

บทที่ 5

สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง

เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม ด้วยวิธี อาร์เอฟ สปีดเตอริง คือ กำลังการสปีดเตอริง 300 วัตต์ เวลา 60 นาที ในบรรยากาศอาร์กอน 40-50 มิลลิทอร์ ใช้ความดันสุญญากาศ ต่ำกว่า 5×10^{-6} ทอร์ ลงบนแผ่นรองรับทองแดง กระจกควอทซ์ และ แผ่นอะลูมินา ซึ่งผลการวิเคราะห์โครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมสามารถสรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

1. ลักษณะและขนาดของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม

จากการวิเคราะห์ขนาด และรูปร่างของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมด้วยภาพถ่าย SEM พบว่าบนแผ่นรองรับทองแดงปรากฏทั้งด้านหน้าแผ่นรองรับและด้านหลังแผ่นรองรับ โดยด้านหน้าแผ่นรองรับมีขนาด 30-100 นาโนเมตร ส่วนด้านหลังแผ่นรองรับนั้นมีขนาด 10-100 นาโนเมตร และมีความยาวอยู่ในระดับไมโครเมตร และมีความหนาของสารซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นรองรับทองแดงประมาณ 5 ไมโครเมตร

ตาราง 5.1 แสดงตารางการเปรียบเทียบขนาดและรูปร่างของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยสารต่าง ๆ กับผลงานวิจัยของคณะทำงานอื่นๆ

ผู้วิจัย (ปีที่ตีพิมพ์)	สารเจือ	รูปแบบ	ขนาดของสารที่สังเคราะห์	
			ขนาด	ความยาว
งานวิจัยนี้	ZnO:Al	nanostructures	10-100 nm	ไมโครเมตร
Zhou S.M. (2004) ⁽²⁰⁾	ZnO:Sc	nanowires	40 nm	ไมโครเมตร
Shen G. (2004) ⁽²¹⁾	ZnO:S	nanowires	80 nm	ไมโครเมตร
Rahm A. (2005) ⁽²²⁾	ZnO:Al	nanosheet	20-80 nm	ไมโครเมตร

จากการค้นคว้า ผลปรากฏว่ายังไม่มี การสังเคราะห์โครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมด้วยวิธี อาร์เอฟ สปีดเตอริง ทั้งนี้จะเป็นเพราะว่าการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนด้วย

วิธี อาร์ เอฟ สปีดเตอริงเป็นวิธีที่เตรียมยาก การสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะเป็นวิธีออกซิเดชันเนื่องจากเป็นวิธีที่เตรียมได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบขนาดและรูปแบบของสารเชิงซ้อนออกไซด์ที่เจือด้วยสารต่างๆ ที่สังเคราะห์ได้กับผลงานวิจัยของผู้อื่น พบว่ามีรูปแบบและขนาดแตกต่างกัน โดยผลของ Zhou S.M. (2004)⁽²⁰⁾ เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เจือด้วย Sc มีการเพิ่มก๊าซออกซิเจนเข้าไปในระบบและมีการให้ความร้อนกับแผ่นรองรับ ต่อมาเป็นผลของ Shen G. (2004)⁽²¹⁾ เจือด้วยกำมะถัน (Sulfur) มีการเพิ่มก๊าซอาร์กอนเข้าไปในระบบและมีการให้ความร้อนกับแผ่นรองรับ และสุดท้าย Rahm A. (2005)⁽²²⁾ เจือด้วยอะลูมิเนียม แต่กระบวนการที่สังเคราะห์มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากือ ทอง และมีการให้ความร้อนให้กับแผ่นรองรับ

ในงานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ด้วยวิธี อาร์เอฟ สปีดเตอริง โดยใช้ก๊าซอาร์กอน ไม่มีการให้ความร้อนกับแผ่นรองรับ และไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ก็สามารถสังเคราะห์โครงสร้างนาโนเชิงซ้อนออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมได้ และผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ นอกจากนั้นเมื่อเปลี่ยนแผ่นรองรับเป็นกระจกควอทซ์ และแผ่นอะลูมินา สารเชิงซ้อนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะรูปร่างแตกต่างไปจากแผ่นรองรับทองแดง แต่ก็มีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่เล็กน้อยปนกันโดยเส้นที่มีความหนาใหญ่สุดประมาณ 200 นาโนเมตร

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้เน้นการวิเคราะห์โครงสร้างนาโนเชิงซ้อนออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมที่อยู่บนแผ่นรองรับทองแดงและกระจกควอทซ์ โดยที่คณะผู้วิจัยมีสมมุติฐานว่า สารที่สังเคราะห์ได้บนแผ่นรองรับที่ต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย SEM น่าจะมีโครงสร้างและสมบัติที่เหมือนกัน หรือกล่าวได้ว่าผลกระทบจากแผ่นรองรับมีน้อยมากในการเตรียมโครงสร้างนาโนเชิงซ้อนออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมด้วยวิธี อาร์เอฟ สปีดเตอริง

2. วิเคราะห์โครงสร้างด้วย TEM

โครงสร้างที่สังเคราะห์ได้บนแผ่นรองรับทองแดงเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วย TEM ผลปรากฏว่ามีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอล โดยมีทิศการโตอยู่ 2 แบบคือ $[11\bar{2}0]$ และ $[0001]$ เมื่อสังเกตจาก SEM ปรากฏว่าโครงสร้างที่ได้มี 2 ลักษณะ และตั้งฉากกันทำให้ได้ทิศการโตเป็น 2 แบบ เมื่อเทียบกับผลการวิจัยของคณะอื่น โดย จากการสังเคราะห์ของ Zhou S.M. (2004)⁽²⁰⁾ และ Shen G. (2004)⁽²¹⁾ มีทิศการโตในทิศ $[0001]$ และสุดท้ายการสังเคราะห์ของ Rahm A. (2005)⁽²²⁾ มีทิศการโตในทิศ $[0002]$ สังเกตว่าการ โตของเชิงซ้อนออกไซด์ส่วนใหญ่เป็นแบบ $[0001]$

3. องค์ประกอบของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย EDS ผลปรากฏว่าองค์ประกอบของธาตุสังกะสี และ ออกซิเจน อยู่ในอัตราส่วนโดยเฉลี่ยแล้วเท่ากับ 49.79:50.21 หรือประมาณ 1:1 แต่ไม่พบธาตุ อะลูมิเนียมทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะว่าธาตุอะลูมิเนียมที่เติมเข้าไปมีปริมาณน้อยมาก โดยเมื่อวิเคราะห์ ด้วย EDS ซึ่งมีความละเอียดน้อยทำให้ไม่พบ ดังนั้นต้องวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่นเพื่อพิสูจน์ว่ามีอะตอม ของธาตุอะลูมิเนียมเข้าไปแทนที่ในอะตอมของสังกะสี

4. การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า

เมื่อนำโครงสร้างนาโนของสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม มาวิเคราะห์สมบัติทาง ไฟฟ้า ผลปรากฏว่าสารที่เตรียมได้มีสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนไปจากเดิม โดยค่าสภาพต้านทานที่ อุณหภูมิห้องมีค่า $1.69 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าสาร ZnO ที่ยังไม่ได้เติมสารเจือที่มีค่า $1 \Omega \cdot \text{cm}$ แสดงว่ามีอะตอมของธาตุอะลูมิเนียมเข้าไปแทนที่ในอะตอมของสังกะสี (Zn) ทำให้ค่า สภาพต้านทานมีค่าลดลงจากเดิม ค่าสภาพต้านทานที่เตรียมได้อาจจะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น เนื่องจากถ้านำไปประยุกต์ใช้ค่าสภาพต้านทานควรจะอยู่ในระดับ $10^{-3} - 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ อย่างไรก็ตาม เมื่อนำมาคำนวณหาค่า Sheet resistance แล้วปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ $56 \Omega / \text{Square}$ ซึ่งต่ำกว่า $100 \Omega / \text{Square}$ ถือว่าเป็นค่าที่ต่ำสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้

ตาราง 5.2 แสดงตารางการเปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้าของสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม กับผลงานวิจัยของคณะทำงานอื่นๆ

ผู้วิจัย (ปีที่ตีพิมพ์)	ค่าโมบิลิตี ($\text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$)	ค่าสภาพต้านทาน ($\Omega \cdot \text{cm}$)	ค่าความหนาแน่น ของพาหะ (cm^{-3})
งานวิจัยนี้	3	1.69×10^{-2}	1.23×10^{20}
Oh B.Y. (2005) ⁽⁵⁸⁾	4.64	6×10^{-3}	2.3×10^{20}
Lee H.W. (2004) ⁽¹⁰⁾	7.6	1×10^{-3}	8.22×10^{20}
Zhaochun Z. (2001) ⁽⁵⁹⁾	5.7	6.72×10^{-3}	1.63×10^{20}

นอกจากนี้จากผลการวัดฮอลล์ ปรากฏว่าได้ค่าความต่างศักย์ฮอลล์เป็นเครื่องหมายลบ แสดงว่าสารตัวอย่างที่ได้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) มีค่าความหนาแน่นของพาหะ $1.23 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ และค่าโมบิลิตี $3 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น่าสนใจที่จะนำไปประยุกต์ใช้ เมื่อนำไปเทียบกับงานของคณะวิจัยอื่นที่เป็นฟิล์มบางโดย Oh B.Y. (2005)⁽⁵⁸⁾ เตรียมฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอร์ริง ได้ค่าสภาพต้านทาน $6 \times 10^{-3} \Omega\cdot\text{cm}$ และค่าความหนาแน่นพาหะเป็น $2.3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ สารที่เตรียมได้มีคุณภาพดีสามารถนำไปทำเป็น TCO เนื่องจากมีสภาพต้านทานต่ำ และค่าความหนาแน่นของพาหะสูง ส่วนงานวิจัยของ Lee H.W. (2004)⁽¹⁰⁾ เป็นการเตรียมฟิล์มบางของสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม ได้ค่าสภาพต้านทาน $1 \times 10^{-3} \Omega\cdot\text{cm}$ และค่าความหนาแน่นพาหะเป็น $8.22 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ และสุดท้าย Zhaochun Z. (2001)⁽⁵⁹⁾ เตรียมฟิล์มบางของสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม ได้ค่าสภาพต้านทาน $6.72 \times 10^{-3} \Omega\cdot\text{cm}$ และค่าความหนาแน่นพาหะเป็น $1.63 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

5. การวิเคราะห์สมบัติทางแสง

จากผลการวัดสมบัติทางแสงปรากฏว่า สารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมนั้นปรากฏ E_2 (high)- E_2 (low) ที่ตำแหน่ง 336 cm^{-1} , $A_1(\text{TO})$ ที่ 380 cm^{-1} , $E_1(\text{TO})$ ที่ 412 cm^{-1} , E_2 (high) ที่ 412 cm^{-1} และ $E_1(\text{LO})$ ที่ 583 cm^{-1} นอกจากนี้สารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมยังปรากฏเส้นสเปกตรัมที่ตำแหน่ง 280 cm^{-1} และ 514 cm^{-1} โดยสองตำแหน่งนี้แสดงถึง Defect ที่เกิดจากสิ่งเจือปนเข้าไป⁽⁵⁷⁾ ดังแสดงในตารางที่ 5.3 แสดงว่ามีอะตอมของอะลูมิเนียมเข้าไปอยู่ในสาร ZnO ทำให้ปรากฏฟีกที่ว่านี้ เมื่อพิจารณาฟีกที่ตำแหน่ง E_2 (high) จะสังเกตว่าในกรณีของสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมจะเกิดการ Shift ไปในค่าที่มากกว่าคือ 442 cm^{-1} แสดงว่ามีสมบัติทางแสงที่น่าสนใจในย่านความถี่ที่เรียกว่า Blue shift นอกจากนี้ถ้าวิเคราะห์ต่อถึงฟีกที่ตำแหน่ง 583 cm^{-1} หรือ $E_1(\text{LO})$ โหมด โดยโหมดนี้จะแสดงถึง Oxygen vacancy หรือ Oxygen deficiency รวมถึงยังเกี่ยวข้องกับขนาดของสารที่สังเคราะห์ได้ ถ้าขนาดเล็กลงฟีกตรงตำแหน่งนี้จะเด่นจากเดิม⁽⁵⁵⁾ ดังนั้นจากการวิเคราะห์ รามานสเปกโตรสโคปี ทำให้ทราบเกี่ยวกับสารเจือที่เติมลงไป นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ถึงสมบัติทางแสงที่น่าสนใจหลังจากเติมสารเจือแล้วทำให้เกิดการ Shift ของโหมดการสั่นอีกด้วย

ตาราง 5.3 แสดงตารางการเปรียบเทียบจาก รามานสเปกโตรสโคปี ของสารซิงค์ออกไซด์ที่เดิม
สารเจือ กับผลงานวิจัยของคณะทำงานอื่นๆ

Symmetry	งานวิจัยนี้	อ้างอิง ⁽⁶⁰⁾	อ้างอิง ⁽⁶¹⁾	อ้างอิง ⁽⁶²⁾
B_1	280	276	275	277
$E_2(\text{High})-E_2(\text{Low})$	336	331	331	331
$A_1(\text{TO})$	380	383	382	382
$E_1(\text{TO})$	412	410	414	414
$E_2(\text{High})$	442	438	439	439
-	514	516	510	511
$A_1(\text{LO})$	-	-	-	-
$E_1(\text{LO})$	583	584	582	584

5.2 ข้อเสนอแนะ และงานที่สามารถทำต่อไป

5.2.1 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทดลอง

1. เนื่องจากเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม ในขณะนี้มีเพียงเงื่อนไขเดียว ตามวิธีการทดลองในบทที่ 3 ซึ่งเมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขในการสปีดเตอริงไปจากเดิม จะทำให้สารที่สังเคราะห์ได้ไม่เป็นนาโน ก็จะเป็นฟิล์มเคลือบอยู่บนแผ่นรองรับเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องศึกษาเงื่อนไขของการสปีดเตอริงให้ละเอียดกว่าเดิม คือ เงื่อนไขความร้อนที่เกิดขึ้นกับแผ่นรองรับซึ่งเกิดขึ้นในระบบของการสปีดเตอริง เนื่องจากการชนของอะตอมหรือไอออน ซึ่งควบคุมยังไม่ได้ในขณะนี้

2. เนื่องจากการเติมสารเจืออะลูมิเนียมในงานวิจัยนี้ใช้เงื่อนไขเดียวคือ 1% โดยโมล ดังนั้นถ้ามีการเติมสารเจือหลาย ๆ เปอร์เซ็นต์ เพื่อวิเคราะห์หาสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุด

3. ถ้าเป็นไปได้ควรนำโครงสร้างเพียงโครงสร้างเดียวมาวัดสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นพาหะต่อมิติและความหนาแน่นสถานะ

4. การติดคอนแทกส์เพื่อวัดสมบัติทางไฟฟ้าควรใช้ทอง เพราะว่าการใช้ Silver paint เวลาเพิ่มอุณหภูมิอาจจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้ค่าที่วัดได้ผิดจากค่าจริง

นอกจากนี้ข้อเสนอแนะอื่นๆ ในการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม สำหรับผู้ที่สนใจศึกษามีรายละเอียดดังนี้

5.2.2 งานที่สามารถทดลองและวิเคราะห์ผลต่อไป

1. เนื่องจากโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมถูกสังเคราะห์ลงบนแผ่นรองรับทองแดง โดยปกติแล้วพื้นผิวของแผ่นรองรับทองแดงจะสัมผัสกับก๊าซออกซิเจนทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางของทองแดงออกไซด์ (Copper Oxide) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type oxide semiconductor) ดังนั้นเมื่อสังเคราะห์สารซิงค์ออกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type oxide semiconductor) ลงบนฟิล์มบางของทองแดงออกไซด์ ทำให้เกิดรอยต่อ p-n เป็น CuO/ZnO:Al nanostructures heterojunction ซึ่งในปัจจุบันรอยต่อ p-n มีประโยชน์อย่างมาก

นอกจากนั้นสารที่สังเคราะห์ลงบนแผ่นซิลิกอน p-type ก็จะมีสมบัตินำไฟฟ้า PIN (p-type /Insulator /n-type) ซึ่งชั้น Insulator มาจากการออกซิเดชันของซิลิกอนที่พื้นผิว โดยที่ปัจจุบันก็มีการใช้ PIN device กันอย่างแพร่หลาย

2. เนื่องจากสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมมีสภาพต้านทานต่ำ และมีความหนาแน่นของพาหะสูง ดังนั้นถ้าเตรียมโครงสร้างในระดับนาโนได้และมีลักษณะเป็นฟิล์มบางสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็น TCO เพื่อใช้ใน Solar cell ได้

3. สารซิงค์ออกไซด์มีสมบัติทางแสงที่น่าสนใจ ถ้ามีการเติมสารเจือชนิดต่างๆ ลงไปจากนั้นศึกษาการสั่นของแลตทิซจากรามานสเปกโตรสโคปี ทำให้ทราบถึงการปล่อยแสงในย่านความยาวคลื่นต่างๆ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ปล่อย

4. สารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมมีสมบัติที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซที่เรียกว่า ก๊าซเซนเซอร์ เช่น ตรวจจับไอน้ำเพื่อนำไปทำเป็นเซนเซอร์ตรวจจับความชื้น ตรวจจับก๊าซไนตริกออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซพิษ⁽⁶³⁾