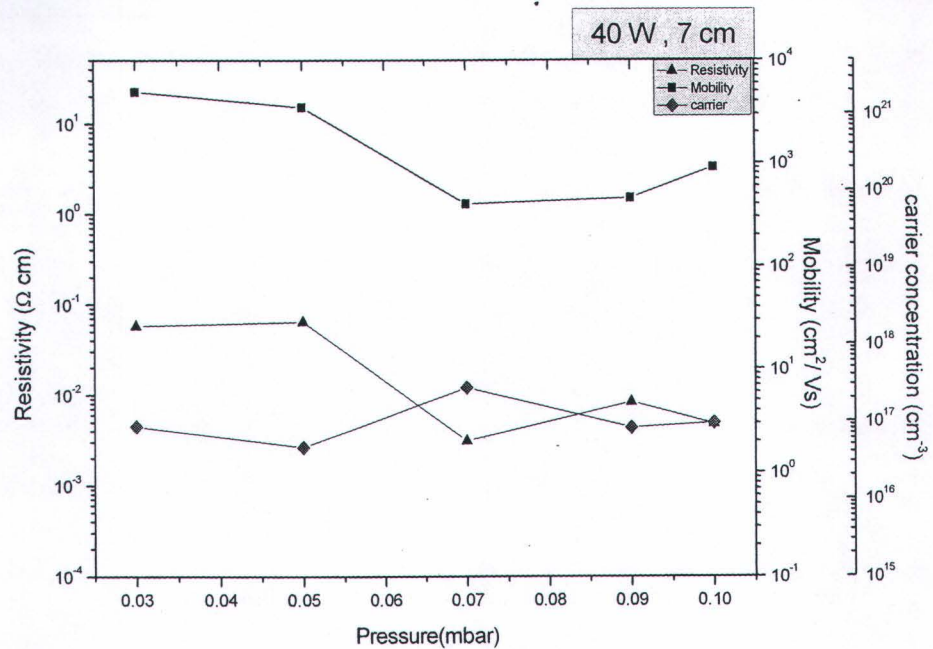
ภาพประกอบ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเปตเตอริงที่มีต่อความหนาของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 30 40 และ 50 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm

4.2 สมบัติทางไฟฟ้า

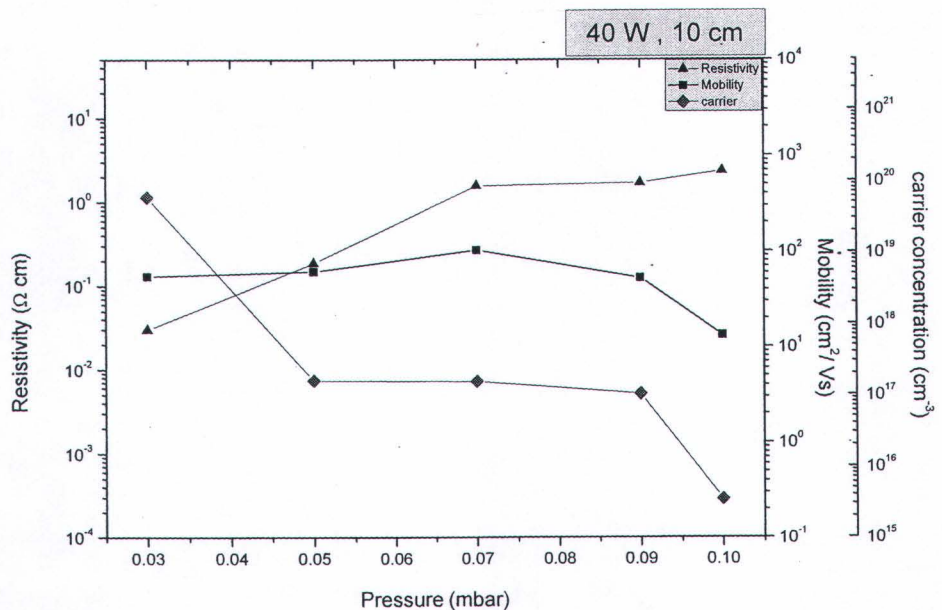
ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มโดยใช้เทคนิคโพรบอยท์โพรบ (Four point probe) และเทคนิคฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall effect measurements) โดยศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะ

4.2.1 ผลของระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับและความดันที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะ

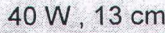
จากภาพประกอบ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสับเดอริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 7 cm ซึ่งมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในช่วง $6.39 \times 10^{-2} - 3.10 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ ความหนาแน่นของพาหะ $4.66 \times 10^{16} - 2.76 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และค่าความคล่องตัวของพาหะ $4.04 \times 10^2 - 4.95 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ เมื่อเพิ่มความดันค่าความคล่องตัวของพาหะและสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงแต่ความหนาแน่นของพาหะมีแนวโน้มคงที่ โดยความคล่องตัวของพาหะจะส่งผลต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอย่างชัดเจนเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ค่าความคล่องตัวของพาหะมีปริมาณมากจะส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากพาหะอิเล็กตรอนมีความสามารถในการเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 13 และ 16 cm ดังภาพประกอบ 4.4 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มความดัน ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยค่าความคล่องตัวของพาหะและความหนาแน่นของพาหะมีอิทธิพลต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าทั้งคู่ เมื่อความคล่องตัวของพาหะและความหนาแน่นของพาหะลดลงจะส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



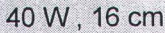
ภาพประกอบ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเปกโตรสโกปีที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 7 cm



ภาพประกอบ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเปกโตรสโกปีที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm



ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 13 cm

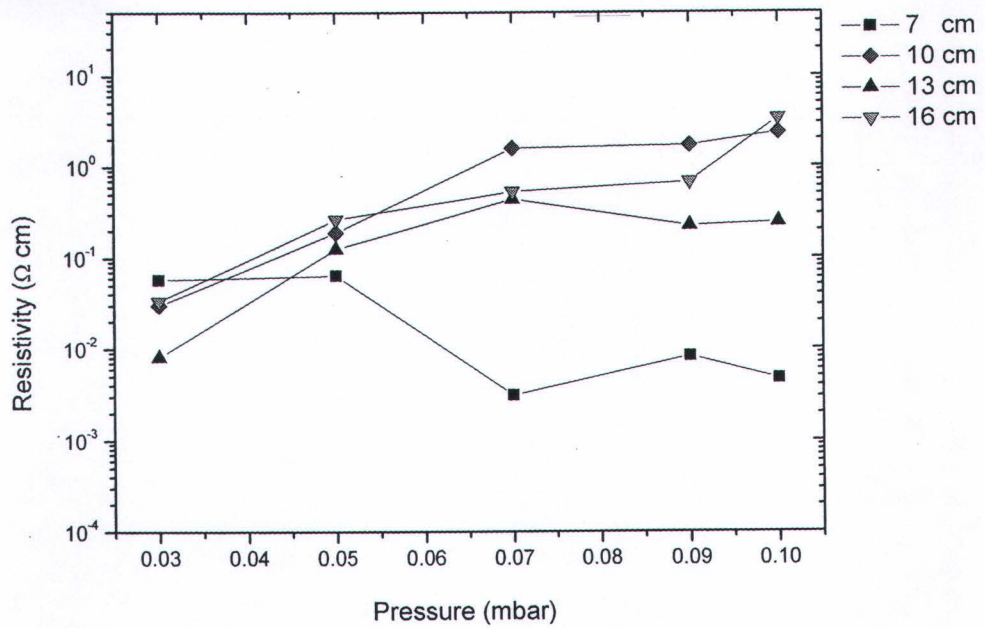


ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 16 cm

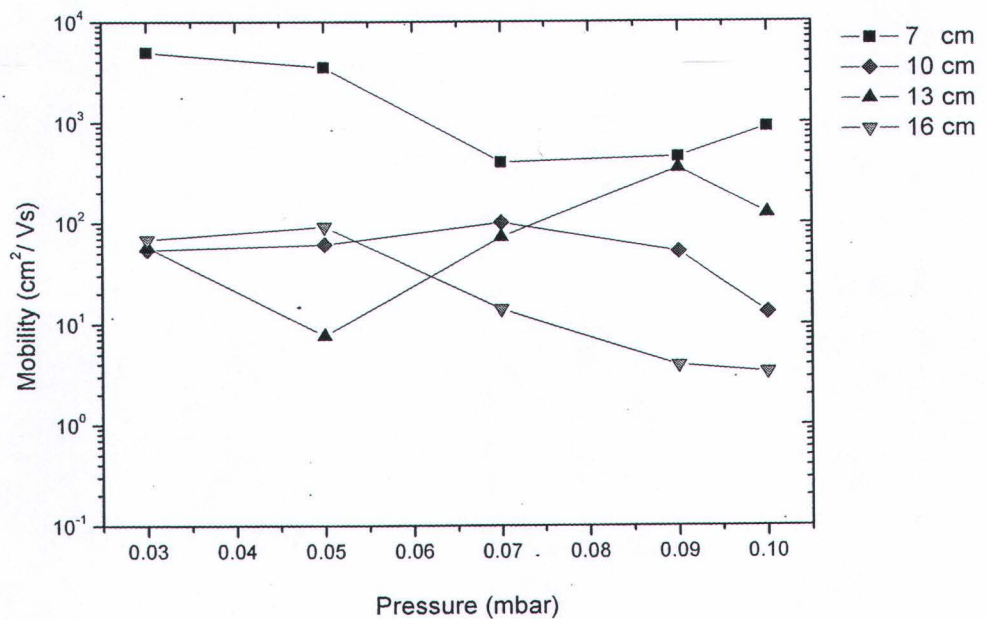
พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปีดเตอริงและระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 7 10 13 และ 16 cm ดังภาพประกอบ 4.7 พบว่าที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 13 และ 16 cm ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มความดัน อะตอมจะมีพลังงานในการทับถมฟิล์มต่ำ เนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์จากการชนกับไอออนในพลาสมา โดยทับถมเป็นกลุ่มกระจุกกระจายไม่เชื่อมต่อกันระหว่างกลุ่มอะตอม AIZO ทำให้เกิดลักษณะฟิล์มบางน้อยกว่า 400 nm และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของภาพประกอบ 4.1 ขณะที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับสั้นเป็น 7 cm สภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าต่ำสุดอย่างเห็นได้ชัดเจน ($3.10 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$) ที่ความดัน 0.07 mbar ซึ่งอธิบายได้จากพลังงานของอะตอมที่ถูกสปีดเตอริงเมื่อทับถมบนแผ่นรองรับ เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้เกิดการแตกตัวของไอออนในพลาสมามากขึ้น และทำให้อะตอม AIZO ที่ถูกสปีดเตอริงออกมาและพลังงานจลน์ของอะตอมสารเคลือบเพิ่มขึ้น มีสัมประสิทธิ์การแพร่สูง เนื่องจากที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับสั้น อะตอม AIZO จะไม่สูญเสียพลังงานเนื่องจากการชนกับไอออนในพลาสมา ทำให้เคลื่อนที่ได้ทั่วบริเวณผิวที่มีพื้นที่ว่าง ซึ่งจะทำให้ฟิล์มที่ได้หนาขึ้นและมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ

ภาพประกอบ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปีดเตอริงและระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่มีต่อความคล่องตัวของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W ซึ่งพบว่าที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 7 cm มีค่าความคล่องตัวของพาหะสูงตลอดทุกช่วงความดัน โดยสูงถึง $4.95 \times 10^3 \text{ mbar}$ เมื่อเตรียมที่ความดัน 0.03 mbar ขณะที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 13 และ 16 cm ความคล่องตัวของพาหะอยู่ในช่วง $3.37 \text{ cm}^2/\text{Vs} - 3.54 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ เมื่อค่าความคล่องตัวของพาหะสูงก็จะส่งผลให้มีค่าสภาพไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากพาหะอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำได้ดี ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้างดภาพประกอบ 4.7

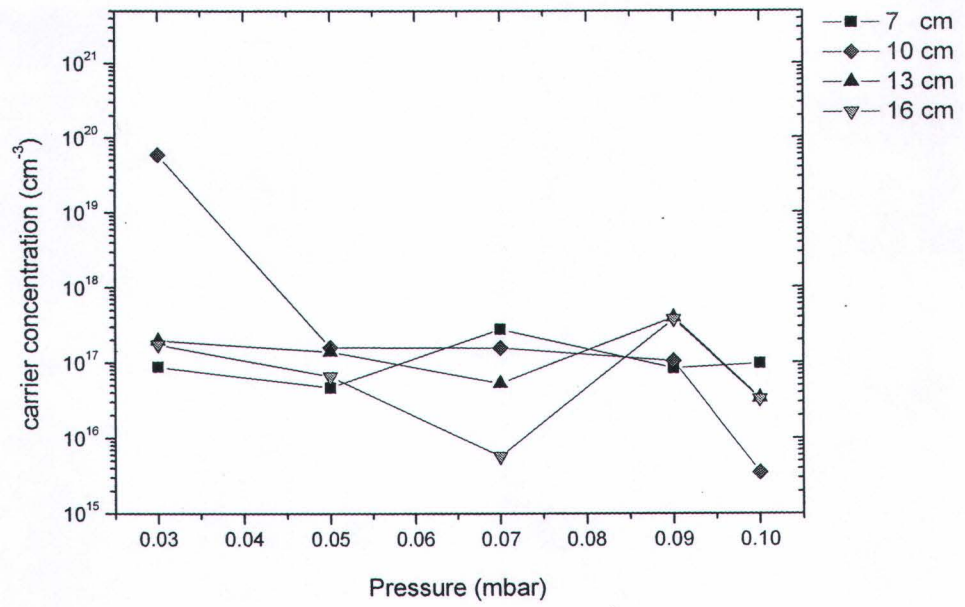
ภาพประกอบ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปีดเตอริงและระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่มีต่อความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W ซึ่งพบว่าที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 7 10 13 และ 16 cm ค่าความหนาแน่นของพาหะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง $2.5 \times 10^{15} - 3.94 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ยกเว้นที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar ซึ่งมีค่าความหนาแน่นของพาหะสูงที่สุดเป็น $5.91 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ และที่ความดัน 0.01 mbar ซึ่งมีความหนาแน่นของพาหะต่ำสุดเป็น $5.73 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปีดเตอริงและระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W



ภาพประกอบ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปีดเตอริงและระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่มีต่อความคล่องตัวของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W



ภาพประกอบ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสะสมกับและระยะห่างระหว่างเป้ากับ
แผ่นรองรับที่มีต่อความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ กำลังไฟฟ้า 40 W

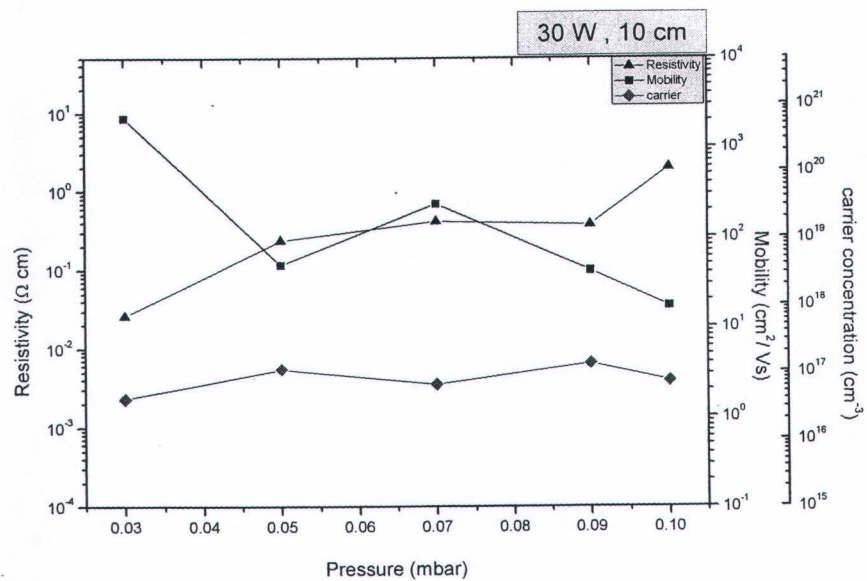
4.2.2 ผลของกำลังไฟฟ้าและความดันที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะ

พิจารณาความดันขณะสับเตอริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO โดยเตรียมที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm กำลังไฟฟ้า 30 40 และ 50 W ดังภาพประกอบ 4.10 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงขึ้น ความคล่องตัวของพาหะมีแนวโน้มลดต่ำลง ส่วนค่าความหนาแน่นของพาหะมีแนวโน้มคงที่ตลอดช่วงความดัน ยกเว้นที่กำลังไฟฟ้า 40 W ความดัน 0.03 และ 0.10 mbar ค่าความคล่องตัวของพาหะส่งผลต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยมีลักษณะแปรผกผันกัน ปริมาณค่าความคล่องตัวของพาหะที่มากจะส่งผลให้พาหะอิเล็กตรอนมีความสามารถในการเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้าได้ดี จึงทำให้เกิดการนำไฟฟ้าที่ดี สภาพต้านทานไฟฟ้าน้อย

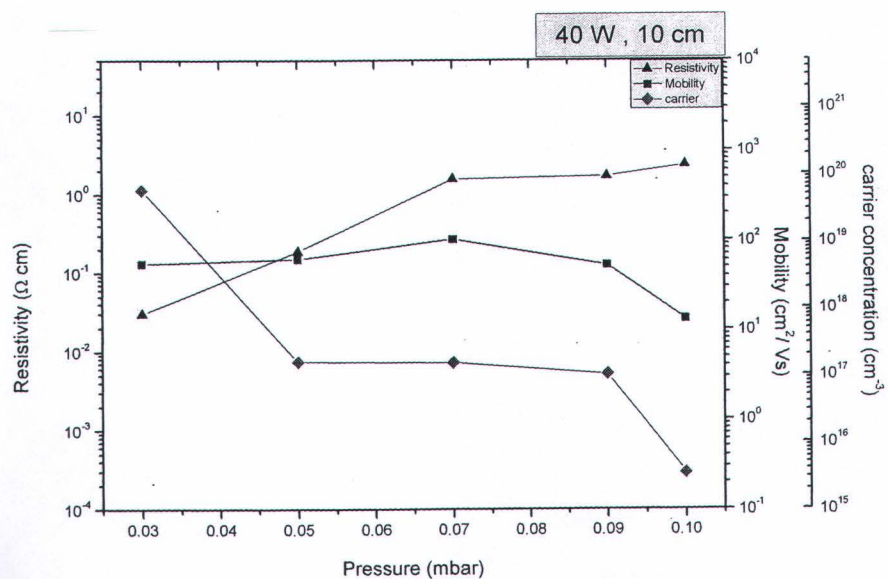
เมื่อเปรียบเทียบสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเตรียมที่กำลังไฟฟ้าต่างกัน ดังภาพประกอบ 4.13 เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดต่ำลงซึ่งสัมพันธ์กับความหนาดังภาพประกอบ 4.2 โดยมีค่าต่ำสุดเป็น $2.57 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ เมื่อเตรียมที่กำลังไฟฟ้า 50 W ความดัน 0.03 mbar โดยการให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะช่วยเร่งให้อิออนให้เคลื่อนที่ด้วยพลังงานสูงเมื่อเกิดการชนและถ่ายเทโมเมนตัมกับอะตอมผิวหน้าเป้าจะส่งผลให้อะตอมผิวหน้าเป้ามียุทธศาสตร์การเคลื่อนที่ที่สูงขณะตกเคลือบบนแผ่นรองรับจึงทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนา เนื้อฟิล์มมีความต่อเนื่องและสม่ำเสมอมากกว่าตัวอย่างที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าน้อย ทำให้พาหะอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ดี ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อย

ภาพประกอบ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสับเตอริงและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความคล่องตัวของพาหะของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ซึ่งพบว่าที่ความดันเพิ่มมากขึ้นค่าความคล่องตัวของพาหะมีแนวโน้มลดต่ำลง โดยแปรผกผันกับสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยดังภาพประกอบ 4.13 โดยเมื่อค่าความคล่องตัวของพาหะมีค่าสูงจะส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อย

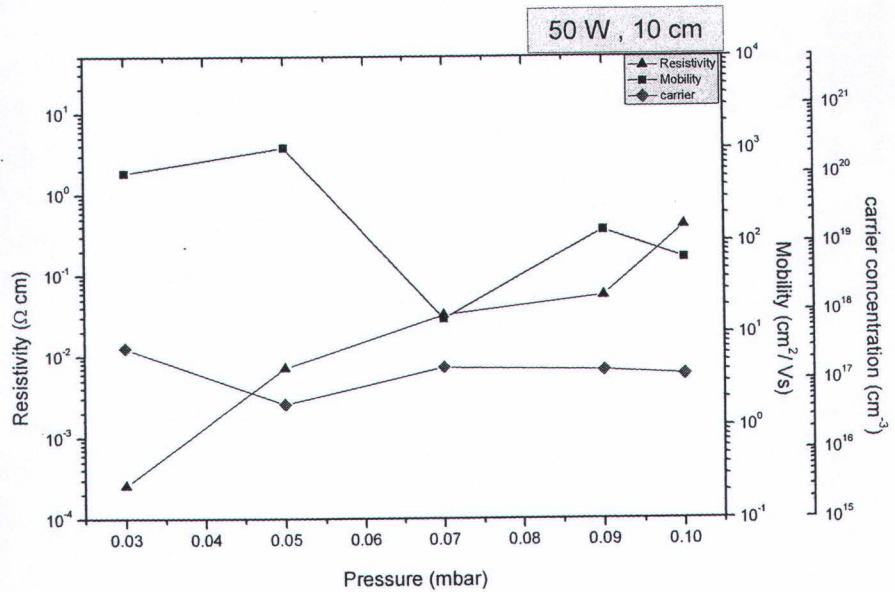
ภาพประกอบ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสับเตอริงและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm พบว่าค่าความหนาแน่นของพาหะของกำลังไฟฟ้า 30 40 และ 50 W มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง $4.0 \times 10^{16} - 2.92 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ยกเว้นกำลังไฟฟ้า 40 W ความดัน 0.03 mbar และ 0.1 mbar ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นของพาหะสูงสุดเป็น $5.91 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ และต่ำสุดเป็น $3.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$



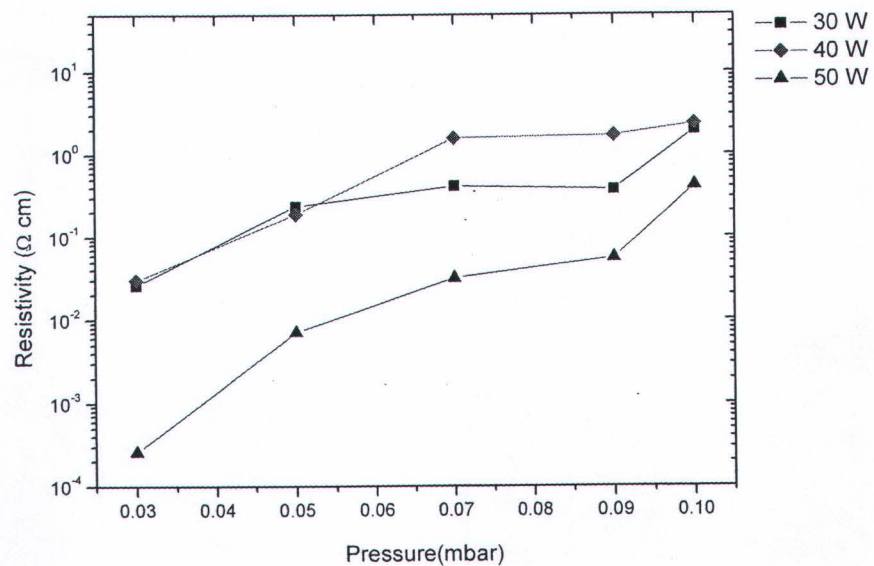
ภาพประกอบ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเปกโตรริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำล้งไฟฟ้า 30 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm



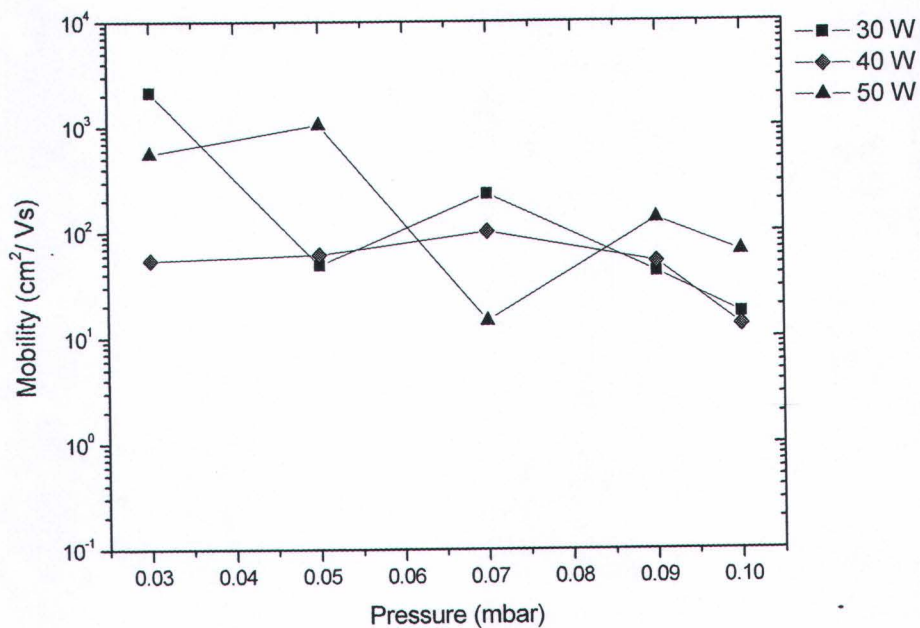
ภาพประกอบ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเปกโตรริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำล้งไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm



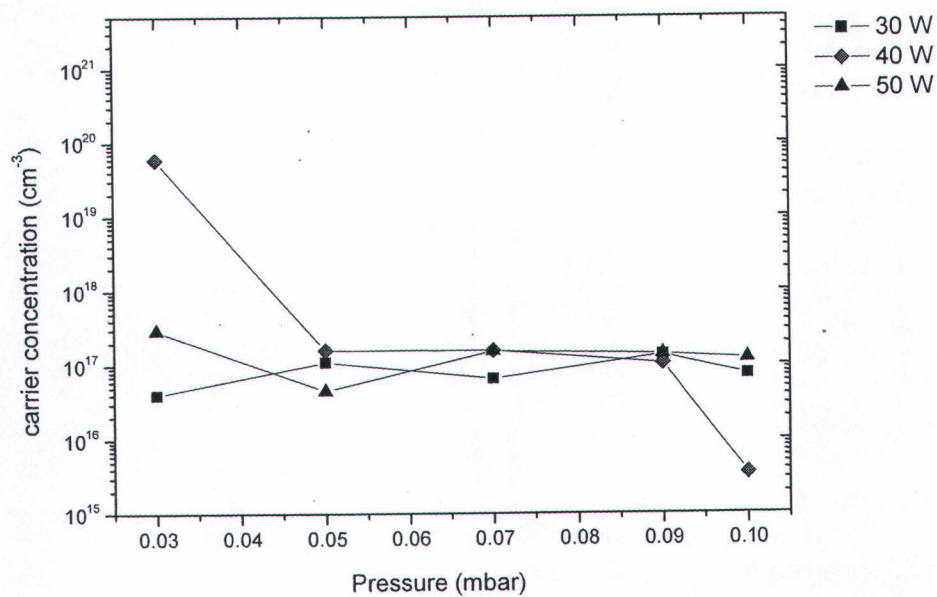
ภาพประกอบ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสปีดเตอริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ กำลังไฟฟ้า 50 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm



ภาพประกอบ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสปีดเตอริงและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm



ภาพประกอบ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปีดเตอริงและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความคล่องตัวของพาหะของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm



ภาพประกอบ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปีดเตอริงและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm

4.3 สมบัติทางแสง

เมื่อวัดค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO ด้วยเครื่องวัดค่าการส่งผ่านแสง (UV – visible spectrometer) แบบลำแสงคู่ ได้ข้อมูลดังภาพประกอบ 4.16 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ความดัน 0.03 mbar โดยพบว่าฟิล์มที่เตรียมได้ทั้งหมดมีการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 nm โดยฟิล์มเตรียมที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 7 cm มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเฉลี่ย 48 % โดยฟิล์มมีลักษณะสีดำไม่โปร่งใสและฟิล์มเตรียมที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 13 และ 16 cm มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเฉลี่ย 70-90 % รั่วแทรกสอดที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์เกิดจากความหนาของฟิล์ม ฟิล์มที่มีความหนามากจะเกิดนิวตันริง เมื่อวัดค่าส่งผ่านแสงจะปรากฏเป็นลักษณะคลื่นรูปไซน์อย่างชัดเจน

เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการสเป็คเตอรียโดยการเพิ่มความดันเป็น 0.05 mbar ดังภาพประกอบ 4.17 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้ทั้งหมดมีค่าการส่งผ่านแสงเฉลี่ย 72-93 % ในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 nm ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเฉลี่ยมีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากฟิล์มมีความหนาลดลง โดยอธิบายได้จากเมื่อความดันเพิ่มขึ้นทำให้มีไอออนของอาร์กอนในพลาสมาเพิ่มขึ้น จึงทำให้อะตอมของเป้าที่ถูกสเป็คเตอรียออกมาชนกับไอออนของอาร์กอนในพลาสมาและสูญเสียพลังงานเนื่องจากการชน และมีพลังงานไม่พอที่จะตกลงบนแผ่นรองรับ ทำให้อัตราการทับถมลดลง ความหนาของฟิล์มจึงลดลงตามลำดับ ลักษณะผลการทดลองที่ได้เมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขการสเป็คเตอรียที่ความดัน 0.07 0.09 และ 0.1 mbar สอดคล้องกันดังภาพประกอบที่ 4.17 4.18 4.19 และ 4.20

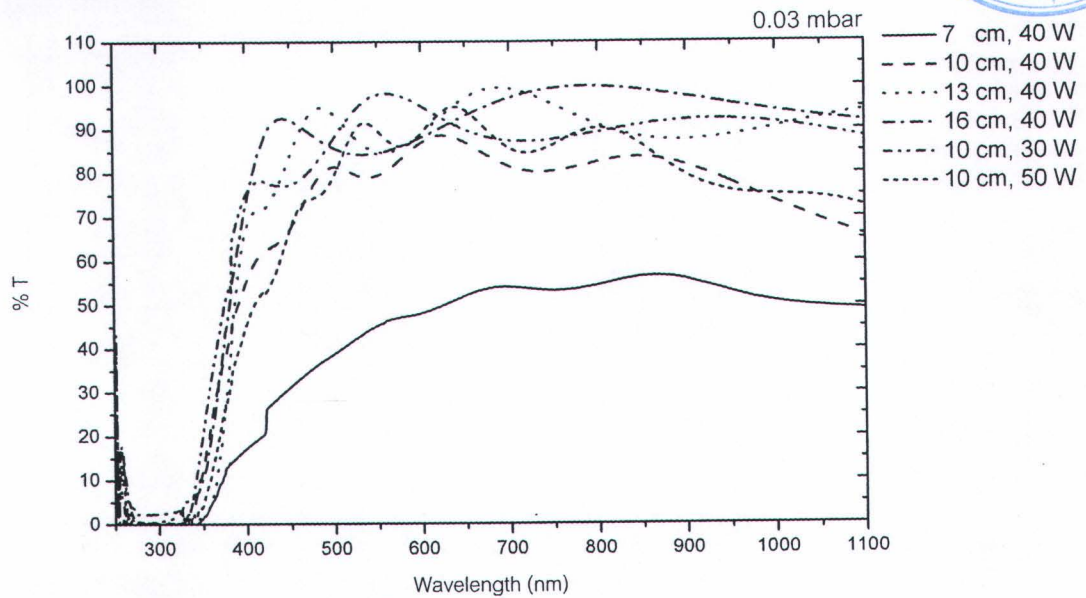
จากกราฟจะเห็นได้ว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าที่ 40 W เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับมากขึ้น จะส่งผลต่อการเลื่อนตำแหน่งของขอบเขตการดูดกลืนแสงของฟิล์มไปทางอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet : UV) (< 350 nm) ซึ่งตำแหน่งขอบเขตการดูดกลืนแสงนี้จะสัมพันธ์กับช่องว่างแถบพลังงาน

ค่าช่องว่างแถบพลังงานนี้หาได้จากการนำค่าการส่งผ่านแสงที่ได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสมการ 2.42 และคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานของโฟตอน ($h\nu$) และประมาณค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยการลากเส้นตรงตัดพลังงานโฟตอน แสดงดังภาพประกอบ 2.27 (b) ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้เป็นตัวบ่งบอกถึงระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ต้องการใช้กระตุ้นเพื่อย้ายสถานะพลังงานไปยังแถบนำไฟฟ้า โดยจากการทดลองพบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าในช่วง 3.3-3.65 eV ดังภาพประกอบ 4.21 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง AIZO เตรียมที่เงื่อนไขต่างๆ

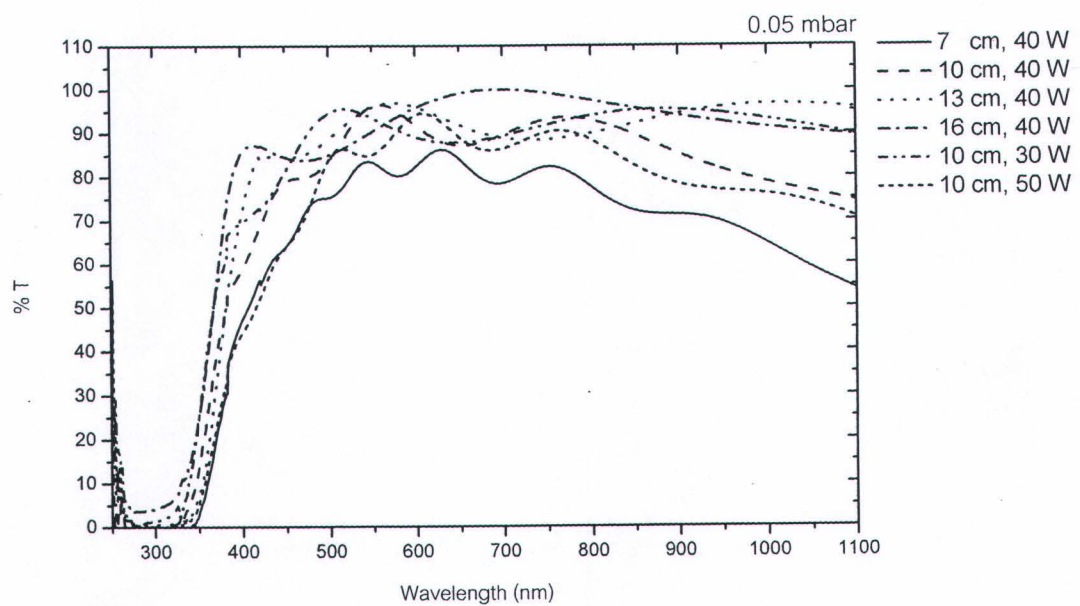


ค่าช่องว่างแถบพลังงานนี้จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งในการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงโฟตอน เมื่อพลังงานที่ได้รับจากช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม AIZO ฟิล์มก็จะส่งผ่านแสงออกมาทั้งหมด จึงเกิดการส่งผ่านแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ต่างกัน โดยปกติฟิล์ม ZnO ที่ไม่เจือสารจะมีช่องว่างแถบพลังงานที่ประมาณ 3.37 eV [60] เมื่อเทียบกับฟิล์ม AIZO พบว่าฟิล์ม AIZO มีการเลื่อนขึ้นของช่องว่างแถบพลังงาน โดยจะช่วยให้เพิ่มช่วงการส่งผ่านแสงของฟิล์มให้มากขึ้นในช่วง UV

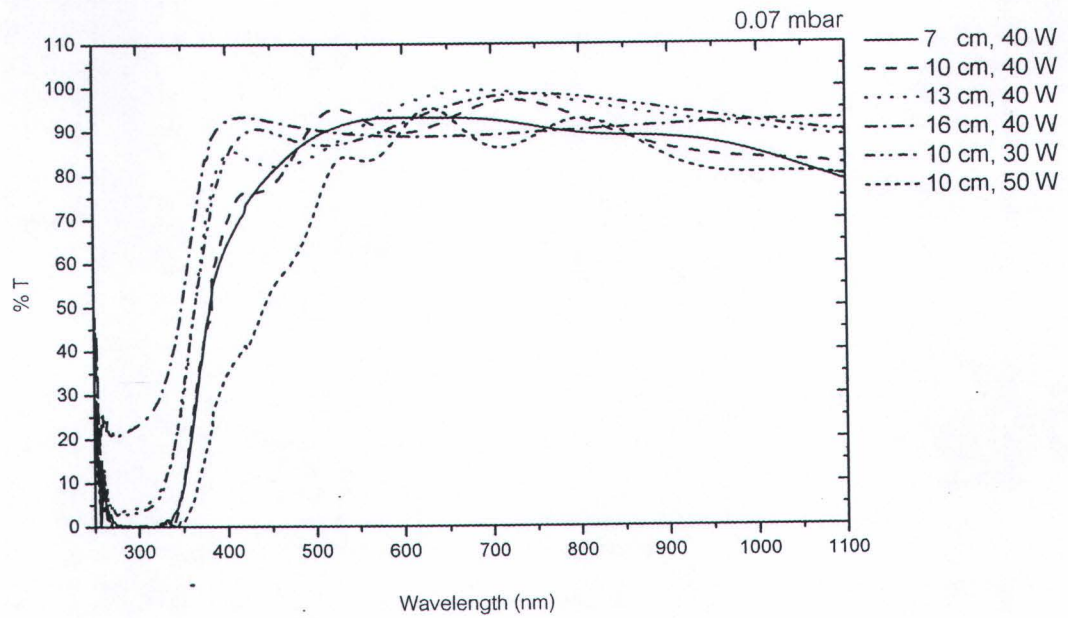
ภาพประกอบ 4.22 แสดงค่าการส่งผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงความยาวคลื่น 400 – 1100 nm ของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยเงื่อนไขในการทับถมฟิล์มที่ต่างกัน จะพบว่าฟิล์มเตรียมที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 7 cm มีค่าการส่งผ่านแสงเฉลี่ยที่ต่ำในช่วงความดันที่น้อยกว่า 0.05 mbar ซึ่งสอดคล้องกับความหนาและลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม เมื่อฟิล์มหนาเพิ่มขึ้นจะดูดกลืนแสงมากและลดความโปร่งใสลง ขณะที่เมื่อเตรียมฟิล์มที่เงื่อนไขอื่นๆพบว่าฟิล์มมีค่าการส่งผ่านแสงเฉลี่ยมากกว่า 80% ในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ (visible) และช่วงใกล้อินฟราเรด (NIR)



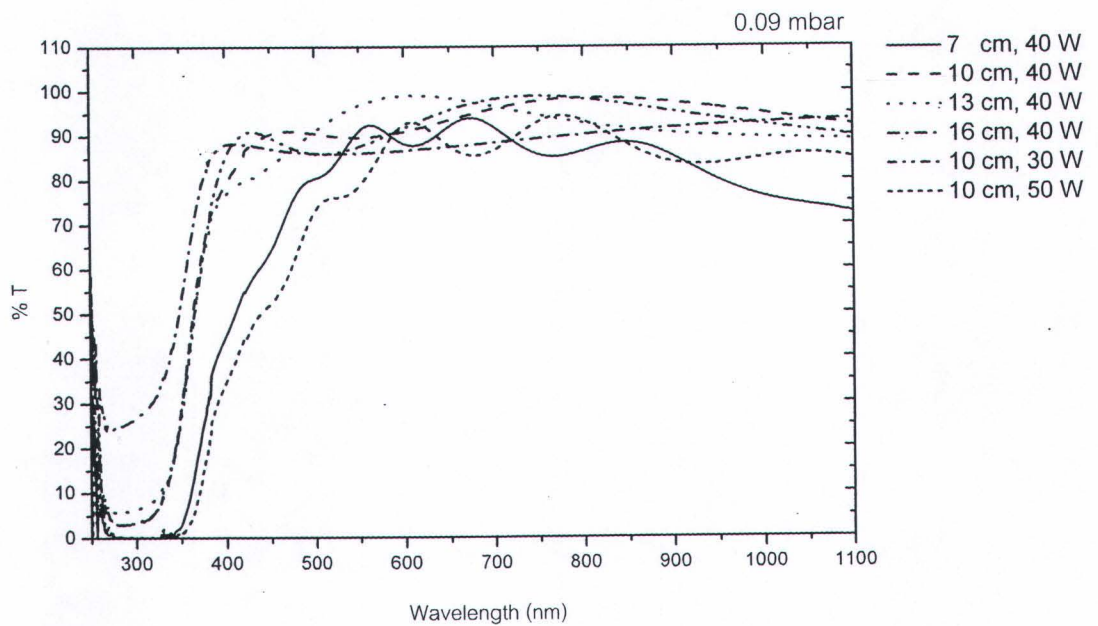
ภาพประกอบ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO
เตรียมที่ความดัน 0.03 mbar



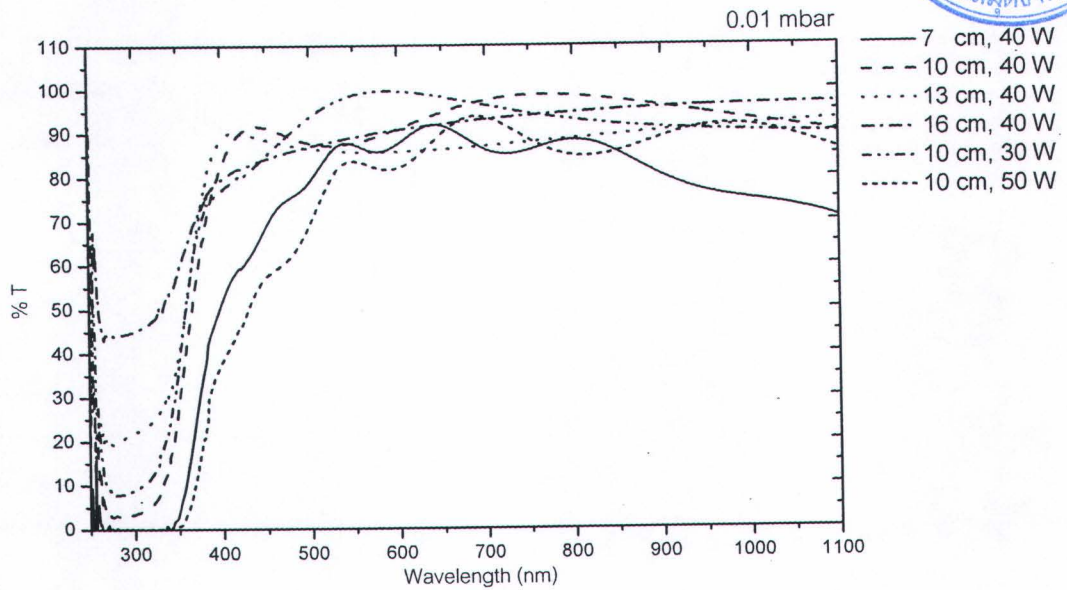
ภาพประกอบ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO
เตรียมที่ความดัน 0.05 mbar



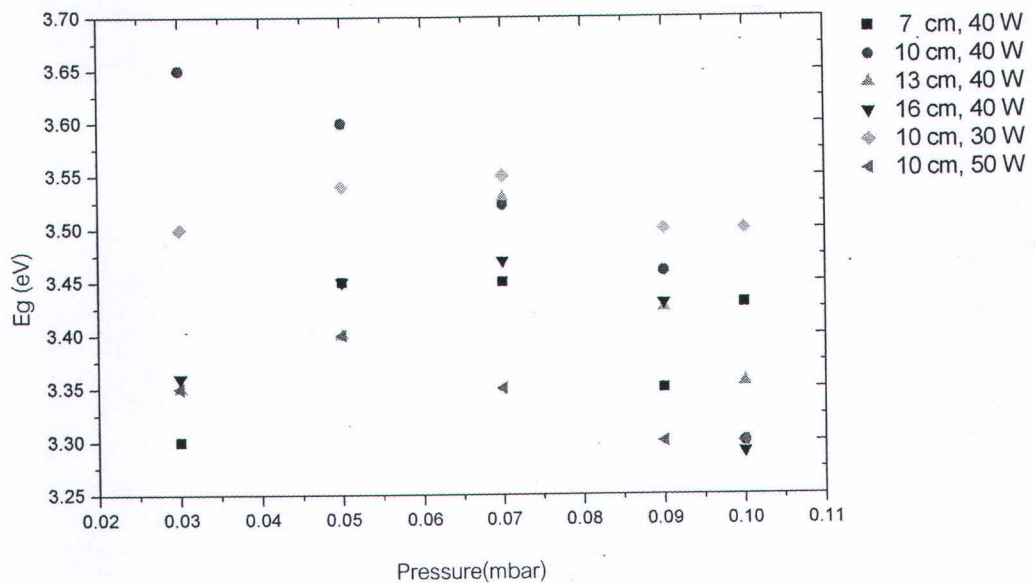
ภาพประกอบ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO
เตรียมที่ความดัน 0.07 mbar



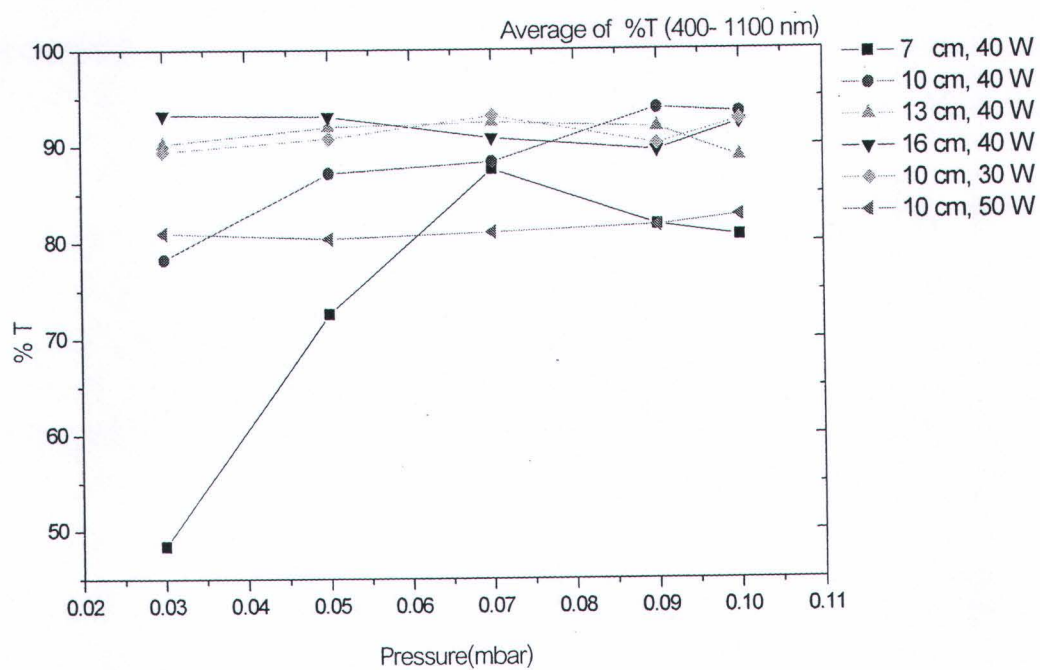
ภาพประกอบ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO
เตรียมที่ความดัน 0.09 mbar



ภาพประกอบ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AlZO
เตรียมที่ความดัน 0.10 mbar



ภาพประกอบ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ความดันและค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง AlZO
เตรียมที่เงื่อนไขต่างๆ



ภาพประกอบ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าเฉลี่ยการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AlZO ในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 nm

4.4 ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของฟิล์ม

จากภาพประกอบ 4.23 ซึ่งแสดงภาพตัดขวางและพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W ความดัน 0.03 0.07 และ 0.10 mbar ตามลำดับ พบว่าฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยความดัน 0.03 mbar มีลักษณะการก่อตัวของฟิล์มเป็นคอลัมน์นาร์ที่หนาแน่นและสม่ำเสมอโดยมีความหนา 730 nm ลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบกรานูลาร์ (granular) เกรนมีขนาดใหญ่ในช่วง 50-150 nm โดยที่ค่าเฉลี่ยประมาณ 76 nm ดังภาพประกอบ 4.23 (a) และ (b)

ตัวอย่างที่เตรียมด้วยความดัน 0.07 mbar การก่อตัวของฟิล์มมีลักษณะเป็นคอลัมน์นาร์ไม่สม่ำเสมอ โดยมีความหนาเป็น 660 nm และลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบเป็นกรานูลาร์ เกรนมีขนาดเล็กเฉลี่ย 27 nm ดังภาพประกอบ 4.23 (c) และ (d) และตัวอย่างที่เตรียมด้วยความดัน 0.10 mbar เนื้อฟิล์มที่ก่อตัวขึ้นมีลักษณะไม่เป็นคอลัมน์นาร์ชัดเจนและไม่หนาแน่น โดยเกาะกันอย่างหลวมๆ มีช่องว่างเล็กๆแทรกในเนื้อฟิล์มจำนวนมากและมีความหนาเป็น 580 nm ลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบเป็นกรานูลาร์ เกรนมีขนาดเล็กเฉลี่ย 25 nm ดังภาพประกอบ 4.23 (e) และ (f)

จากการทดลองพบว่าความดันส่งผลต่อการก่อตัว และลักษณะพื้นผิวของฟิล์มโดยที่ความดันต่ำ ฟิล์มมีลักษณะเป็นคอลัมน์นาร์ที่หนาแน่น สม่ำเสมอและเกรนมีขนาดใหญ่ เมื่อเพิ่มความดันฟิล์มจะบาง ความหนาแน่นน้อย ลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบเป็นกรานูลาร์ เกรนมีขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 4.24 ซึ่งแสดงภาพตัดขวางและพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO เตรียมที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดันเป็น 0.03 mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 30 40 และ 50 W ตามลำดับ พบว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 30 W มีลักษณะบาง เกาะกันอย่างหลวมๆ ไม่เห็นเป็นคอลัมน์นาร์ชัดเจน โดยมีความหนา 302 nm ลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบเป็นกรานูลาร์ เกรนมีขนาดเล็กเฉลี่ย 23 nm ดังภาพประกอบ 4.24 (a) และ (b)

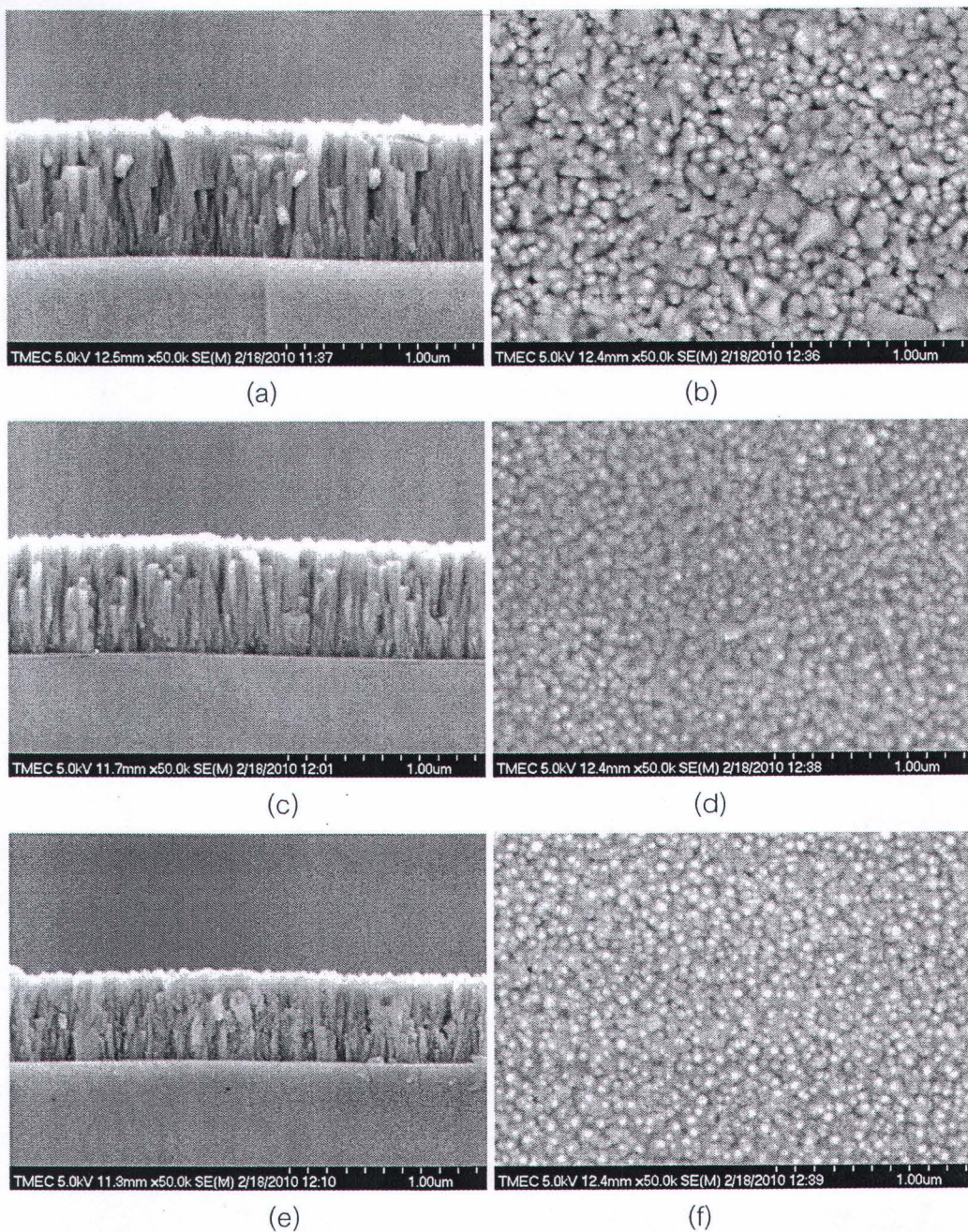
ตัวอย่างที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 40 W มีลักษณะเกาะตัวกันอย่างหลวมๆ มีช่องว่างเล็กๆแทรกในเนื้อฟิล์ม มีความหนา 562 nm ลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบกรานูลาร์ เกรนมีขนาดใหญ่ เฉลี่ยประมาณ 67 nm ดังภาพประกอบ 4.24 (c) และ (d) และตัวอย่างที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W มีลักษณะการก่อตัวของฟิล์มเป็นคอลัมน์นาร์ที่หนาแน่นและสม่ำเสมอโดยมีความหนา 730 nm ลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบกรานูลาร์ เกรนมีขนาดใหญ่ในช่วงประมาณ 50-150 nm ค่าเฉลี่ยประมาณ 76 nm ดังภาพประกอบ 4.24 (e) และ (f)

จากการทดลองพบว่ากำลังไฟฟ้ามีผลต่อการก่อตัวของฟิล์มอย่างชัดเจน โดยที่กำลังไฟฟ้าต่ำ ฟิล์มบาง ความหนาแน่นน้อย และเกรนมีขนาดเล็ก เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าฟิล์มจะมีลักษณะเป็นคอลัมน์นาร์ที่หนาแน่น สม่ำเสมอมากขึ้น และลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบเป็นกรานูลาร์ เกรนมีขนาดใหญ่และชัดเจนมากขึ้น

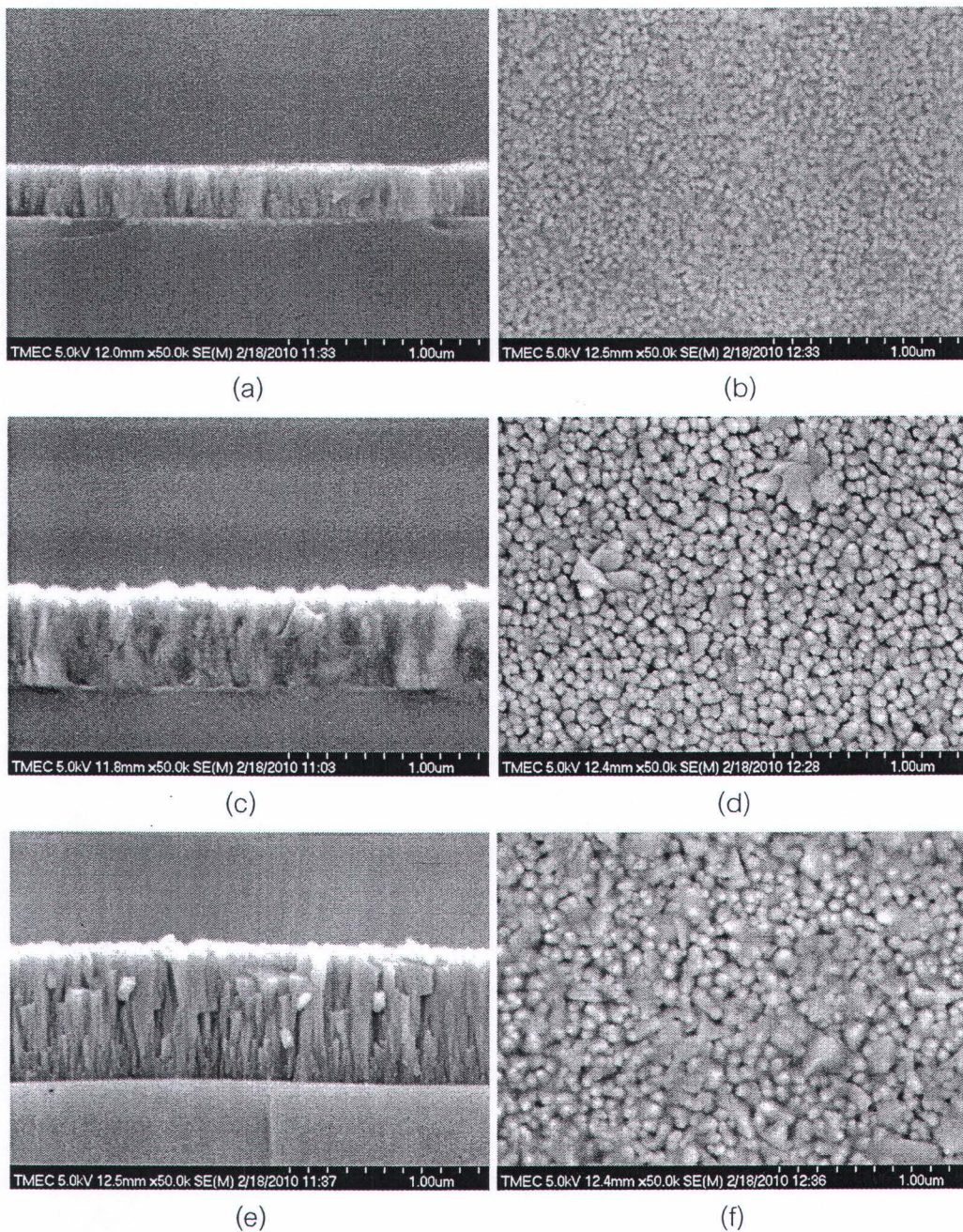
ภาพจาก SEM แสดงให้เห็นว่าความดันและกำลังไฟฟ้าส่งผลต่อการเติบโตของฟิล์ม สำหรับฟิล์มที่เตรียมด้วยความดันสูงซึ่งมีปริมาณไอออนบวกในพลาสมามาก เมื่อเกิดการสับเตอรืงอะตอมที่หลุดจากผิวหน้าเป้าจึงมีโอกาศสูญเสียพลังงานจากการชนกับไอออนก่อนตกเคลือบบนแผ่นรองรับพลังงานจลน์ของอะตอมสารเคลือบลดลง มีสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มกระจัดกระจาย ส่งผลให้มีอัตราการทับถมต่ำและให้โครงสร้างผลึกที่มีลักษณะคอลัมน์าร์ มีความหนาแน่นน้อย ขณะที่ฟิล์มเตรียมที่กำลังไฟฟ้ามาก อะตอมจะมีพลังงานในการทับถมสูง พลังงานจลน์ของอะตอมสารเคลือบเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่สูง ทำให้เคลื่อนที่ไปได้ทั่วบริเวณผิวที่มีพื้นที่ว่าง ส่งผลให้ได้เกรนขนาดใหญ่ ฟิล์มมีความหนาแน่นสูง

สำหรับฟิล์มที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำในช่วงของ $10^{-3} - 10^{-4} \Omega\text{cm}$ ได้ตรวจสอบความขรุขระของฟิล์ม AIZO ดังกล่าว เพื่อหาเงื่อนไขในการสับเตอรืงที่เหมาะสมในการนำฟิล์มไปประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยอะตอมมิค ฟอซ ไมโครสโคป (AFM) ซึ่งได้ผลดังภาพประกอบ 4.25

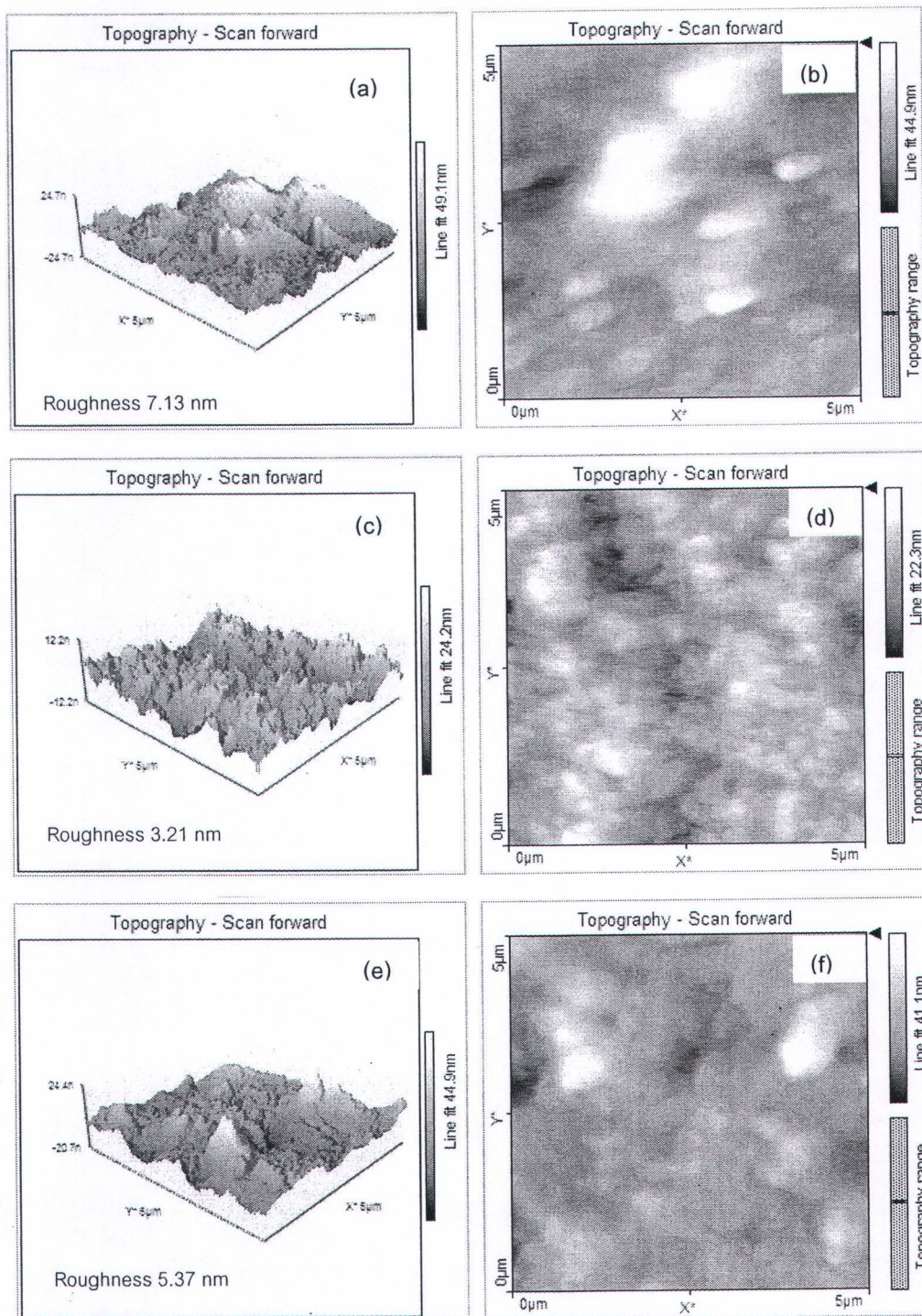
จากการวิเคราะห์พบว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยเงื่อนไขต่างกัน จะให้พื้นผิวและความขรุขระที่แตกต่างกันโดยฟิล์มที่เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 7 cm ความดัน 0.07 mbar จะให้ฟิล์มที่มีความขรุขระมากถึง 7.13 nm ในพื้นที่ $5 \times 5 \mu\text{m}$ โดยฟิล์มมีลักษณะเหมือนภูเขา (ภาพประกอบ 4.25a) ขณะที่ฟิล์มเตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar ซึ่งมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุดจะให้ฟิล์มที่มีความขรุขระน้อยเป็น 3.21 nm ในพื้นที่ $5 \times 5 \mu\text{m}$ โดยฟิล์มมีลักษณะคล้ายภูเขาไฟ (ภาพประกอบ 4.25c) และเมื่อเพิ่มความดันเป็น 0.05 mbar ในเงื่อนไขเดียวกัน ฟิล์มมีความขรุขระเพิ่มขึ้นเป็น 5.37 nm ในพื้นที่ $5 \times 5 \mu\text{m}$ โดยพื้นผิวฟิล์มค่อนข้างราบกว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยความดัน 0.03 mbar (ภาพประกอบ 4.25e)



ภาพประกอบ 4.23 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพตัดขวางและพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วย กำลังไฟฟ้า 50 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับ แผ่นรองรับ 10 cm ที่ความดัน (a) (b) 0.03 mbar (c)(d) 0.07 mbar (e) (f) 0.10 mbar ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4.24 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดันเป็น 0.03 mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า (a)(b) 30 W (c)(d) 40 W และ (e)(f) 50 W ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4.25 แสดงพื้นผิวและความขรุขระของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยเงื่อนไข

(a) (b) กำลัง 40 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 7 cm ความดัน 0.07 mbar

(c) (d) กำลัง 50 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar

(e) (f) กำลัง 50 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.05 mbar

4.5 คุณสมบัติของฟิล์มหลังกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก

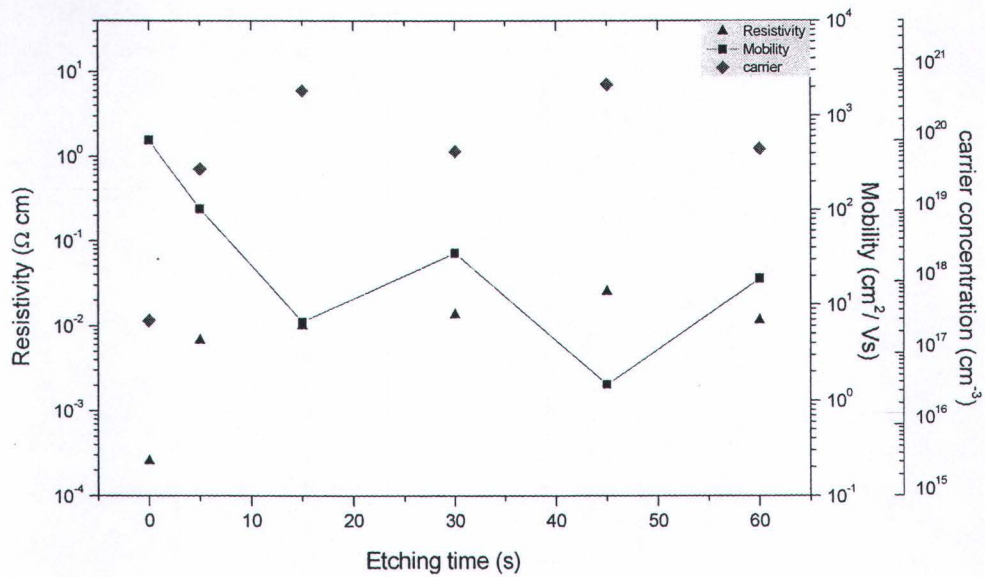
จากผลการทดลองที่ 4.2.2 เมื่อเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar กำลังไฟฟ้า 50 W ซึ่งให้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติดีที่สุด กล่าวคือมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็น $2.57 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ และการส่งผ่านแสง 81% โดยมีความขรุขระเป็น 3.21 nm จึงนำฟิล์มที่เตรียมด้วยเงื่อนไขนี้มากัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก เพื่อเป็นการเพิ่มความขรุขระของผิวหน้าฟิล์ม โดยหลังจากกัดด้วยกรดฟิล์มมีคุณสมบัติดังนี้

4.5.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

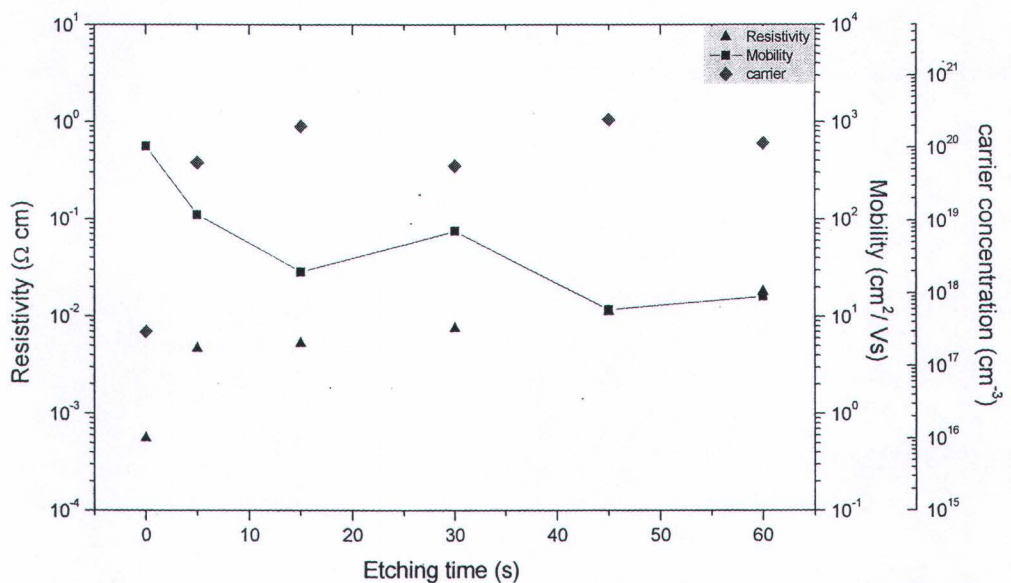
พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% และ 0.05% ดังภาพประกอบ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับพบว่าทั้งสองกราฟมีลักษณะคล้ายกันคือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อกัดฟิล์มด้วยกรดไฮโดรคลอริกในระยะเวลาที่นานขึ้น โดยค่าความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะซึ่งแปรผกผันกันมีอิทธิพลต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าทั้งคู่ การเพิ่มเวลาในการกัดฟิล์มด้วยกรดทำให้ความหนาของฟิล์มลดลงดังภาพประกอบ 4.28 ซึ่งฟิล์มที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% และ 0.05% จะมีอัตราการกัดกร่อน (Etching rate) สูงสุดที่ระยะเวลา 5 s และลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% จะมีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่าฟิล์มที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05% ดังภาพประกอบ 4.29

4.5.2 คุณสมบัติทางแสง

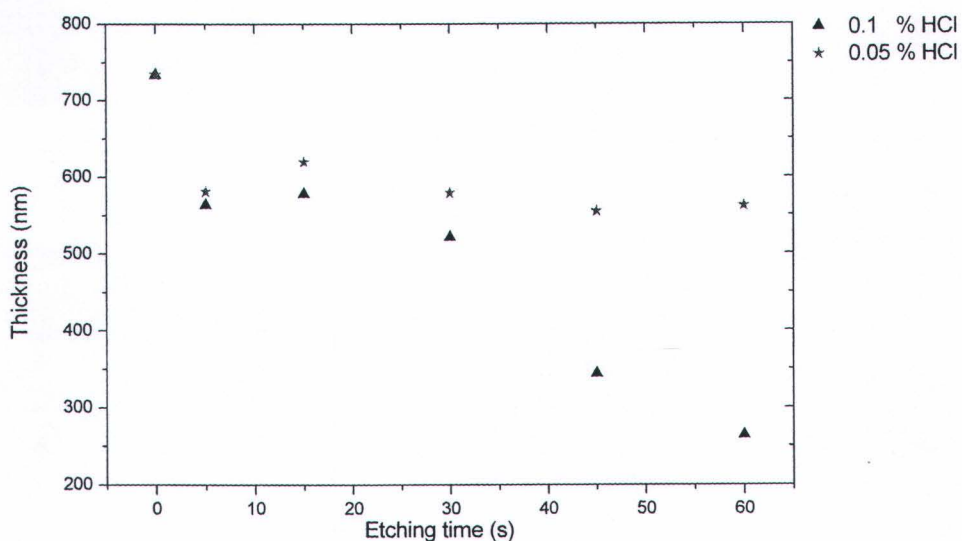
ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่มีต่อค่าเฮชของฟิล์ม AIZO หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% ด้วยระยะเวลา 5 - 60 s ดังภาพประกอบ 4.30 โดยสามารถหาค่าเฮชได้จากสมการ 2.45 พบว่าฟิล์มที่กัดด้วยระยะเวลา 5 s จะมีค่าเฮชสูงสุดเป็น 53 % ขณะที่ฟิล์มที่ไม่ได้กัดด้วยกรด มีค่าเฮชเป็น 50% ที่ความยาวคลื่น 800 nm ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะความขรุขระของพื้นผิวในหัวข้อ 4.5.3 และเมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นเป็น 0.05% ดังภาพประกอบ 4.31 พบว่ามีค่าเฮชแนวโน้มใกล้เคียงกันทุกช่วงความยาวคลื่น แม้กระทั่งฟิล์มที่กัดด้วยกรดด้วยระยะเวลาต่างๆ โดยมีค่าเฮชอยู่ในช่วง 40 - 55 % ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับลักษณะพื้นผิวของฟิล์มดังภาพประกอบ 4.32 และ 4.33



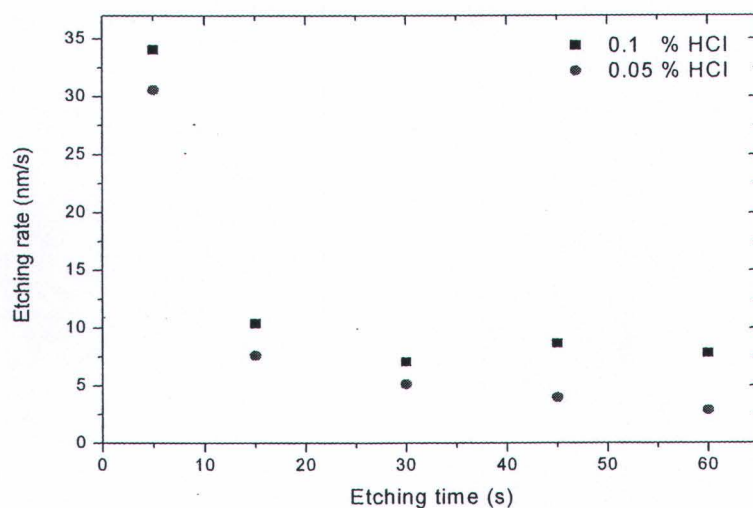
ภาพประกอบ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1%



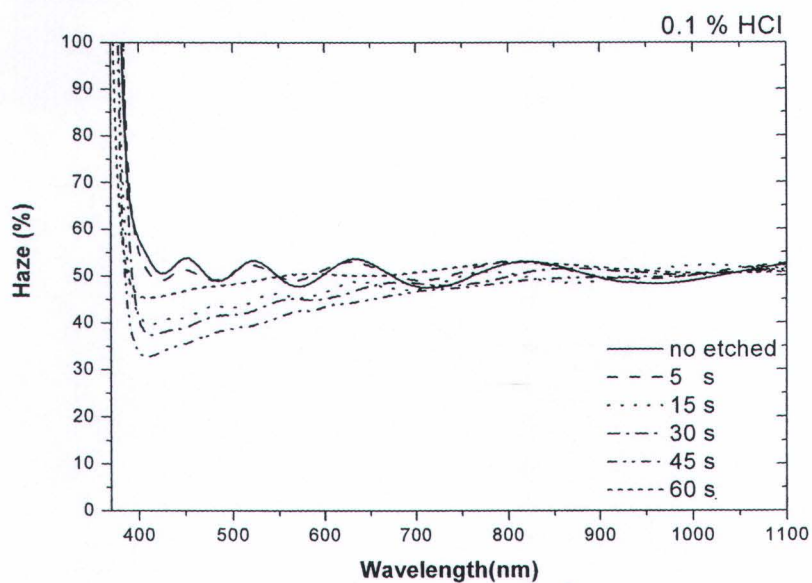
ภาพประกอบ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05%



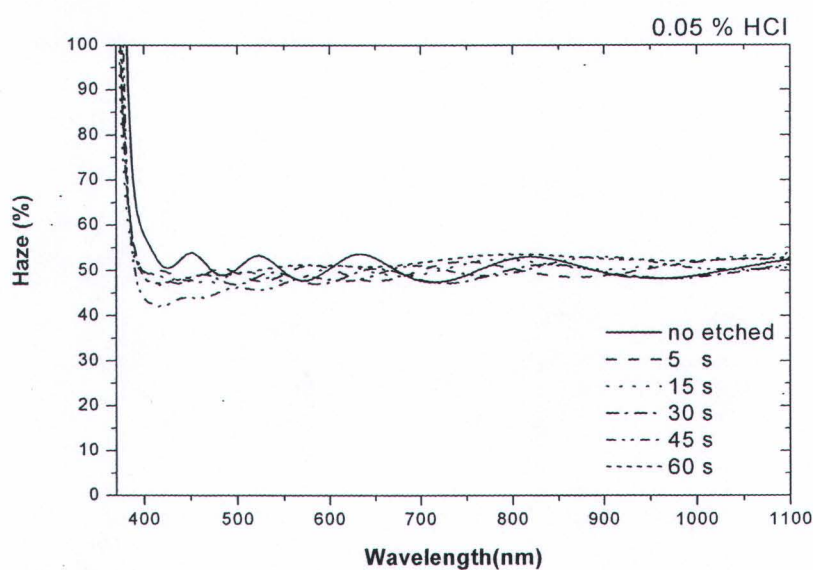
ภาพประกอบ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อความหนาของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% และ 0.05%



ภาพประกอบ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่ออัตราการกัดกร่อนของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% และ 0.05%



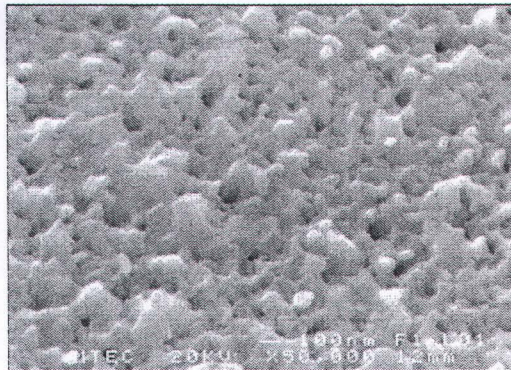
ภาพประกอบ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่มีต่อค่า haze ของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% ด้วยระยะเวลา 5 15 30 45 และ 60 s



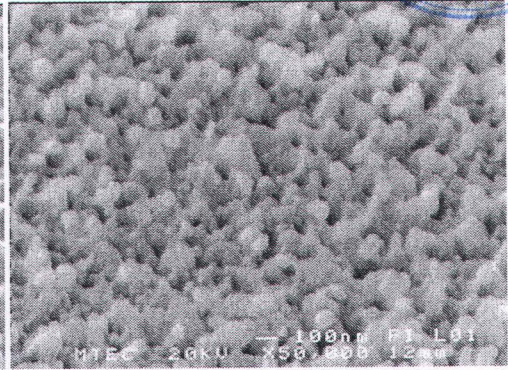
ภาพประกอบ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่มีต่อค่า haze ของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05% ด้วยระยะเวลาต่างๆ

4.5.3 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม

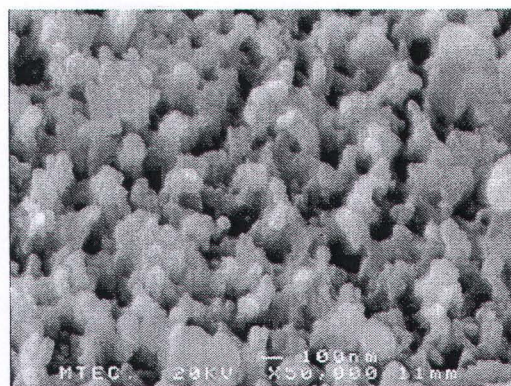
พิจารณาภาพถ่าย SEM ของภาพโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% ระยะเวลา 5 - 60 s ดังภาพประกอบ 4.32 พบว่าฟิล์มกัด้วยระยะเวลา 5 และ 15 s มีลักษณะเป็นหลุมบ่อขนาดเล็กอย่างหนาแน่น และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกัด้วยกรด พบว่าฟิล์มจะมีหลุมขนาดใหญ่มากขึ้นแต่ไม่หนาแน่น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับภาพ SEM ของฟิล์มที่กัด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05% พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่กัด้วยกรดระยะเวลาต่าง ๆ นั้น ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยพบว่ามีหลุมบ่อขนาดเล็กและหนาแน่น ดังภาพประกอบ 4.33 ซึ่งลักษณะความขรุขระนี้จะส่งผลต่อการกระเจิงของแสงที่ตกกระทบ และสอดคล้องกับผลการทดลองหัวข้อ 4.5.2 คุณสมบัติทางแสง



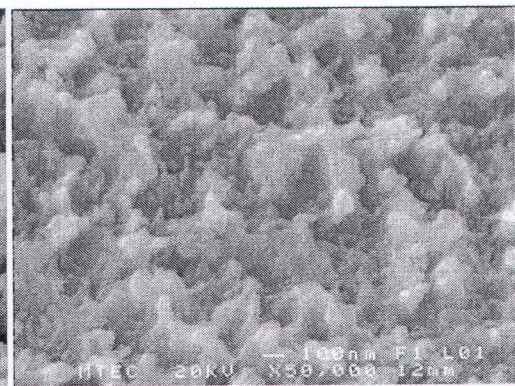
(a)



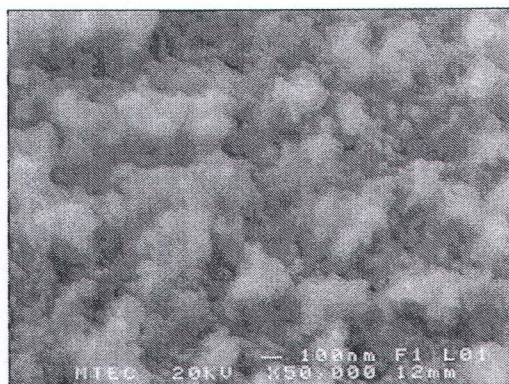
(b)



(c)

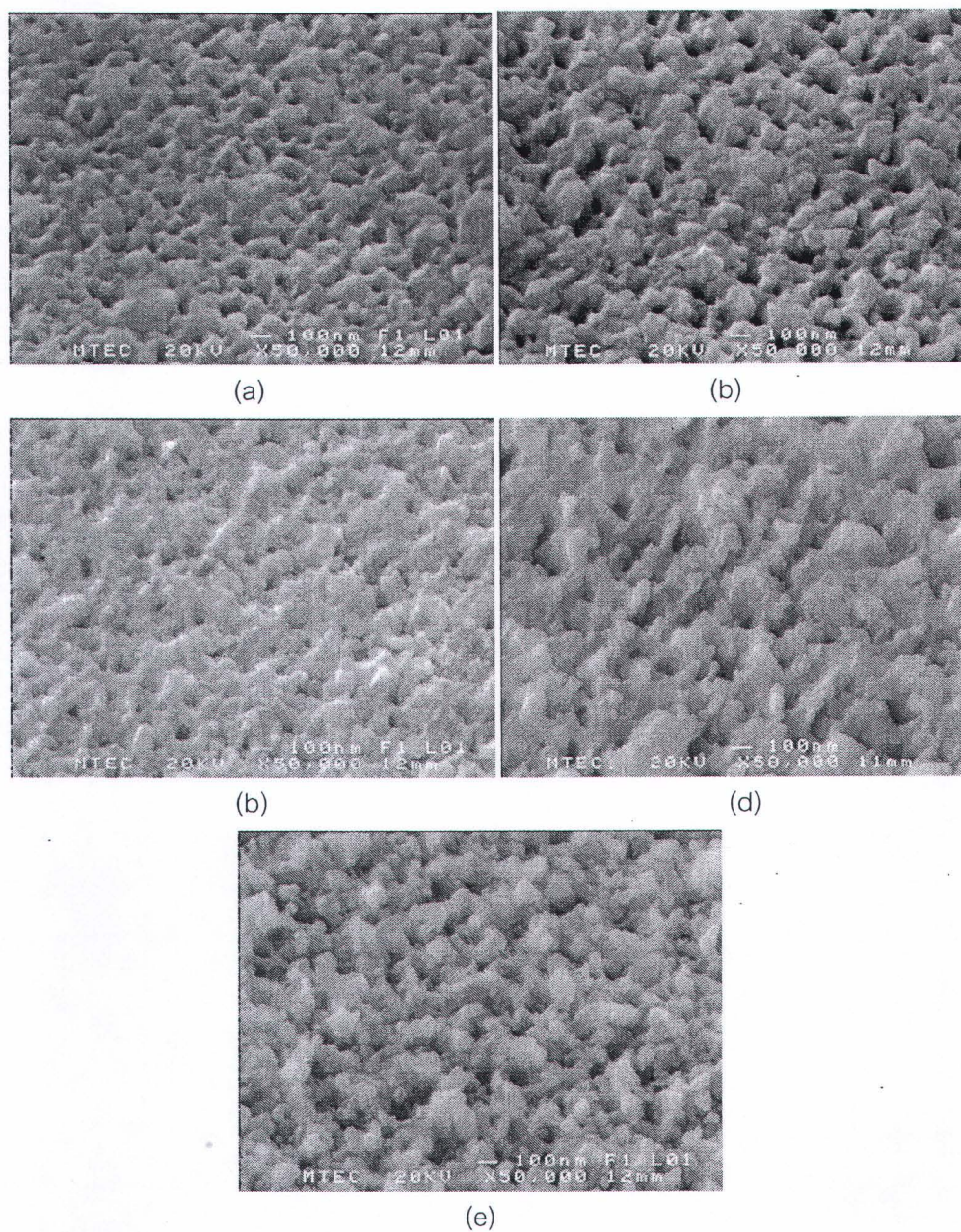


(d)



(e)

ภาพประกอบ 4.32 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วย
ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W
หลังจากกัด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% ระยะเวลา (a) 5 s (b) 15 s (c) 30 s
(d) 45 s (e) 60 s



ภาพประกอบ 4.33 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05% ระยะเวลา (a) 5 s (b) 15 s (c) 30 s (d) 45 s (e) 60 s

4.6 โครงสร้างผลึกของฟิล์ม AIZO

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 40 W และ 50 W โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เรย์ (XRD) นั้นได้ผลดังภาพประกอบ 4.34 และ 4.3 ตามลำดับ จากภาพประกอบ 4.34 พบว่าฟิล์ม AIZO มีโครงสร้างเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวอร์ตไซต์ โดยเทียบกับฐานข้อมูล JCPDF no. 891397 โดยพบพีค (002) (103) (100) (101) และ (102) โดยผลึกส่วนใหญ่มีการจัดเรียงตัวไปตามทิศ (002) ซึ่งบ่งบอกถึงแกนผลึก c ตั้งฉากกับผิวของแผ่นรองรับ โดยจากการวิเคราะห์ไม่พบพีคของโลหะ Zn หรือ Al หรือ In

สำหรับฟิล์มเตรียมด้วยกำลัง 50 W ดังภาพประกอบ 4.35 ที่ความดันต่ำ 0.03 mbar ผลึกมีการจัดเรียงตัวไปตามทิศ (002) อย่างชัดเจนและมีความเข้มสูงเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ซึ่งบ่งถึงความเข้มของผลึกที่สูงขึ้น โดยความเข้มของพีค (002) ลดลงเมื่อความดันมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ถึงความเป็นผลึกลดลง

เมื่อพิจารณาจากระนาบ (002) และ (103) ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เรย์ สามารถนำข้อมูลที่ได้ มาคำนวณหาแลตทิซพารามิเตอร์ สำหรับโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลจากสมการ

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4a^2} \left[\frac{4}{3}(h^2 + hk + k^2) + \frac{l^2}{(c/a)^2} \right]$$

เมื่อ h, k, l เป็นดัชนีมิลเลอร์ และ λ เท่ากับ 0.154056 nm

และสามารถคำนวณหาขนาดของผลึกจากสมการเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation)

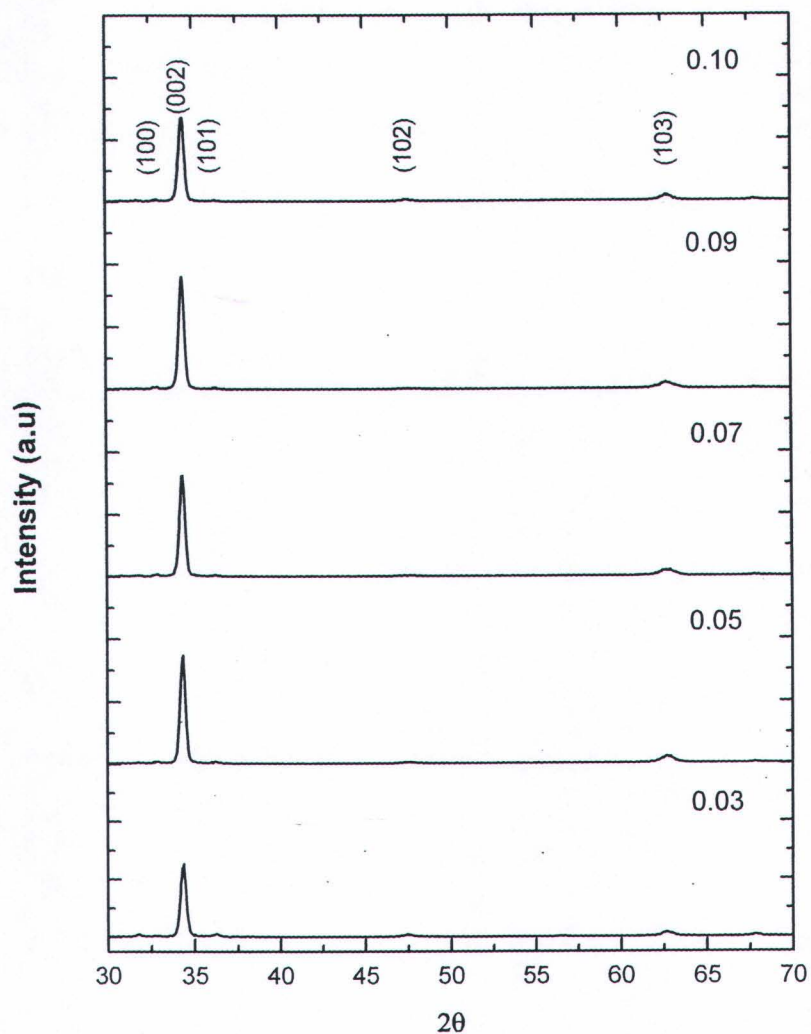
$$B = \frac{k\lambda}{L \cos \theta}$$

เมื่อ B เป็น FWHM ของระนาบ (002)

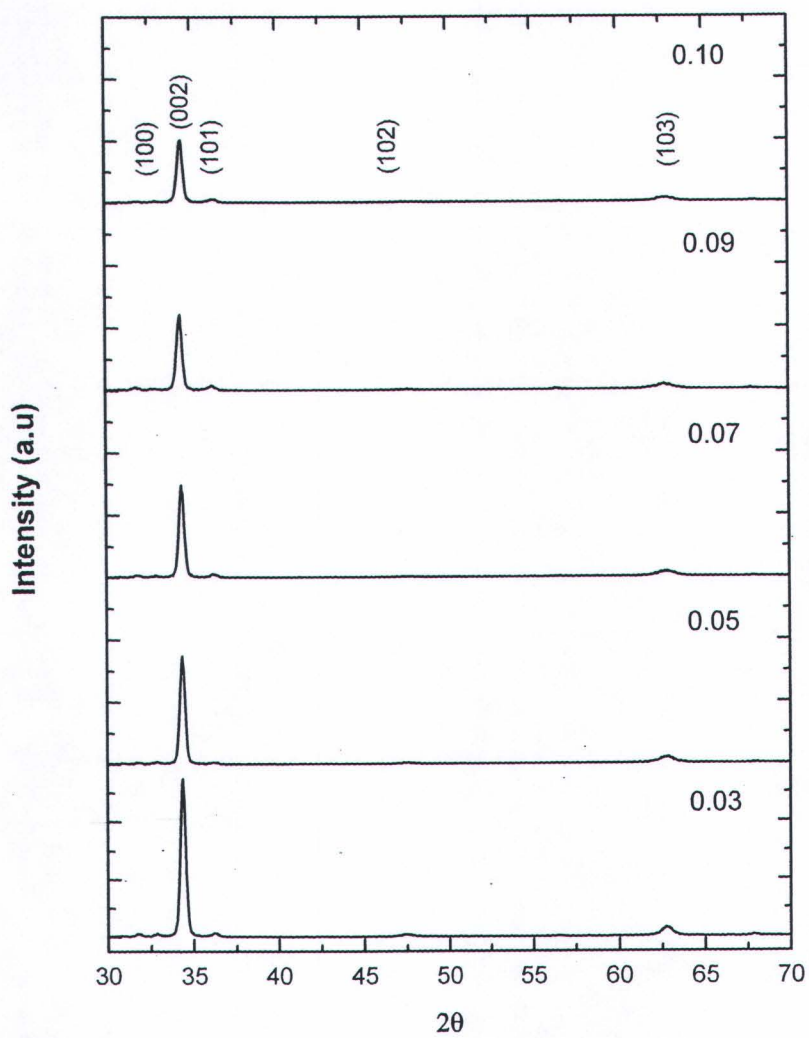
L เป็น ขนาดผลึก และ k มีค่าเท่ากับ 1

จากการคำนวณได้ค่าแกนผลึก a ค่าแกนผลึก c และขนาดของผลึก ตามตาราง 4.1 โดยมีค่าเฉลี่ยของ a เป็น 3.251 Å และ ค่าเฉลี่ยของ c เป็น 5.214 Å โดยมีค่า c/a เท่ากับ 1.6031 ซึ่งสอดคล้องกับฐานข้อมูล JCPDF no. 891397 ซึ่งมีค่าแกนผลึก a เป็น 3.253 Å และค่าแกนผลึก c เป็น 5.213 Å

สำหรับขนาดของผลึกอยู่ในช่วงระหว่าง 48-53 nm โดยการเพิ่มความดันขณะสเป็คเตอริงไม่มีนัยยะอย่างชัดเจนต่อขนาดของผลึกที่ได้



ภาพประกอบ 4.34 แสดงสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เรย์สำหรับฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 40 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 7 cm ที่ความดัน 0.03-0.10 mbar



ภาพประกอบ 4.35 แสดงสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เรย์สำหรับฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm ที่ความดัน 0.03-0.10 mbar

ตาราง 4.1 แสดงค่าแกนผลึก a ค่าแกนผลึก c และ ขนาดของผลึก ของฟิล์มที่เตรียมด้วยเงื่อนไขต่างๆ

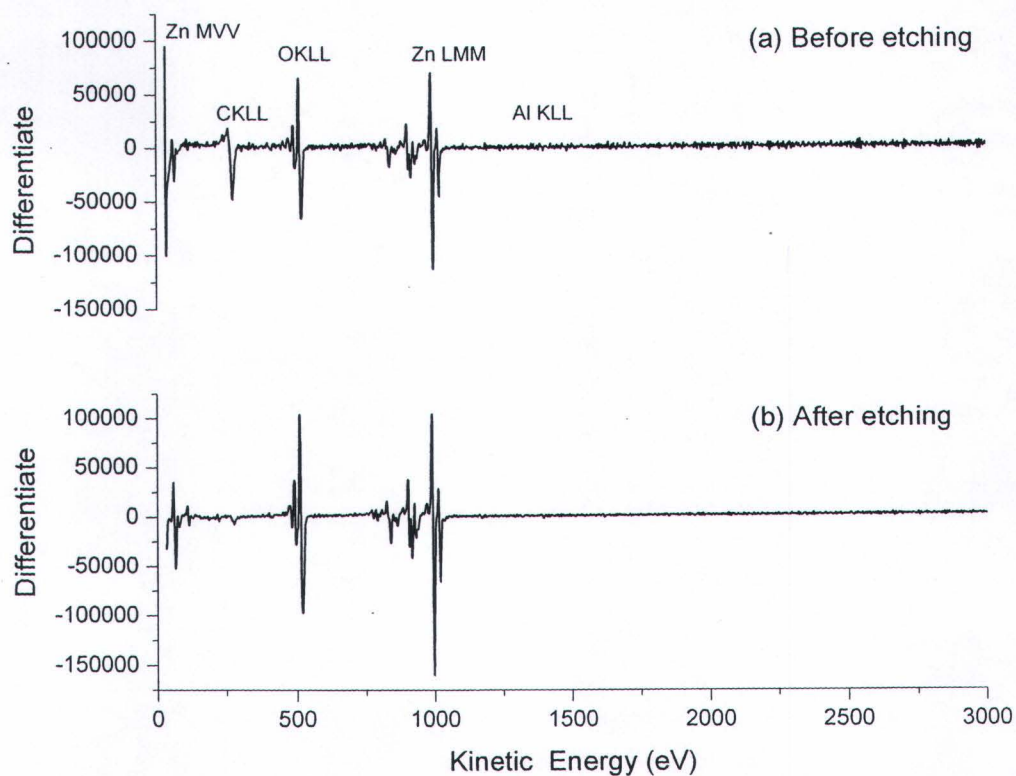
เงื่อนไขการเตรียมฟิล์ม		a (Å)	c (Å)	Crystal size (nm)
40 W 7 cm	3×10^{-2} mbar	3.272	5.216	49.3
	5×10^{-2} mbar	3.265	5.216	51.5
	7×10^{-2} mbar	3.225	5.216	52.8
	9×10^{-2} mbar	3.251	5.216	50.6
	10×10^{-2} mbar	3.261	5.210	48.6
50 W 10 cm	3×10^{-2} mbar	3.265	5.216	49.9
	5×10^{-2} mbar	3.238	5.216	51.3
	7×10^{-2} mbar	3.231	5.216	51.3
	9×10^{-2} mbar	3.248	5.222	48.6
	10×10^{-2} mbar	3.250	5.204	48.0
เฉลี่ย		3.251	5.214	50.2

4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์ม AlZO โดยเทคนิคไอเจย์ อิเล็กตรอน (AES)

เพื่อหาองค์ประกอบของฟิล์ม AlZO ซึ่งเตรียมด้วยเทคนิคดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง ด้วยกำลัง 50 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm และ ความดัน 0.03 mbar โดยการวิเคราะห์จาก AES ด้วยพลังงาน 10 kV 10 nA โดยใช้ resolution 1 eV/step ได้ผลการวิเคราะห์เป็นภาพประกอบ 4.36 และตาราง 4.2

จากการวิเคราะห์พบว่าพื้นผิวฟิล์ม AlZO ก่อนการกัดกร่อนผิวหน้าด้วยการสเปตเตอริง (sputter etching) มีองค์ประกอบเป็น Zn และ O ในปริมาณ 30.6 และ 28.6 atomic % ตามลำดับ โดยมี C ปนเปื้อน 40.8 atomic % บนผิวหน้าฟิล์ม (รูป 4.36a) เมื่อทำการกัดกร่อนผิวหน้าด้วยการสเปตเตอริงพื้นผิวฟิล์มด้วย Ar โดยใช้ปืนไอออน (ion gun) 4 kV ขนาด 6x6 mm ระดมยิงเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นวิเคราะห์พื้นผิวอีกครั้งดังรูป 4.36b พบว่าฟิล์มมีองค์ประกอบเป็น Zn และ O ในปริมาณ 47.2 และ 47.2 atomic % ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วน Zn: O เป็น 1: 1 และพบว่าปริมาณ C ลดลงเป็น 5.6 atomic %

เนื่องด้วยขอบเขตจำกัดของเครื่อง AES ซึ่งสามารถวิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่ 0.1 atomic % จึงทำให้การตรวจพบ Al และ In เป็นไปได้ยาก เนื่องด้วยปริมาณสารที่เจือ 0.5 wt% นั้นเป็นปริมาณน้อย (0.40 atomic % สำหรับ Al และ 0.15 atomic % สำหรับ In) แม้จะได้เพิ่มพลังงานในการวิเคราะห์เป็น 10 kV 20 nA แล้วก็ตาม



ภาพประกอบ 4.36 แสดงดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของไอเจย์ สำหรับ Al₂O₃

(a) ก่อนการกัดกร่อนผิวหน้าด้วยการสเปตเตอริง

(b) หลังการกัดกร่อนผิวหน้าด้วยการสเปตเตอริงด้วย Ar

ตาราง 4.2 แสดงองค์ประกอบของฟิล์ม Al₂O₃

	ปริมาณ (atomic %)		
	Zn	O	C
ก่อนการกัดกร่อนผิวหน้าด้วยการสเปตเตอริง	30.6	28.6	40.8
หลังการกัดกร่อนผิวหน้าด้วยการสเปตเตอริง ด้วย Ar	47.2	47.2	5.6