

## บทที่ 7

### ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของการเตรียมเป่าซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียมออกไซด์เตรียมโดยวิธีอัดเปียกแล้วเผาตามขั้นตอนดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 6 และส่วนของการเตรียมฟิล์มบางที่เตรียมจากเป่าทั้ง 2 ชนิด โดยหาสภาวะการเตรียมฟิล์มที่เหมาะสม ทำการเตรียมซ้ำ และสุดท้ายขยายพื้นที่การเตรียมให้มีกว้างมากขึ้น

### สมบัติของเป่าซิงค์ออกไซด์

เป่าที่เตรียมขึ้นในตามขั้นตอนดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 6 ประกอบด้วยสัดส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ตั้งแต่ 1-5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล สมบัติของเป่าที่เตรียมได้จะมีการวัดสมบัติต่างๆ คือ การหดตัว ความหนาแน่น และความต้านทานในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง ผลที่ได้สรุปแสดงในตารางที่ 7.1 ได้ดังนี้

ตัวอย่าง	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%โดยมวล)	การหดตัว (%)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความต้านทาน (Ω)	องค์ประกอบโดยมวล		
					Zn(%)	O(%)	Al(%)
ZnO-F	1	15	4.94	400	79.3	20.25	0.45
ZnO-C*	2	-	3.9	150	78.74	20.2	1.06
ZnO-B	2	15.6	5.07	150	79.6	19.19	1.21
ZnO-D	2	13.6	4.73	150	76.38	22.46	1.17
ZnO-E	2	13.2	4.43	150	81.36	17.65	0.99
ZnO-G	3	12.3	4.53	150	77.95	20.79	1.25
ZnO-H	4	11.4	4.29	600	79.15	19.42	1.43
ZnO-I	5	9.5	3.9	1,000	77.01	21.42	1.57

ZnO-C\* เป่าที่ขึ้นรูปโดยวิธีอัดร้อน , ความหนาแน่นของซิงค์ออกไซด์(bluk) 5.675 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ 7.1 แสดงการหดตัว ความหนาแน่น ความต้านทานในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง และองค์ประกอบโดยมวลของเป่าซิงค์ออกไซด์

วัดการหดตัวของเป่าโดยการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของเป่าก่อนและหลังเผา การหดตัวหลังเผา มีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนโดยมวลของอลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น สำหรับเป่าซิงค์ออกไซด์ที่มีสัดส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์สองเปอร์เซ็นต์โดยมวลจะมีการหดตัวหลังเผาประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นหากต้องการเป่าซิงค์ออกไซด์เส้นผ่าศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร (2 นิ้ว) จะต้องเตรียมเป่าอัดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.9 เซนติเมตร

คำนวณความหนาแน่นได้จากการวัดปริมาตรและน้ำหนักหลังเผา เป่าซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมขึ้น มีความหนาแน่นประมาณ 4-5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความหนาแน่นจะลดลงตามสัดส่วนโดยมวลของอลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เป่าซิงค์ออกไซด์ที่มีสัดส่วนโดยมวลของอลูมิเนียมออกไซด์สองเปอร์เซ็นต์จะมีความหนาแน่นสูงกว่าเป่าที่ขึ้นรูปโดยวิธีอัดร้อน แสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำเป่าที่เตรียมได้มาใช้งานกับระบบที่มีอยู่ เพราะการสเปคเตอร์เป่าที่มีความหนาแน่นต่ำจะทำให้เกิดการอาร์กในขณะสเปคเตอร์

วัดความต้านทานไฟฟ้าตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของเป่าซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมได้ มีลักษณะเป็นตัวนำเหมือนกับเป่าที่ขึ้นรูปโดยวิธีอัดร้อน ลักษณะเช่นนี้เป็นข้อดีของเป่าที่เตรียมได้ที่สามารถใช้สเปคเตอร์ได้ทั้งในระบบ ดีซี และอาร์เอฟสเปคเตอร์ พบว่าเป่าจะมีความต้านทานต่ำสุดเมื่อเป่าถูกเจือด้วยอลูมิเนียมออกไซด์ 2-3 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

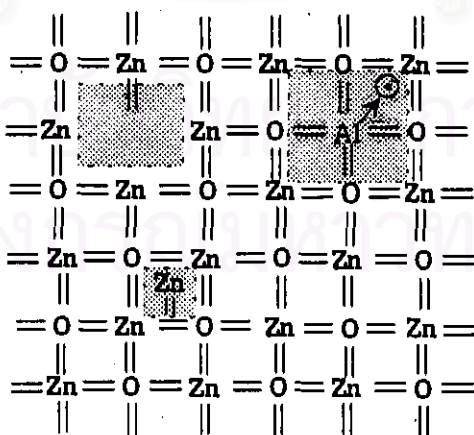
ตรวจสอบองค์ประกอบธาตุของเป่าด้วยวิธี EDX(energy dispersive x-ray analysis) เนื่องจากเป่ามีอะตอมของออกซิเจนเป็นองค์ประกอบการตรวจสอบโดยวิธี EDX กระทำได้เพียงตรวจสอบความบริสุทธิ์ของเป่าเท่านั้น จากการตรวจสอบพบว่าเป่าที่เตรียมได้มีความบริสุทธิ์สูง ไม่พบธาตุอื่นใดนอกจาก Zn, O และ Al

เป่าที่เจืออลูมิเนียมออกไซด์ 2 เปอร์เซ็นต์โดยมวล เตรียมซ้ำ 3 ครั้ง มีความต้านทานไฟฟ้าไม่แตกต่างกัน นอกจากการหดตัวที่ขึ้นกับความชื้นที่ในขั้นตอนการเตรียม หากเทียบกับเป่าชนิดอัดร้อน เป่าชนิดอัดเปือกแล้วเผา จะมีความหนาแน่นสูงกว่า

### สมบัติของฟิล์มซิงค์ออกไซด์

การสปีดเตอร์เป่าซิงค์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบ องค์ประกอบของฟิล์มที่ได้จะมีสมบัติแตกต่างจากเป่าดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 คือ มีการขาดหายของอะตอมของออกซิเจนในโครงสร้างของฟิล์ม และอาศัยผลตามรายงานของ C. R. Aita และคณะ[46] อธิบายกลไกการสปีดเตอร์เป่าซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีพลังงานระหว่างพันธะที่ต่ำ เมื่อเป่าถูกสปีดเตอร์ จะทำให้ออกาสที่มีโมเลกุลคู่ที่สมบูรณ์จะหลุดออกจากเป่ามีน้อย โอกาสที่อะตอมของออกซิเจนจะถูก สปีดเตอร์จะมีมากกว่าอะตอมของซิงค์ตามรายงานของ C. R. Aita และคณะ  $O_2$  ในพลาสติกจะมีมากเป็นอันดับสองรองจาก Ar การแตกตัวของโมเลกุลคู่ทำให้มีการสูญเสียอะตอมของออกซิเจนในขณะก่อตัวเป็นฟิล์ม ทำให้เกิดความบกพร่องของโครงสร้างในฟิล์ม ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 7.1 จากการรายงานของ T. Minami และคณะ[47] ความบกพร่องเหล่านี้มีส่วนทำให้เกิดการนำไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากการขาดหายไปของอะตอมของออกซิเจนภายในโครงสร้างผลึก ทำให้ฟิล์มมีความหนาแน่นพาหะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดจากอะตอมของซิงค์อิสระที่อยู่ตามช่องว่างของโครงผลึก หากมีการเจือลูมิเนียมลงในฟิล์มแล้ว  $Al^{3+}$  จะเข้าไปแทนที่  $Zn^{2+}$  ในโครงสร้างผลึก  $Al^{3+}$  ก็จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้นในโครงสร้างผลึก การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นพาหะเป็นผลทำให้ฟิล์มมีลักษณะเป็นตัวนำในที่สุด แต่เมื่อความหนาแน่นพาหะเพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าหนึ่งจะทำให้สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์เพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้ฟิล์มมีสภาพต้านทานสูงขึ้น ดังนั้นจะเห็นว่าสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมได้จะขึ้นกับโอกาสที่จะมีการก่อตัวเป็นโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์หรือไม่เพียงใด

ในการสังเกตผลของตัวแปรที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม เป็นไปได้ยากที่จะสังเกตหลายตัวแปรพร้อมกัน ดังนั้นจึงเลือกที่จะสังเกตตัวแปรเพียงตัวเดียวโดยให้ตัวให้อื่นคงที่



รูปที่ 7.1 แบบจำลองโครงสร้างผลึกของฟิล์มซิงค์ออกไซด์เจือลูมิเนียมใน 2 มิติ

## 1) การวิเคราะห์หาสภาวะการสับตัดเตอร์ที่เหมาะสมของระบบ

การวิเคราะห์หาสภาวะการสับตัดเตอร์ที่เหมาะสมของระบบ เป้าที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นป้าชนิดอัตร้อน ที่เจือลูมินัมออกไซด์ 2 เปรอร์เซ็นต์โดยมวล จะกระทำเพียงดูผลของอัตรการเคลื่อน และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเท่านั้น โดยต้องการทราบผลของตัวแปรกระทบที่มีต่ออัตรการเคลื่อน และสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเท่านั้น เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ สำหรับสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มทุกตัวจากการตรวจสอบเบื้องต้นพบว่าอยู่ในช่วงประมาณ 90 เปรอร์เซ็นต์ แต่ไม่ได้รายงานในตอนนี โดยจะรายงานในภายหลัง

### 1.1) อัตรการเคลื่อน

รูปที่ 7.2 แสดงให้เห็นว่าวัสดุรองรับที่วางท่ามุม 0 และ 90 องศา กับเป้าจะมีอัตรการเคลื่อนจะลดลง เมื่อความดันแก๊สอาร์กอนเพิ่มขึ้น ขณะที่ความดันเพิ่มสูงขึ้นอะตอมที่ถูกสับตัดเตอร์ออกมาจะมีการชนกันระหว่างอะตอมของแก๊สมากขึ้นจึงเกิดการกระเจิงเปลี่ยนทิศทาง ทำให้ปริมาณที่ขึ้นไปจับกับวัสดุรองรับมีน้อยลง สำหรับวัสดุรองรับที่วางท่ามุม 45 องศา หากพิจารณาตามโครงสร้างในรูปที่ 5.12 ระยะของวัสดุรองรับในแนวนี้จะอยู่ใกล้กับเป้าหมายมากที่สุด(ในแนวรัศมีจากศูนย์กลางของเป้า) ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีอัตรการเคลื่อนที่สูงกว่าการจัดวางในแนวอื่นและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

รูปที่ 7.3 แสดงให้เห็นว่าวัสดุรองรับที่วางทั้ง 3 แนว เมื่อมีการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าที่ให้กับระบบขณะสับตัดเตอร์จะทำให้อัตรการเคลื่อนเพิ่มขึ้น เพราะเป็นการเพิ่มจำนวนและพลังงานของสับตัดเตอร์อะตอม ทำให้อัตรการสับตัดเตอร์เพิ่มสูงขึ้น

รูปที่ 7.4 แสดงให้เห็นว่าวัสดุรองรับที่วางทั้ง 3 แนว เมื่อมีการเพิ่มของระยะห่างระหว่างแท่นวางวัสดุรองรับกับเป้า(ระยะ d แสดงดังรูปที่ 5.12) ทำให้อัตรการเคลื่อนลดลง เป็นการเพิ่มโอกาสการกระเจิงเปลี่ยนทิศทางของอะตอมที่ถูกสับตัดเตอร์ โอกาสของอะตอมที่ถูกสับตัดเตอร์จะไปถึงวัสดุรองรับก็จะลดลง

รูปที่ 7.5 แสดงให้เห็นว่าวัสดุรองรับที่วางท่ามุม 0 และ 90 องศา กับเป้า การเพิ่มขึ้นของแก๊สออกซิเจนทำให้อัตรการเคลื่อนลดลง เพราะออกซิเจนไอออนมีอัตรการสับตัดเตอร์ที่ต่ำกว่าอาร์กอนไอออน และออกซิเจนไอออนมีความสามารถที่จะจับกับอิเล็กตรอนหุติยภูมิในพลาสมาได้ดีกว่าอาร์กอนไอออน ทำให้กระบวนการไอออไนซ์ที่เกิดขึ้นลดลงเป็นผลให้อัตรการเคลื่อนลดลงด้วย[46]

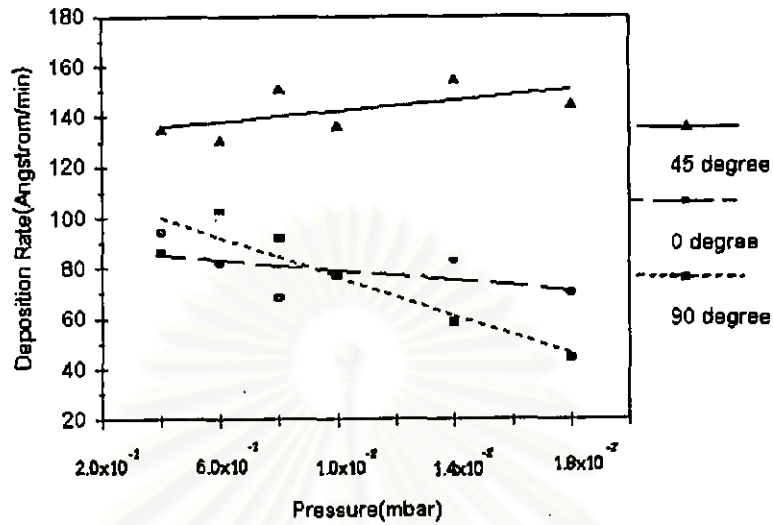
สำหรับวัสดุรองรับที่วางท่ามุม 45 องศา หากพิจารณาตามโครงสร้างในรูปที่ 5.12 ระยะของวัสดุรองรับในแนวนี้จะอยู่ใกล้กับเป่ามากที่สุด(ในแนวรัศมีจากศูนย์กลางของเป่า) จึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

หากพิจารณาโครงสร้างตามรูปที่ 5.12 จะเห็นว่าการจัดวางวัสดุรองรับวางท่ามุม 45 องศา กับเป่า ระยะของวัสดุรองรับในแนวนี้จะอยู่ใกล้กับเป่ามากที่สุด ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีอัตราการเคลือบที่สูงกว่าการจัดวางในแนวอื่น

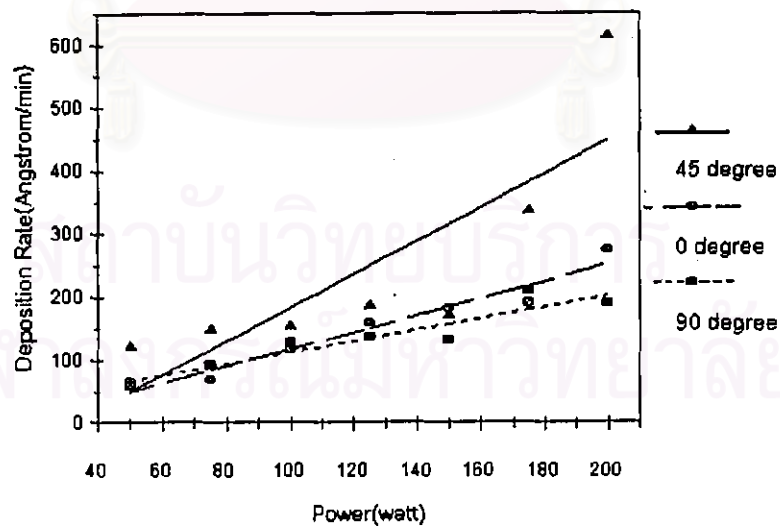
อัตราการเคลือบของฟิล์มที่ได้ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังไฟฟ้าอาร์เอฟที่ใช้ในการสปัตเตอร์ เป็นสัดส่วนกลับกับความดันแก๊สอาร์กอนและระยะห่างระหว่างวัสดุรองรับกับเป่า ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3



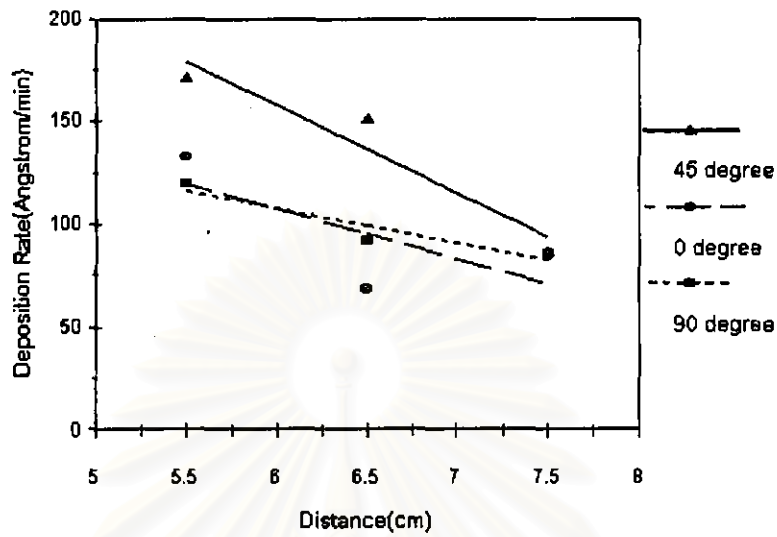
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.2 อัตราการเคลือบกับความดันแก๊สอาร์กอนของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าชนิดอัตร้อน  
ที่กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm

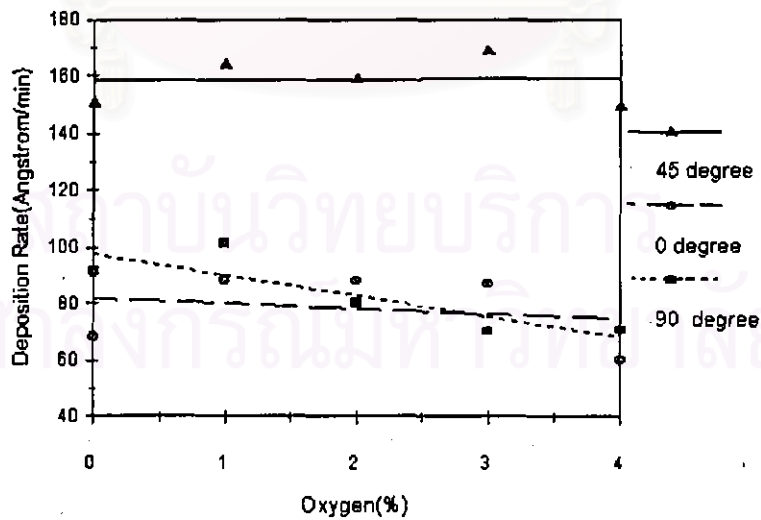


รูปที่ 7.3 อัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ระบบของฟิล์มบาง ZnO  
จากเป้าชนิดอัตร้อน ที่ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm



รูปที่ 7.4 อัตราการเคลือบกับระยะระหว่างวัสดุรองรับกับเป้า ของฟิล์มบาง ZnO

จากเป้าชนิดอัดร้อน ที่ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt



รูปที่ 7.5 อัตราการเคลือบกับสัดส่วนแก๊สออกซิเจน ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าชนิดอัดร้อน

ที่ความดันแก๊สรวม  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm กำลัง 75 watt



## 1.2) สมบัติทางไฟฟ้า

การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มที่สภาวะการสับตัดเตอร์ต่างๆของเป้าอัตร้อนมีดังนี้

อิทธิพลของความดันแก๊สอาร์กอนต่อสมบัติทางไฟฟ้า รูปที่ 7.6 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีการจัดวางวัสดุรองรับทั้ง 3 แนวมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้น เพราะความดันเพิ่มสูงที่ขึ้นจะทำให้แก๊สออกซิเจนในพลาสมามีโอกาสที่จะถูกไอออไนซ์โดยการชนกับอนุภาคอื่นๆภายในพลาสมาแล้วขึ้นไปจับบนฟิล์มเพิ่มสูงขึ้น กระบวนการเช่นนี้ทำให้ได้โครงสร้างผลึกของฟิล์มซึ่งคือออกไซด์ที่มีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้ได้ฟิล์มที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงสัมพันธ์กับสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และความหนาแน่นพาหะที่ลดลงสัมพันธ์กันดังรูปที่ 7.10-7.11

อิทธิพลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้สับตัดเตอร์ต่อสมบัติทางไฟฟ้า รูปที่ 7.7 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีการจัดวางวัสดุรองรับท่ามุม 45 องศาเป้า สภาพต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ให้กับระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากการจัดวางวัสดุรองรับในแนวนี้จะอยู่ใกล้เป้าหมายที่สุดจึงทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนเมื่อการเพิ่มกำลังไฟฟ้าเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับระบบ ทำให้แก๊สออกซิเจนในพลาสมามีโอกาสไอออไนซ์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ได้ฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ได้ฟิล์มที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงสัมพันธ์กับสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และความหนาแน่นพาหะที่ลดลงสัมพันธ์กันดังรูปที่ 7.12-7.13 รูปที่ 7.7 การจัดวางวัสดุรองรับท่ามุม 0 และ 90 องศาเป้า สมบัติทางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจากรูปที่ 7.12-7.13 การเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นผลมาจากความหนาแน่นพาหะที่ลดลง

อิทธิพลของระยะห่างระหว่างวัสดุรองรับกับเป้าต่อสมบัติทางไฟฟ้า รูปที่ 7.8 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีการจัดวางวัสดุรองรับทั้ง 3 แนวมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างวัสดุรองรับกับเป้าเพิ่มขึ้น เพราะที่ระยะใกล้กับเป้าจะมีโอกาสเกิดความบกพร่องของผลึกสูงเนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่สูงและที่ระยะไกลโอกาสที่แก๊สออกซิเจนจะถูกไอออไนซ์มีน้อย เนื่องจากโอกาสที่จะชนกับอนุภาคอื่นๆภายในพลาสมาเพื่อจะได้รับพลังงานพอที่จะแตกตัวขึ้นไปจับบนฟิล์มมีน้อยในระยะใกล้ ดังนั้นฟิล์มที่ได้จึงมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากที่ระยะห่างออกไปฟิล์มที่เตรียมได้มีสภาพต้านทานสูงมากทำให้ไม่สามารถวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ และความหนาแน่นพาหะได้

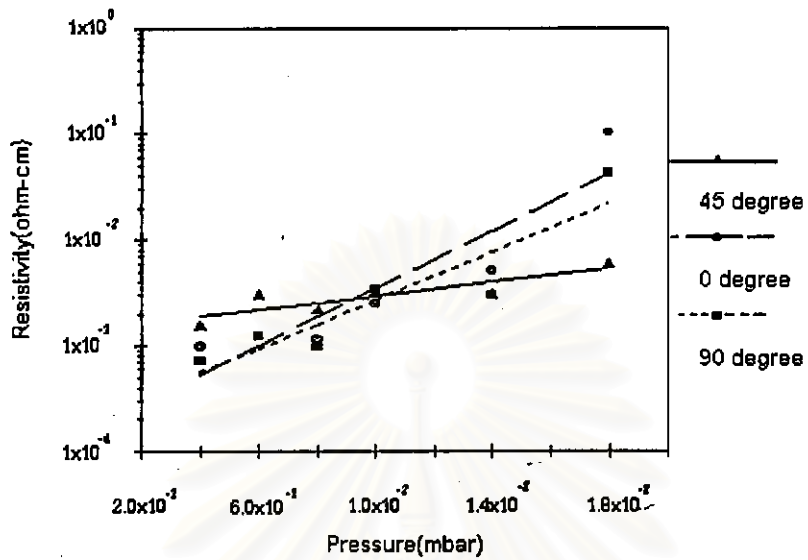
อิทธิพลของแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มสูงขึ้นในขณะสับตัดเตอร์ รูปที่ 7.9 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีการจัดวางวัสดุรองรับทั้ง 3 แนวมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อป้อนแก๊สออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้นในขณะสับตัดเตอร์แก๊สออกซิเจนที่ป้อนให้กับระบบ จะแตกตัวเข้าไปเติมในส่วนของอะตอมของออกซิเจนที่ขาดหายไปบนโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ที่จะทำให้ฟิล์มเกิดผลึกที่สมบูรณ์มากขึ้น ฟิล์มที่ได้จึงมีสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สูงมากทำให้ไม่สามารถวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และความหนาแน่นพาหะของฟิล์มได้



อิทธิพลของแนวการจัดวางวัสดุรองรับ จะเห็นว่าวัสดุรองรับที่วางท่ามุม 90 องศา กับ เป้าจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าการจัดวางในแนวอื่น เพราะการจัดวางในแนวนี้ฟิล์มมีโอกาสเกิด ความบกพร่องของผลึกภายในฟิล์มสูงกว่าการจัดวางในแนวอื่น อะตอมของออกซิเจนที่มีความสามารถจับกับ อิเล็กตรอนทุติยภูมิได้ดีกว่าอนุภาคอื่นๆ ในพลาสติก(46)จะถูกดึงเข้าหาแท่นวางวัสดุรองรับที่เป็นเสมือน ขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับเป้า ทำให้โอกาสที่จะขึ้นไปจับบนแท่นวางวัสดุรองรับที่วางท่ามุมกับเป้า 90 องศา น้อยกว่าในแนวอื่น

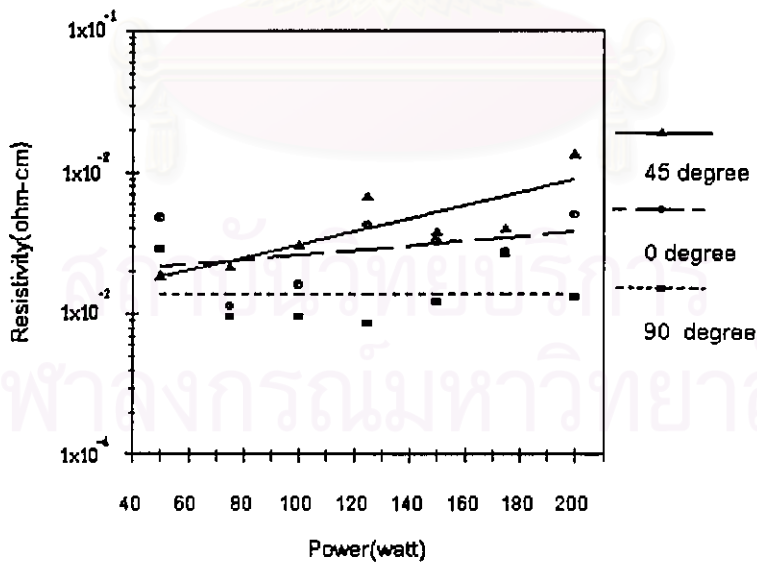
จากผลในข้อ 1.1 และ 1.2 ทำให้สามารถเลือกสภาวะการเตรียมที่เหมาะสมได้ดังนี้คือ เตรียมที่ความดันแก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์  $8 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ ความดันในช่วงนี้จะให้สภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ ในช่วง ความดันต่ำกว่านี้การทำให้เกิดสภาพโกลดิสซาร์จะกระทำได้ยาก หากสูงกว่านี้ก็จะไม่เป็นผลดีกับระบบปั๊ม กำลังไฟฟ้า 75 วัตต์ เนื่องจากระบบที่ใช้เป็นแบบแมกเนตรอนสปัตเตอร์ การสปัตเตอร์ที่กำลังสูงจะเกิดการ สะสมความร้อนบริเวณแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ ซึ่งทำให้แหวนแม่เหล็กภายในแหล่งกำเนิดเสื่อมสภาพได้ ระยะห่างระหว่างแท่นวางวัสดุรองรับกับเป้า 6.5 cm. ที่ระยะต่ำกว่านี้ทำให้แท่นวางวัสดุรองรับติดขอบของ แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ แนววัสดุรองรับท่ามุม 90 องศา กับเป้า แนวนี้จะให้สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



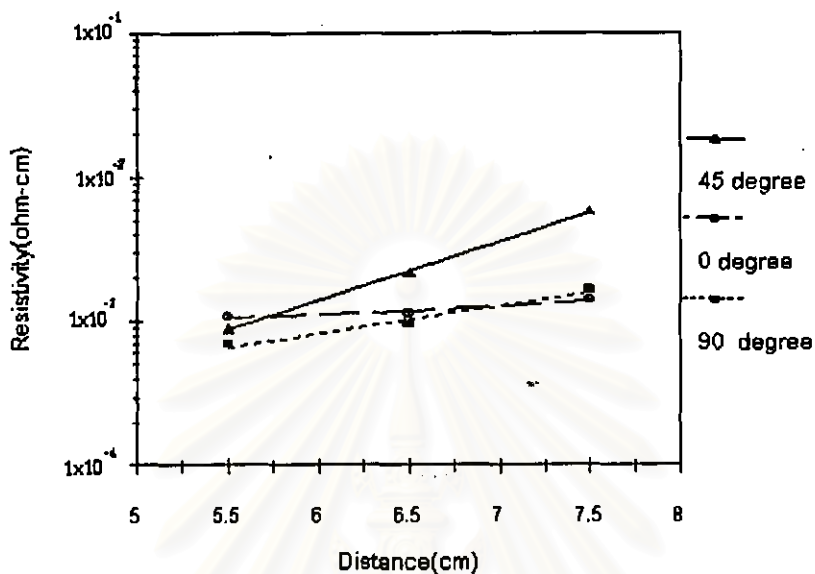
รูปที่ 7.6 สภาพต้านทานไฟฟ้ากับความดันแก๊สอาร์กอน ของฟิล์มบาง ZnO

จากเป้า้อัดร้อน กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm



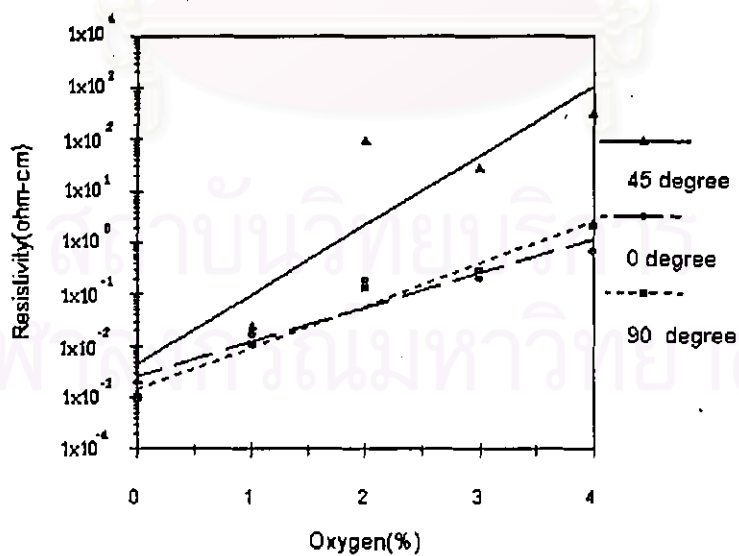
รูปที่ 7.7 สภาพต้านทานไฟฟ้ากับกำลังไฟที่ใช้สเป็คเตอร์ ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้า้อัดร้อน

ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm



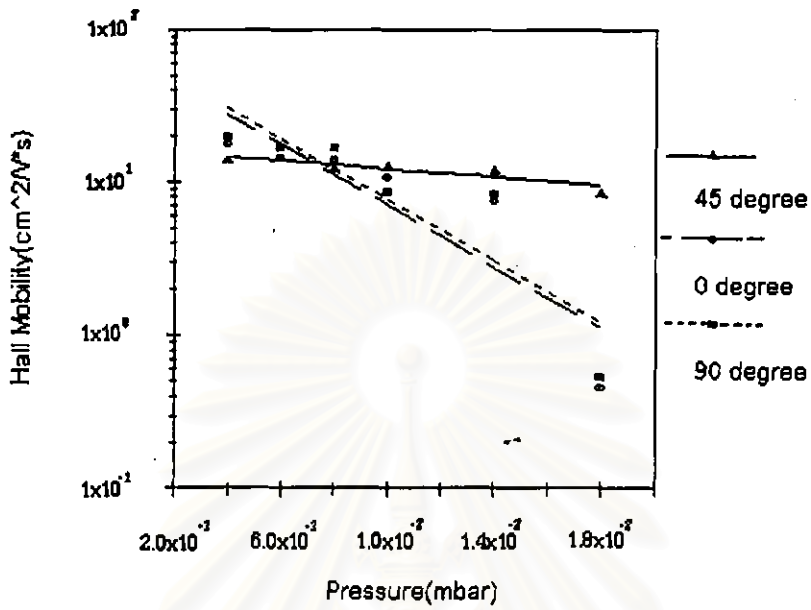
รูปที่ 7.8 สภาพต้านทานไฟฟ้าและระยะแทนวางวัสดุรองรับกับเป้า ของฟิล์มบาง ZnO

จากเป้าอัดร้อน กำลัง 75 watt ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar



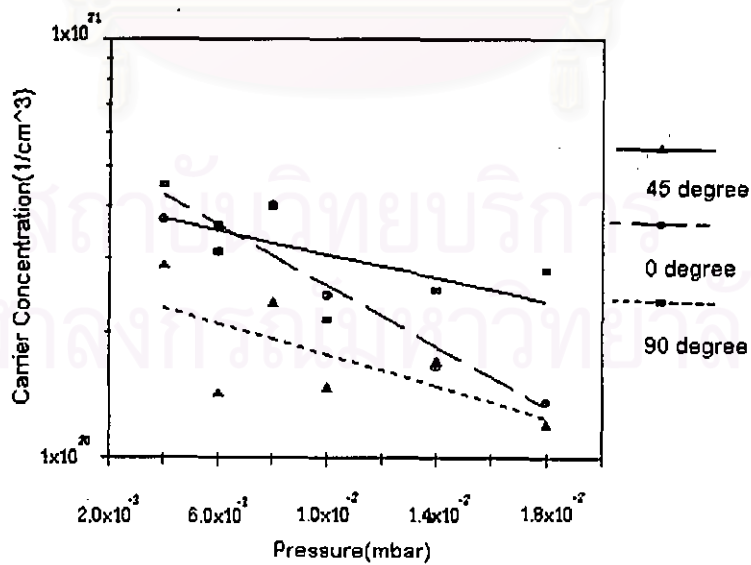
รูปที่ 7.9 สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัดส่วนของแก๊สออกซิเจน ของฟิล์มบาง ZnO

ที่จากเป้าอัดร้อน กำลัง 75 watt ความดันแก๊สรวม  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm



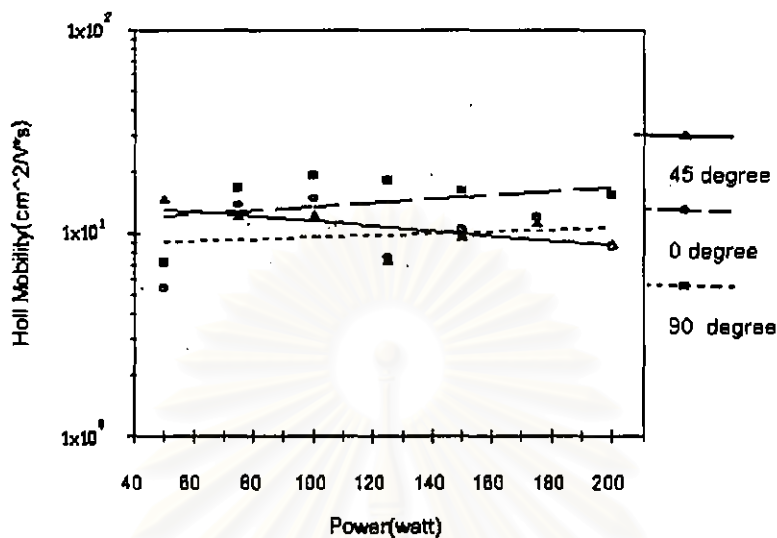
รูปที่ 7.10 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์กับความดันแก๊สอาร์กอน ของฟิล์มบาง ZnO

จากเป่าอัดร็อน กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm



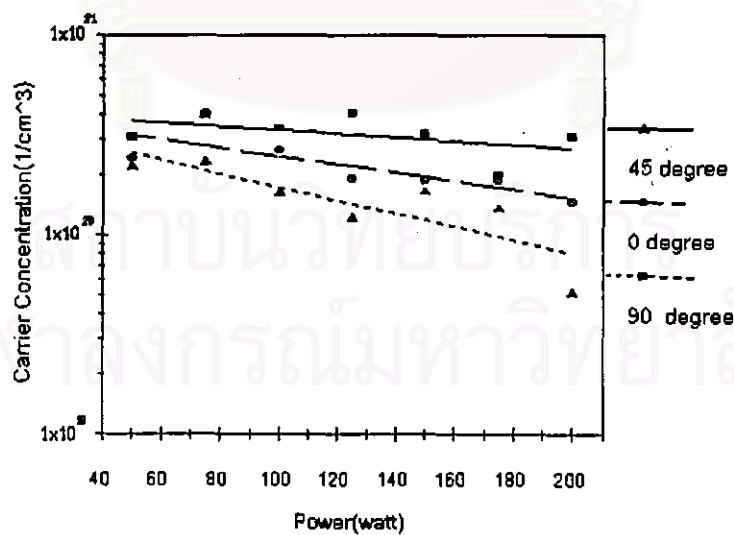
รูปที่ 7.11 ความหนาแน่นพาหะกับความดันแก๊สอาร์กอน ของฟิล์มบาง ZnO

จากเป่าอัดร็อน กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm



รูปที่ 7.12 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์กับกำลังไฟที่ใช้สเป็คเตอร์ ของฟิล์มบาง ZnO

จากเป้าอีตรอน ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm



รูปที่ 7.13 ความหนาแน่นพาหะกับกำลังไฟที่ใช้สเป็คเตอร์ ของฟิล์มบาง ZnO

จากเป้าอีตรอน ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm

### 1.3) สมบัติของฟิล์มในสภาวะการเตรียมที่เหมาะสม

ในการเตรียมฟิล์มในแต่ละครั้งแม้ว่าจะเตรียมในสภาวะการเตรียมเดียวกันแต่สภาวะของพลาสมาก็จะแตกต่างกัน อันเป็นผลมาจากสภาพผิวหน้าของเป้าที่เปลี่ยนไป พื้นผิวของวัสดุรองรับที่แตกต่างกัน จากข้อมูลเบื้องต้นทดลองเตรียมซ้ำที่สภาวะการเตรียมนี้ 10 ครั้ง โดยเลือกสภาวะการเตรียมที่เหมาะสม ดังนี้คือ เตรียมที่ความดันแก๊สอาร์กอน กำลังไฟฟ้า 75 วัตต์ ระยะห่างระหว่างแท่นวางวัสดุรองรับกับเป้า 6.5 cm. แนววัสดุรองรับทำมุม 90 องศากับเป้า จะได้ผลดังนี้

การเตรียมครั้งที่	อัตราการเคลือบ( $\text{\AA}/\text{min}$ )		
	45 องศา	0 องศา	90 องศา
1	$1.51 \times 10^2$	$6.84 \times 10^1$	$9.16 \times 10^1$
2	$1.43 \times 10^2$	$8.96 \times 10^1$	$8.31 \times 10^1$
3	$1.04 \times 10^2$	$7.73 \times 10^1$	$8.61 \times 10^1$
4	$1.60 \times 10^2$	$1.03 \times 10^2$	$8.53 \times 10^1$
5	$9.72 \times 10^1$	$4.51 \times 10^1$	$5.62 \times 10^1$
6	$7.01 \times 10^1$	$8.13 \times 10^1$	$5.97 \times 10^1$
7	$6.47 \times 10^1$	$8.55 \times 10^1$	$5.43 \times 10^1$
8	$1.00 \times 10^2$	$1.16 \times 10^2$	$5.50 \times 10^1$
9	$9.20 \times 10^1$	$7.34 \times 10^1$	$8.64 \times 10^1$
10	$8.94 \times 10^1$	$1.01 \times 10^2$	$5.31 \times 10^1$
เฉลี่ย	$1.07 \times 10^2$	$8.41 \times 10^1$	$7.11 \times 10^1$
ค่าคลาดเคลื่อน	$3.14 \times 10^1$	$1.92 \times 10^1$	$1.56 \times 10^1$

ตารางที่ 7.2 อัตราการเคลือบของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัครอน

ที่ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm

- อัตราการเคลือบเฉลี่ยตามแนวการจัดวางวัสดุรองรับที่ได้แสดงดังตารางที่ 7.2 แนววัสดุรองรับวางทำมุม 90 องศากับเป้า จะให้อัตราการเคลือบ  $71.1 \pm 15.6 \text{ \AA}/\text{min}$  ในการเตรียมซ้ำอัตราการเคลือบ ที่ได้จะคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ยราว 24 เปอร์เซ็นต์

- สภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ และความหนาแน่นพาหะ ที่ได้แสดง  
 ดังตารางที่ 7.3 และ 7.4 แนววัสดุรองรับวางท่ามุม 90 องศากับเป้า จะให้สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ  
 $(9.61 \pm 0.88) \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$  ในการเตรียมชั้นอัตราการผลิตที่ได้จะคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ยราว 9 เปอร์เซ็นต์  
 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์  $15.9 \pm 6 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  และความหนาแน่นพาหะ  $(4.14 \pm 0.41) \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

การเตรียมครั้งที่	สภาพต้านทานไฟฟ้า( $\Omega\text{-cm}$ )		
	45 องศา	0 องศา	90 องศา
1	$2.18 \times 10^{-3}$	$1.13 \times 10^{-3}$	$9.56 \times 10^{-4}$
2	$2.08 \times 10^{-3}$	$4.31 \times 10^{-3}$	$9.95 \times 10^{-4}$
3	$2.08 \times 10^{-3}$	$2.37 \times 10^{-3}$	$1.12 \times 10^{-3}$
4	$2.84 \times 10^{-3}$	$1.80 \times 10^{-3}$	$8.94 \times 10^{-4}$
5	$1.92 \times 10^{-3}$	$1.86 \times 10^{-3}$	$9.10 \times 10^{-4}$
6	$1.48 \times 10^{-3}$	$4.30 \times 10^{-3}$	$1.09 \times 10^{-3}$
7	$4.48 \times 10^{-3}$	$4.82 \times 10^{-3}$	$9.53 \times 10^{-4}$
8	$1.47 \times 10^{-2}$	$6.88 \times 10^{-3}$	$9.63 \times 10^{-4}$
9	$2.05 \times 10^{-3}$	$1.50 \times 10^{-3}$	$9.39 \times 10^{-4}$
10	$3.50 \times 10^{-3}$	$6.62 \times 10^{-3}$	$7.94 \times 10^{-4}$
เฉลี่ย	$3.73 \times 10^{-3}$	$3.56 \times 10^{-3}$	$9.61 \times 10^{-4}$
ค่าคลาดเคลื่อน	$3.75 \times 10^{-3}$	$2.02 \times 10^{-3}$	$8.84 \times 10^{-5}$

ตารางที่ 7.3 สภาพต้านทานไฟฟ้า ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดร้อน  
 ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  กำลัง 75 watt และระยะ 6.5 cm

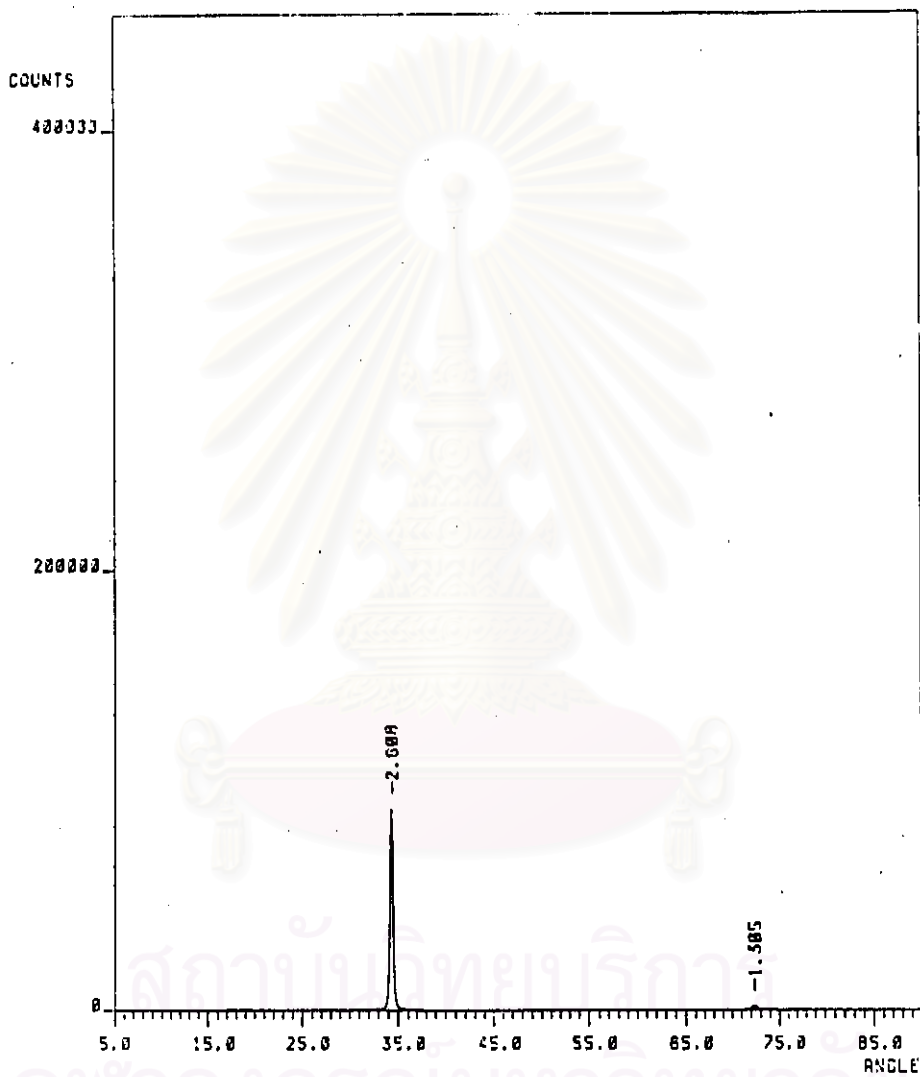


การเตรียมครั้งที่	สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )			ความหนาแน่นพาหะ( $\text{cm}^{-3}$ )		
	45 องศา	0 องศา	90 องศา	45 องศา	0 องศา	90 องศา
1	$1.22 \times 10^1$	$1.37 \times 10^1$	$1.65 \times 10^1$	$2.35 \times 10^{20}$	$4.29 \times 10^{20}$	$3.96 \times 10^{20}$
2	$1.30 \times 10^1$	$6.62 \times 10^0$	$1.49 \times 10^1$	$2.30 \times 10^{20}$	$2.19 \times 10^{20}$	$4.20 \times 10^{20}$
3	$1.20 \times 10^1$	$9.96 \times 10^0$	$1.65 \times 10^1$	$2.51 \times 10^{20}$	$2.65 \times 10^{20}$	$3.39 \times 10^{20}$
4	$1.27 \times 10^1$	$1.41 \times 10^0$	$1.64 \times 10^1$	$1.73 \times 10^{20}$	$2.46 \times 10^{20}$	$4.26 \times 10^{20}$
5	$1.20 \times 10^1$	$8.89 \times 10^0$	$1.59 \times 10^1$	$2.71 \times 10^{20}$	$3.78 \times 10^{20}$	$4.32 \times 10^{20}$
6	$1.21 \times 10^1$	$6.53 \times 10^0$	$1.57 \times 10^1$	$3.49 \times 10^{20}$	$2.23 \times 10^{20}$	$3.65 \times 10^{20}$
7	$1.36 \times 10^1$	$6.34 \times 10^0$	$1.51 \times 10^1$	$1.03 \times 10^{20}$	$2.04 \times 10^{20}$	$4.35 \times 10^{20}$
8	$3.22 \times 10^0$	$6.14 \times 10^0$	$1.52 \times 10^1$	$1.32 \times 10^{20}$	$1.48 \times 10^{20}$	$4.28 \times 10^{20}$
9	$1.21 \times 10^1$	$1.42 \times 10^1$	$1.66 \times 10^1$	$2.51 \times 10^{20}$	$2.94 \times 10^{20}$	$4.00 \times 10^{20}$
10	$8.50 \times 10^0$	$6.08 \times 10^0$	$1.58 \times 10^1$	$2.10 \times 10^{20}$	$1.55 \times 10^{20}$	$4.99 \times 10^{20}$
เฉลี่ย	$1.11 \times 10^1$	$7.98 \times 10^0$	$1.59 \times 10^1$	$2.21 \times 10^{20}$	$2.56 \times 10^{20}$	$4.14 \times 10^{20}$
ค่าคลาดเคลื่อน	$2.94 \times 10^0$	$3.64 \times 10^0$	$6.0 \times 10^0$	$6.74 \times 10^{19}$	$8.57 \times 10^{19}$	$4.12 \times 10^{19}$

ตารางที่ 7.4 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ และความหนาแน่นพาหะ ของฟิล์มบาง ZnO

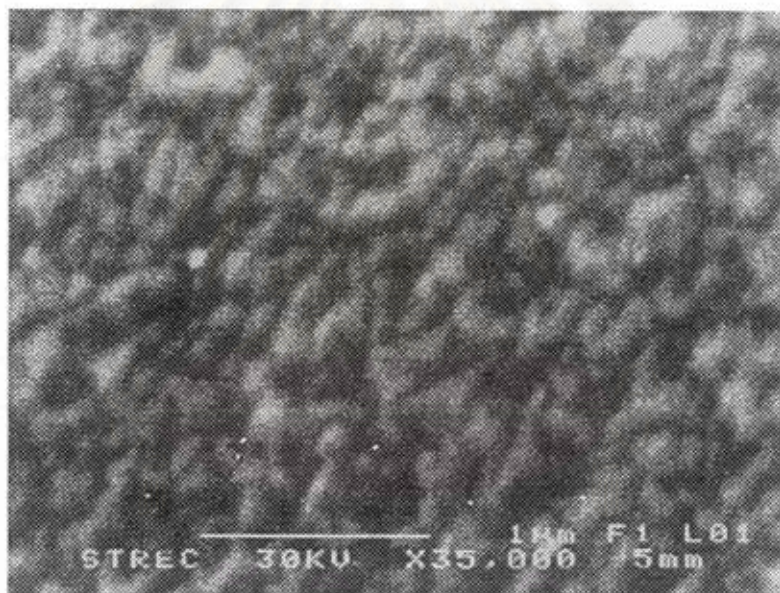
จากเป่าอัดร้อน ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt และระยะ 6.5 cm

- โครงสร้างผลึกของฟิล์ม ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่มีการจัดวางวัสดุรองรับทั้งสามแบบ พบเห็นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่พบมีเพียง 2 ระนาบคือ (002) และ (004) ที่มุมเลี้ยวเบน ( $2\theta$ ) 34.3 และ 72.2 องศาตามลำดับ ดังรูปที่ 7.14 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีแกน c ตั้งฉากกับระนาบวัสดุรองรับ จากรูปที่ 7.14 หากนำมุมเลี้ยวเบนที่ได้มาเทียบกับตารางที่ 4.1 จะทำให้ทราบว่าฟิล์มที่ได้มีระนาบใดบ้าง แล้วนำระนาบที่ได้คำนวณค่าคงที่ผลึกจากสมการ 4.21 ค่าคงที่ผลึกที่ได้คือ  $c = 5.216\text{-}5.228 \text{ \AA}$



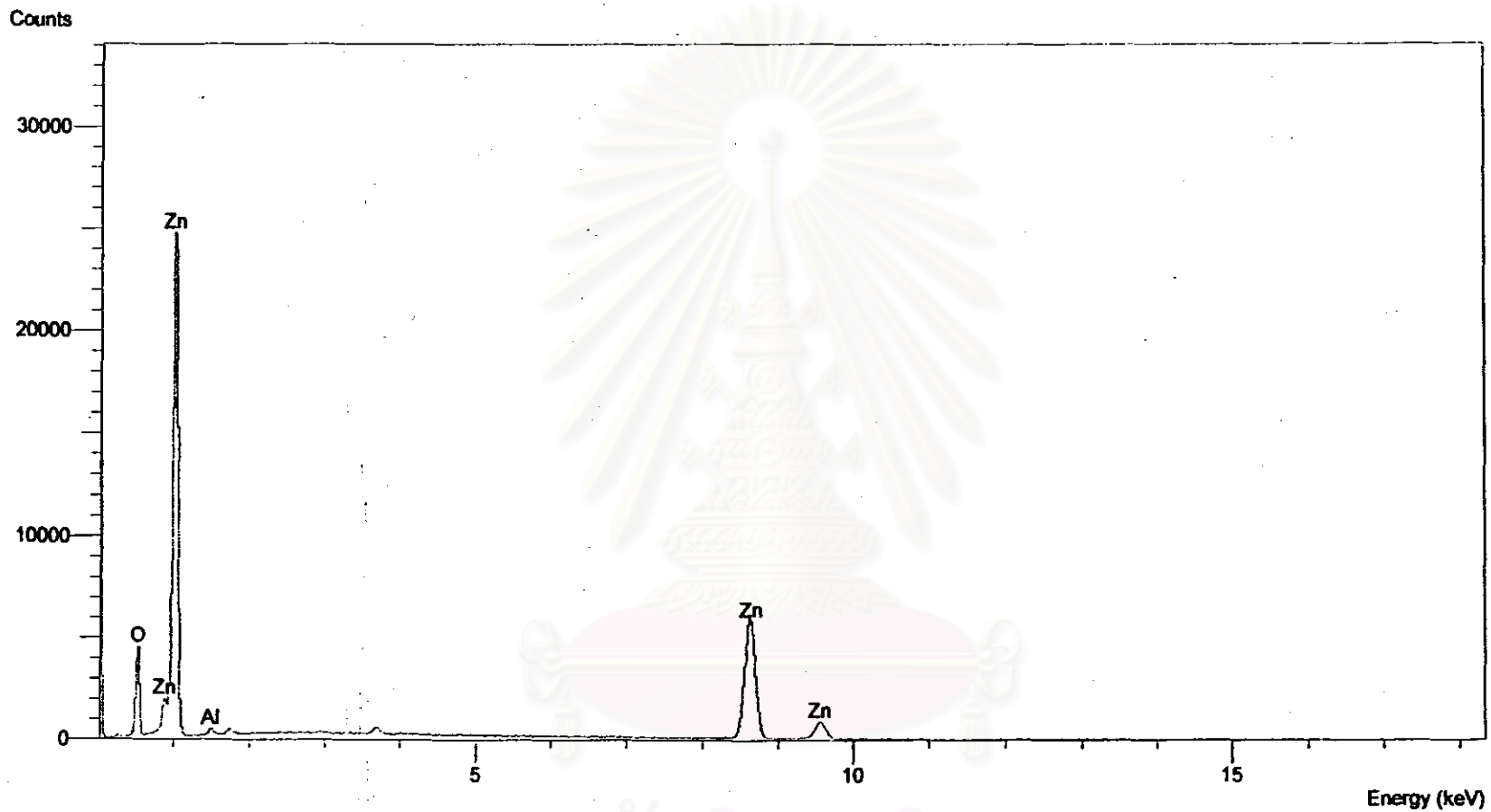
รูปที่ 7.14 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอีตรอน ที่ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm

- การตรวจสอบสภาพพื้นผิว เมื่อนำฟิล์มที่ได้จากการสเปคเตอร์มาตรวจสอบสภาพพื้นผิว โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนดังรูปที่ 7.15 พบว่าฟิล์มประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กจำนวนมาก แต่ไม่พบเกรนที่มีขนาดโตกว่า  $1 \mu\text{m}$  ลักษณะเช่นนี้เกิดจากการสเปคเตอร์ที่สภาวะอุณหภูมิของวัสดุรองรับต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของซิงค์ออกไซด์มาก และความดันต่ำ อะตอมที่มาจับเป็นฟิล์มมีพลังงานสูง ขณะที่มาจับมีการเกลี่ยผิวหน้าของฟิล์ม ทำให้พื้นผิวของฟิล์มมีความเรียบมาก เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของฟิล์มด้วย EDX แสดงดังรูปที่ 7.16 พบเพียง Zn, O และ Al ไม่พบธาตุอื่นนอกจากนี้ แต่เนื่องจากฟิล์มมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบการวิเคราะห์ด้วย EDX เป็นวิธีที่ไม่เหมาะสม จึงไม่สามารถระบุส่วนประกอบของฟิล์มได้ ทำได้เพียงดูความบริสุทธิ์ของฟิล์มที่เตรียมได้เท่านั้น



รูปที่ 7.15 การวิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มบาง ZnO ด้วย SEM จากเป้าอัดร้อน

ที่ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm,



รูปที่ 7.16 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของฟิล์มบาง ZnO เตรียมจากเป้าอัตราอน

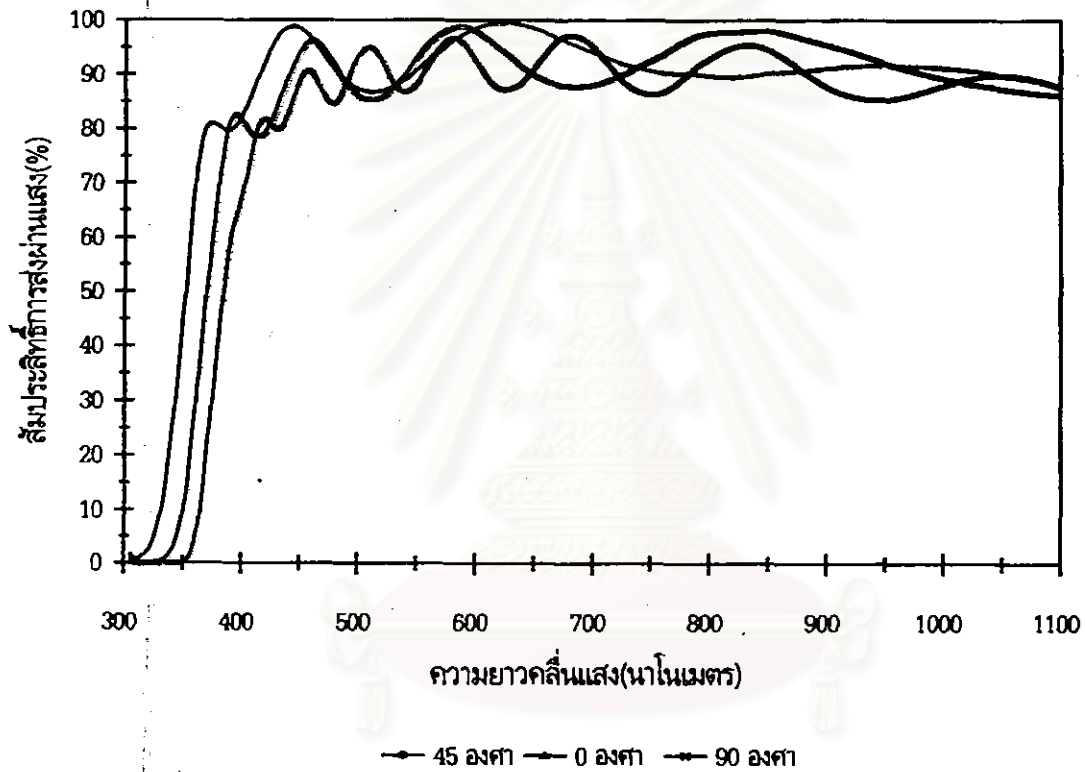
ที่ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm

- การวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกระทำโดยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงคู่ แล้วนำสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงโดยสมการที่ 4.27 และคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $((\alpha - \alpha_0)h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ดังรูปที่ 7.18-7.20 โดยลากเส้นตรงบนกราฟข้อที่คำนวณได้หาจุดตัดบนแกน  $h\nu$  ในรูปที่ 7.17 จะเห็นว่าฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมได้ทุกตัวจะมีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงสูงประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตร ริวแทรกสอดที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์บนกราฟเกิดจากความหนาของฟิล์ม ในรูปที่ 7.18-7.19 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงอยู่ในระดับไม่น้อยกว่า  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  จากรูปที่ 7.18-7.19 และข้อมูลในตารางที่ 7.5 ในบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดสัมพันธ์กับช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.5-3.7 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยปกติฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ไม่มีสารเจือจะมีช่องว่างแถบพลังงานสัมพันธ์กับ bulk ที่ประมาณ 3.3 อิเล็กตรอนโวลต์ การเคลื่อนขึ้นของช่องว่างแถบพลังงานอาจเกิดจากจะสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นพาหะที่เพิ่มมากขึ้น โดยจะสัมพันธ์กับข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 7.4 เรียกปรากฏการณ์เคลื่อนขึ้นของช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่า Moss-Burstein shift[4] เป็นผลจากการที่อิเล็กตรอนครอบครองสถานะในบริเวณตอนล่างของแถบนำจนเต็ม ทำให้อิเล็กตรอนอิสระจะต้องขึ้นครอบครองสถานะที่ว่างในระดับที่สูงกว่า สมมุติในกรณีช่องว่างแถบพลังงานเป็นรูปพลาโบลิดอย่างง่าย การเลื่อนของช่องว่างแถบพลังงานสำหรับอิเล็กตรอนอิสระ(free electron)เขียนได้เป็น[4]

$$\Delta E = \frac{h^2}{8m_{vc}^*} \left( \frac{3N}{\pi} \right)^{2/3} \quad (6.1)$$

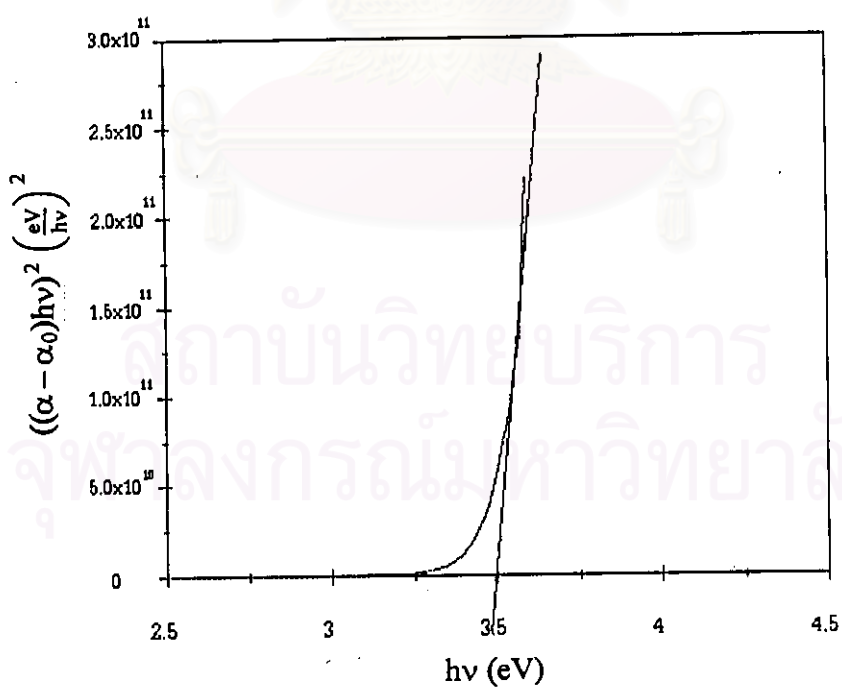
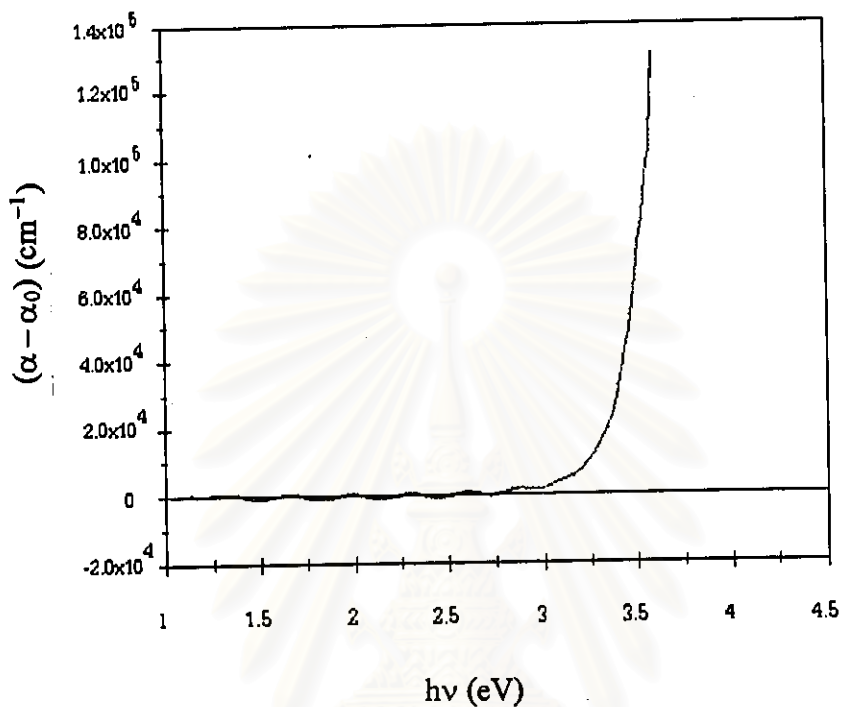
เมื่อ  $m_{vc}^*$  คือ มวลยังผลในแถบนำ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



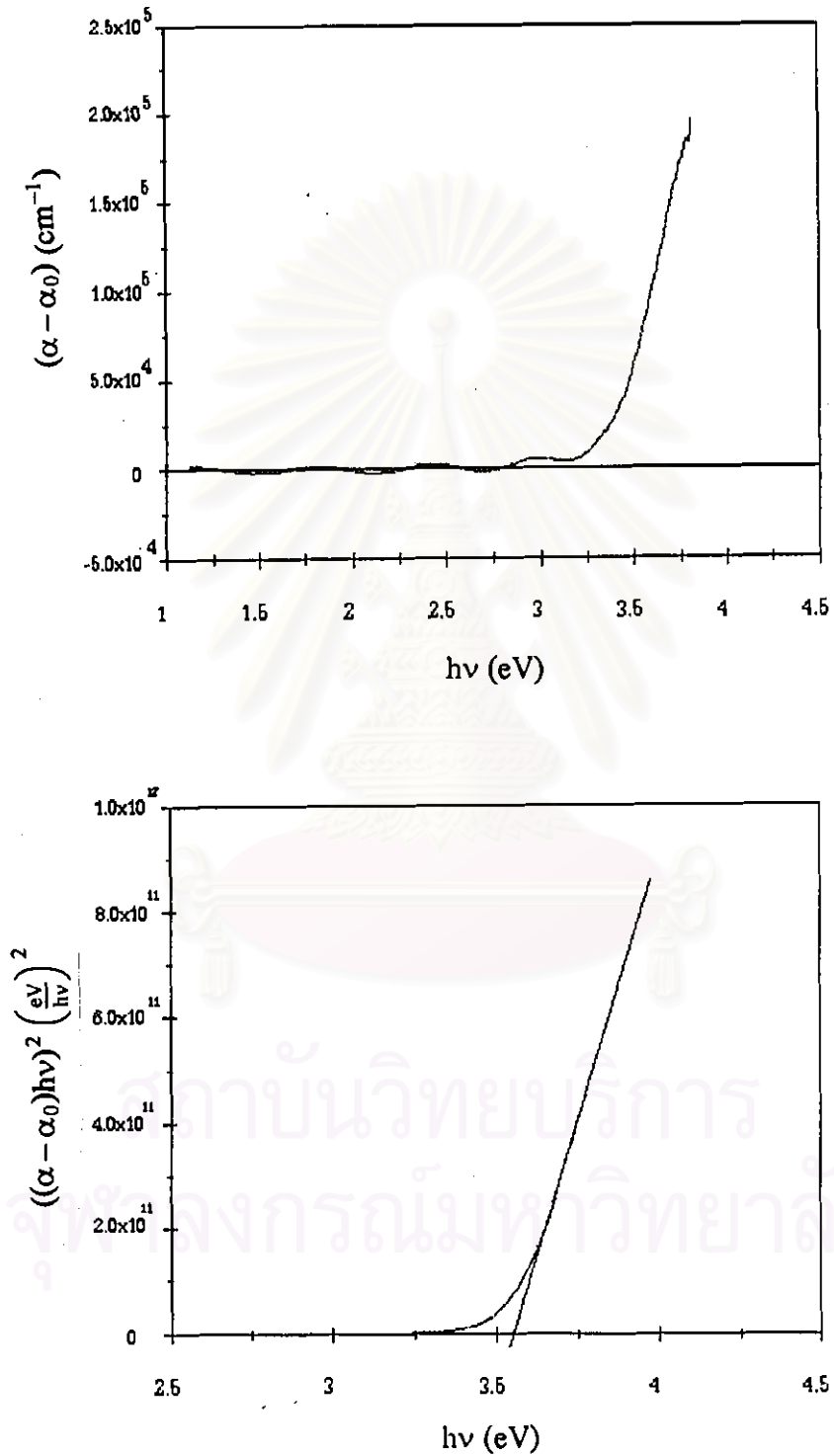
รูปที่ 7.17 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง ZnO จากปฏิกิริยา

ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm

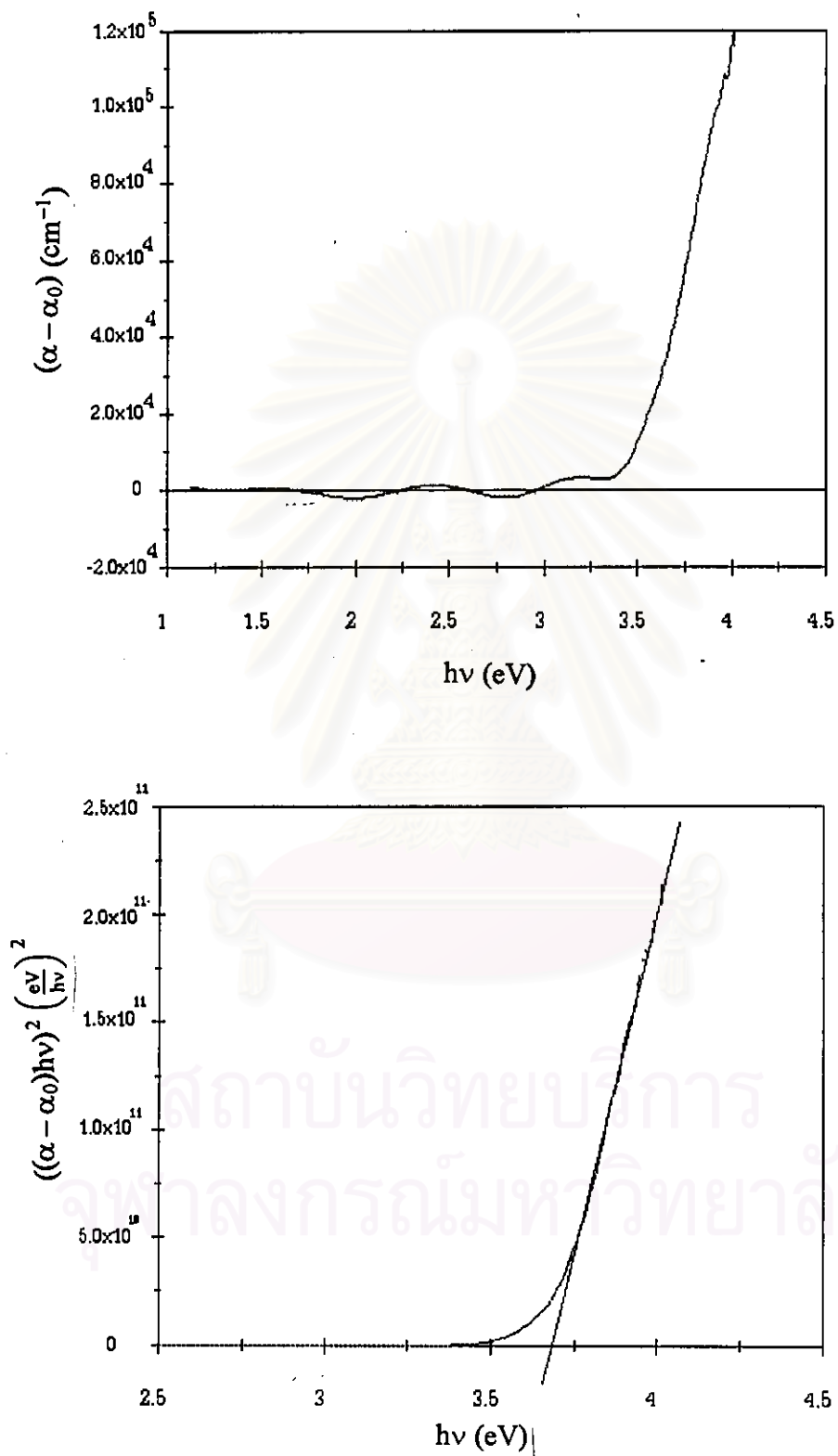


รูปที่ 7.18 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดร้อน ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm แนว 45 องศา





รูปที่ 7.19 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดร็อน ความดัน  $8 \times 10^{-5}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm แนว 0 องศา



รูปที่ 7.20 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัตร้อน ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm แนว 90 องศา

การเตรียม ครั้งที่	ช่องว่างแถบพลังงาน(eV)		
	45 องศา	0 องศา	90 องศา
1	3.5	3.55	3.67
2	3.43	3.63	3.72
3	3.47	3.6	3.73
4	3.47	3.55	3.69
5	3.42	3.61	3.7
6	3.59	3.64	3.71
7	3.52	3.63	3.72
8	3.52	3.64	3.7
9	3.45	3.5	3.65
10	3.5	3.62	3.7
เฉลี่ย	3.487	3.597	3.699
ค่าคลาด เคลื่อน	0.047	0.045	0.023

ตารางที่ 7.5 ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดร้อน

ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm แนว 45 องศา

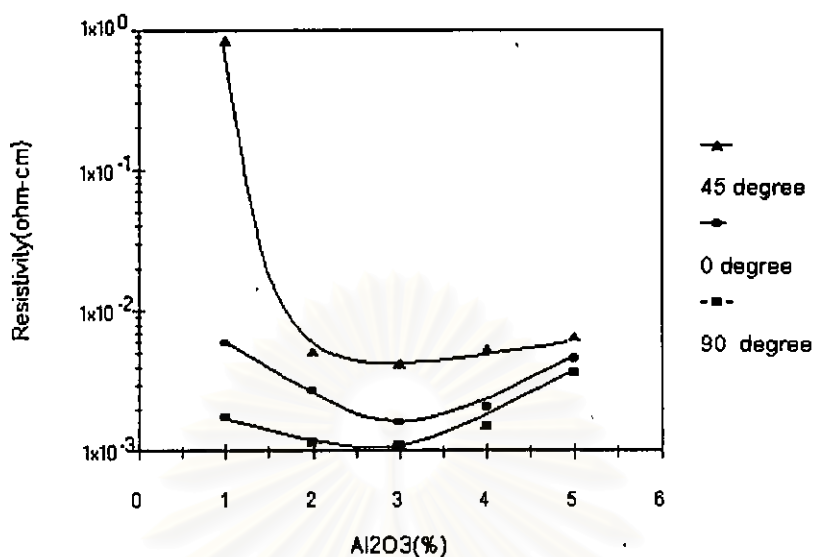
## 2. สมบัติของฟิล์มที่เตรียมจากเป่าชนิดอัดเปียกแล้วเผา

เนื่องจากการเตรียมฟิล์มจากเป่าชนิดอัดร้อนต้องใช้ต้นทุนในส่วนของเป่าซึ่งมีราคาสูง ดังนั้นจึงมีแนวความคิดที่จะเตรียมฟิล์มจากเป่าที่ทำขึ้นเอง โดยวิธีการเตรียมดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 ผลจากการเตรียมพบว่าฟิล์มที่ได้มีสมบัติต่างๆดังนี้

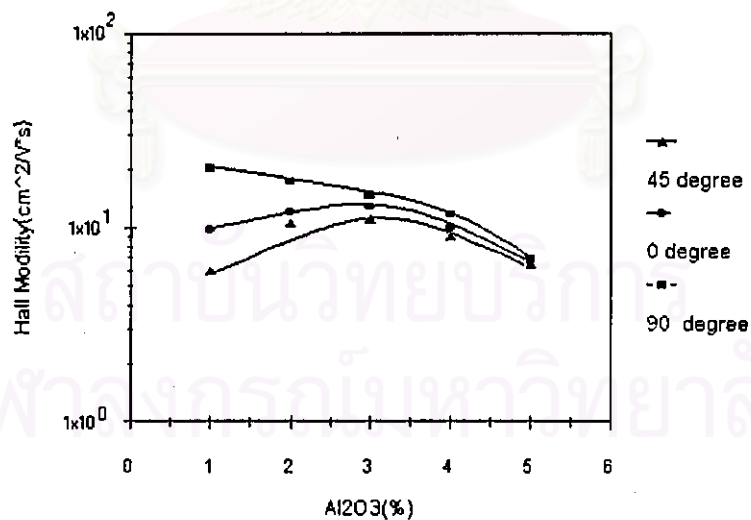
### 2.1) สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมจากเป่าที่มีสัดส่วนโดยมวลต่างๆ

อาศัยสภาวะการสเปกเตอร์ที่ได้จากตอนที่ 1 ทำการเตรียมฟิล์มจากเป่าชนิดอัดเปียกแล้วเผาที่สัดส่วนโดยมวลของอลูมิเนียมออกไซด์ต่างๆกันโดยมุ่งเน้นที่สมบัติทางไฟฟ้า ดังจะเห็นได้ในรูปที่ 7.21 ทำให้ทราบว่า ฟิล์มที่เตรียมจากเป่าที่มีสัดส่วนโดยมวล 2-3 เปอร์เซ็นต์เป็นช่วงสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอลูมิเนียมออกไซด์ สัดส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้  $Al^{3+}$  แทนที่ในตำแหน่งของ  $Zn^{2+}$  ในผลึกเพิ่มมากขึ้น เป็นการเพิ่มความหนาแน่นพาหะภายในฟิล์ม ดังจะเห็นได้ในรูปที่ 7.22 สภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงถึงค่าหนึ่งแล้วจะเพิ่มขึ้น เกิดจากการลดลงของสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ ดังแสดงในรูปที่ 7.23 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จะถูกจำกัดโดยการกระเจิงจากขอบเขตของเกรน (grain boundary scattering) และปริมาณสารเจือ(ionized impurity)ดังจะเห็นได้จากการลดลงของสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของ  $Al^{3+}$  การเพิ่มขึ้นของ  $Al^{3+}$  ภายในฟิล์มจะทำให้เกิดกลไกการกระเจิงมากขึ้น เป็นผลมาจากการจัดวางที่ไม่เป็นระเบียบในโครงสร้างผลึกของฟิล์ม

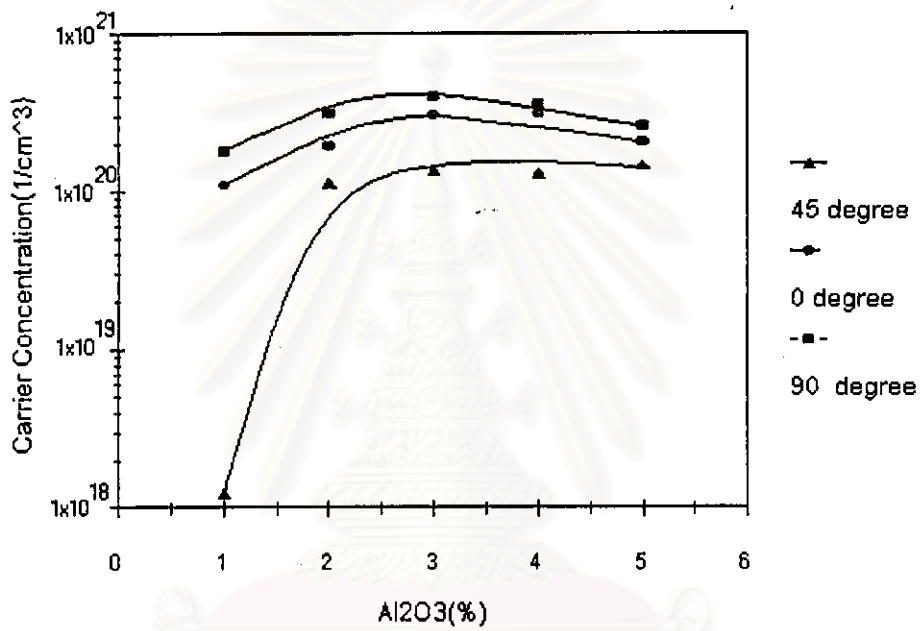
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.21 สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัดส่วนโดยมวลของอลูมิเนียมออกไซด์ ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดเปียกแล้วเผา กำลัง 75 watt ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm



รูปที่ 7.22 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และสัดส่วนโดยมวลของอลูมิเนียมออกไซด์ ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดเปียกแล้วเผา กำลัง 75 watt ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm



รูปที่ 7.23 ความหนาแน่นพาหะและสัดส่วนโดยมวลของอลูมิเนียมออกไซด์ ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดเปียกแล้วเผา กำลัง 75 watt ความดันแก๊สอาร์กอน 8x10<sup>-3</sup> mbar ระยะ 6.5 cm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.2) การเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มที่เตรียมจากเป่าอัดเปียกแล้วเผากับฟิล์มที่เตรียมจากเป่าอัดร้อน

ในการเปรียบเทียบเป่าจะเลือกเป่าที่มีสัดส่วนโดยมวลของอลูมิเนียมออกไซด์ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล เนื่องจากเป่าชนิดอัดร้อนมีเพียงเป่าที่เจืออลูมิเนียมออกไซด์ 2 เปอร์เซ็นต์โดยมวล และจะสังเกตผลของตัวแปรที่มีต่อสมบัติของฟิล์มที่สภาวะการเตรียมเดียวกับหัวข้อ 1.1 - 1.2

### - อัตราการเคลือบฟิล์ม

รูปที่ 7.24 แสดงให้เห็นว่าวัสดุรองรับที่วางท่ามุม 0 และ 90 องศากับเป่าจะมีอัตราการเคลือบจะลดลง เมื่อความดันแก๊สอาร์กอนเพิ่มขึ้น ขณะที่ความดันเพิ่มสูงขึ้นอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ออกมา จะมีการชนกันระหว่างอะตอมของแก๊สมากขึ้นจึงเกิดการกระเจิงเปลี่ยนทิศทาง ทำให้ปริมาณที่ขึ้นไปจับกับวัสดุรองรับมีน้อยลง สำหรับวัสดุรองรับที่วางท่ามุม 45 องศา หากพิจารณาตามโครงสร้างในรูปที่ 5.12 ระยะของวัสดุรองรับในแนวนี้จะอยู่ใกล้กับเป่ามากที่สุด(ในแนวรัศมีจากศูนย์กลางของเป่า) ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีอัตราการเคลือบที่สูงกว่าการจัดวางในแนวอื่นและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

รูปที่ 7.25 แสดงให้เห็นว่าวัสดุรองรับที่วางทั้ง 3 แนว เมื่อมีการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าที่ให้กับระบบขณะสปัตเตอร์จะทำให้อัตราการเคลือบเพิ่มขึ้น เพราะเป็นการเพิ่มจำนวนและพลังงานของสปัตเตอร์อะตอมโดยตรง ทำให้อัตราการสปัตเตอร์เพิ่มสูงขึ้น

รูปที่ 7.26 แสดงให้เห็นว่าวัสดุรองรับที่วางทั้ง 3 แนว เมื่อมีการเพิ่มของระยะห่างระหว่างแท่นวางวัสดุรองรับกับเป่า(ระยะ d แสดงดังรูปที่ 5.12) ทำให้อัตราการเคลือบลดลง เป็นการเพิ่มโอกาสการกระเจิงเปลี่ยนทิศทางของอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ โอกาสของอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์จะไปถึงวัสดุรองรับก็จะลดลง

รูปที่ 7.5 แสดงให้เห็นว่าวัสดุรองรับที่วางทั้ง 3 แนว เมื่อเพิ่มปริมาณของแก๊สออกซิเจนในพลาสมาจะทำให้อัตราการเคลือบลดลง เพราะออกซิเจนไอออนมีอัตราการสปัตเตอร์ที่ต่ำกว่าอาร์กอนไอออน และออกซิเจนไอออนมีความสามารถที่จะจับกับอิเล็กตรอนหุติยภูมิในพลาสมาได้ดีกว่าอาร์กอนไอออน ทำให้กระบวนการไอออนไนซ์ที่เกิดขึ้นลดลงเป็นผลให้อัตราการเคลือบลดลงด้วย[46] ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนกว่าในกรณีของฟิล์มที่เตรียมจากเป่าชนิดอัดร้อน เพราะพื้นที่ของเป่าชนิดอัดร้อนมีมากกว่าจึงเห็นการลดลงของอัตราการเคลือบน้อยกว่า

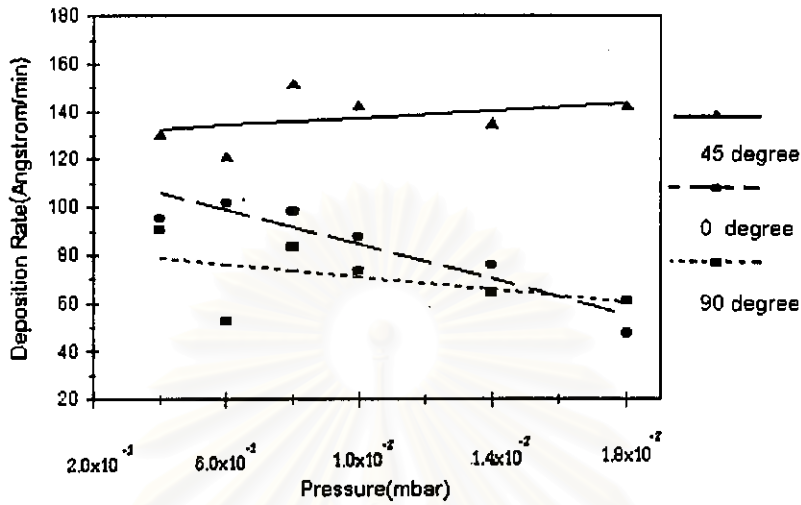


หากพิจารณาโครงสร้างตามรูปที่ 5.12 จะเห็นว่าการจัดวางวัสดุรองรับวางท่ามุม 45 องศา กับเป้า ระยะของวัสดุรองรับในแนวนี้จะอยู่ใกล้กับเป้าหมายที่สุด ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีอัตราการเคลือบที่สูงกว่าการจัดวางในแนวอื่น

อัตราการเคลือบของฟิล์มที่เตรียมจากเป้าชนิดอัดเปียกแล้วเผา จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังไฟฟ้าอาร์เอฟที่ใช้ในการสับเตอร์ เป็นสัดส่วนกลับกับความดันแก๊สอาร์กอนและระยะห่างระหว่างวัสดุรองรับกับเป้า ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 และให้ผลที่มีแนวโน้มไม่แตกต่างกับฟิล์มที่เตรียมจากเป้าชนิดอัดร้อน

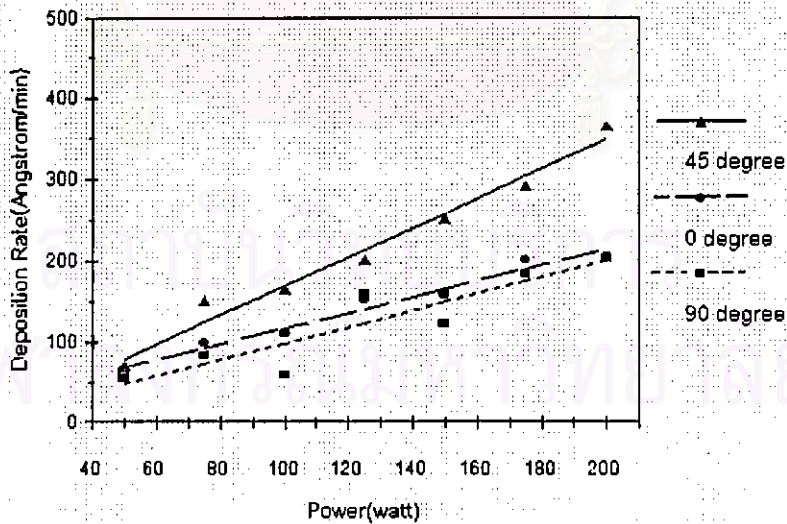


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



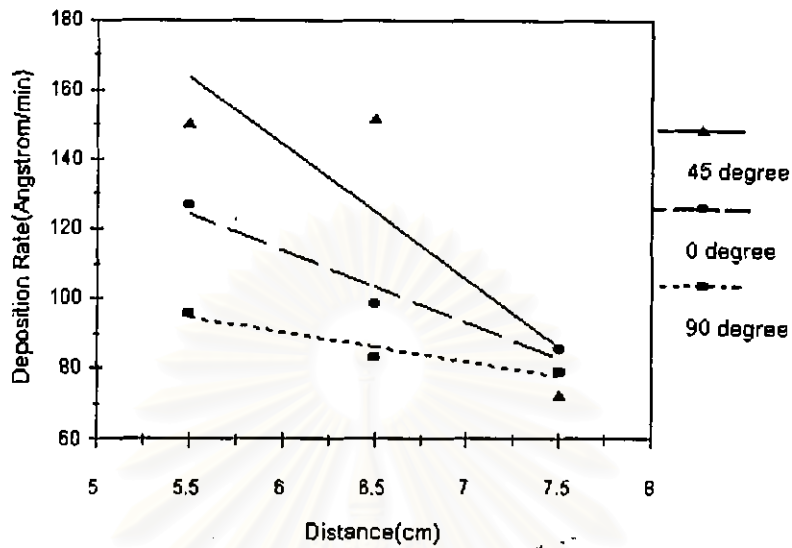
รูปที่ 7.24 อัตราการเคลือบกับความดันแก๊สอาร์กอนของฟิล์มบาง ZnO

จากเป้าชนิดอัดเปียกแล้วเผา ที่กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm

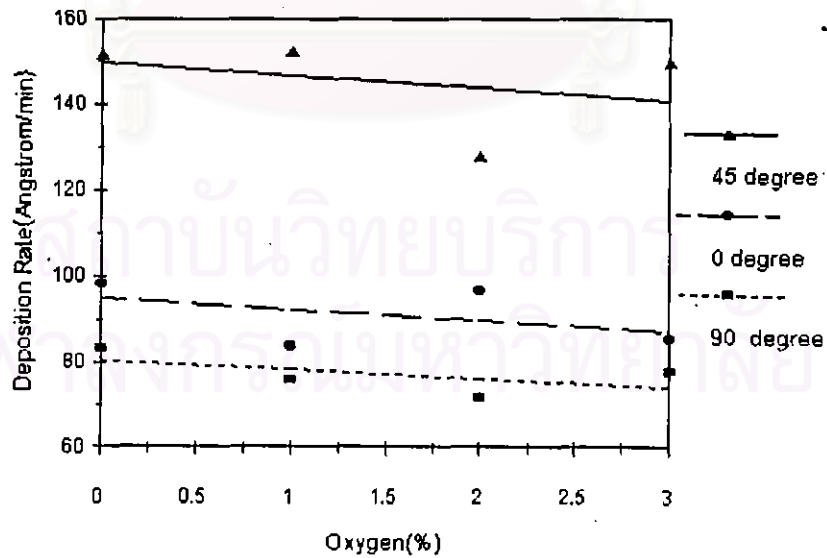


รูปที่ 7.25 อัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ระบบของฟิล์มบาง ZnO

จากเป้าชนิดอัดเปียกแล้วเผา ที่ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-1}$  mbar ระยะ 6.5 cm



รูปที่ 7.26 อัตราการเคลือบกับระยะระหว่างวัสดุรองรับกับเป้า ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าชนิดอัดเปียกแล้วเผา ที่ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt



รูปที่ 7.27 อัตราการเคลือบกับสัดส่วนแก๊สออกซิเจน ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าชนิดอัดเปียกแล้วเผา ที่ความดันแก๊สรวม  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm กำลัง 75 watt

## - สมบัติทางไฟฟ้า

อิทธิพลของความดันแก๊สอาร์กอนต่อสมบัติทางไฟฟ้า รูปที่ 7.28 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีการจัดวางวัสดุรองรับทั้ง 3 แนวมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้น เพราะความดันเพิ่มสูงที่ขึ้นจะทำให้แก๊สออกซิเจนในพลาสมามีโอกาสที่จะถูกไอออไนซ์โดยการชนกับอนุภาคอื่นๆ ภายในพลาสมาแล้วขึ้นไปจับบนฟิล์มเพิ่มสูงขึ้น กระบวนการเช่นนี้ทำให้ได้โครงสร้างผลึกของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่มีความสมบูรณ์มากขึ้น และจากรูปที่ 7.32-7.33 แสดงให้เห็นว่า สภาพต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการลดลงสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์

อิทธิพลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้สเปคเตอร์ต่อสมบัติทางไฟฟ้า รูปที่ 7.29 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีการจัดวางวัสดุรองรับท่ามุม 45 องศากับเป้า สภาพต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ให้กับระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากการจัดวางวัสดุรองรับในแนวนี้จะอยู่ใกล้เป้าหมายมากที่สุดจึงทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน เมื่อการเพิ่มกำลังไฟฟ้าเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับระบบ ทำให้แก๊สออกซิเจนในพลาสมามีโอกาสไอออไนซ์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ได้ฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ได้ฟิล์มที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงเกิดจากความหนาแน่นพาหะที่ลดลงดังที่เห็นในรูปที่ 7.34-7.35 รูปที่ 7.30 การจัดวางวัสดุรองรับท่ามุม 0 และ 90 องศากับเป้า สมบัติทางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จากรูปที่ 7.34-7.35 จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นผลมาจากการลดลงของความหนาแน่นพาหะ

อิทธิพลของระยะห่างระหว่างวัสดุรองรับกับเป้าต่อสมบัติทางไฟฟ้า รูปที่ 7.30 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีการจัดวางวัสดุรองรับทั้ง 3 แนวมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างวัสดุรองรับกับเป้าเพิ่มขึ้น เพราะที่ระยะใกล้กับเป้าจะมีโอกาสเกิดความบกพร่องของผลึกสูงเนื่องจากอัตราการเคลือบที่สูงและที่ระยะไกลโอกาสที่แก๊สออกซิเจนจะถูกไอออไนซ์มีน้อย เนื่องจากโอกาสที่จะชนกับอนุภาคอื่นๆภายในพลาสมาเพื่อให้ได้รับพลังงานพอที่จะแตกตัวขึ้นไปจับบนฟิล์มมีน้อยในระยะใกล้ ดังนั้นฟิล์มที่ได้จึงมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากที่ระยะห่างออกไปฟิล์มที่เตรียมได้มีสภาพต้านทานสูงมากทำให้ไม่สามารถวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ และความหนาแน่นพาหะได้

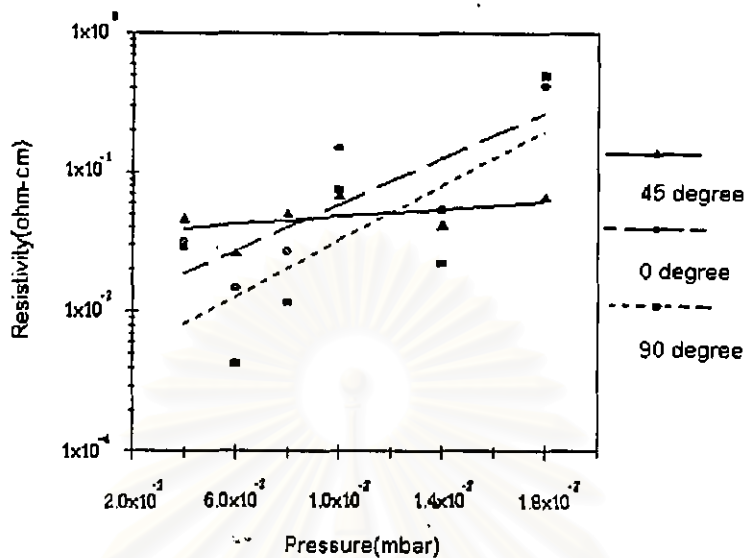
อิทธิพลของแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มสูงขึ้นในขณะสเปคเตอร์ รูปที่ 7.31 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีการจัดวางวัสดุรองรับทั้ง 3 แนวมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อป้อนแก๊สออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้นในขณะสเปคเตอร์แก๊สออกซิเจนที่ป้อนให้กับระบบ จะแตกตัวเข้าไปเติมในส่วนของอะตอมของออกซิเจนที่ขาดหายไปบนโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ที่จะทำให้ฟิล์มเกิดผลึกที่สมบูรณ์มากขึ้น ฟิล์มที่ได้จึงมีสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สูงมากทำให้ไม่สามารถวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และความหนาแน่นพาหะของฟิล์มได้

อิทธิพลของแนวการจัดวางวัสดุรองรับ จะเห็นว่าวัสดุรองรับที่วางทำมุม 90 องศา กับ เป้าจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าการจัดวางในแนวอื่น . เพราะการจัดวางในแนวนั้นฟิล์มมีโอกาสเกิดความบกพร่องของผลึกภายในฟิล์มสูงกว่าการจัดวางในแนวอื่น อะตอมของออกซิเจนที่มีความสามารถจับกับ อิเล็กตรอนหุติยภูมิได้ดีกว่าอนุภาคอื่นๆในพลาสติก[46]จะถูกดึงเข้าหาแทนวางวัสดุรองรับที่เป็นเสมือน ขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับเป้า ทำให้โอกาสที่จะขึ้นไปจับบนแทนวางวัสดุรองรับที่วางทำมุมกับเป้า 90 องศา น้อยกว่าในแนวอื่น

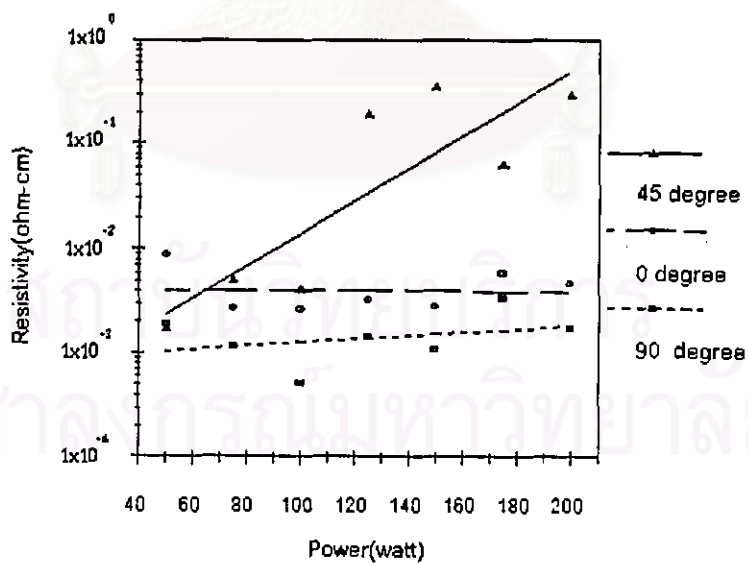
จากข้อมูลเบื้องต้นจะเห็นว่าสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมได้มีลักษณะไปในแนวทาง เดียวกับฟิล์มที่เตรียมจากเป้าชนิดอัตร้อน แต่ข้อมูลมีการกระจายมากกว่าเป็นเพราะเป้าที่เตรียมได้มี ขนาดเล็กกว่า



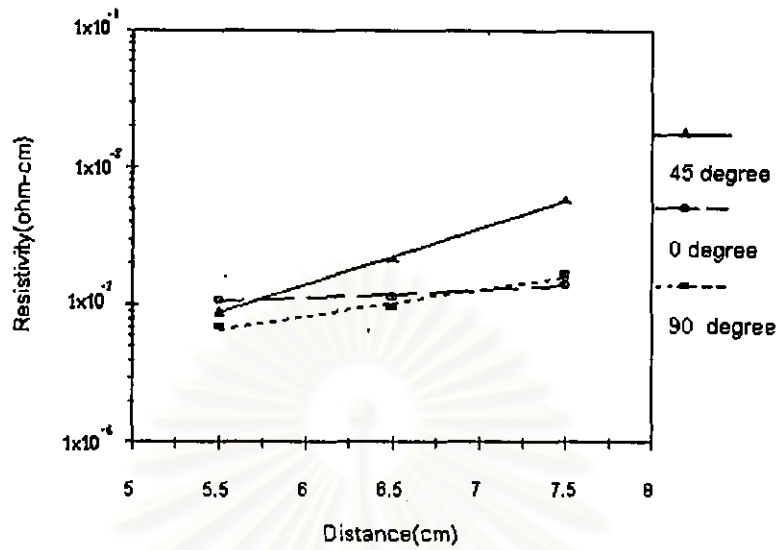
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.28 สภาพต้านทานไฟฟ้ากับความดันแก๊สอาร์กอน ของฟิล์มบาง ZnO จากเม้าอัดเปียกแล้วเผา กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm

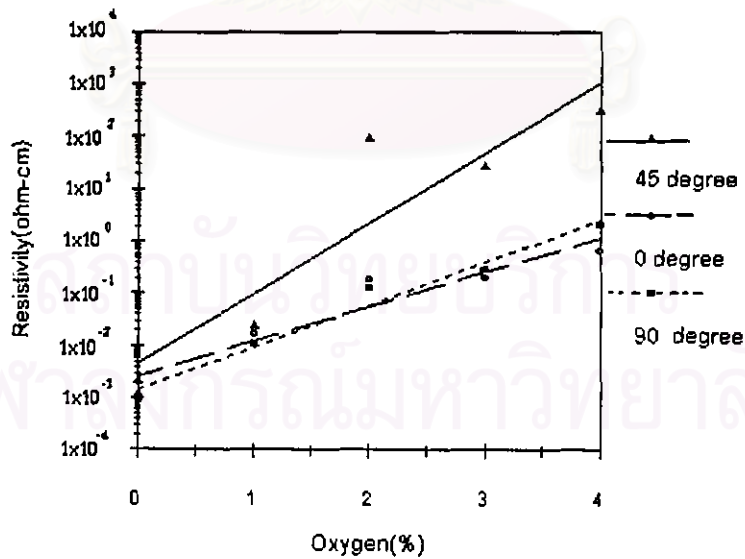


รูปที่ 7.29 สภาพต้านทานไฟฟ้ากับกำลังไฟที่ใช้สเป็คเตอร์ ของฟิล์มบาง ZnO จากเม้าอัดเปียกแล้วเผา ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^3$  mbar ระยะ 6.5 cm



รูปที่ 7.30 สภาพต้านทานไฟฟ้าและระยะแทนวางวัสดุรองรับกับเป้า ของฟิล์มบาง ZnO

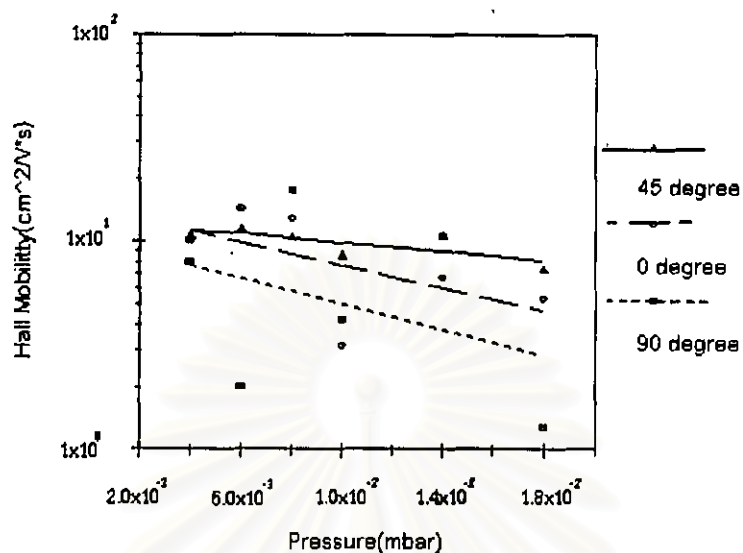
จากเป้าอัดเบียดแล้วเผา กำลัง 75 watt ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar



รูปที่ 7.31 สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัดส่วนของแก๊สออกซิเจน ของฟิล์มบาง ZnO

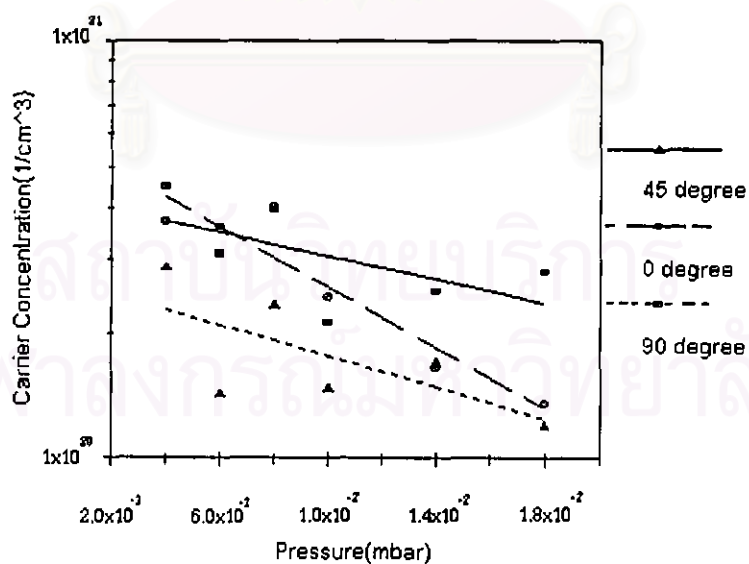
จากเป้าอัดเบียดแล้วเผา กำลัง 75 watt ความดันแก๊สรวม  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm





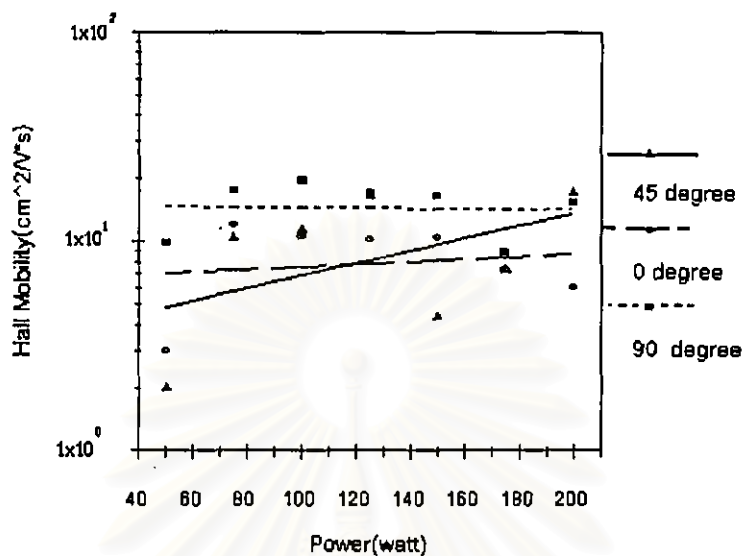
รูปที่ 7.32 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์กับความดันแก๊สอาร์กอน ของฟิล์มบาง ZnO

จากเป้าอัดเบี่ยงแล้วเผา กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm



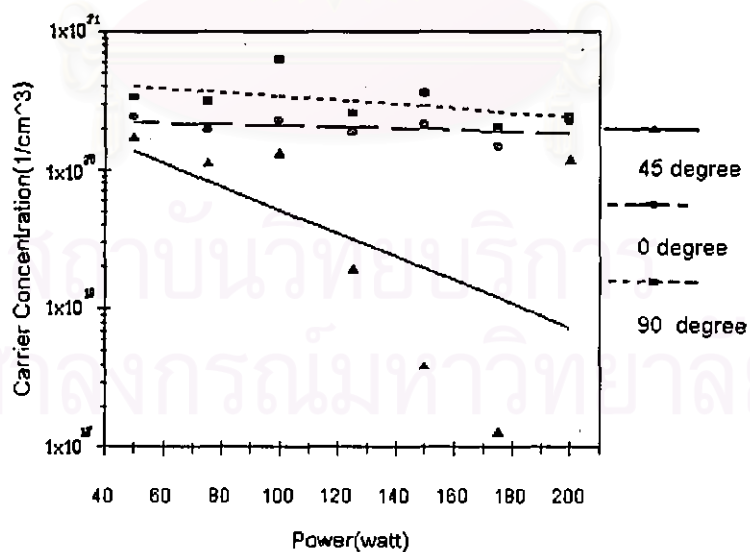
รูปที่ 7.33 ความหนาแน่นพาหะกับความดันแก๊สอาร์กอน ของฟิล์มบาง ZnO

จากเป้าอัดเบี่ยงแล้วเผา กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm



รูปที่ 7.34 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์กับกำลังไฟที่ใช้สเปคเตอร์ ของฟิล์มบาง ZnO

จากเป้าอัดเบี่ยงแล้วเผา ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm



รูปที่ 7.35 ความหนาแน่นพาหะกับกำลังไฟที่ใช้สเปคเตอร์ ของฟิล์มบาง ZnO

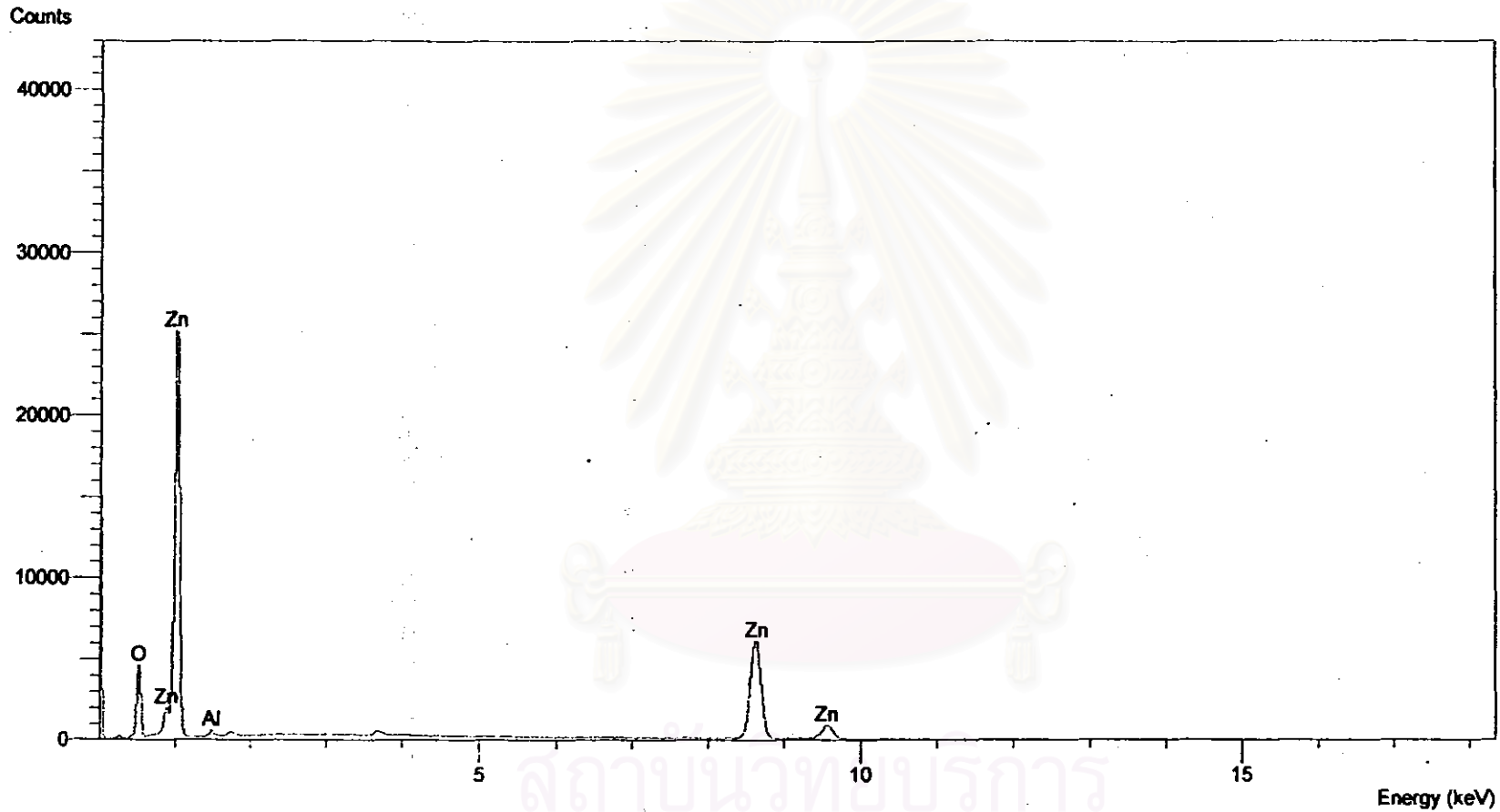
จากเป้าอัดเบี่ยงแล้วเผา ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm

- การตรวจสอบสภาพพื้นผิว เมื่อนำฟิล์มที่ได้จากการสเปกเตอร์มาตรวจสอบสภาพพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 7.36 พบว่าฟิล์มประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กจำนวนมาก แต่ไม่พบเกรนที่มีขนาดโตกว่า  $1\mu\text{m}$  ซึ่งจะเห็นว่าสภาพพื้นผิวมีลักษณะเช่นเดียวกับฟิล์มที่เตรียมจากเป้าชนิดอัตร้อนในรูปที่ 7.15 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDX แสดงดังรูปที่ 7.37 เพื่อดูความบริสุทธิ์ของฟิล์มที่เตรียมได้พบเพียง Zn , O และ Al ไม่พบธาตุอื่นนอกจากนี้

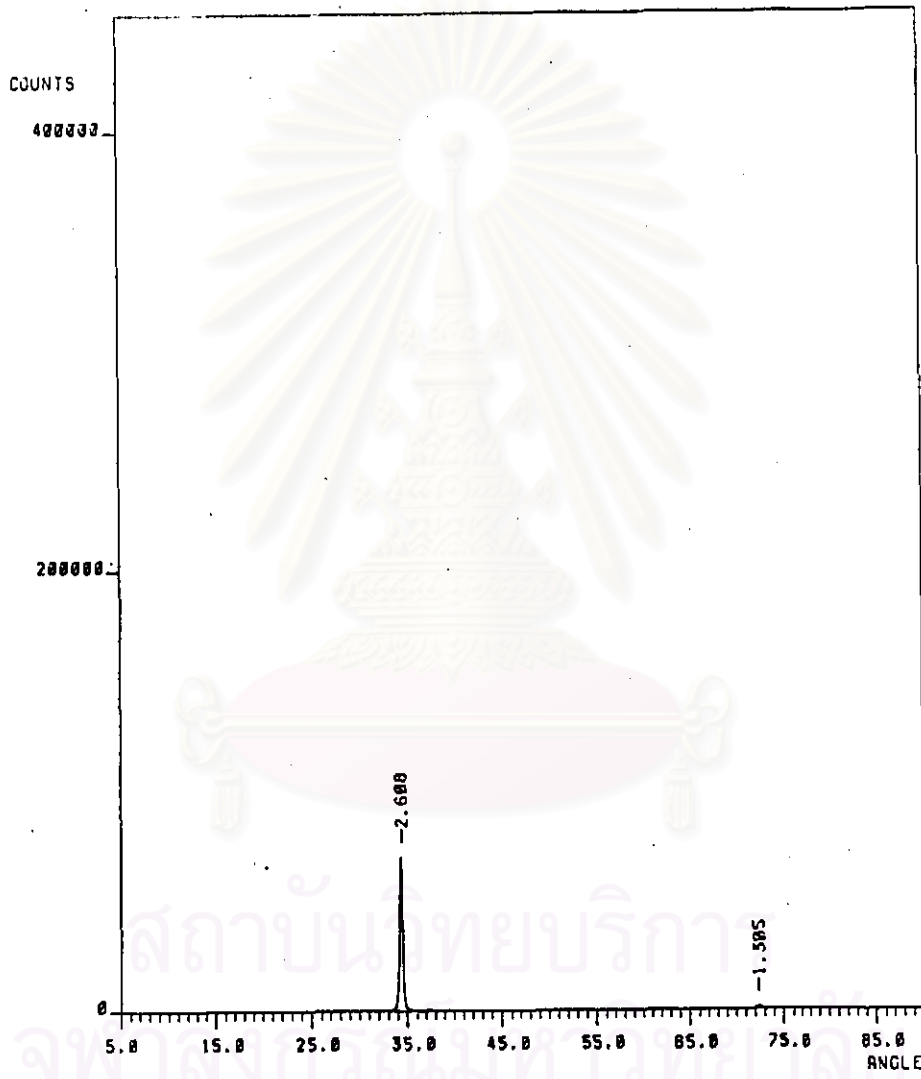


รูปที่ 7.36 การวิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มบาง ZnO ด้วย SEM จากเป้าอัดเบี่ยงแล้วเผา ที่ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm

- โครงสร้างผลึกของฟิล์ม ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างของฟิล์มซึ่งค้อออกไซด์ที่มีการจัดวางวัสดุรองรับทั้งสามแบบ ให้ผลเช่นเดียวกับฟิล์มที่เตรียมจากเป้าชนิดอัตร้อน คือ มีแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่พบมีเพียง 2 ระนาบคือ (002) และ (004) ที่มุมเลี้ยวเบน ( $2\theta$ ) 34.3 และ 72.2 องศา ตามลำดับ ดังรูปที่ 7.38 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เตรียมได้ มีแกน c ตั้งฉากกับระนาบวัสดุรองรับ ค่าคงที่ผลึกที่ได้คือ  $c = 5.216-5.228 \text{ \AA}$



รูปที่ 7.37 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของฟิล์มบาง ZnO เตรียมจากเป้าอัดเปียกแล้วเผา  
ที่ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm

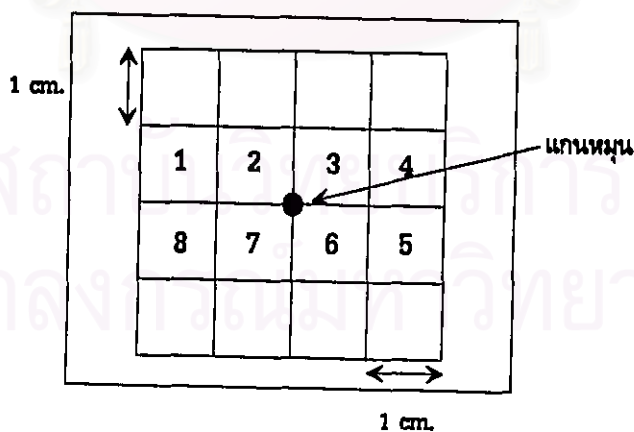


รูปที่ 7.38 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดเปียกแล้วเผา ที่ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm

### 3) การเตรียมฟิล์มให้มีพื้นที่กว้างมากขึ้น

เนื่องจากแหล่งกำเนิดการสปีดเตอร์ที่มีขนาดเล็กฟิล์มที่เตรียมได้จะมีความสม่ำเสมอในพื้นที่เล็กๆ จึงได้มีการศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอในพื้นที่ที่กว้างมากขึ้น ในการเตรียมฟิล์มให้มีพื้นที่กว้างมากขึ้นจะมีการศึกษาเฉพาะกรณีเป้าชนิดอัตร้อน เพราะเป้าชนิดอัตร้อนแล้วแม้ยังต้องมีการปรับปรุงในส่วนขั้นตอนการเตรียมให้มีขนาดพอเหมาะกับแหล่งกำเนิดการสปีดเตอร์ที่มีอยู่ ในการทดลองเคลือบฟิล์มลงบนวัสดุรองรับขนาดพื้นที่  $4.85 \times 5.85$  ตารางเซนติเมตร จะทำเฉพาะแนวทามุม  $90^\circ$  องศาด้วยเป้า ที่สภาวะการเตรียมที่เหมาะสม คือ ที่ความดันแก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลังไฟฟ้าอาร์เอฟ 75 วัตต์ ให้มีการหมุนวัสดุรองรับตามโครงสร้างในรูปที่ 5.14 เพื่อเพิ่มพื้นที่ของฟิล์ม โดยทดลองเตรียม 3 ครั้ง ผลเบื้องต้นพบว่าฟิล์มมีการก่อตัวสมมาตรรอบแกนหมุนมากกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นการวิเคราะห์สมบัติจะกระทำที่ตำแหน่งต่างๆบนฟิล์ม ดังที่แสดงในรูป 7.39 พบว่า

- อัตราการเคลือบเฉลี่ยที่ตำแหน่ง 1,4,5,8 และ 2,3,6,7 เป็น  $11 \pm 1.2$  และ  $21.6 \pm 1.85$  อังสตรอมต่อนาที ตามลำดับ



รูปที่ 7.39 การระบุตำแหน่งบนวัสดุรองรับขนาด  $4.85 \times 5.85$  ตารางเซนติเมตร

ตำแหน่งที่ (บนฟิล์ม)	อัตราการเคลือบ( $\text{\AA}/\text{min}$ )		
	เตรียมครั้งที่ 1	เตรียมครั้งที่ 2	เตรียมครั้งที่ 3
1	$1.06 \times 10^{*1}$	$1.34 \times 10^{*1}$	$1.10 \times 10^{*1}$
2	$1.90 \times 10^{*1}$	$2.27 \times 10^{*1}$	$2.25 \times 10^{*1}$
3	$2.31 \times 10^{*1}$	$2.53 \times 10^{*1}$	$1.97 \times 10^{*1}$
4	$1.08 \times 10^{*1}$	$1.17 \times 10^{*1}$	$1.17 \times 10^{*1}$
5	$1.01 \times 10^{*1}$	$1.07 \times 10^{*1}$	$1.01 \times 10^{*1}$
6	$2.21 \times 10^{*1}$	$2.33 \times 10^{*1}$	$2.04 \times 10^{*1}$
7	$2.13 \times 10^{*1}$	$2.04 \times 10^{*1}$	$1.98 \times 10^{*1}$
8	9.54	$1.26 \times 10^{*1}$	9.31

ตารางที่ 7.6 อัตราการเคลือบของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัตร้อน พื้นที่ผิวรองรับ  $4.85 \times 5.85 \text{ cm}^2$

ที่ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm

- ค่าเฉลี่ยของสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ตำแหน่ง 1,4,5,8, และ 2,3,6,7 คือ  $(2.09 \pm 0.42) \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$  และ  $(2.94 \pm 0.39) \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$
- ค่าเฉลี่ยของสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ที่ตำแหน่ง 1,4,5,8, และ 2,3,6,7 คือ  $6.68 \pm 0.45 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  และ  $8.3 \pm 0.4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
- ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นพาหะที่ตำแหน่ง 1,4,5,8, และ 2,3,6,7 คือ  $(4.5 \pm 0.66) \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  และ  $(2.61 \pm 0.31) \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

สมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้มีการก่อตัวรอบแกนหมุนที่ตำแหน่ง 1,4,5,8, หนากว่าที่ตำแหน่ง 2,3,6,7 อันเกิดจากรอยตัดของหน้ากาก ที่แสดงในรูปที่ 5.14 สมบัติทางไฟฟ้าที่ได้มีความแตกต่างกันน้อยมาก ในการเตรียมอาจต้องมีการปรับปรุงในส่วนของหน้ากาก ซึ่งจะได้มีการศึกษาการเตรียม แบบนี้ต่อไป



ตำแหน่งที่ (บนฟิล์ม)	สภาพต้านทานไฟฟ้า( $\Omega$ -cm)		
	เตรียมครั้งที่	เตรียมครั้งที่	เตรียมครั้งที่
	1	2	3
1	$1.95 \times 10^{-3}$	$3.04 \times 10^{-3}$	$1.97 \times 10^{-3}$
2	$2.86 \times 10^{-3}$	$3.51 \times 10^{-3}$	$2.53 \times 10^{-3}$
3	$3.17 \times 10^{-3}$	$3.74 \times 10^{-3}$	$2.39 \times 10^{-3}$
4	$2.24 \times 10^{-3}$	$2.48 \times 10^{-3}$	$1.52 \times 10^{-3}$
5	$2.10 \times 10^{-3}$	$2.07 \times 10^{-3}$	$1.60 \times 10^{-3}$
6	$3.07 \times 10^{-3}$	$3.16 \times 10^{-3}$	$2.52 \times 10^{-3}$
7	$2.85 \times 10^{-3}$	$2.87 \times 10^{-3}$	$2.60 \times 10^{-3}$
8	$1.79 \times 10^{-3}$	$2.57 \times 10^{-3}$	$1.76 \times 10^{-3}$

ตารางที่ 7.7 สภาพต้านทานไฟฟ้า ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัตร้อน พื้นที่วัสดุรองรับ  $4.85 \times 5.85 \text{ cm}^2$

ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  กำลัง 75 watt และระยะ 6.5 cm



ตำแหน่งที่ (บนฟิล์ม)	สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )			ความหนาแน่นพาหะ( $\text{cm}^{-3}$ )		
	เตรียมครั้งที่	เตรียมครั้งที่	เตรียมครั้งที่	เตรียมครั้งที่	เตรียมครั้งที่	เตรียมครั้งที่
	1	2	3	1	2	3
1	6.58	6.25	7.25	$4.87 \times 10^{20}$	$3.29 \times 10^{20}$	$4.37 \times 10^{20}$
2	7.94	8	8.36	$3.11 \times 10^{20}$	$2.22 \times 10^{20}$	$2.61 \times 10^{20}$
3	7.83	8.45	8.72	$2.52 \times 10^{20}$	$1.98 \times 10^{20}$	$3.00 \times 10^{20}$
4	7.66	6.38	6.97	$4.38 \times 10^{20}$	$3.61 \times 10^{20}$	$5.35 \times 10^{20}$
5	6.72	7.14	7.57	$4.42 \times 10^{20}$	$4.22 \times 10^{20}$	$5.16 \times 10^{20}$
6	7.71	8.52	8.53	$2.64 \times 10^{20}$	$2.31 \times 10^{20}$	$2.91 \times 10^{20}$
7	8.43	8.46	8.61	$2.60 \times 10^{20}$	$2.58 \times 10^{20}$	$2.79 \times 10^{20}$
8	6.95	6.3	6.62	$5.04 \times 10^{20}$	$3.87 \times 10^{20}$	$5.38 \times 10^{20}$

ตารางที่ 7.8 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ และความหนาแน่นพาหะ ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดร้อน  
พื้นที่วัสดุรองรับ  $4.85 \times 5.85 \text{ cm}^2$  ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  กำลัง 75 watt และระยะ 6.5 cm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย