



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นจากอนุภาคนาโนและ
วัสดุประกอบโดยเทคนิคการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

Fabrication of novel humidity sensor based on nanoparticles and
composite materials by electrostatic spray deposition

นางสาวทศิยาภรณ์ ทิววงศ์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นจากอนุภาคนาโนและ
วัสดุประกอบโดยเทคนิคการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

Fabrication of novel humidity sensor based on nanoparticles and
composite materials by electrostatic spray deposition

นางสาวทศติยาภรณ์ ทิววงศ์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ การประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นจากอนุภาคนาโนและวัสดุประกอบโดยเทคนิคการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

แหล่งเงิน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ 2555 **จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน** 370,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี **ตั้งแต่** 1 ตุลาคม 2554 **ถึง** 30 กันยายน 2555

หัวหน้าโครงการ นางสาวศุภิยาภรณ์ ทิววงศ์ คณะ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นจากฟิล์มบางของอนุภาคนาโนเงินและ อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยจะเตรียมด้วยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ฟิล์มบางถูกเตรียมขึ้นบนฐานรองรับที่เป็นกระจกเพื่อศึกษาเงื่อนไขในการปลูกฟิล์ม โดยเงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มบาง ได้แก่ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับ เวลาในการเตรียมฟิล์มบางและความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า ตามลำดับ ทำการตรวจสอบวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีระบบยูวี-วิสิเบิลจากการปลูกฟิล์มพบว่าสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางของอนุภาคนาโนเงินที่เตรียมได้มีสมบัติความเป็นผลึกบนระนาบ (100), (200), (311) และ (222) มียอดของการเลี้ยวเบนที่มุม $2\theta = 38.2, 44.3, 64.4$ และ 77.4 องศา สำหรับฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จะมีโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะแบบเฮกซะโกนอลมียอดการเลี้ยวเบนที่มุม $2\theta = 31.8, 34.5, 36.3, 47.6$ และ 56.7 องศาซึ่งตรงกับระนาบเลี้ยวเบนที่ (100), (002), (101), (102) และ (110) ตามลำดับ เมื่อนำฟิล์มที่ได้ไปสร้างเป็นอุปกรณ์ เซนเซอร์วัดความชื้นสร้างขึ้นโดยการเตรียมฟิล์มบางบนขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิต จากการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของเซนเซอร์ความชื้นที่สร้างจากฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ค่าความชื้น 93%RH มีค่าความต้านทานเชิงซ้อนเท่ากับ 10.3 กิโลโอห์ม สภาพความไว $1.84 \times 10^5 \text{ Ohm/\%RH}$ และมีค่าฮิสเทอรีซิสอยู่ที่ 8 %RH เวลาในการดูดซับและคายความชื้นเท่ากับ 4 และ 2 วินาที ตามลำดับ สำหรับเซนเซอร์ความชื้นที่สร้างจากฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่าค่าเป็นเชิงเส้นระหว่างค่าความชื้นและค่าความต้านทานเชิงซ้อนมีค่าที่ดี

คำสำคัญ : การปลูกฟิล์มบางโดยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต, ฟิล์มบางอนุภาคนาโน, สิ่งประดิษฐ์ตรวจวัดความชื้น

Research Title: Fabrication of novel humidity sensor based on nanoparticles and composite materials
by electrostatic spray deposition

Researcher: Miss Thutiyaporn Thiwawong

Faculty College of Nanotechnology

Abstract

This research is a study of preparation of silver nanoparticles, zinc oxide nanoparticles thin films by electrostatic spray deposition (ESD) for humidity sensor application. The nanoparticles thin films were deposited on glass substrate to investigate the thin films growth conditions such as distance between nozzle and substrate, deposition time, and electrostatic field. The crystal structures of sample films, their surface morphology, and optical properties have been investigated by X-Ray diffraction (XRD), Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), atomic force microscope (AFM) and UV-VIS spectrophotometer (UV-VIS), respectively. Silver nanoparticles thin films were founded in the orientation of (100), (200), (311) and (222) plane cubic structure at diffraction angle $2\theta = 38.2^\circ$, 44.3° , 64.4° and 77.4° . In case of zinc oxide nanoparticles thin films, the crystalline properties were founded at at diffraction angle $2\theta = 38.2^\circ$, 44.3° , 64.4° and 77.4° that corresponding to the orientation of (100), (200), (311) and (222) plane with cubic structure. For the silver nanoparticles humidity sensor were fabricated on to interdigitated electrodes. The characteristic sensor showed that a sensor has impedance $10.3 \text{ k}\Omega$ at relative humidity sensor of 93%RH sensitivity of $1.84 \times 10^5 \text{ Ohm/\%RH}$, and hysteresis of 8 %RH. Humidity adsorption and desorption time are 4 and 2 seconds, respectively. With zinc oxide nanoparticles, humidity shows highly linear sensitivity behavior between the relative humidity and the complex impedance.

keywords : Electrostatic spray deposition(ESD), nanoparticle thin films, Humidity sensor

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งเงินงบประมาณแผ่นดิน/เงินรายได้ ที่ให้แหล่งเงินทุนในการทำงานวิจัยและอำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ที่เป็นส่วนสำคัญในการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง และคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และสถานที่ในการทำงานวิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ในการสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณบทความวิจัย หนังสือที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งเอกสารอ้างอิงต่างๆ ที่ใช้สำหรับศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับงานวิจัย เพื่อความเข้าใจและไขข้อสงสัย

ศุภชัย ภิรมย์
เบญจพล ต้นอู่

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
1.5 รายละเอียดของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 แนวคิด ทฤษฎีหลักตามประเด็นให้ครอบคลุมเรื่องที่วิจัย.....	4
2.1 อนุภาคนาโนเงิน (Silver nanoparticle).....	4
2.2 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์(Zinc Oxide Nanoparticle).....	12
2.2 ระบบเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	15
2.3 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์ม.....	30
2.4 เซนเซอร์ความชื้น (Humidity Sensor).....	41
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทบทวนวรรณกรรม.....	54
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 การเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	59
3.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ (Glass Substrate).....	61
3.3 การเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน.....	62
3.4 การเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	64

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.5 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบาง.....	64
3.6 การประดิษฐ์เซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดความชื้น.....	68
3.7 การตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้น.....	69
3.7 การสร้างต้นแบบอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น.....	72
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน.....	74
4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	94
4.3 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้นอนุภาคนาโนเงิน.....	96
4.4 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้น อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	112
4.5 ผลการทดสอบเครื่องต้นแบบการตรวจวัดความชื้น.....	115
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	117
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง	118
ประวัติผู้เขียน	122
ภาคผนวก	130
(ก) การยื่นจดสิทธิบัตร.....	131
(ข) การประชุมวิชาการ.....	135
(ค) การตีพิมพ์วารสารระดับชาติ.....	139
(ง) การตีพิมพ์วารสารระดับนานาชาติ.....	144
(จ) ชุดอุปกรณ์เครื่องต้นแบบระบบวัดความชื้น.....	147

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอนุภาคนาโนเงินที่ใช้ในการทดลอง.....	7
2.2 สมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ (ZnO).....	13
2.3 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของ ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีต่างๆ กันเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรทางโครงสร้างผลึก14	
2.4 การแบ่งประเภทของเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบาง.....	16
2.5 สารละลายที่ใช้ในการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต แล้วทำให้เกิดการแตกตัวแบบ jet.....	23
2.6 ค่าของความยาวคลื่น, พลังงาน และชนิดของการ excitation.....	41
2.7 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของหลักการวัดความขึ้นแบบต่างๆ.....	43
2.8 ค่าความขึ้นของสารละลายเกลืออิมิตัวที่อุณหภูมิต่างๆ.....	46
2.9 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซนเซอร์ตรวจวัดความขึ้นประเภทฟิล์มบาง.....	57
3.1 เงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง.....	63
3.2 เงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง.....	64
3.3 เงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มอนุภาคนาโนเงินบนขั้วไฟฟ้า.....	69
3.4 เงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มอนุภาคนาโนเงินบนขั้วไฟฟ้า.....	69
4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระยะในการพ่นตั้งแต่ 0 – 150 มิลลิเมตร โดยใช้ระดับแรงดันเท่ากับ -11 กิโลโวลต์.....	76
4.2 อัตราส่วนระหว่างแนวตั้งฉากกับแนวราบของเส้นผ่านศูนย์กลางวงสเปร์ย์ที่ระยะในการพ่น ตั้งแต่ 10 – 150 มิลลิเมตร โดยใช้ระดับแรงดันเท่ากับ -11 กิโลโวลต์.....	78
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของฟิล์มที่ระยะต่างๆ กับค่าความขรุขระ ของพื้นผิวฟิล์ม.....	83
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของฟิล์มที่ระยะต่างๆ กับ ค่าความขรุขระ ของพื้นผิวฟิล์ม.....	87
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มต่างๆ กับ ค่าความขรุขระ ของพื้นผิวฟิล์ม.....	91
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มต่างๆ กับค่าความหนาของชั้นฟิล์ม อนุภาคนาโน.....	98
4.7 คุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความขึ้น.....	103
4.8 คุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความขึ้น.....	104

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

2.1 รูปแบบการเลี้ยงเบนริงส์อิเล็กซ์ของอนุภาคนาโนเงิน	
(a) ตัวอย่างที่วัดหลังจากทำการเตรียมสารเสร็จ (b) ตัวอย่างที่วัดหลังจากผ่าน 16 เดือน	6
2.2 ภาพถ่ายแสดงขนาดอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้โดยมีขนาดประมาณ 20 นาโนเมตร	6
2.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเงินที่ปริมาณอัตราส่วนต่างๆ กัน	7
2.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดแสดงอนุภาคนาโนเงินที่เข้าไปผสมกับแคลเซียมฟอสเฟตหลังจากทำการแอลนีลที่ 500 °C	8
2.5 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli เมื่อทำการเจืออนุภาคนาโนเงินเข้าไปผสม	9
2.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดแสดงชั้นของอนุภาคนาโนเงินที่แอนนีลที่อุณหภูมิเป็น (a) 100 °C, (b) 140 °C และ (c) 180 °C	9
2.7 ความสัมพันธ์กราฟ IV ของโซล่าเซลล์	10
2.8 สเปกตรัมการเลี้ยงเบนของอนุภาคนาโนเงินที่ผสมกับโพลีเอแนลีน เมื่อขนาดของอนุภาคนาโนเงินที่ผสมเข้าไปมีขนาดต่างๆ กัน	10
2.9 การตอบสนองของความชื้นของฟิล์มบางโพลีเอแนลีนที่มีการผสมอนุภาคนาโนเงินในขนาดที่แตกต่างกัน	11
2.10 สภาพความไวในการตอบสนองของฟิล์มบางโพลีเอแนลีนที่มีการผสมอนุภาคนาโนเงินในขนาดที่แตกต่างกันที่ความชื้น 5%RH	11
2.11 แสดงลักษณะของผลซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และโครงสร้างทางผลึกของซิงค์ออกไซด์	12
2.12 โครงผลึกของซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	13
2.13 กระบวนการในการเตรียมฟิล์มบาง	15
2.14 การหยดแบบเรเลย์ (Rayleigh)	21
2.15 โหมดการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบต่างๆ	22
2.16 ลักษณะของโคน (cone shape) และลักษณะหยดละอองฝอยและลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับแรงของของเหลวที่มากกระทำ	24
2.17 ผลของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีผลต่อการแตกตัวเป็นละอองฝอย	25
2.18 การเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (a) ระบบแบบหัวเข็มธรรมดา (b) ระบบแบบหัวเข็มที่สามารถกรองได้	26
2.19 การติดตั้งระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (ESD)	28
2.20 สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต	28

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 การติดตั้งระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต(ESD) ที่เตรียมขึ้นบนฐานรองรับแผ่นอะลูมิเนียม (a) ภาพถ่ายด้านบน (b) ภาพถ่ายแนวตัดขวาง.....	29
2.22 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มซึ่งก่อเกิดไอซ์ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	29
2.23 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในผลึกตามกฎของแบรกก์.....	30
2.24 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในกรณีคลื่นแทรกสอดและเสริมกัน.....	31
2.25 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	32
2.26 โครงสร้างหลักกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกาศ.....	34
2.27 ผลจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง.....	35
2.28 คาน (Cantilever) ที่ใช้ในการวัด.....	35
2.29 แผนภาพระบบแสงที่ใช้วัดการโค้งงอของคาน.....	36
2.30 ระบบการวัดกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	36
2.31 กราฟแรงอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่ขึ้นอยู่กับระยะห่าง.....	37
2.32 ลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง.....	39
2.33 ระบบการวัดเซนเซอร์ความชื้นแบบMass flow.....	45
2.34 ระบบการวัดเซนเซอร์ความชื้นแบบจุ่มกับความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่ได้จากการผสมสารละลายเกลือจนอิ่มตัว.....	45
2.35 ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น.....	49
2.36 ความเป็นเชิงเส้นของเซนเซอร์.....	50
2.37 ช่วงการใช้งานของเซนเซอร์.....	50
2.38 ผลตอบสนองทางเวลาขาขึ้น(คายความชื้น) ของเซนเซอร์วัดความชื้น.....	51
2.39 ผลตอบสนองทางเวลาขาลง (ดูดซับความชื้น) ของเซนเซอร์วัดความชื้น.....	52
2.40 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ที่เกิดขึ้นกับเซนเซอร์.....	53
2.41 เวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์ทั้งช่วงเวลาในการดูดซับความชื้น และเวลาในการคายความชื้น.....	56
2.42 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ที่เกิดขึ้นกับเซนเซอร์ความชื้น.....	56
2.43 เสถียรภาพของเซนเซอร์ความชื้นที่วัดเป็นเวลา 70 วัน.....	56
3.1 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	58
3.2 ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	59

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง(ก) ชนิดคงที่ (ข) ชนิดปรับค่าได้.....	59
3.4 (ก) หลอดบรรจุสาร (ข) หัวเข็มสำหรับการพ่น.....	60
3.5 แผ่นโลหะนำไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง(ก) แผ่นอะลูมิเนียม(ข) แผ่นทองแดง.....	60
3.6 (ก) กล้องและเลนส์กำลังขยายสูง(ข) หน้าจอแสดงภาพถ่ายลำและละอองฝอย.....	61
3.7 ระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	61
3.8 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD), Bruker รุ่น D8 Discover with GADDS.....	65
3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดชนิด Field Emission(FE-SEM) , Hitachi รุ่น S4700.....	66
3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอม(AFM), Seiko SPA-400.....	67
3.11 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer,PG Instrument รุ่น T90+.....	68
3.12 ลักษณะข้อไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิต.....	68
3.13 ระบบการวัดการตอบสนองต่อความชื้น.....	70
3.14 ไดอะแกรมเครื่องต้นแบบสำหรับการตรวจวัดความชื้น.....	72
4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มแตกตัวเป็นละอองฝอยและแตกตัวเป็นละอองฝอย แบบสมบูรณ์ที่ระยะห่างต่างๆ.....	74
4.2 ภาพลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเงินที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็ม และฐานรองรับเท่ากับ 10 mm และปรับแรงดันไฟฟ้าเป็น 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 กิโลโวลต์....	75
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง.....	77
4.4 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะต่างกัน.....	79
4.5 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มจากเครื่องFE-SEM โดยระยะในการเตรียมฟิล์มต่างกัน (ก)-(จ) เท่ากับ 20 – 70 มิลลิเมตร.....	80
4.6 ภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมฟิล์ม20 มิลลิเมตร มีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ.40 ไมครอน.....	81
4.7 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม โดยที่ระยะห่างการเตรียมฟิล์มต่างๆ.....	82
4.8 ค่าของความขรุขระของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน.....	83
4.9 กราฟดูคลื่นของแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน.....	84
4.10 ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนน (surface plasmon resonance, SPR).....	85

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะต่างกัน.....	85
4.12 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมโดยมี ระยะการเตรียมฟิล์มฟิล์มต่างๆ กัน (a)-(g) แสดงภาพถ่ายด้านบนพื้นผิว(top view).....	86
4.13 ค่าของความขรุขระของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน.....	88
4.14 กราฟดูกลืนของแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน.....	88
4.15 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เวลาต่างๆ.....	89
4.16 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมโดย เวลาในการเตรียมฟิล์มต่างๆ กัน (a)-(f) แสดงภาพถ่ายด้านบนพื้นผิว(top view).....	90
4.17 ค่าของความขรุขระของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่โดยเวลาในการเตรียมฟิล์มต่างๆ กัน.....	91
4.18 กราฟดูกลืนของแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เวลาในการเตรียมต่างๆ กัน.....	92
4.19 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	94
4.20 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	95
4.21 สเปกตรัมการดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	95
4.23 ภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมฟิล์ม 40 มิลลิเมตร.....	97
4.24 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาพันสารเคลือบฟิล์ม 1 นาที.....	98
4.25 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาพันสารเคลือบฟิล์ม 5 นาที.....	99
4.26 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาพันสารเคลือบฟิล์ม 10 นาที.....	99
4.27 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาพันสารเคลือบฟิล์ม 10 นาที 2 ครั้ง.....	100
4.28 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาเตรียมฟิล์มต่างกัน.....	101
4.29 การตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นของเซนเซอร์.....	102
4.30 การตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นของเซนเซอร์ในช่วงเวลา 300 วินาที.....	102
4.31 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาพันสารเคลือบฟิล์มเป็นเวลาต่างๆ.....	104
4.32 การตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของวัสดุในการดูดซับและคายความชื้น.....	106
4.33 การตรวจสอบเสถียรภาพของเซนเซอร์เมื่อเวลาผ่านไป 40 วัน.....	107
4.34 ความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ในกรณีความถี่แตกต่างกัน.....	108
4.35 ความต้านทานเชิงซ้อนที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ในกรณีความถี่แตกต่างกัน.....	109
4.36 การวิเคราะห์คุณลักษณะวงจรด้วยวิธีคอมเพล็กซ์อิมพีแดนซ์(Complex Impedance).....	110
4.37 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซนเซอร์ความชื้น.....	111

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 การตอบสนองของเซนเซอร์ความชื้นจากอนุภาคนาโนเชิงค้ำออกไซด์.....	112
4.39 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้น(Impedance, Ω).....	113
4.40 การตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้น.....	114
4.41 ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์ต้นแบบ.....	115
4.40 ภาพถ่ายโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความชื้นในชุดอุปกรณ์ต้นแบบ.....	116

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และเชื้อราต่างๆ นอกจากนี้ความชื้นยังมีผลต่อราคาสินค้าเกษตรทำให้สินค้าทางเกษตรมีราคาตกต่ำ ซึ่งเกษตรกรจำเป็นต้องมีการตรวจวัดความชื้นและทำการควบคุมความชื้นให้อยู่สภาวะที่เหมาะสมซึ่งความชื้นมิได้ส่งผลต่อผลผลิตต่อการเกษตรเท่านั้น ยังส่งผลถึงในด้านอุตสาหกรรมอาหารและอื่นๆ ในชีวิตประจำวัน

สิ่งประดิษฐ์ตรวจวัดความชื้นในท้องตลาดพบเห็นในหลายรูปแบบซึ่งแตกต่างกันในเรื่องของความแม่นยำ ช่วงของการตรวจวัด จะพบว่าอุปกรณ์ในการตรวจวัดความชื้นหรือเซนเซอร์ที่ได้รับการยอมรับและเที่ยงตรงนั้นมีราคาค่อนข้างสูงซึ่งในการประดิษฐ์อุปกรณ์นั้นมีด้วยกันอย่างแพร่หลายโดยอาศัยสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุเมื่อมีความชื้นในอากาศ และในอุปกรณ์เซนเซอร์ดังกล่าวจะวัดรูปแบบของการนำไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน(Resistive humidity sensor)หรือค่าของความจุไฟฟ้า(Capacitive humidity sensor)โดยวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าจะอยู่บนขั้วไฟฟ้าและจะวัดการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณขั้วไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้ามีได้หลายรูปแบบ ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นทำจาก วัสดุประเภทพอลิเมอร์แผ่นชั้นเมมเบรน (Membrane) ทำหน้าที่ในการดูดซับ(adsorption) ซึ่งจะอยู่บนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน แต่เทคโนโลยีบนซิลิกอนดังกล่าวเป็นเทคโนโลยีที่มีการลงทุนสูง

เซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นจากอนุภาคนาโนนั้นมีความสำคัญในการพัฒนาเป็นเซนเซอร์อย่างมากเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรจากอนุภาคนาโนนั้นมีมากกว่าอนุภาคระดับไมโคร ดังนั้นแนวคิดดังกล่าวจึงมีรายงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนในการตรวจวัดความชื้นเกิดขึ้นอย่างแพร่หลาย ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความคิดที่ว่าหากสามารถเตรียมฟิล์มสำหรับตรวจวัดความชื้นโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต(Electrostatic spray deposition) ซึ่งนับว่าเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและสามารถทำได้ในบรรยากาศปกติอีกทั้งเป็นเทคโนโลยีที่ลงทุนต่ำ โดยกพ่นอนุภาคนาโนลงบนขั้วไฟฟ้าเพื่อประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นโดยอาศัยสมบัติของวัสดุนาโนที่มีสมบัติในการดูดซับไอน้ำ และเกิดการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นและทำการตรวจวัดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานหรือค่าความจุไฟฟ้าและสามารถนำเซนเซอร์ที่ได้ต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบสำหรับการตรวจวัดความชื้นภาคสนามได้ซึ่งการประดิษฐ์เซนเซอร์ด้วยกระบวนการพ่นเคลือบดังกล่าวสามารถเตรียมฟิล์มให้มีขนาดหรือพื้นที่ให้มากขึ้น(Large active area) ตามความต้องการได้ ซึ่งนับเป็นการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำอีกทั้งยังสามารถพัฒนากับการประยุกต์ใช้

งานด้านอื่นๆอีกมากมาย

จะเห็นได้ว่าปัญหาเรื่องความชื้นมีผลต่อภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น ในโรงเรือนเพาะเห็ด ตั้งแต่กระบวนการเลือกเชื้อเห็ดที่เหมาะสม การควบคุมความชื้นในโรงเรือน หรือแม้กระทั่งในเมล็ดข้าวเองโดยเมล็ดข้าวจะได้ราคาดีในกรณีที่มีความชื้นต่ำซึ่งลดความชื้นให้อยู่ในระดับต่ำหมายถึง แรงงาน ต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นจากเดิมมาคั้งนั้นการพัฒนาอุปกรณ์เซนเซอร์ในการตรวจวัดความชื้นเพื่อช่วยเหลือในงานด้านเกษตรกรรมมีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวสามารถขยายจากอุปกรณ์ตรวจวัดขนาดเล็กให้สามารถขยายไปได้ตามความเหมาะสมโดยการพัฒนาระบบให้สามารถเตรียมฟิล์มให้มีขนาดหรือพื้นที่มากขึ้น ซึ่งนับเป็นการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 พัฒนาระบบการเตรียมฟิล์มโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตและสามารถพัฒนาให้สามารถเตรียมฟิล์มสำหรับการใช้งานในระดับใหญ่(Large Area)
- 1.2.2 เพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นจากอนุภาคนาโน
- 1.2.3 เพื่อการวิจัยและพัฒนาสิ่งประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนซึ่งนำไปสู่การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

- 1.3.1 สามารถพัฒนาระบบการเตรียมฟิล์มโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับการเตรียมฟิล์มอนุภาคนาโน
- 1.3.2 สามารถประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นจากอนุภาคนาโนและวัสดุประกอบ
- 1.3.3 สามารถสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับการวัดความชื้นในงานด้านเกษตรกรรม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 มีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับระบบและวิธีการเตรียมโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic spray deposition:ESD)
- 1.4.2 มีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับสมบัติของอนุภาคนาโนเงิน ที่นำมาใช้ในเตรียมฟิล์มโดยกระบวนการ ESD
- 1.4.3 มีความรู้และความเข้าใจ สมบัติเฉพาะทางโครงสร้างผลึก สมบัติทางพื้นผิว และสมบัติทางแสง ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน รวมทั้งสามารถวัดและวิเคราะห์ผล

การทดลองด้วยวิธีการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Field emission scanning electron microscope: FE-SEM), กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) และระบบวัดทางแสง (UV-Vis Spectroscopy) ตามลำดับ

1.4.4 สามารถนำฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดความชื้น

1.5 รายละเอียดของงานวิจัย

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะประกอบไปด้วย ทฤษฎีของอนุภาคนาโนเงิน ซึ่งคือออกไซด์ ทฤษฎีการเตรียมฟิล์มบางโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต และสุดท้าย คือ การกล่าวถึงทฤษฎีของเซนเซอร์วัดความชื้น ซึ่งเป็นปลายทางของงานวิจัยนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการทดลองต่างๆ ของงานวิจัย ตั้งแต่กระบวนการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต รวมถึงการตรวจสอบฟิล์มบางอนุภาคนาโนด้วยเครื่องมือการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางและท้ายสุดจะเป็นการกล่าวถึงกระบวนการประดิษฐ์เซนเซอร์ความชื้น การสร้างต้นแบบอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด ตั้งแต่กระบวนการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ผลของการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางอนุภาคนาโน และผลของการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้น

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดรวมถึงข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้ จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของอนุภาคนาโน ปัจจัยที่ทำให้อนุภาคหรืออุปกรณ์ในระดับนาโนเมตรมีสมบัติใหม่ที่ต่างไปจากอนุภาคเดิมที่มีขนาดใหญ่ สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางพื้นผิวและสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนเงิน และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

นอกจากนี้ ในบทนี้ ยังกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของเทคโนโลยีการเตรียมฟิล์มบาง รวมทั้งระบบการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโน โดยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบดังกล่าวในการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน จากนั้นจะกล่าวถึงหลักการเครื่องมือวิเคราะห์ฟิล์มบาง สุดท้าย จะกล่าวถึงหลักการของเซนเซอร์และเซนเซอร์ความชื้น สมบัติสำคัญต่างๆ ของเซนเซอร์ทั่วไป และเซนเซอร์วัดความชื้นตามลำดับ

2.1 แนวคิด ทฤษฎีหลักตามประเด็นให้ครอบคลุมเรื่องที่วิจัย

2.1.1 อนุภาคนาโนเงิน (silver nanoparticle)

2.1.1.1 อนุภาคนาโน (nanoparticles)

อนุภาคนาโน (nanoparticles) อนุภาคนาโนของสารหนึ่งๆเมื่อถูกออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 100 นาโนเมตร จะทำให้เกิดคุณสมบัติใหม่ๆหรือเพิ่มระดับความสามารถจากเดิม อย่างเช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซึ่งสามารถมองทะลุผ่านได้ ถ้าอยู่ในระดับนาโนเมตรแต่ยังคงมีคุณสมบัติในการดูดซึมและสะท้อนแสงแดดได้อยู่จึงถูกนำมาใช้ทำครีมกันแดด หรือสารเคมีอื่นๆ ในระดับอนุภาคนาโนสามารถนำมาทำสีทาบ้านหรือสีเคลือบรถยนต์รวมถึงเป็นส่วนประกอบในเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม สินค้าเครื่องสำอางที่ประกอบไปด้วยอนุภาคนาโนที่สามารถแทรกซึมเข้าไปในชั้นผิวหนังได้ลึกมากขึ้นก็ถูกนำมาใช้ทำครีมเพื่อต่อต้านริ้วรอย เช่น ผลิตภัณฑ์บางชนิด ใช้เทคนิคในการบรรจุวิตามินไว้แคปซูลขนาดเล็กมากที่ทำหน้าที่เป็นเหมือนฟองน้ำเก็บกักครีมไว้และจะปล่อยออกมาเมื่อชั้นแคปซูลภายนอกละลายภายใต้ผิวหนัง

นอกจากการประดิษฐ์อนุภาคนาโนขึ้นจากสารเคมีเดิมที่มีอยู่แล้ว ยังมีการประกอบอนุภาคนาโนเข้ากับสิ่งอื่นๆอย่างเช่น การสร้างวัสดุนาโนผสมเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม การพัฒนาฟิล์มพลาสติกนาโนคอมโพสิตที่มีความสามารถในการสกัดกั้นการผ่านของก๊าซบางชนิดและไอน้ำ เพื่อใช้ทำบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุความสดของผักและผลไม้และเพิ่มมูลค่าการส่งออก การผลิตบรรจุภัณฑ์หรือเครื่องมือทางการแพทย์เพื่อใช้ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ไวรัส หรือทำให้ไม่เปื้อนน้ำ เป็นต้น

2.1.1.2 อนุภาคนาโนโลหะ (metal nanoparticle)

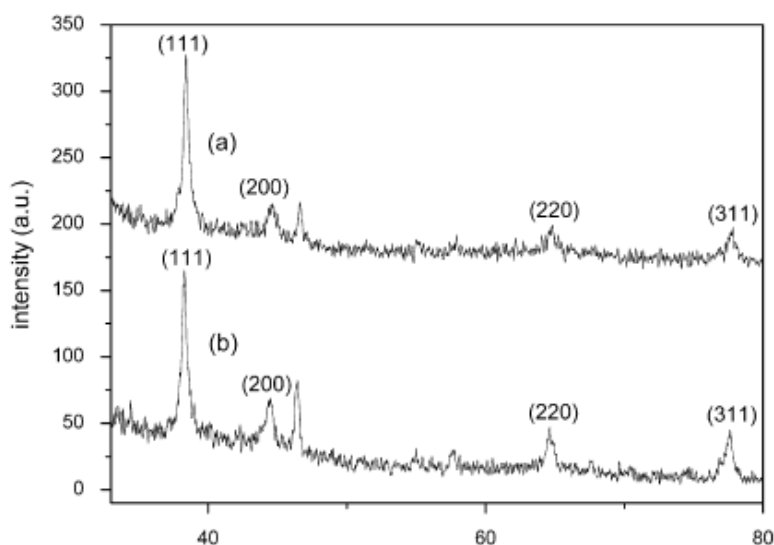
อนุภาคนาโนโลหะ เช่น อนุภาคนาโนทองและอนุภาคนาโนเงิน สมบัติซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนโลหะ คือ ปรากฏการณ์เซอ์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance, SPR) โดยอนุภาคนาโนโลหะส่วนใหญ่ จะมีความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในช่วงใกล้รังสียูวี โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวของอนุภาคนาโนโลหะ ทำให้เกิดการสั่นแบบพลาสมอน

2.1.1.3 สมบัติอนุภาคนาโนเงิน

อนุภาคนาโนเงินเป็นอนุภาคที่จัดอยู่ในกลุ่มอนุภาคนาโนโลหะ อนุภาคนาโนเงินปัจจุบันได้รับความนิยมในการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมาก เนื่องจากอนุภาคนาโนเงินมีคุณสมบัติหลาย ๆ ประการที่น่าสนใจ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น ในทางการแพทย์ สามารถนำไปใช้สำหรับฆ่าเชื้อและผลิตเครื่องมือสำหรับการผ่าตัด[12,13] ทางอุตสาหกรรมใช้อนุภาคนาโนเงินเป็นสารเร่งปฏิกิริยา[14] นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำอนุภาคนาโนเงินไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์[15] และในทางการเกษตรได้อีกด้วย[16] ตัวอย่างที่ชัดเจนอีกตัวอย่างหนึ่ง คือ เสื้อนาโน ซึ่งเสื้อนาโนมีสมบัติของอนุภาคนาโนเงินในระดับนาโนเข้าไปแทรกซึมในเส้นใยของผ้า ทำให้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย ทำให้แบคทีเรียตายลง ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นสมบัติพิเศษของอนุภาคนาโนเงิน

2.1.1.3.1 สมบัติทางโครงสร้างของอนุภาคนาโนเงิน

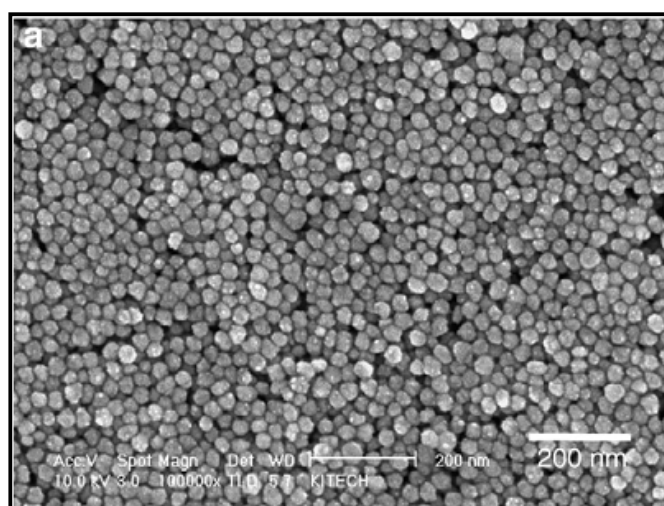
จากรายงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษาถึงโครงสร้างอนุภาคนาโนเงิน จะพบว่ามีโครงสร้างที่สำคัญ คือ โครงสร้างเป็นแบบคิวบิก (Cubic structure) Yusheng Liu และคณะ[19] ได้ทำการวิจัยในเรื่องของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินขนาด 6-30 นาโนเมตร ด้วยเทคนิค gamma radiation อนุภาคนาโนเงินที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก เฟซเซนเตอร์ บนระนาบ (111), (200), (220) และ (311) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนเงิน (a) ตัวอย่างที่วัดหลังจากทำการเตรียมสารเสร็จ (b) ตัวอย่างที่วัดหลังจากผ่าน 16 เดือน

2.1.1.3.2 สมบัติทางพื้นผิวของอนุภาคนาโนเงิน

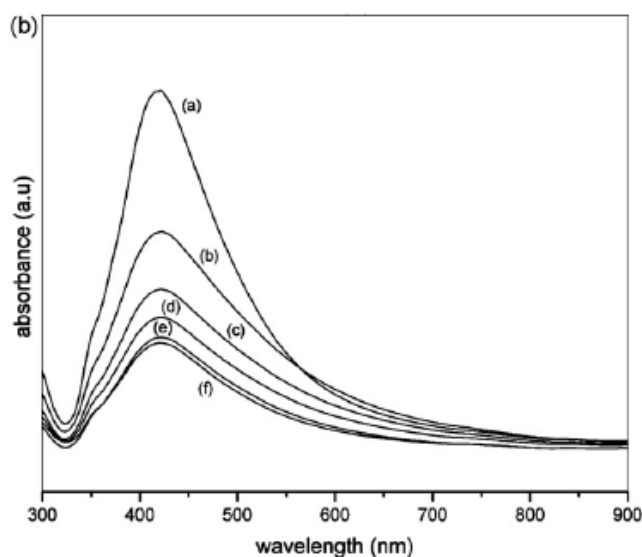
และจากรายงานการวิจัยของ Dongjo Kim และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาถึงการเตรียมฟิล์มบางออร์แกนิกทรานซิสเตอร์ โดยใช้อนุภาคนาโนเงินทำเป็นขั้วด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์อิงค์เจ็ท โดยในการทดลองพบว่า น้ำหมึกอนุภาคนาโนเงินที่นำมาผ่านกระบวนการสังเคราะห์มีขนาดอนุภาค 20 นาโนเมตร ดังรูปที่ 2.2 และนอกจากนี้ ยังพบว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินให้มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 20 – 100 นาโนเมตร ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์สาร



รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายแสดงขนาดอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้โดยมีขนาดประมาณ 20 นาโนเมตร

2.1.1.3.3 สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนเงิน

และจากรายงานการวิจัยของ S.L. Smitha และคณะ[21] ได้ทำการศึกษาถึงการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance) และปรากฏการณ์โฟโวลูมิเนสเซนส์ของอนุภาคนาโนเงิน โดยในการทดลองพบว่าสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนเงินจะมีช่วงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 300-600 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเงินที่ปริมาณอัตราส่วนของโพแทสเซียมคลอไรด์ต่างๆ กัน

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอนุภาคนาโนเงินที่ใช้ในการทดลอง[22]

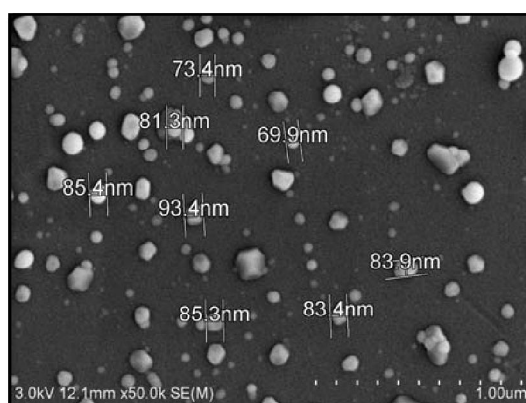
สมบัติของสาร	Silver, dispersion, nanoparticles, <100 nm particle size (TEM), 10 wt. % in ethylene glycol
สถานะ	ของเหลวกระจายตัว (Liquid dispersion)
มวลโมเลกุล	107.87
ลักษณะของสี	น้ำตาลแกมเท
ขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ย	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 นาโนเมตร
จุดเดือด	198 °C ที่ 1.013 hPa

ตารางที่ 2.1(ต่อ) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอนุภาคนาโนเงินที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติของสาร	Silver, dispersion, nanoparticles, <100 nm particle size (TEM), 10 wt. % in ethylene glycol
จุดหลอมเหลว	-13 °C
ความดันไอ	0.05 hPa ที่ 20 °C
Specific Gravity	1.0 – 1.3

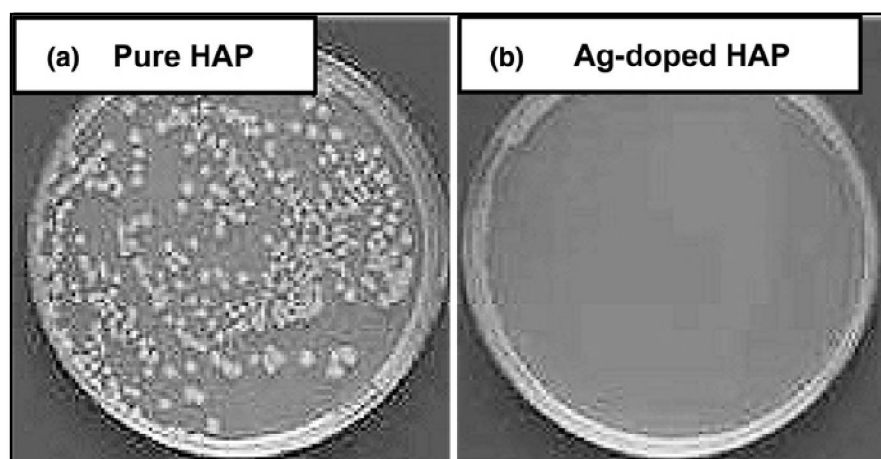
2.1.1.4 การประยุกต์ใช้งานอนุภาคนาโนเงิน

จากการศึกษาสมบัติของอนุภาคนาโนมาข้างต้น พบว่าอนุภาคนาโนมีสมบัติที่เป็นประโยชน์อย่างมากมาย ช่วยทำให้โครงสร้างมีสมบัติที่พิเศษขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทั้งในงานวิจัย และอุตสาหกรรมได้ ตัวอย่างของอนุภาคนาโนที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบันคือ อนุภาคนาโนเงิน เนื่องจากอนุภาคนาโนดังกล่าวมีคุณสมบัติหลายๆ ประการที่น่าสนใจ ซึ่งได้มีรายงานการวิจัยในการนำอนุภาคนาโนเงินไปประยุกต์ใช้ดังต่อไปนี้



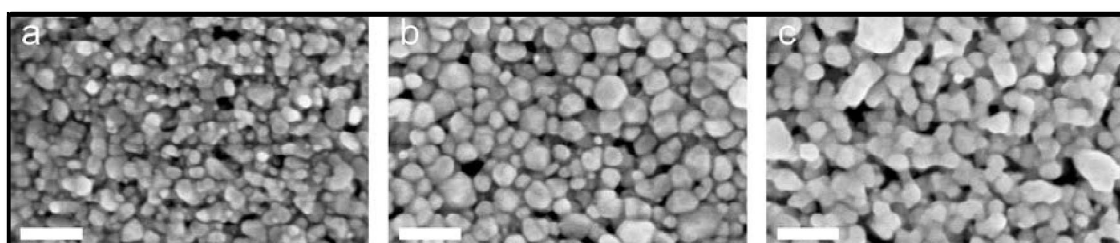
รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดแสดงอนุภาคนาโนเงินที่เข้าไปผสมกับแคลเซียมฟอสเฟตหลังจากทำการแอลนีลที่ 100 °C

จากรายงานวิจัยของ Kyu-Seog Hwang และคณะ[23] ได้ที่ทำการศึกษถึงการใช้อนุภาคนาโนเงินเจือเข้าไปผสมกับแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมจากกระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต เพื่อใช้ในการต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* (E.coli) ซึ่งพบว่าอนุภาคนาโนเงินมีส่วนช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย ดังรูปที่ 2.4 - 2.5

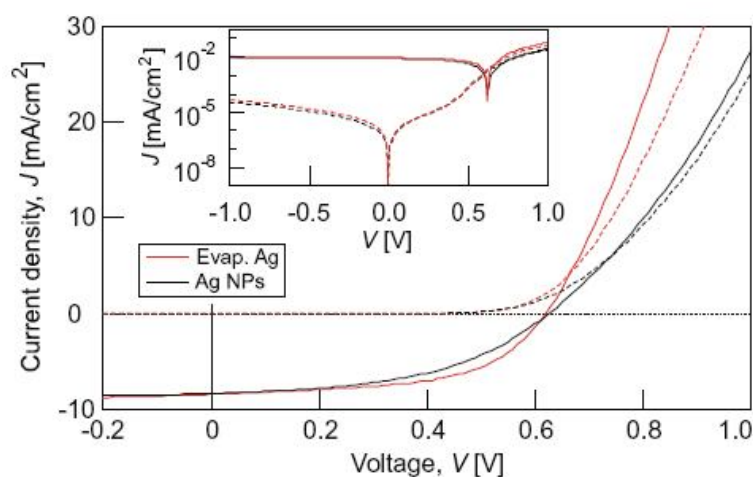


รูปที่ 2.5 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* จากการเจือปนอนุภาคนาโนเงิน

ในงานวิจัยของ Claudio Girotto และคณะ[24] ได้ทำการศึกษาถึงการนำอนุภาคนาโนเงินแบบสารละลายพ่นสเปรย์ลงบนขั้วโซลาร์เซลล์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับโซลาร์เซลล์ โดยในงานวิจัยได้พบว่าเมื่อทำการเคลือบอนุภาคนาโนเงินเข้าไปเป็นขั้วด้านบนของโซลาร์เซลล์แล้วจะทำให้ค่า Power conversion efficiency (PCE) ของโซลาร์เซลล์มีค่าเท่ากับ 2.5% เมื่อเทียบกับกระบวนการระเหยเงินแบบปกติซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.9% แต่กระบวนการใช้อนุภาคนาโนเงินแบบสารละลายพ่นลงบนขั้วทำได้ง่ายกว่า ไม่ซับซ้อน และราคาไม่แพง ซึ่งถือว่าการนำอนุภาคนาโนเงินแบบสารละลายพ่นลงบนขั้วโซลาร์เซลล์ จะทำให้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ได้ดีขึ้น ดังรูปที่ 2.6 – 2.7

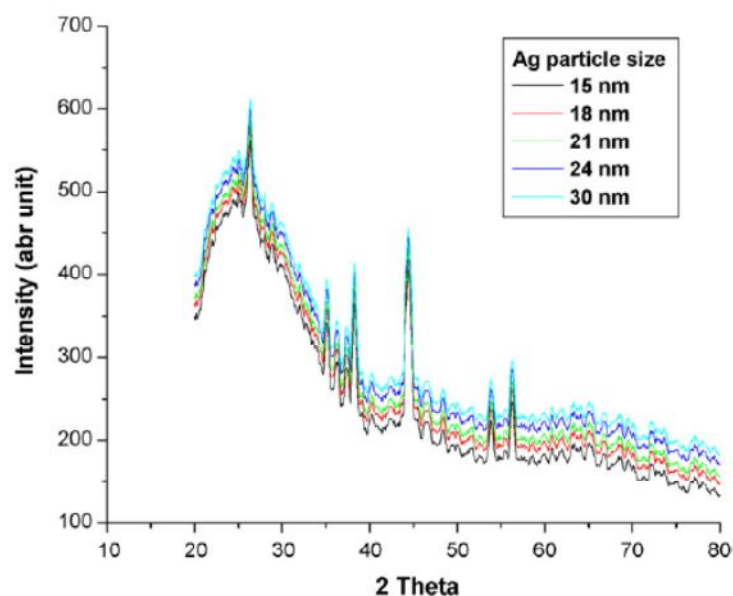


รูปที่ 2.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด แสดงชั้นของอนุภาคนาโนเงินที่แอนนัลที่อุณหภูมิเป็น (a) 100 °C, (b) 140 °C และ (c) 180 °C

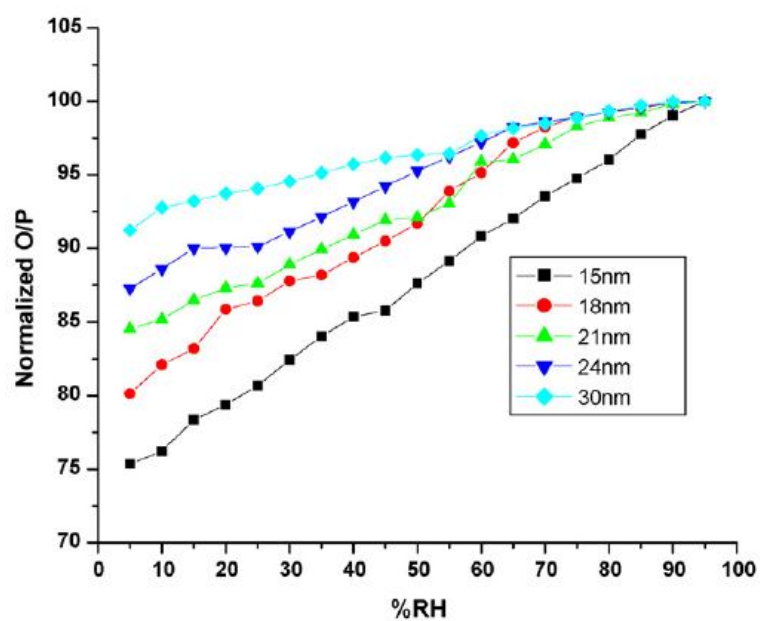


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์กราฟ IV ของโซล่าเซลล์

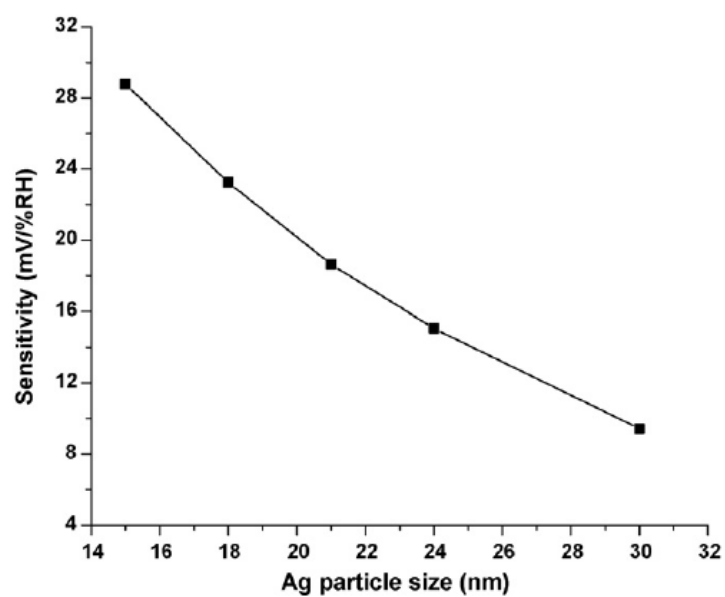
และในงานวิจัยของ Madhavi V. Fuke และคณะ[25] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการนำขนาดของอนุภาคนาโนเงินต่างๆ กัน เข้าไปผสมกับโพลีแอนนาไลน์ เพื่อใช้ในการตรวจวัดความชื้น ซึ่งในการทดลองพบว่า ขนาดของอนุภาคนาโนเงินที่มีขนาดเล็กกลง จะทำให้สภาพความไวต่อการตอบสนองความชื้น และค่าการตอบสนองต่อความชื้นดีขึ้นแสดงในรูปที่ 2.8 – 2.10



รูปที่ 2.8 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนเงินที่ผสมกับโพลีแอนนาไลน์ เมื่อขนาดของอนุภาคนาโนเงินที่ผสมเข้าไปมีขนาดต่างๆ กัน



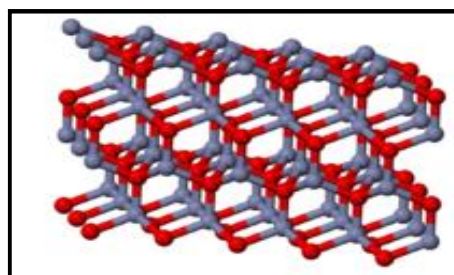
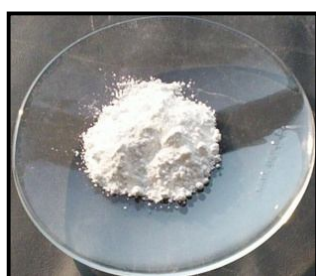
รูปที่ 2.9 การตอบสนองของความชื้นของฟิล์มบางโพลีเอทิลีนที่มีการผสมอนุภาคนาโนเงินในขนาดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.10 สภาพความไวในการตอบสนองของฟิล์มบางโพลีเอทิลีนที่มีการผสมอนุภาคนาโนเงินในขนาดที่แตกต่างกันที่ความชื้น 5%RH

2.1.2 ซิงค์ออกไซด์(ZnO)

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide: ZnO) เป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ โดยมีสูตรทางเคมีว่า ZnO ปกติแล้วสารซิงค์ออกไซด์ ไม่สามารถละลายได้ในน้ำ แต่สามารถละลายได้ในกรดแก่ต่างได้ สาร Zinc Oxide จะพบอยู่ในรูปผลึกแบบผลึกเฮกซะโกนอล หรือในรูปของผงแป้งสีขาวที่รู้จักในชื่อว่า Zinc white ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และจะยังคงขาวอยู่ได้เมื่อถูกไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือถูกแสงอัลตราไวโอเลต ผลึกโปร่งแสงของ Zinc Oxide อธิบายได้ด้วย piezoelectric effect , luminescent (สีของสาร Zinc Oxide ที่มีสีขาวจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อถูกให้ความร้อน และจะกลับเป็นสีขาวตามเดิมเมื่ออุณหภูมิลดลง) และการตอบสนองต่อแสงขาว สาร Zinc Oxide จะสลายตัวกลายเป็นไอระเหยของ Zinc และก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิประมาณ 1975 °C มี Optical band gap เท่ากับ 3.4 eV สาร Zinc Oxide ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็นแร่ zincite ที่ผ่านมาวัสดุ ZnO ได้เป็นที่สนใจในการศึกษาเพื่อนำ มาใช้ในการสร้างอุปกรณ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากค่าระดับพลังงานต้องห้ามที่มีค่า 3.4 eV สำหรับตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ จากที่ผ่านมามีการคาดหวัง ที่จะนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ที่ให้และทำงานในย่านแสงสีน้ำเงินและม่วง นอกจากนี้ ค่าพลังงาน exciton binding ของ ZnO ที่มีค่าประมาณ 60 meV ก็มีค่าที่มากพอสำหรับวัสดุที่จะนำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ โดยค่าพลังงาน exciton binding ของ ZnO ดังกล่าวจะมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจากความร้อนที่อุณหภูมิห้องประมาณ 2.4 เท่า ดังนั้นจะมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการเปล่งแสงจาก near-band-edge excitonic emission ที่อุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิสูงกว่าที่อุณหภูมิห้อง



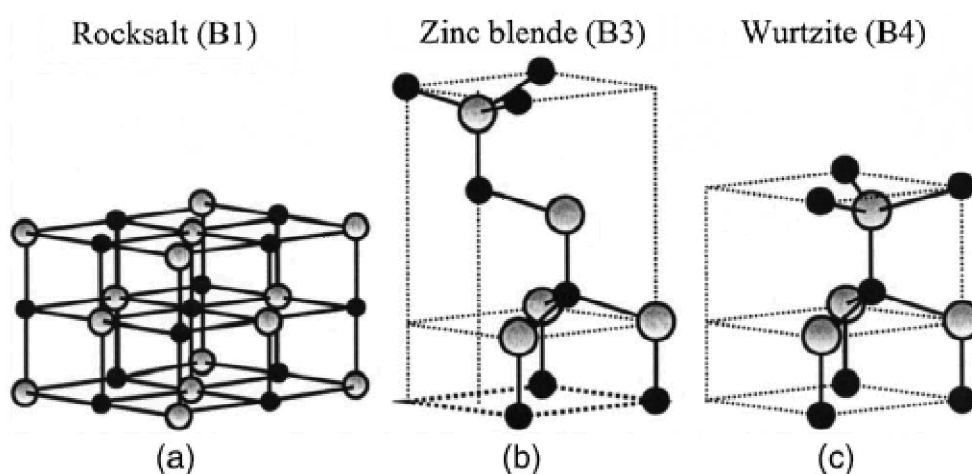
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของผงซิงค์ออกไซด์(ZnO) และ โครงสร้างทางผลึกของซิงค์ออกไซด์

2.1.2.1 สมบัติทางโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์

ในสารประกอบกลุ่ม II-VI นั้น ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็นแบบcubic zinc-blende หรือ hexagonal wurtzite โดยมีไอออนบวก (anion) ถูกล้อมรอบไอออนลบ (cation) จำนวนสี่ตัวที่ตำแหน่งมุมของเตตระฮีดรอน ซึ่งตำแหน่งของอะตอมที่เตตระฮีดรอนนั้น ปกติแล้วจะมีการจับพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3 สำหรับ ZnO จะมีโครงสร้างแบบ wurzite(B4) แบบ zinc blende (B3) และแบบ rocksalt (b1) ดังแสดงในรูปที่ a ซึ่งที่เงื่อนไขแวดล้อมปกติแล้วนั้น จะมีโครงสร้างแบบ wurzite สำหรับโครงสร้างแบบ zinc-blende จะอยู่ในสถานะเสถียร เมื่อถูกปลูกลงบนฐานรองรับที่เป็นโครงสร้างแบบ cubic ส่วนโครงสร้างแบบ rocksalt จะพบในสถานะที่ความดันสูงๆ

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

สถานะของสาร	ของแข็ง
สูตรทางโมเลกุล	ZnO
จุดหลอมเหลวของสาร	1,975 °C
ความหนาแน่น	5.606 g/cm ³ ที่สถานะของแข็ง
แถบช่องว่างพลังงาน	3.4 eV
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	8.5



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของ ZnO แบบ cubic rocksalt (B1), cubic zinc blende (B3) และ hexagonal wurzite (B4) โดยจุดเทาจะแทนอะตอมของ Zn และจุดดำจะแทนอะตอมของ O [a]

[a] JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 98, 041301 (2005)

2.1.2.2 สมบัติทางไฟฟ้าของซิงค์ออกไซด์

เนื่องด้วย ZnO เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าพลังงานต้องห้ามเป็นแบบตรง (direct band gap) ที่มีค่าระดับพลังงานที่ค่อนข้างกว้าง ทำให้มีความได้เปรียบในแง่การนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งข้อได้เปรียบเปรียบดังกล่าวได้แก่ การที่ค่าพลังงานต้องห้ามที่กว้างทำให้ต้องการค่า breakdown voltage ที่สูง มีความทนทานต่อสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงได้ ค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวอุปกรณ์ที่ต่ำ สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงและกำลังไฟฟ้าที่สูงได้ ปกติแล้วการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจะสามารถแบ่งการพิจารณาได้เป็นสองช่วง คือช่วงที่มีสนามไฟฟ้าต่ำ (low electric field) และช่วงที่มีสนามไฟฟ้าสูง (high electric field) โดยในช่วงที่มีสนามไฟฟ้าต่ำนั้น ค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพลังงานจากความร้อน ทำให้ค่าการกระจายตัวของพลังงานจะมีค่าไม่ขึ้นกับสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปให้กับอุปกรณ์ ดังนั้นอัตราการ scattering ซึ่งจะบอกถึงค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนจะไม่ขึ้นกับค่าสนามไฟฟ้าและพฤติกรรมของอุปกรณ์จะเป็นไปตามกฎของโอห์ม แต่ในขณะที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงนั้น ค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้าภายนอกจะไม่สามารถละทิ้งได้ ตารางที่ 3 แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าของ ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีต่างๆ กันเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรทางโครงสร้างผลึก

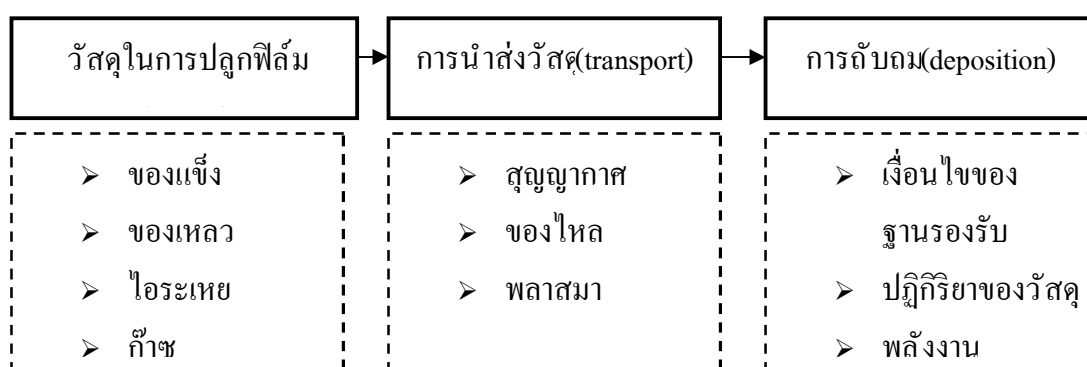
ตารางที่ 2.3 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของ ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีต่างๆ กันเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรทางโครงสร้างผลึก[a]

Sample	FWHM of XRD rocking curves (arc sec)	Carrier concentration (cm^{-3})	Electron mobility ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	Ref. (year)
Monte Carlo calculation	...	...	300	146 [Albrecht <i>et al.</i> (1999)]
Bulk ZnO grown by vapor-phase transport method	n/a	6.0×10^{16}	205	146 [Look <i>et al.</i> (1998)]
Bulk ZnO grown by pressurized melt method	49 (0002)	5.05×10^{17} (296 K) 3.64×10^{16} (77 K)	131 (296 K) 298 (77 K)	669 [Nause and Nemeth (2005)]
Bulk ZnO grown by hydrothermal method	18 (0002)	8×10^{13}	200	670 [Maeda <i>et al.</i> (2005)]
ZnO thin film on c-plane sapphire substrates grown by PLD	151 (0002)	2.0×10^{16}	155	147 [Kaidashev <i>et al.</i> (2003)]
ZnO thin films on c-plane sapphire grown by MBE	42 (0002)	1.2×10^{17}	130	148 [Kato <i>et al.</i> (2003)]
ZnO thin films grown on a-plane sapphire by MBE	n/a	7.0×10^{16}	120	148 [Iwata <i>et al.</i> (2000)]
$\text{Zn}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{O}/\text{ZnO}$ heterostructure grown on c-plane sapphire by PLD	n/a	$8.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	130	148 [Edahiro <i>et al.</i> (2003)]
ZnO thin film on c-plane sapphire with ZnO/MgO double-buffer layers grown by MBE	18 (0002) 1076 (10 $\bar{1}$ 1)	1.2×10^{17}	145	148 [Miyamoto <i>et al.</i> (2004)] 671 [Cho <i>et al.</i> (2005)]

2.1.3 ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

2.1.3.1 การเตรียมฟิล์มบาง[26,27]

ขั้นตอนของการผลิตฟิล์มบางนั้นมีด้วยกันหลายวิธีและอาจแบ่งชนิดตามการเปลี่ยนสถานะของสารในการปลูกฟิล์ม โดยทั่วไปแล้วในการปลูกฟิล์มหรือเคลือบสารนั้นจะพิจารณาจากวัสดุ(source)ที่จะนำมาปลูกฟิล์มว่าอยู่ในสถานะใดซึ่งอาจจะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว ไอระเหย หรือก๊าซ จากนั้นก็จะพิจารณาในเรื่องการนำส่งวัสดุพื้นฐานรอง(transport) ซึ่งการนำส่งนั้นก็จะแบ่งได้เป็นการนำส่งในสภาวะสุญญากาศ(vacuum), ของไหล(fluid) หรือ พลาสมา(plasma) โดยเทคนิคพื้นฐานในการผลิตฟิล์มบางมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ดังเช่น เทคนิคการเคลือบสารด้วยการระเหยของแข็ง (Physical Vapor Deposition), เทคนิคการเคลือบสารด้วยปฏิกิริยาเคมีของไอระเหยก๊าซ (Chemical vapor deposition) ซึ่งในกระบวนการปลูกฟิล์มดังกล่าวจะพิจารณาได้จากแผนภาพ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.13 กระบวนการในการเตรียมฟิล์มบาง

การเตรียมฟิล์มบางของแข็งเพื่อที่จะใช้ในการปรับแต่งสมบัติด้านหน้าพื้นผิวของธาตุหรือเครื่องมือวัดทางวิทยาศาสตร์ และทางด้านอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต คือ กระบวนการที่เตรียมฟิล์มของสารต่างๆ ลงบนแผ่นฐานรองรับ ด้วยแรงไฟฟ้า(electrical force) โดยเริ่มแรก กระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตจะถูกนำมาใช้กับพวกผลผลิตที่เป็นชั้นๆ ของธาตุกัมมันตภาพรังสี เช่น α หรือ β ในแหล่งกำเนิด หรือเตรียมเป่าสำหรับการก่อกัมมันต์ของการเร่งอนุภาค หรือปฏิกิริยานิวเคลียร์ เมื่อไม่นานมานี้ กระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตถูกนำมาใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มทางด้านนาโนเทคโนโลยีและนาโนอิเล็กทรอนิกส์

ซึ่งมีหลายวิธีที่ทำการเตรียมฟิล์มลงบนฐานรองรับ เช่น

1. การเตรียมฟิล์มลงบนฐานรองรับโดยการเตรียมสารละลายหรือสารแขวนลอยจากนั้นทำการระเหยตัวทำละลายออก
2. การพ่นลงขั้วแคโทด หรือนำไปปรับใช้กับการเตรียมพวกขั้วโลหะ
3. การเตรียมฟิล์มโดยการควบแน่นของไอระเหยของสาร

4. การเตรียมฟิล์มด้วยกระบวนการฉาบด้วยโลหะโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ
5. การใช้เลเซอร์ในการตัดเป็นชั้นๆ
6. การระเหยเป็นไอทางเคมี
7. การระเหยเป็นไอทางกายภาพ
8. การใช้คลื่นไมโครเวฟ-พาสมาในการเคลือบชั้น
9. การเตรียมฟิล์มโดยการระเหยเป็นไอด้วย เฟรม-แอตซิส
10. การเตรียมฟิล์มโดยวิธีอิเล็กโตรไลซิสที่ใช้กับการเตรียมฟิล์มพวกโลหะ
11. การเตรียมฟิล์มด้วยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ตารางที่ 2.4 การแบ่งประเภทของเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบาง

เทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบาง		
EVAPORATIVE METHODS	Vacuum Evaporation	Conventional vacuum evaporation
		Electron-beam evaporation
		Molecular-beam epitaxy (MBE)
		Reactive evaporation
GLOW-DISCHARGE PROCESSES	Sputtering	Diode sputtering
		Reactive sputtering
		Bias sputtering (ion plating)
		Magnetron sputtering
		Ion beam deposition
		Ion beam sputter deposition
		Reactive ion plating
	Plasma Processes	Cluster beam deposition (CBD)
		Plasma-enhanced CVD
		Plasma oxidation
		Plasma anodization
		Plasma polymerization
		Plasma nitridation
		Plasma reduction
		Microwave ECR plasma CVD
		Cathodic arc deposition

ตารางที่ 2.4(ต่อ) การแบ่งประเภทของเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบาง(ต่อ)

เทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบาง		
GAS-PHASE CHEMICAL PROCESSES	Chemical Vapor Deposition (CVD)	CVD epitaxy
		Atmospheric-pressure CVD (APCVD)
		Low-pressure CVD (LPCVD)
		Metalorganic CVD (MOCVD)
		Photo-enhanced CVD (PHCVD)
		Laser-induced CVD (PCVD)
		Electron-enhanced CVD
	Thermal Forming Processes	Ion implantation
		Thermal oxidation
		Thermal nitridation
LIQUID-PHASE CHEMICAL TECHNIQUES	Electro Processes	Thermal polymerization
		Electroplating
		Electroless plating
		Electrolytic anodization
		Chemical reduction plating
		Chemical displacement plating
		Electrophoretic deposition
	Mechanical Techniques	Liquid phase epitaxy
		Sparry pyrolysis
		Spray-on techniques
		Spin-on techniques

มีหลายวิธีที่ทำให้สารจำนวนมากที่เกิดการสูญเสียโดยไปติดเกาะอยู่กับห้องสุญญากาศ ขณะที่วิธีการฟ้นละอองของข้าวเคลือบ วิธีการระเหยเป็นไอทางเคมี และการควบแน่นของไอระเหย ได้มีการนำมาใช้ เมื่อสารละลายหรือสารแขวนลอยได้นำมาพ่นด้วยเครื่องทำให้แตกตัวก็จะทำให้สารก่อตัวขึ้นเป็นชั้น โดยชั้นจะไม่ค่อยมีความเรียบและไม่ค่อยสมบูรณ์ ซึ่งส่งผลให้ความหนาไม่สมบูรณ์ตามไปด้วย ซึ่งในการแบ่งประเภทของการปลูกฟิล์มอาจแบ่งได้ในหลายลักษณะดังแสดง ดังตารางที่ 2.2

คุณภาพของฟิล์มบางที่ก่อตัวเกิดขึ้นบนฐานรองรับจะแน่นหรือแข็ง ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและหยดเล็กๆ ที่เกิดการก่อตัวเป็นชั้นๆ และขึ้นอยู่กับความเรียบของพื้นผิวซึ่งขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของสารบนฐานรองรับ อนุภาคที่มีขนาดเล็กๆ จะเกิดการกระจายตัวกันแบบใกล้เคียงกัน ทำให้ช่วยลดขนาดของการเกิดช่องว่างได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดความไม่สมบูรณ์ของฟิล์ม และการแตกร้าวของฟิล์มได้ หยดละอองเล็กๆ จะกระจายตัวกันอย่างสมบูรณ์และมีความเป็นระเบียบบนฐานรองรับ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นชั้นๆ เกิดขึ้นเป็นความหนาของฟิล์ม ซึ่งจะเห็นว่าทั้งหมดนี้กระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นเครื่องมือที่สามารถเตรียมชั้น และฟิล์มบางได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงเพราะสามารถเตรียมฟิล์มได้อย่างที่ต้องการและอย่างสมบูรณ์ เทคนิคการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถที่จะทำให้เกิดละอองหยดเล็กๆ ในระดับไมโครเมตร และในระดับเล็กกว่าไมโครเมตร โดยในกระบวนการแรงทางไฟฟ้าสถิตจะทำให้เกิดการแพร่กระจายละอองหยดเล็กๆ อย่างสม่ำเสมอระหว่างช่องว่างของหัวเข็มกับฐานรองรับ ซึ่งกระบวนการนี้จะสามารถควบคุมได้ง่ายโดยการปรับ อัตราการไหลของสาร และปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำการให้กับหัวเข็ม นอกจากนี้เมื่อเทียบต้นทุนในกระบวนการสร้างฟิล์มบาง กระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าจะราคาถูกกว่ากระบวนการที่สร้างฟิล์มด้วยวิธีการระเหยเป็นไอทางเคมีและทางกายภาพ หรือกระบวนการพ่นด้วยพลาสมาซึ่งต้องใช้ระบบสุญญากาศสูงในระบบด้วย ในส่วนความหนาฟิล์มสามารถควบคุมได้โดยการปรับความเข้มข้นและอัตราการไหลของสารละลายที่นำมาใช้การพ่น

2.1.3.2 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต[27,28]

การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic spray deposition) เป็นกระบวนการที่สามารถทำให้ของเหลวแตกตัวหยดของเหลว(droplet) ที่ได้จากกระบวนการนี้ จะมีความเป็นประจุสูงซึ่งเป็นไปตามกฎของเรเลย์ (Rayleigh limit) มีขนาดเล็กมาก ซึ่งอยู่ในระดับ 10 นาโนเมตร ความเป็นประจุและขนาดของหยดเล็กๆ จะสามารถควบคุมได้โดยจากไฟฟ้าที่ให้เข้าไป การเคลื่อนที่ของหยดประจุจะสามารถควบคุมได้จากสนามไฟฟ้า ประสิทธิภาพของประจุที่เกิดจากการปลุกด้วยการพ่นจะมีประสิทธิภาพความเป็นประจุที่ดีกว่าแบบหยดที่ไม่มีประจุ กระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตได้มีการนำมาใช้ประยุกต์อย่างมากมายในกระบวนการอุตสาหกรรมและอุตสาหกรรมเครื่องมือทางด้านวิทยาศาสตร์ ซึ่งจะเห็นว่ากระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตนี้สามารถนำมาใช้ประยุกต์กับเทคโนโลยีด้านวัสดุศาสตร์ ทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องมือระดับไมโคร และเทคโนโลยีในระดับนาโน

ในปี 1912 Smoluchowski ได้เสนอถึงทฤษฎีของการเกิดประจุขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยประจุของหยดของของเหลว จะขึ้นอยู่กับจำนวนของไอออนบวกและไอออนลบที่อยู่ในปริมาตรของของเหลวในหลอด ในทางตรงกันข้าม ประจุที่เกิดจากการให้ไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปในระหว่างกระบวนการ จะทำให้เกิดเป็นประจุอย่างชัดเจน และมีประสิทธิภาพดีกว่าการเกิดขึ้นเอง

โดยธรรมชาติ ซึ่งกระบวนการที่กล่าวมานี้เรียกว่า การเหนี่ยวนำให้เกิดประจุ ซึ่ง ลอร์ด เคลวิน (Lord Kelvin's) ได้ยกตัวอย่างและอธิบายไว้จากการทำเครื่องหยดน้ำ ำ ในปี.ศ.1876 โดย ลอร์ด เคลวิน ได้้อธิบายว่าประจุที่เกิดขึ้น จะเกิดจากการหยดของหยดน้ำ จากปลายเข็ม หัว ที่เค้าทำการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าไป 10 kV และในปี 1915 Zeleny ทำการวิจัยการเกิดละอองด้วยไฟฟ้า (Electrospray) ของสารละลายเอทานอล ด้วยการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1-5 kV การเกิดละอองดังกล่าวมีปัจจัยที่สำคัญ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของของเหลว สมบัติของของเหลว และระยะห่างระหว่างปลายหลอดแก้วถึงแผ่นแพลต (Ground plate)

กระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีการที่ทำให้ของเหลวแตกตัวเป็นหยดเล็กๆ ด้วยแรงทางไฟฟ้า (electrical force) หรือ เรียกว่าแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) หัวเข็มที่ทำให้แตกตัวเป็นไอออนนี้ จะทำจากหลอดโลหะซึ่งมีปลายเข็มที่เล็กมาก ซึ่งเมื่อทำการให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงเข้าไป จะเกิดการกดด้านข้าง (shear stress) บนพื้นผิวของของเหลว เนื่องจากเกิดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น ทำให้เกิดการยืดตัวของของเหลวที่ปลายเข็ม และเจ็ทออกมา จากนั้นจะมีการแตกสลายตัวของของเหลวกลายเป็นหยดเล็กๆ กระจัดกระจายออกมา โดยหยดเล็กๆ ที่ได้จากระบวนการพ่นนี้ จะมีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ข้อดีของการวิธีการนี้ คือละอองหยดจะมีความเป็นประจุสูงมากซึ่งเป็นไปตามกฎของเรเลย์ (Rayleigh limit) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับประจุของหยดที่ตกลงมา ซึ่งประจุพวกนี้ จะสามารถเอาชนะแรงดึงดูดของพื้นผิวแล้วทำให้เกิดแตกตัวของอะตอมในที่สุด โดยความเป็นประจุจะสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$Q_R = 2\pi(16\sigma_1\epsilon_0r^3)^{1/2} \quad (2.1)$$

โดย σ_1 คือ ค่าของแรงตึงผิว ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของพื้นที่ว่าง และ r คือ รัศมีของหยดละออง

ขนาดของประจุและขนาดของหยดเล็กๆ สามารถควบคุมขนาดได้ทำการปรับค่าอัตราการไหล (flow rate) และ ปรับขนาดความต่างศักย์ที่ให้เข้าไปที่บริเวณหัวเข็มหยดเล็กๆ ที่ความเป็นประจุจะสามารถกระจายออกมาได้เนื่องจากเกิดแรงผลักของคูลอมป์ (Coulombe) การขยายออกของประจุของหยดเล็กๆ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.2

$$-\frac{1}{c_d} \frac{dc_d}{dt} = \frac{2C_c\epsilon_0c_dE_{ds}^2}{\eta_g\rho_1} = \frac{c_d}{\tau_{exp}} \quad (2.2)$$

ซึ่ง C_d คือ ค่าความเข้มข้นของมวลชิ้นส่วนของหยดเล็ก ๆ η_g คือ ค่าความหนืดของก๊าซไดนามิก, ρ_l คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว และ C_c คือ ค่าแฟกเตอร์คันทิงแฮม (Cunningham factor)

E_{ds} คือ ค่าสนามไฟฟ้าของประจุ ซึ่งจะหาได้ขนาดของประจุ Q_d และสนามไฟฟ้าได้จากสมการที่ 2.3

$$E_{ds} = \frac{Q_d}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2 τ_{exp} คือ ค่าเวลาคงที่ (time constant) ซึ่งหาได้จากสมการ 2.4

$$\tau_{exp} = \frac{\eta_g \rho_l}{2C_c \epsilon_0 E_{ds}^2} \quad (2.4)$$

ความเข้มข้นของมวลที่หยดออกมาจะเกิดการหดตัวลงตามเวลา ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.5

$$C_d = C_{d0} \left(1 - \frac{t}{\tau_{exp}}\right) \quad (2.5)$$

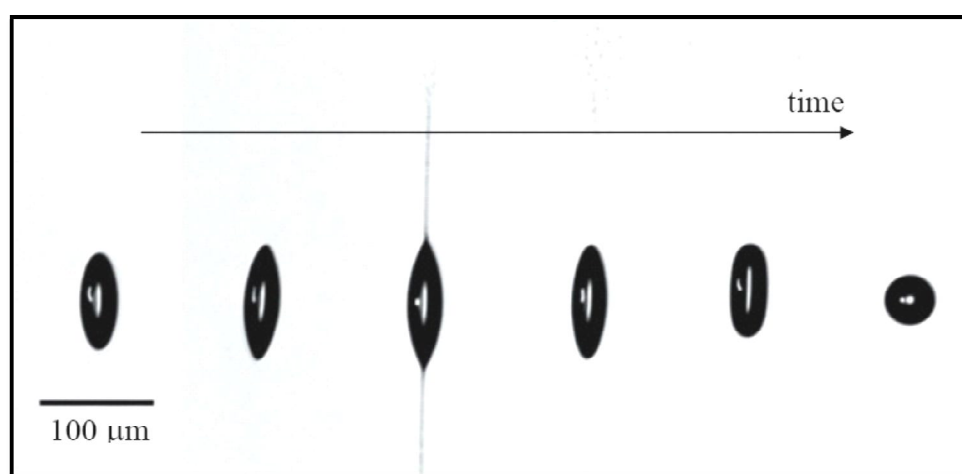
การเคลื่อนที่ของหยดประจุสามารถควบคุมได้ง่ายโดยสนามไฟฟ้า การปลูกด้วยการพ่นหรืออนุภาคที่ตกลงมาจะมีประสิทธิภาพมากกว่าที่ไม่มีประจุ เครื่องมือระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตจะสามารถทำได้ง่าย ใช้งานได้ง่าย และถูก แต่ก็ยังมีข้อบกพร่องที่สำคัญคือ วิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตนี้จะถูกจำกัดในการใช้ทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งจะใช้ได้ชั่วขณะหนึ่ง ซึ่งวิธีการแก้ปัญหานี้ ได้มีการนำหัวแบบหลายหัว (multi-nozzle) หรือ หัวแบบสลิต (slit-nozzle) มาใช้ในระบบเครื่องระบบการพ่นที่มีโรตารี หรือมีหัวฉีดแบบนิวเมติก ที่มีกรวดและขี้บวบของไฟฟ้าแรงสูงจะทำให้เกิดการเหนียวของขี้ทั้งสองทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุจำนวนมาก อย่างไรก็ตามประจุที่เกิดขึ้นตามกระบวนการนี้จะมีขนาดเล็กกว่าของเรย์เลย์ (Rayleigh limit)

ข้อที่สำคัญอย่างมากในการแบ่งลักษณะระบบการพ่นก็คือ โหมดในการพ่นสเปรย์ ซึ่งมีอยู่หลายโหมดด้วยกันที่นำมาถ่วงถึงตามรายจ่ายวิจัยต่างๆ แต่จะสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1. ในกลุ่มแรกจะเป็นลักษณะของการแตกตัวเป็นหยด หลุดออกอย่างกระจัดกระจายมาของของเหลวที่บริเวณปลายเข็ม ซึ่งส่วนที่หลุดออกมาจะมีลักษณะหยดที่ใหญ่ หยดขนาดเล็กและลักษณะของหยดที่กำลังยึดตัวอยู่ในขณะนั้นๆ
2. ส่วนในกลุ่มที่สองจะเป็นลักษณะของการแตกตัวเป็นฝอยๆ จากของเหลวที่ยึดออกมา ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกสลายตัวกลายเป็นหยดเล็กๆ เนื่องจากความไม่เสถียรของ และจากการ

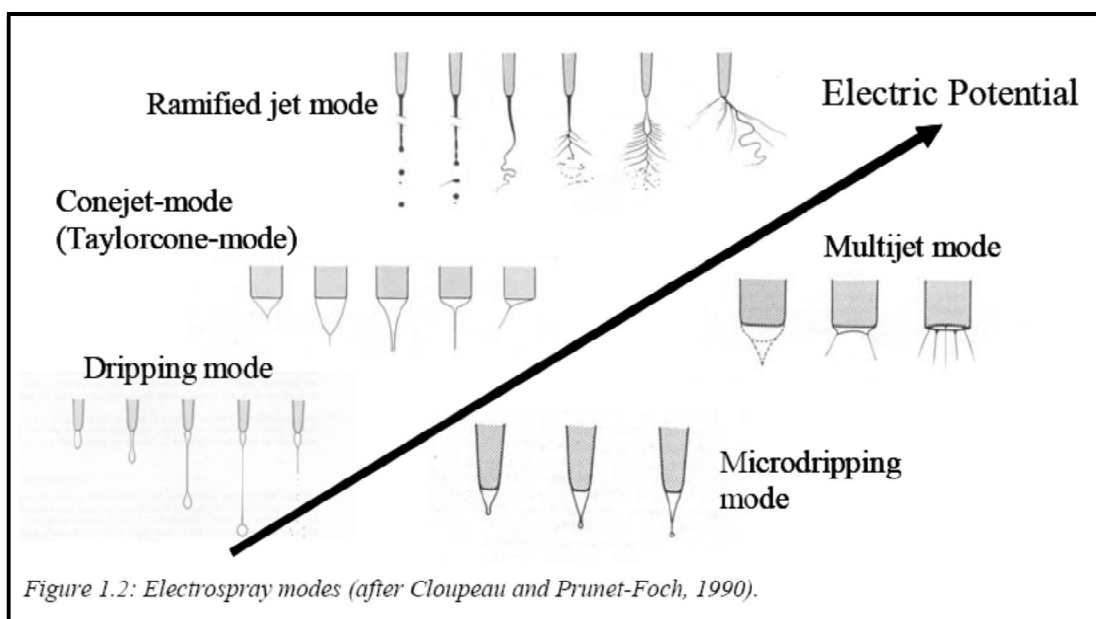
สังเกตจะพบว่าความเป็นฟอยหดยกเล็กๆ จะมีความราบเรียบและความสมบูรณ์มาก และบางครั้งจะเห็นรัศมีของการเป็นฟอยเกิดขึ้นในระดับปลายเข็มเกิดขึ้น

หยดของเหลวเกิดจากการปลดปล่อยในโหมด liquid jet และจากปรากฏการณ์ดังกล่าว จะสามารถอธิบายไปสู่การแตกตัวแบบการพ่น(Electrostatic spray) ได้ต่อไป โดยในปี 2003 Duft และคณะวิจัย มีการศึกษาถึงผลของขนาดหยดของเหลว (ethylene glycol droplet) โดยมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไข ทำให้ได้ขนาดหยดของของเหลวจาก 58 ไมโครเมตรลดลงถึง 24 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การหยดแบบเรเลย์ (Rayleigh)

สำหรับระบบการพ่นด้วยไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ การนำไฟฟ้าของหลอด Capillary นำไฟฟ้าที่เกิดจากการให้ศักย์ไฟฟ้าที่มีขนาดสูงและแผ่นกราวด์ โดยของเหลวจะถูกส่งผ่านมายังหลอด Capillary และเกิดการแตกตัวโดยสนามไฟฟ้าภายนอก Capillary Cloupeau and Prunet-Foch อธิบายถึงความแตกต่างในโหมดการพ่นของโหมดต่างๆ ได้โดยปัจจัยทาง geometry (ตัวอย่างเช่น ระยะทางระหว่างหลอด Capillary) และ ระหว่าง plate หรือว่ารัศมีของหลอด Capillary), อัตราการไหล, สมบัติของของเหลว (แรงตึงผิว, การนำไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้า โดยโหมดในการพ่นแบบต่างๆ สามารถอธิบายได้โดยรูป 2.13 และสามารถแบ่งได้เป็น



รูปที่ 2.15 โหมดการพ่นด้วยไฟฟ้าสลับแบบต่างๆ[28]

- Dripping mode มีลักษณะเป็นแบบหยดต่อหยด (drop by drop) ลักษณะดังกล่าวเกิดจากการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจากศูนย์ จนกระทั่งของเหลวไหลลงและเกิดเป็นหยดของเหลวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าปลายหลอดcapillary
- Micro dripping mode มีลักษณะเป็นหยดของเหลวที่มีขนาดเล็กกว่าในDripping mode โดยลักษณะที่ปลายหลอดและหยดของเหลวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าปลายหลอดcapillary
- Cone jet mode (Taylorcone-mode) มีลักษณะหยด คือ มีรูปร่างเป็นโคน(cone) ที่ปลายcapillary มีลำของเหลว(jet) ต่อจาก cone และปลายของ jet จะเกิดเป็นละอองฝอยเนื่องจากไฟฟ้า(Electrospray) โดยลักษณะของละอองฝอยที่เกิดจากcone jet mode นี้ มีการกระจายตัวของละอองที่สม่ำเสมอเป็นการแตกตัวที่สมบูรณ์
- Multijet mode มีลักษณะของละอองฝอยที่เกิดจากการเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูง และเกิดละอองฝอยที่ปลายของหลอด capillary
- Ramified jet mode มีลักษณะของjet ที่เกิดจาก jet ออกมา ส่วนของลำของเหลว มีลักษณะที่แตกต่างจาก cone jet ตรงที่ตำแหน่งในการเกิดละอองฝอย

➤ การพ่นแบบ *Cone jet mode*

ในการเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่น จะใช้ในโหมดของ Cone jet mode ในการทำให้ของเหลวแตกตัวลงบนฐานรองรับ

ในปี 1952 Vonnegut และ Neubauer ได้ทำการทดลองการพ่นด้วยไฟฟ้า โดยไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ และทำให้เกิดการพ่นในโหมดต่างๆ ในที่นี้มีที่ Dripping mode และ Cone jet mode Like Zeleny พบว่าเป็นการยากที่จะทำให้เกิดการพ่นแบบ Cone jet mode บนน้ำไม่บริสุทธิ์ เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าที่มีค่าสูง แต่มีประสบความสำเร็จในการพ่นสารละลายจำพวกแอลกอฮอล์ น้ำมันหล่อลื่น และน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำและค่าของแรงตึงผิว ตัวอย่างสมบัติที่สำคัญของของเหลวที่สามารถทำให้เกิด Cone jet mode แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.5 สารละลายที่ใช้ในการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต แล้วทำให้เกิดการแตกตัวแบบ cone jet [28]

Liquid	ρ [kg/m ³]	μ [Pa s]	γ [N/m]	ϵ_r	K	Reference
Acetone	790	0.0032	0.023	20.7	53	Gañán-Calvo et al.(1997)
n-Butanol 99%pure	810	0.00294	0.0246	17.8	15	Rob Hartman (1998)
n-Butanol 99%+LiCl	810	0.00276	0.0252	17.3	101/216	Rob Hartman (1998)
Dioxane+ 2/4%formamide	1030	0.00139	0.03	2.3/2.5	0.24/1.1	Gañán-Calvo et al.(1997)
Ethylene glycol	1110	0.02	0.046	38.8	1	Jaworek and Krupa(1999)
Ethanol	789	0.00116	0.022	25	30	Jaworek and Krupa(1999)
Ethylene glycol	1109	0.02	0.048	37	76	Rob Hartman (1998)
Formamide	1130	0.0037	0.058	111	28400	Fernandez dela Mora and Loscertales (1994)
Glycerol	1262	0.92(25°C)	0.0063	X	1.57	Ku and Kim (2002)
Isopropanol	X	X	X	X	50	Ragucci et al. (2000)
Methanol	795	0.0059	0.021	33.6	85	Gañán-Calvo et al.(1997)

โดยสามารถหาความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า I ในการพ่นกับสมบัติของของเหลว และ อัตราการไหลของสาร (volume feed rate, Q)

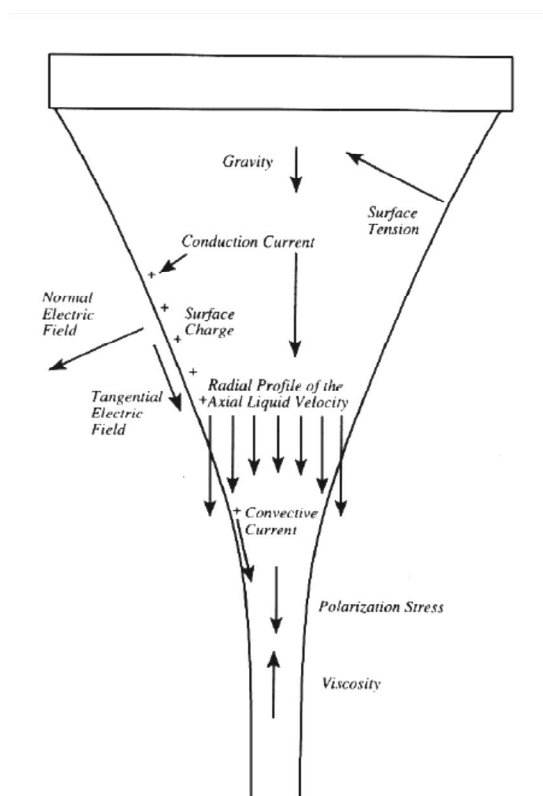
$$I = f(\epsilon) \left(\frac{\gamma Q K}{\epsilon} \right)^{0.5} \quad (2.6)$$

โดย $f(\epsilon)$ คือ ฟังก์ชันการทดลอง

K คือ ค่าการนำไฟฟ้า, γ คือ ค่าแรงตึงผิว

ϵ คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

กระแสใน Cone jet mode เกิดได้ 2 ทาง คือ การนำของไอออน บนของเหลวเนื่องจาก สนามไฟฟ้า และการส่งผ่านไอออนเนื่องจากพาของของเหลว เมื่อทำการให้สนามไฟฟ้า ที่ผิวของ ของเหลวจะไหลด้วยความเร่งอันเนื่องมาจากทิศทางของสนามไฟฟ้า รูปร่าง cone ดังกล่าว เกิดจาก กระแสไฟฟ้าอันเนื่องมาจาก ความหนืดและการนำไฟฟ้าของของเหลว ดังแสดงในรูป 2.14



รูปที่ 2.16 ลักษณะของโคน (cone shape) และลักษณะหยดละอองฝอยและลักษณะของ กระแสไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับแรงของของเหลวที่มากระทำ[28]

จากภาพดังกล่าวสามารถอธิบายผลกระทบที่เกิดจาก ค่าการนำและความหนืดของของเหลวได้จากสมการ

$$G = \left(\frac{\gamma^3 \epsilon_0^2}{\mu^3 K^2 Q} \right)^{1/3} \quad (2.7)$$

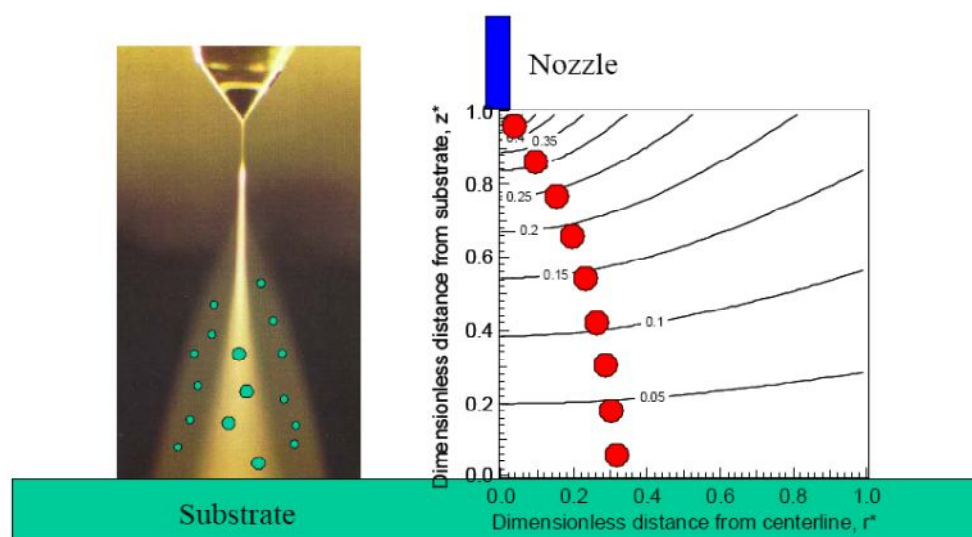
โดย μ คือ หยดของของเหลว

K คือ ค่าการนำไฟฟ้า, γ คือ ค่าแรงตึงผิว

ϵ คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

สำหรับการพัฒนาการพ่นแบบ Cone jet มีส่วนที่สำคัญได้แก่ การปรับปรุงรูปร่างของ cone, การทำให้ของเหลวแตกตัวจากปลาย cone และ การส่งผ่านละอองของเหลวลงบนแผ่นเพลท

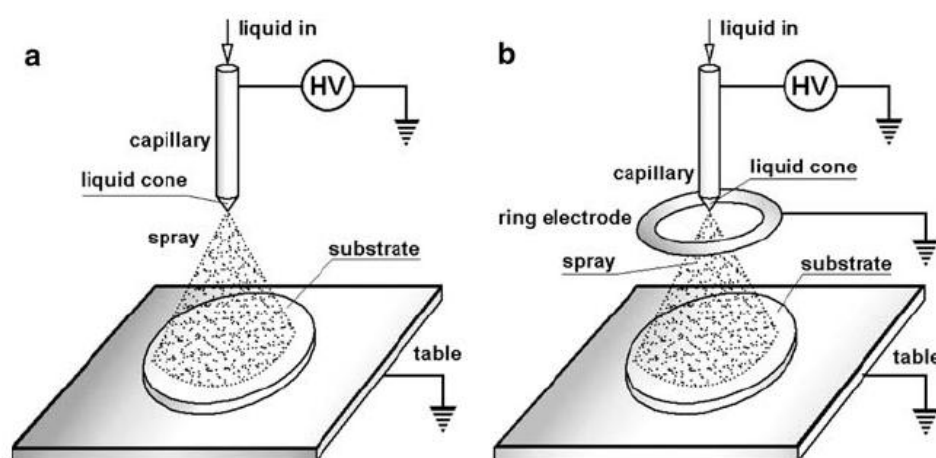
ทฤษฎี conejet อธิบายได้โดย Taylor (1964) โดยอธิบายรูปร่างของ cone มีมุมอยู่ที่ 49.3° หรือที่เรียกว่า Taylor-cone ในปี Smith (1986) สังเกตได้ว่า cone เกิดได้จากศักย์ไฟฟ้า รัศมีของหลอด capillary การนำและความหนืดของของเหลว นอกจากนั้นได้มีการวิจัยและพัฒนาทฤษฎีของสนามไฟฟ้าที่ผลกับแรงตึงผิว ความดันภายในของเหลวที่มีรูปร่างแบบ cone ในปี 1999 แสดงให้เห็นถึงโมเดลในการคำนวณรูปร่างของ cone และ jet ได้สำเร็จ โดยสามารถอธิบายได้ถึงสนามไฟฟ้าภายในและภายนอก cone รวมถึงความหนาแน่นประจุที่พื้นผิวของ cone ในท้ายสุดสามารถประมาณค่าความเร็วของเหลวที่พื้นผิวของ cone ได้ จากที่กล่าวข้างต้นกระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังรูป 2.15



รูปที่ 2.17 ผลของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีผลต่อการแตกตัวเป็นละอองฝอย[28]

ระบบหลักๆ ของการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางจะมีอยู่ ระบบหลักๆ คือ

1. ระบบแบบหัวเข็มธรรมดาซึ่งจะทำการพ่นละอองออกมายังฐานรองรับโดยตรงความต่างศักย์แรงสูงจะถูกป้อนเข้าไปให้ที่ระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับซึ่งฐานรองรับจะวางอยู่บนขั้วไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่เป็นกราวด์ของระบบดังรูปที่ 2.16 (a)
2. ระบบแบบหัวเข็มที่สามารถกรองได้ ซึ่งในระบบจะสามารถแยกทำได้อย่างอิสระต่อกันจากฐานรองรับ ที่บริเวณหัวเข็มจะทำการให้ความต่างศักย์ขณะที่ตัวกรองและฐานรองรับจะเป็นกราวด์ในระบบดังรูปที่ 2.16 (b)



รูปที่ 2.18 การเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (a) ระบบแบบหัวเข็มธรรมดา
(b) ระบบแบบหัวเข็มที่สามารถกรองได้[27]

ข้อเสียของระบบแรก คือ ระบบจะมีขั้วเพียงตำแหน่งเดียวที่บริเวณฐานรองรับโดยจะไม่สามารถให้กระแสผ่านไปยังฐานรองรับได้โดยตรง เพราะจะทำให้มีการเสียหายเกิดขึ้นที่ฐานรองรับ ในขณะที่ระบบที่สองจะมีตัวกรองเป็นขั้วด้วย นอกเหนือจากที่บริเวณฐานรองรับแล้ว อย่างไรก็ตามข้อเสียของระบบที่สองนี้ก็คือมีการแยกจำนวนของละอองหยดเล็กๆ ด้วยขั้วตัวกรอง และยังต้องมีการใช้อย่างเฉพาะและระมัดระวังเพื่อที่จะทำการขัดขวางละอองบางส่วนที่จะตกลงไปยังฐานรองรับ โดยระบบนี้ ได้มีการใช้อย่างแพร่หลายซึ่งในระบบนี้ก็สามารถที่จะทำให้เกิดหยดละอองเล็กๆ แรงตกลงมาด้วยสนามไฟฟ้าและลงมายังแผ่นฐานรองรับในที่สุด

2.2.2.1 แรงที่มีผลต่อการกระทำกับสารที่พ่นออกมา

1. แรงโน้มถ่วง (Gravimetric force)
2. แรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ที่พาสารจากหัวเข็มไปยังฐานรองรับ
3. แรงผลักแบบคูลอมบ์ (Coulombic force) แรงคูลอมบ์ซึ่งพยายามที่จะผลักประจุใกล้เคียงภายในสารละลายที่ถูกพ่นออกมา ซึ่งจะทำให้เกิดการกระจายของสารที่ฉีดออกมาระหว่างที่พุ่งไปสู่ฐานรองรับ
4. แรงวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic forces) ซึ่งจะพยายามปกป้องกระแสของพอลิเมอร์ไม่ให้ถูกขยายออก
5. แรงตึงผิว (Surface tensions) ซึ่งจะกระทำกับแรงขยายออกของผิวสารละลายพอลิเมอร์
6. แรงแบบลาก (Drag forces) จากการเสียดสีระหว่างประจุของสารละลายพอลิเมอร์กับอากาศ

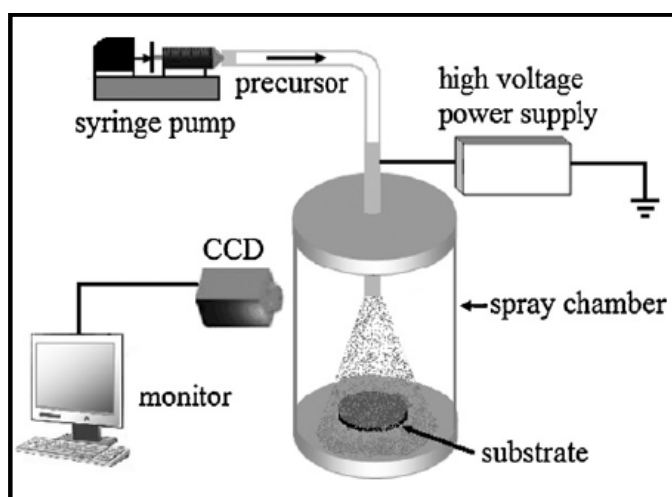
2.2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อเตรียมฟิล์มโดยกระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต[29]

1. น้ำหนักโมเลกุลการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล และ โครงสร้างของสาร
2. สมบัติของสารละลาย (ความหนืด, การนำไฟฟ้าและแรงตึงผิว)
3. ศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหล และความเข้มข้น
4. ระยะห่างระหว่างปลายหัวเข็มกับแผ่นฐานรองรับ
5. อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของอากาศ
6. การเคลื่อนที่ของแผ่นฐานรองรับ

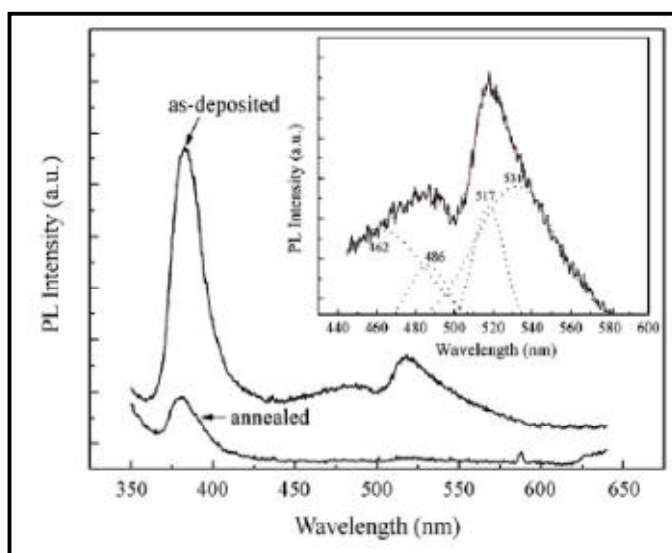
2.1.3.3 การประยุกต์ใช้งานจากการเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

การพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายสาขามากมาย รวมไปถึงการพ่นสี หรือการปลูกฟิล์มบาง วิธีทางกายภาพและเคมีจะใช้สำหรับปลูกฟิล์มบางและฟิล์มหนาจากก๊าซ สารละลาย ของเหลว หรือของแข็ง ซึ่งเป็นไปตามการอ้างอิงของอาร์เทนเบิร์ก (Altenburg) แต่ก็มีงานบางส่วนที่ได้รับความนิยมเช่นกัน นั่นคือ วิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต เมื่อไม่นานมานี้ ชอย (Choy) ได้ทำการเรียบเรียงและอ้างอิงถึงการให้กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์เพื่อใช้ในการพัฒนากระบวนการการปลูกฟิล์มด้วยการระเหยเป็นไอทางเคมี (chemical vapour deposition processes) รวมถึงการนำฟิล์มที่ได้จากการปลูกไปประยุกต์ใช้งาน ด้วยการนำเสนอการใช้วิธีการพ่นทางไฟฟ้าสถิต ดังนั้นจึงได้ทำการสรุปและนำเสนอถึงกระบวนการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตและการนำฟิล์มบางที่ได้ไปประยุกต์ใช้ดังนี้

จากรายงานการวิจัยของ Jin Li และคณะ[10] ได้ทำการเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์โพลิคริสตัลไลน์ โดยวิธีพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (ESD) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นอุปกรณ์ ultraviolet luminescence แสดงในรูปที่ 2.17 – 2.18 ข้อดีของงานวิจัยนี้ คือสามารถเตรียมฟิล์มได้ง่าย ไม่ซับซ้อน ด้วยวิธีESD และในงานวิจัยยังพบว่าฟิล์มบางมีการตอบสนองการเปล่งแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่น UV

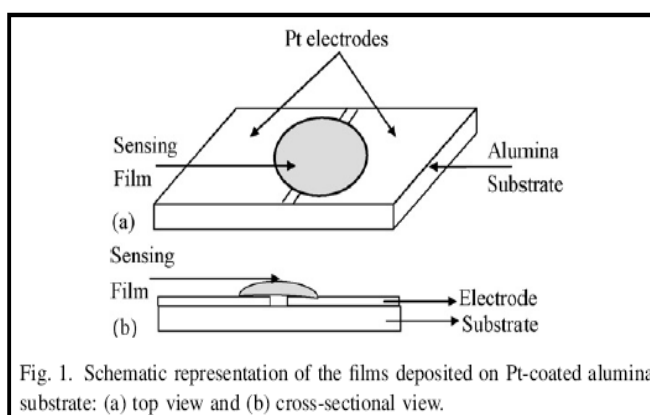


รูปที่ 2.19 การติดตั้งระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต(ESD)

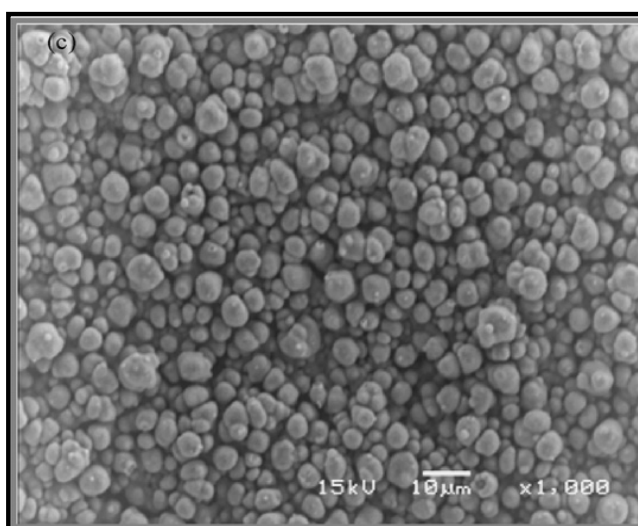


รูปที่ 2.20 สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

และจากรายงานการวิจัยของ Camelia Matei Ghimbeu และคณะ[9] ได้ทำการเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์โดยวิธีพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นก๊าซเซนเซอร์ ซึ่งข้อดีของวิธีการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตคือ กระบวนการดังกล่าวทำให้ฟิล์มมีความพรุนสูง โดยสามารถทำให้พัฒนาเป็นอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลจากงานวิจัยดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 2.19 – 2.20



รูปที่ 2.21 การติดตั้งระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต(ESD) ที่เตรียมขึ้นบนฐานรองรับแผ่นอะลูมินา (a) ภาพถ่ายด้านบน (b) ภาพถ่ายแนวตัดขวาง



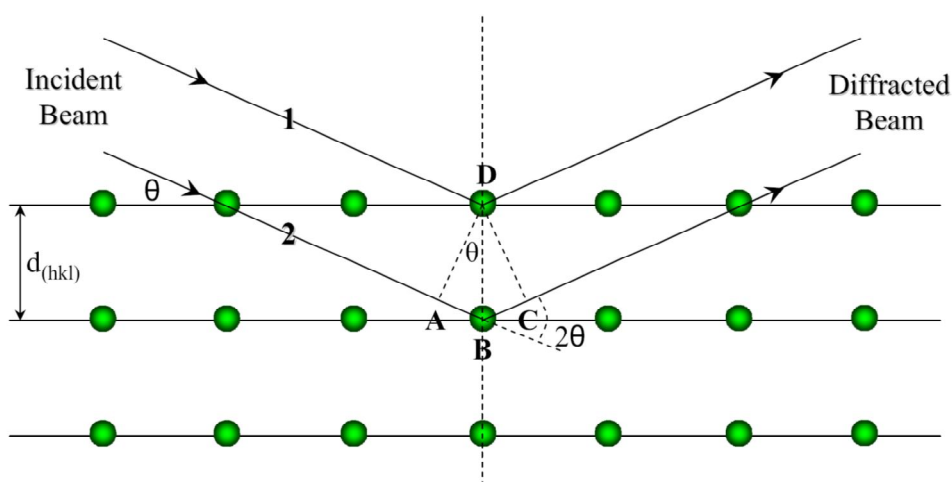
รูปที่ 2.22 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

2.1.4 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์ม[26]

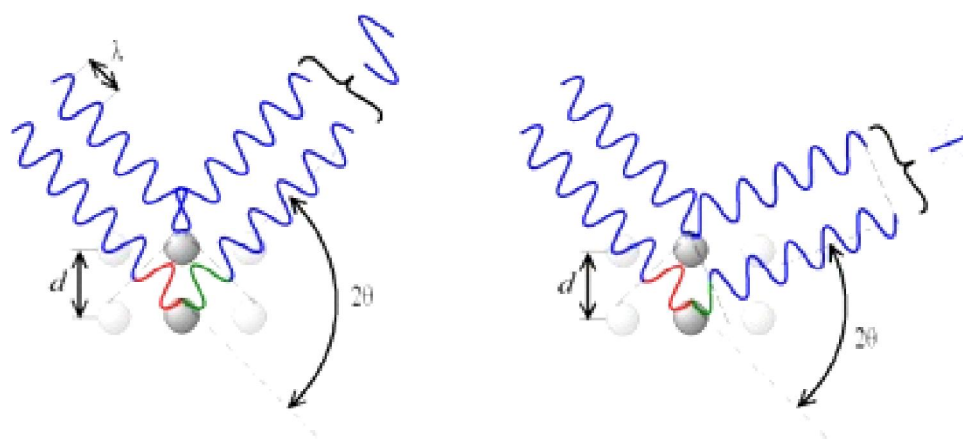
2.1.4.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

(X-ray diffraction: XRD)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มทำให้เราทราบว่าฟิล์มนั้นมีค่าคงที่แลตติซ (Lattice constant) เท่าใดและมีระยะห่างอะไบบ้างในฟิล์มรังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงและมีความยาวคลื่นระหว่าง $0.5\text{--}2.5\text{ \AA}$ รังสีเอกซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงมากวิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนักเช่นทองแดงผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอกซ์ 2 ชนิด คือรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) รังสีเอกซ์จะแสดงสมบัติเชิงคลื่นคือการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึกและหลังจากคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและแบบหักล้างกันถ้าหากพิจารณาเฉพาะบริเวณที่รังสีเอกซ์ตกกระทบบอะตอมรังสีเอกซ์จะแสดงสมบัติเชิงอนุภาคคือกระเจิงออกทุกทิศทางเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบบกับอะตอมซึ่งเรียงตัวอยู่บนขนาดของโครงสร้างผลึกอะตอมนี้ จะทำหน้าที่กระเจิงรังสีเอกซ์ทำให้มีสภาพเหมือนกับว่ารังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบลงมามีการสะท้อน



รูปที่ 2.23 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในผลึกตามกฎของแบรกก์



รูปที่ 2.24 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในกรณีคลื่นแทรกสอดและเสริมกัน

พิจารณารูปที่ 2.21 เมื่อมีรังสีเอกซ์ตกกระทบกับระนาบของผลึกโดยระยะห่างระหว่างระนาบเป็น d จากรูปรังสีเอกซ์ตกกระทบที่จุด D และ B ทำมุม θ กับระนาบแล้วสะท้อนออกมาจากระนาบเป็นมุม θ ผลต่างทางเดินของรังสีเอกซ์ทั้งสองมีค่าเท่ากับ $AB + BC$ ซึ่งเท่ากับ $2d\sin\theta$ โดยการแทรกสอดแบบเสริมของรังสีจะเกิดขึ้นได้เมื่อผลต่างทางเดินรังสีจะต้องมีค่าเท่ากับ $n\lambda$ โดย n เป็นจำนวนเต็ม และ λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์แสดงได้ดังสมการที่ 2.8

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.8)$$

เมื่อ $n =$ ลำดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 2, 3, ...

สมการที่ (2.8) เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ในทางผลึกวิทยา (Crystallography) สามารถมองผลึกว่าประกอบด้วยระนาบของอะตอมต่างๆ โดยการระบุระนาบจะใช้สัญลักษณ์ $(h k l)$ ซึ่งค่า hkl เรียกว่าดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) เป็นเลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 0, 1, 2, ... ระยะห่างระหว่างระนาบในชุดเดียวกันขึ้นอยู่กับดัชนีมิลเลอร์ $(h k l)$ และค่าคงที่ของโครงผลึก $(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma)$ ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกจะมีต่างกันไปตามระบบผลึกแบบต่างๆ

ในกรณีอย่างง่ายเมื่อพิจารณาผลึกที่มีโครงสร้างแบบ cubic ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกดังนี้ $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

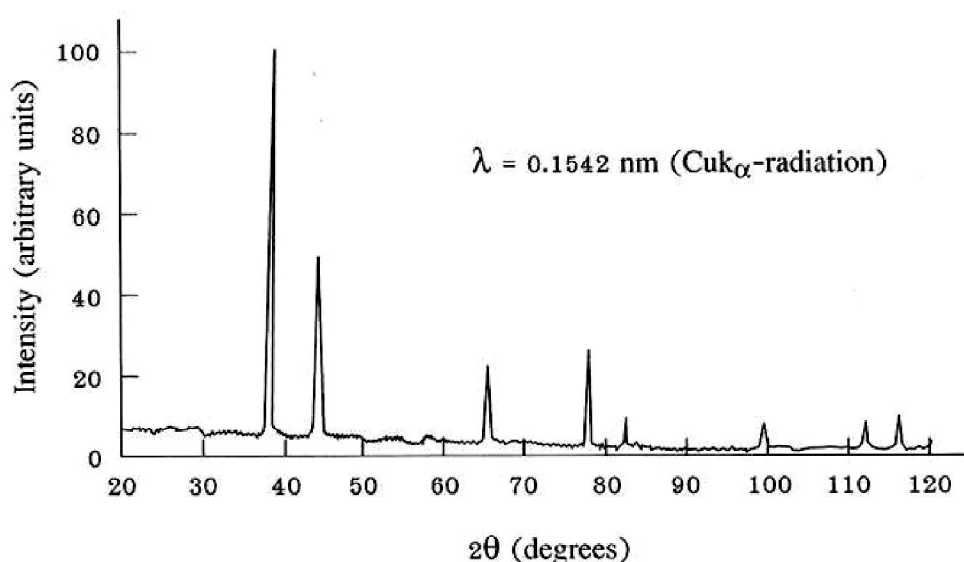
$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2.9)$$

จากสมการ (2.9) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการ (2.10) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกดังสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.10)$$

เมื่อ a คือ ค่าคงที่แลตทิซ
 λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
 θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

ระยะต่างๆในผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไประยะใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) มุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่าของมุมสะท้อนเมื่อนำฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นมาไปวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆจะถูกตรวจหาค่าทั้งสองจะนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่าแบบอย่างการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกันเมื่อได้ข้อมูลดังกล่าวมาแล้วก็จะสามารถคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.25 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

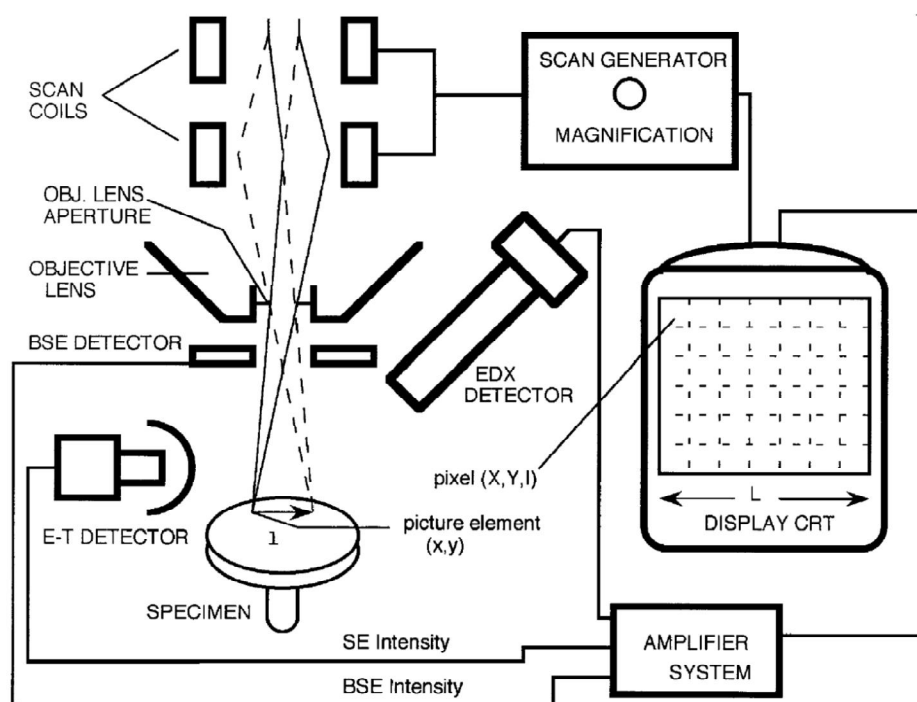
จากสมการ Sherrer's equation สามารถหาค่าขนาดของเม็ดผลึกได้ดังนี้(Grain size)

$$D = \frac{K\lambda_x}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (2.11)$$

- เมื่อ D คือ ขนาดของเม็ดผลึก
 K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดผลึก ($0.89 \leq K \leq 0.94$)
 θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน
 $\beta_{2\theta}$ คือ ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน(Full width at half-Maximum of the diffraction peak : FWHM)
 λ_x คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

2.1.4.2 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM)

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดพิจารณาได้จากรูปที่ 2.8 ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดได้ดังนี้ แหล่งกำเนิดของอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งเป็นหัวแคโทดมีอยู่ 3 ชนิดคือทั้งสแตน, Lanthanum Hexaboride (LaB6), และ Field emission ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจาก Filament และเร่งกลุ่มอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1 - 40 kV และกลุ่มอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกบีบให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดย Condenser lens และปรับโฟกัสโดย Objective lens และถ้าต้องการให้ลำอิเล็กตรอนกวาดไปทั่วผิวของตัวอย่างก็สามารถควบคุมได้โดยใช้ Scanning coils ซึ่งจะกวาดบนระนาบ x-y ทำให้เกิดสัญญาณขึ้นมาแล้วหัววัด(Detector) จะวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นและถูกแปลงเป็นข้อมูลที่ต้องการโดยชุดระบบทางอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อลำอิเล็กตรอนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนโฟกัสลงบนผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดอันตรกิริยากันระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกยิงลงมาและอะตอมของตัวอย่าง อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกยิงลงมากับอะตอมของตัวอย่างสามารถแบ่งได้ 2 แบบตามลักษณะการชนคือแบบยืดหยุ่น (Elastic) และแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) ซึ่งทั้งสองลักษณะจะให้สัญญาณที่จะนำมาใช้งานแตกต่างกัน



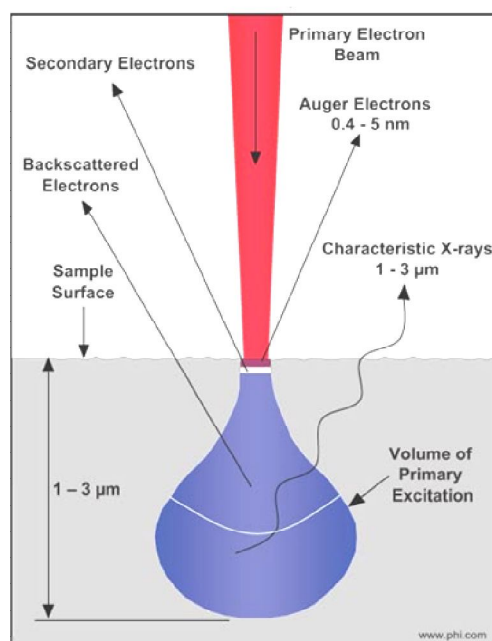
รูปที่ 2.26 โครงสร้างหลักกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

1. การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)

เมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งเป็นอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) ตกกระทบลงบนตัวอย่างทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิกระเจิงออกมาและมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนซึ่งน้อยมากให้กับอะตอมของตัวอย่างอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาเราเรียกว่า Backscatter electron ซึ่งสามารถนำสัญญาณดังกล่าวมาสร้างเป็นสัญญาณภาพบนจอCRT ได้

2. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)

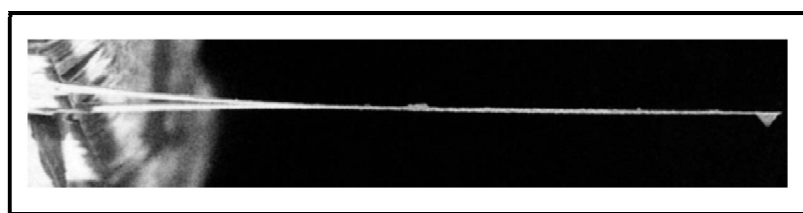
กลุ่มของอิเล็กตรอนปฐมภูมิเมื่อชนกับอะตอมของตัวอย่างแล้วจะเกิดการถ่ายเทพลังงาน จลน์และเกิดอันตรกิริยากันกับอะตอมของตัวอย่างทำให้เกิดสัญญาณต่างๆซึ่งเป็นสัญญาณที่ Detector สามารถวัดได้ได้แก่อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons), Auger electrons, Characteristics X-ray, Continuous X-ray และ Fluorescence X-ray เป็นต้นดังรูปที่ 2.24 อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นโคจร (Shell) ต่างๆของอะตอมตัวอย่างถ้าพลังงานที่ให้มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรกับนิวเคลียสของอะตอมตัวอย่างจะทำให้อิเล็กตรอนในชั้นโคจรหลุดออกมาเราเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งสามารถนำไปใช้ศึกษาลักษณะผิวหน้าของตัวอย่างได้



รูปที่ 2.27 ผลจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง

2.3.3 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope : AFM)

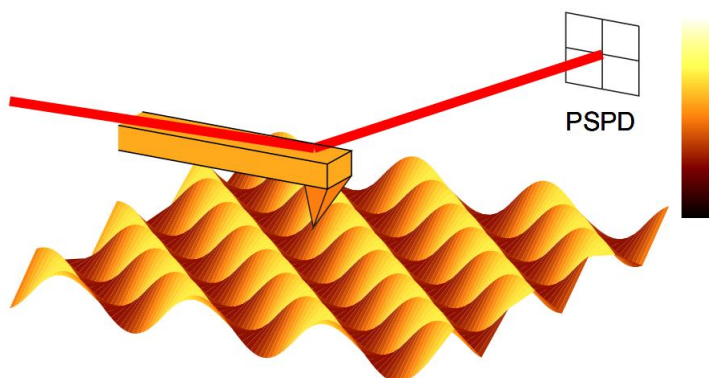
กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) ได้สร้างขึ้นในปี 1986 โดย Binnig, Quate และ Gerber ซึ่งใช้หัวโพรบปลายแหลมเคลื่อนที่กวาดไปทั่วทั้งผิวหน้าของชิ้นงาน โดยที่โพรบก็คือเข็มปลายแหลมเล็กๆ ที่ติดอยู่บริเวณปลายของคาน (Cantilever) ที่สามารถโค้งงอได้ตามแรงที่เกิดขึ้นระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงาน



รูปที่ 2.28 คาน (Cantilever) ที่ใช้ในการวัด

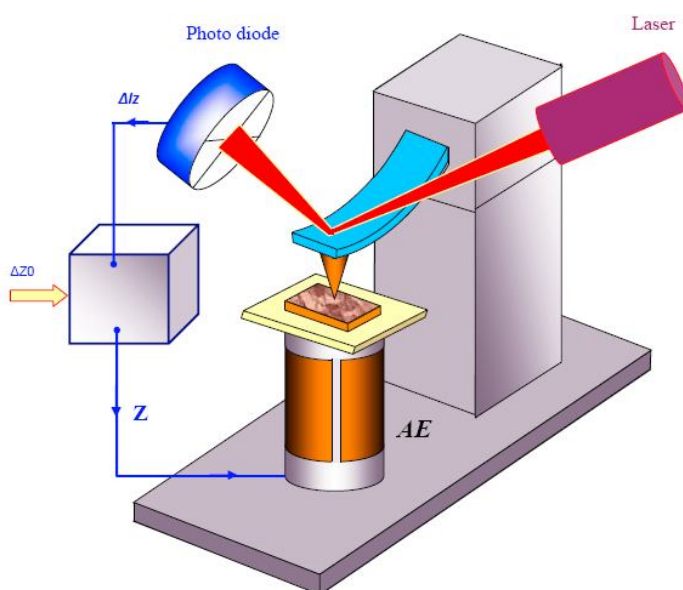
ในช่วงเริ่มแรก กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมใช้การทะลุผ่านกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนที่ปลายคานเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคาน แต่ในปัจจุบัน กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมใช้เทคนิคทางแสงเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคานแทนดังรูปที่ 2.27 ได้แสดงให้เห็นการทำงานของกล้อง

จุลทรรศน์แรงอะตอมซึ่งสามารถโค้งงอได้ โดยแสงเลเซอร์เดินทางตกกระทบบนคานแล้วสะท้อนออกมาตกกระทบบนตัวตรวจจับทางแสงสองตัวที่อยู่ติดกัน จากนั้นทำการวัดผลต่างของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับทางแสงจึงทำให้สามารถวัดการโค้งงอของคานได้



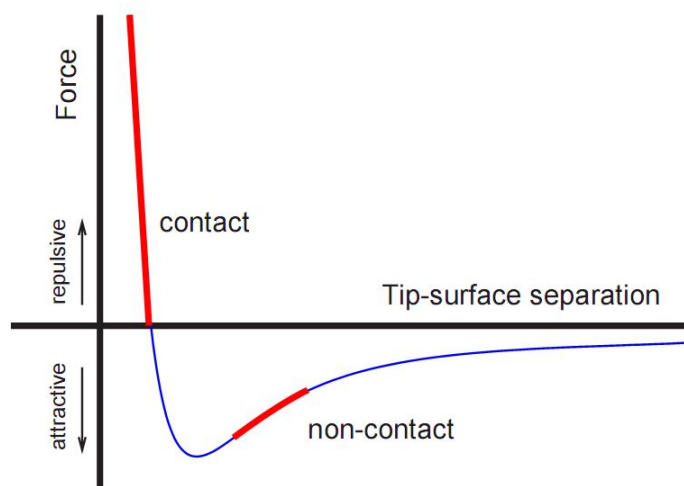
รูปที่ 2.29 แผนภาพระบบแสงที่ใช้วัดการโค้งงอของคาน

การเคลื่อนที่ของเข็มหรือชิ้นงานที่มีความแม่นยำสูงนั้นใช้อุปกรณ์ที่สร้างจากสารเซรามิก piezoelectric เป็นส่วนของการเคลื่อนที่ของฐานคู่ได้จากรูปที่ 2.28 โดยการเคลื่อนที่ของวัสดุ piezoelectric นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงก็เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่เข้าไปกระตุ้น ซึ่งส่วนมากมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ตัวควบคุมการเคลื่อนที่ที่สามารถควบคุมได้แม่นยำในระดับอังสตรอม ในแนวแกน x, y และ z โดยที่แกน z คือแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน



รูปที่ 2.30 ระบบการวัดล้อจุลทรรศน์แรงอะตอม

จากการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมสามารถทำงานได้ในสองโหมดหลัก คือ การทำงานแบบมีการควบคุมแบบย้อนกลับและ การทำงานแบบไม่มีการควบคุมแบบย้อนกลับ โดยการทำงานแบบมีการควบคุมแบบย้อนกลับนั้นจะกำหนดให้ปิเอโซเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของ ชีงงาน (หรือ เข็ม) สามารถเคลื่อนที่ขึ้นและลงได้โดย รักษาระยะห่างระหว่างเข็มกับชีงงานมีค่าคงที่ส่งผลให้แรงระหว่างเข็มกับชีงงานมีค่าคงที่ด้วย ซึ่งโหมดนี้เรียกว่า โหมดแรงคงที่ (Constant force) ทำให้สามารถแสดงให้เห็นภาพลักษณะพื้นผิวของชีงงานที่น่าเชื่อถือได้



รูปที่ 2.31 กราฟแรงอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่ขึ้นอยู่กักระยะห่าง

ส่วนการทำงานแบบที่สองไม่มีการควบคุมแบบย้อนกลับ เป็นโหมดที่ควบคุมให้การเคลื่อนที่ในตำแหน่งแนวแกน z คงที่ และวัดการโค้งงอของคาน ซึ่งโหมดนี้มีประโยชน์สำหรับชีงงานที่มีลักษณะพื้นผิวก่อนข้างเรียบมากที่ความละเอียดสูง

การวัดเพื่อให้ได้ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมนั้น สามารถทำได้หลายวิธีด้วยการใช้อันตรกิริยาที่แตกที่เกิดขึ้นระหว่างเข็มกับชีงงานต่าง ซึ่งอันตรกิริยาที่ใช้วัดหลักๆมีอยู่ด้วยกันสามวิธี คือ โหมดสัมผัส (contact mode), โหมดสัมผัสแบบสั่น (tapping mode) และ โหมดไม่สัมผัส (non-contact mode)

โหมดสัมผัส คือ เป็นวิธีการวัดพื้นฐานที่ใช้กันทั่วไปของ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมซึ่งเข็มและชีงงานมีระยะใกล้กันมากขณะที่ลากเข็มผ่านชีงงาน โดยการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับชีงงานนั้นใกล้กันในระดับที่มีแรงผลักระหว่างโมเลกุลเกิดขึ้น บริเวณที่เกิดแรงผลักรับคือบริเวณที่เส้นกราฟอยู่เหนือแกน x ปัญหาที่สำคัญของโหมดสัมผัส นั้นคือมีแรงซึ่งมีค่ามากเกิดในแนวตามพื้นผิวขณะที่ลากเข็มผ่านชีงงาน

โหมดสัมผัสแบบสั่นเป็นโหมดการทำงานพื้นฐานอีกชนิดหนึ่งที่ใช้กับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมทั่วไป ขณะทำงานคานจะเกิดการสั่นด้วยความถี่ที่เหมาะสมและมีตำแหน่งอยู่เหนือพื้นผิว

ของชิ้นงาน ด้วยการสัมผัสพื้นผิวชิ้นแบบสั้นนี้ ทำให้แรงเสียดทานมีค่าน้อยมาก แต่การสัมผัสระหว่างเข็มกับชิ้นงานนั้นยังอยู่ในช่วงที่เกิดการผลึกเหมือนเดิม เนื่องจากการสัมผัสระหว่างเข็มกับชิ้นงานเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงตามแนวพื้นผิวลดลงขณะที่เข็มลากผ่านพื้นผิวชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานมีความอ่อนมาก การวัดด้วยโหมคสัมผัสแบบดังเป็นทางเลือกที่ดีกว่าการวัดด้วยโหมคสัมผัส

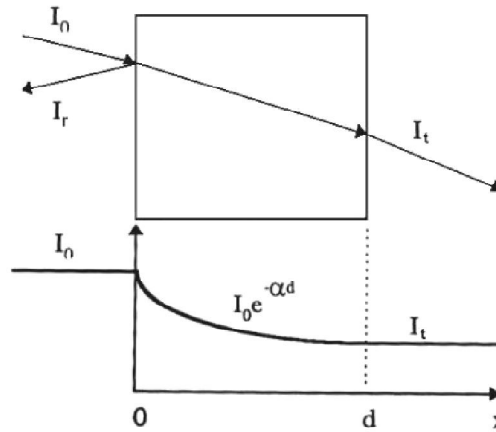
โหมคไม่สัมผัส เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการสร้างภาพของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมได้ ซึ่งคันต้องอยู่เหนือพื้นผิวของชิ้นงานโดยที่ระยะห่างระหว่างเข็มกับชิ้นงานต้องไม่ห่างเกินกว่าขอบเขตของแรงผลักระหว่างโมเลกุล โหมคการทำงานนี้ สร้างขึ้นได้ยากภายใต้สภาวะปกติ ซึ่งสามารถใช้วัดสิ่งเจือปนที่อยู่บนพื้นผิวได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว

สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างสามารถทำได้โดยการลากเส้นผ่านจุดที่สนใจบนภาพที่ได้จาก กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมซึ่งทำให้ได้ลักษณะโครงร่างของเส้นที่บอกถึงความลึก ความสูงของพื้นผิว และเราจะใช้ค่าความขรุขระ Root mean square (R_{rms}) เพื่อเป็นค่าที่บอกสภาพความขรุขระของบริเวณพื้นผิวดังกล่าวได้เป็น

$$R_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_1^N (h_i - \bar{h})\right)^2} \quad (2.12)$$

2.1.4.2 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยระบบยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-Visible Spectroscopy)

การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยระบบยูวี-วิสิเบิล(UV-Vis) สเปกโทรสโกปี มาใช้ในการวิเคราะห์สารเริ่มเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1930 ซึ่งนับเป็นสเปกโทรสโกปีแบบดูดซับชนิดแรก ช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ในช่วงของยูวีอยู่ระหว่าง 190 -400 นาโนเมตร และขยายไปถึงช่วงของวิสิเบิล (VIS) จะอยู่ระหว่าง 380-800 นาโนเมตร โดยหลักการการทะลุผ่านของแสงก็คือเมื่อแสงเดินทางไปถึงตกกระทบวัสดุ แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิววัสดุและจะมีแสงบางส่วนเดินทางเข้าไปข้างในวัสดุ แสงบางส่วนดังกล่าวจะถูกดูดกลืนและจะมีบางส่วนที่ทะลุออกมา ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.32 ลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบผิววัสดุ

I_r คือ ความเข้มแสงที่สะท้อนจากผิววัสดุ

I_t คือ ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านผิววัสดุ

เราสามารถให้นิยามของสัมประสิทธิ์ การสะท้อนแสง R (Optical Reflectivity Coefficient) สัมประสิทธิ์ การดูดกลืน α (Optical Absorption Coefficient) และสัมประสิทธิ์ การทะลุผ่านแสง (Optical Transmittance Coefficient) ได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์ การสะท้อนแสง
$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.13)$$

ดังนั้นความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่ตัววัสดุมีค่า

$$I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.14)$$

จากนั้นเมื่อแสงเดินทางเข้าไปในวัสดุแสงจะถูกดูดกลืน จากรูปจะเห็นว่าแสงจะมีค่าความเข้มแสงลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง d

ในกรณีที่มีการสะท้อนที่ผิวด้านหลัง ความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านออกด้านหลังของวัสดุ คือ

$$I_t = (1 - R)^2 I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.15)$$

สัมประสิทธิ์ การทะลุผ่านแสง
$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \quad (2.16)$$

สัมประสิทธิ์ การดูดกลืนแสง
$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left[\frac{T}{(1 - R)} \right] \quad (2.17)$$

$$\alpha = \frac{1}{d}(-\ln T) = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (2.18)$$

ในการศึกษาสมบัติทางแสงของสารอินทรีย์นั้น โดยระดับพลังงานในแต่ละช่วง มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงภายในของโมเลกุลที่มีสภาวะการเร้าต่างกันของการวัด โดยที่ช่วงของรังสีแกมมา(γ -ray) และรังสีเอกซ์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนและทำให้เกิดการแตกของพันธะซึ่งนำไปสู่รายละเอียดของการวิเคราะห์โครงสร้างของสารในช่วงของ รังสีไกลอินฟราเรด (far infrared) คาบเกี่ยวกับไมโครเวฟมีผลต่อการเร้าให้เกิดการหมุนหรือการเคลื่อนที่ของโมเลกุล

ระดับพลังงานในช่วงของอัลตราไวโอเลตจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนที่เกิดพันธะเกิดสภาวะเร้าสู่ระดับออร์บิทัลที่มีพลังงานสูงขึ้น ซึ่งจะสามารถบอกลักษณะของโมเลกุล ของสารประกอบอินทรีย์บางอย่างได้เช่น มีพันธะคู่ที่คอนจูเกต(conjugated double bond) เนื่องจากผลจากการเคลื่อนที่ย้ายของอิเล็กตรอน (electron delocalization)เป็นผลให้ช่องว่างของระดับพลังงานระหว่างHOMO และ LUMO ลดลง ซึ่งหมายถึงพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นการเร้าของอิเล็กตรอนก็จะน้อยลงด้วย การดูดซับพลังงานของโมเลกุลประเภทนี้ จึงอยู่ที่ความถี่ต่ำลง

ในการดูดกลืนแสงช่วงยูวีปริมาณแสงที่พอเหมาะทำให้เกิดการเร้าอิเล็กตรอน (electronic excitation) จากสถานะพื้น (ground state) ไปสู่สภาวะเร้า (excited state) กล่าวคืออิเล็กตรอนจากระดับที่มีพลังงานต่ำจะถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานที่สูงกว่า พลังงานที่ดูดกลืนโดยโมเลกุลหรืออะตอมนั้นจะมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานที่สูงกว่า พลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลหรืออะตอมนั้นจะมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงาน(ΔE) ระหว่างสภาวะเร้ากับสถานะพื้น

ในการเร้าอิเล็กตรอนของพันธะซิกมา(σ -bond) จะใช้พลังงานสูงกว่า(ความยาวคลื่นสั้นกว่า) ในพันธะไพ(π -Bond) เนื่องจากช่วงพลังงานระหว่างออร์บิทัลที่ไม่ก่อพันธะ(nonbonding) กับออร์บิทัลก่อพันธะ(bonding) ของพันธะซิกมากว่าในพันธะไพ

โมเลกุลที่ดูดกลืนแสงยูวีช่วงความยาวคลื่นต่ำประมาณ 150 นาโนเมตรลงมามักจะประกอบด้วยพันธะซิกมาเนื่องมาจากเป็นพลังงานที่สามารถเร้าอิเล็กตรอนของพันธะซิกมาได้ แต่เนื่องจากช่วงของความยาวคลื่นที่ใช้มักอยู่ที่ประมาณ200 -400 นาโนเมตรสำหรับยูวีและช่วง200–800 nm สำหรับยูวีวีส์เบิล ดังนั้นโมเลกุลส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับยูวีสเปกโทรโฟโตมิเตอร์มักจะมีสารประกอบที่มีพันธะไพ

ตารางที่ 2.6 ค่าของความยาวคลื่น, พลังงาน และชนิดของการ excitation

Spectral Region	Wavelength Length(nm)	Energy Range(cm ⁻¹)	Energy Range(eV)	Type of Excitation
Vacuum-UV	10-180	1x10 ⁶ -55,600	124-6.89	Electronic
UV	200-400	55,600-25,000	6.89-3.10	Electronic
Visible	400-750	25,500-13,300	3.10-1.65	Electronic
Near IR	750-2,500	13,300-4,000	1.65-0.496	Electronic, Vibrational, overtones
IR	2,500-25,000	4,000-40,000	0.496-0.0496	Vibrations, Phonons

2.1.5 เซนเซอร์ความชื้น (Humidity Sensor)

2.1.5.1 หลักการของเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น

2.1.5.1.1 ความชื้น (Humidity)[30]

ความชื้น (humidity) หมายถึง ปริมาณน้ำที่ปรากฏอยู่ในสถานะของแก๊สในอากาศ หรือในแก๊สชนิดอื่น รูปแบบการวัดความชื้นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) โดยความชื้นสัมพัทธ์ เป็นหน่วยการวัดที่นิยมใช้กันมากที่สุด ความหมายของความชื้นสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนของความดันไอน้ำ ณ หนึ่งนั้น ต่อความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิเฉพาะ โดยทั่วไปแสดง ในรูปของเปอร์เซ็นต์ดังสมการที่ 2.19

$$RH(\%) = P_w/P_s \times 100 \quad (2.19)$$

โดยที่ RH(%) คือ ความชื้นสัมพัทธ์(%)

P_w คือ ความดันไอน้ำ บางส่วน(mbar)

P_s คือ ความดันไอน้ำ อิ่มตัว(mbar)

ความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) คือ อัตราส่วนมวลของไอน้ำ ต่อปริมาตรของอากาศ หรือแก๊ส อาจเปรียบได้ว่าเป็นความหนาแน่น หรือความเข้มข้นของไอน้ำ ในอากาศ (Suzuki, 2004) แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.20

$$d_w = [M_w/(V_w+V_g)] = M_w/V \quad (2.20)$$

โดยที่	d_w	คือ ความชื้นสัมบูรณ์ (kg/m^3)
	M_w	คือ มวลของไอน้ำ (kg)
	V_w	คือ ปริมาตรของไอน้ำ (m^3)
	V_g	คือ ปริมาตรของอากาศแห้ง (m^3)
	V_g	คือ ปริมาตรของอากาศแห้งและไอน้ำ รวมกัน (m^3)

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) คือ อุณหภูมิซึ่งความดันไอน้ำจริงในอากาศหรือแก๊ส มีค่าเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว ณ อุณหภูมินี้ ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าเป็น 100% และไอน้ำเริ่มเกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำในอากาศ หรือ แก๊สจะไม่สามารถเก็บกักปริมาณไอน้ำได้มากไปกว่านี้ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลงกว่าจุดนี้ ความดันไอน้ำอิ่มตัวก็จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ในขณะที่ความดันไอน้ำจริงยังคงเท่าเดิม ส่งผลให้ความดันไอน้ำจริงในอากาศมีค่าเกินกว่าค่าความดันไอน้ำอิ่มตัว และเกิดการควบแน่นของไอน้ำ กลายเป็นหยดน้ำมากขึ้นตามลำดับ เหมือนกับปรากฏการณ์ที่หยดน้ำเกาะอยู่รอบ ๆ แก้ว ที่มีน้ำแข็งใสอยู่ สามารถอธิบายได้ว่าอุณหภูมิของน้ำในแก้วมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศในขณะนั้น จึงทำให้เกิดการควบแน่นและกลายเป็นหยดน้ำที่ข้างแก้วและอุณหภูมิจุดน้ำค้างจะแปรเปลี่ยนตามค่าความดันในขณะนั้นด้วย

นอกจากนี้ความชื้น (Humidity) ยังเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงปริมาณของน้ำในสถานะแก๊สที่ปนอยู่ในอากาศหรือ แก๊สชนิดอื่น โดยมีหน่วยวัดเป็นความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity) หรือความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ความชื้นสัมบูรณ์เป็นการวัดอัตราส่วนของมวลไอน้ำ เทียบกับมวลอากาศแห้งที่รวมตัวอยู่ในปริมาตรเดียวกัน แต่หน่วยการวัดความชื้นที่นิยมใช้มากกว่า คือความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นการวัดความชื้นโดยคิดอัตราส่วนมวลของไอน้ำ ในอากาศเทียบกับค่ามวลไอน้ำ ในอากาศอิ่มตัวสูงสุดที่อุณหภูมิเดียวกัน มีหน่วยเป็น %RH ความชื้นมีผลต่อชีวิตประจำวัน ในทางอุตสาหกรรมต้องมีการควบคุมปริมาณความชื้นอย่างดี โดยเฉพาะอุตสาหกรรมอาหารและยา ความชื้นมีผลโดยตรงต่อคุณภาพ และระยะเวลาในการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์วงจรรวม และในอุตสาหกรรมอีกหลาย ๆ ประเภท

2.1.5.1.2 เซนเซอร์ความชื้น (Humidity Sensor)[30]

เซนเซอร์ความชื้น คือ อุปกรณ์ตัวตรวจวัดปริมาณไอน้ำ ในบรรยากาศและสามารถบอกปริมาณความชื้นในบรรยากาศขณะนั้น ได้อยู่ในรูปของความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) โดยเซนเซอร์วัดความชื้นที่ดีสามารถใช้ในงานด้านต่างๆ ได้อย่างกว้าง จะต้องมีความไวสูงในช่วงพิสัย

อุณหภูมิและความชื้นกว้าง ให้ค่าความชื้นที่แน่นอน มีฮีสเทอรีซิสน้อย ทนทาน มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นเร็ว ทนทานต่อสิ่งปนเปื้อน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เชื่อมต่อกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ง่าย โครงสร้างไม่ซับซ้อน และมีราคาถูก

เซนเซอร์วัดความชื้นหลากหลายชนิดได้รับการพัฒนา เพื่อให้เหมาะกับประเภทของการใช้งาน ซึ่งมีหลักการทำงานแตกต่างกันออกไป เช่น ใช้วัสดุไวความชื้น ใช้ไซโครมิเตอร์ (Psychomotor) แบบกระเปาะเปียก-แห้ง ใช้การวัดจุดน้ำค้าง ใช้การวัดอินฟราเรด (Brion, 1986) การพิจารณาเลือกใช้งานอาจเลือกจาก ขนาด น้ำหนัก ราคา ประสิทธิภาพ หรือการบำรุงรักษา ซึ่งหลักการตรวจวัดความชื้นแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของหลักการวัดความชื้นแบบต่าง [30]

วิธีการวัดความชื้น	หลักการทำงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
ใช้วัสดุไวความชื้น	อาศัยการเปลี่ยนแปลงทางกล(ขนาดความยาว ปริมาตรความเค้น)	- ไม่ต้องการพลังงาน - ไวต่ออุณหภูมิน้อย - ราคาถูก - ใช้งานง่าย	- ผลตอบสนองไม่เป็นเชิงเส้น - มีฮีสเทอรีซิส - ผลตอบสนองช้า
	อาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า (ความต้านทานความถี่ ค่าความจุไฟฟ้า)	- ใช้งานง่าย - ราคาถูก - มีขนาดเล็ก - บำรุงรักษาง่าย	- มีฮีสเทอรีซิส - ไวต่อสิ่งสกปรก
ใช้วิธีกระเปาะเปียก-กระเปาะแห้ง	ใช้การวัดอุณหภูมิ กระเปาะเปียก-แห้ง	ไม่ต้องทำการชั่งน้ำหนัก	- ต้องเปลี่ยนไส้กรองและเติมน้ำ ภาชนะอยู่เสมอ - ต้องการอากาศไหลผ่านด้วยอัตราการไหลสูง
ใช้วิธีวัดจุดน้ำค้าง	ใช้การวัดอุณหภูมิจุดน้ำค้างด้วยการตรวจรู้การควบแน่นโดยใช้ความเย็น	- มีความแม่นยำสูง - ย่านพลวัตกว้าง - ไม่ต้องทำการชั่งน้ำหนัก	- มีขนาดใหญ่ - ราคาแพง - ใช้พลังงานสูง - ต้องมีการทำความสะอาดสม่ำเสมอ
วัดรังสีอินฟราเรด	เลือกการดูดกลืน	- ใช้ได้กับแก๊สที่กัก	- ราคาแพง
	สเปกตรัมอินฟราเรดของอินทรีย์	กร่อน - ย่านพลวัตกว้าง	- อาจเกิดการรบกวนจากแก๊สชนิดอื่น

2.1.5.1.3 ประเภทของเซนเซอร์วัดความชื้น[30]

การแบ่งตัวเซนเซอร์ความชื้นตามชนิด สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดหลัก คือ วัสดุเซรามิก และวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งแต่ละชนิดมีหลักการทำงานดังนี้

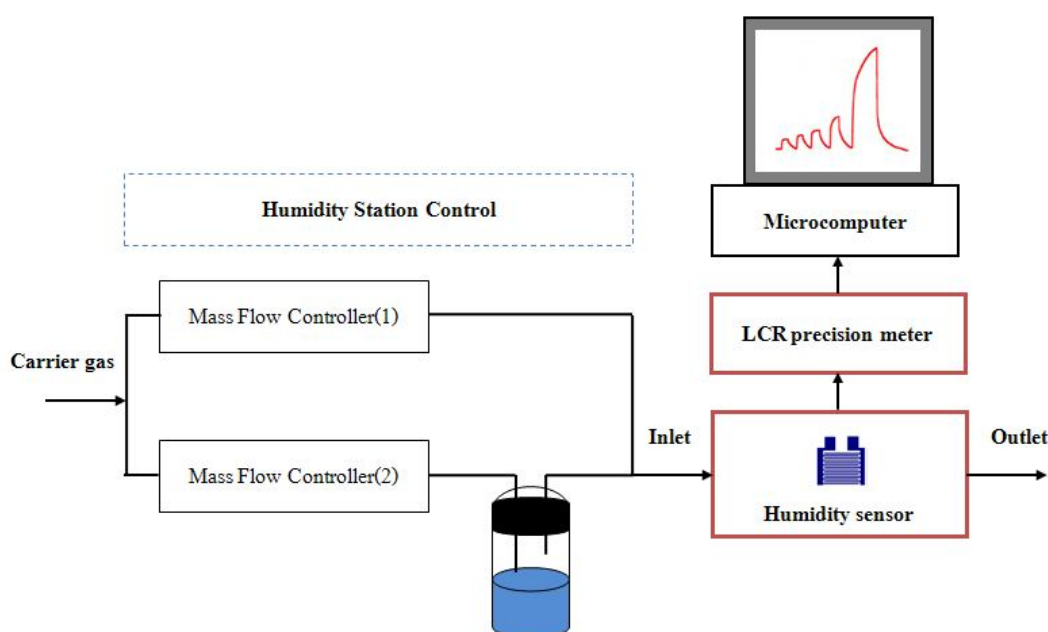
เซนเซอร์ที่ใช้เซรามิกเป็นตัวตรวจวัด(ceramic-based humidity sensor) เซนเซอร์ประเภทนี้สามารถจำแนกตามกลไกการตรวจวัด ได้แก่ ไอออนิก อิเล็กทรอนิกส์ ความจุไฟฟ้า และของแข็ง-อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีข้อดี คือ มีความแข็งแรง ทนทาน ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี มีเสถียรทางกายภาพ และอุณหภูมิ (Traversa, 1995) ข้อเสียของเซนเซอร์ความชื้นประเภทนี้ คือ ต้องมีการให้ความร้อนแก่เซนเซอร์ความชื้นเพื่อให้ตัวมันคืนสภาพ นอกจากนี้เซนเซอร์ความชื้นประเภทนี้ยังไวต่อสิ่งสกปรกด้วย

เซนเซอร์ที่ใช้วัสดุพอลิเมอร์เป็นตัวตรวจวัด(Polymer-based humidity sensor) เซนเซอร์ความชื้นประเภทนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากกว่าวัสดุเซรามิก เนื่องจากวัสดุเซรามิกจะเน้นไปที่งานประเภทความร้อนสูง และสภาพแวดล้อมมีการกัดกร่อน ซึ่งงานโดยทั่วไปจะใช้งานที่อุณหภูมิปกติ วัสดุพอลิเมอร์ที่นำมาใช้สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ พอลิอิเล็กโทรไลต์ และไดอิเล็กทริก ซึ่งการวัดความชื้นจะทำการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ความจุไฟฟ้า ความต้านทาน คลื่นเสียงพื้นผิว(Penza, et al., 1999) และเพียโซรีซิสทีฟ โดยเซนเซอร์วัดความชื้นประเภทพอลิอิเล็กโทรไลต์ จะใช้ความนำไอออน ของวัสดุประเภทไอออนิกเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น วัสดุจะมีความนำไอออนิกเพิ่มขึ้น กลไกการตรวจรู้อาศัยอัตราเร็วของอนุภาคประจุไอออนิก ซึ่งเคลื่อนที่เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก หรือความเข้มข้นประจุพาหะ (Yamazoe, 1986) สมดุลของประจุเกิดจากการที่ไอออนเคลื่อนที่ตรงกันข้ามประจุ นั่น คือ มีแรงไฟฟ้าสถิตดึงดูดกลุ่มขั้วที่อยู่กับที่ เมื่อน้ำ ดูดซึมผ่านวัสดุ อัตราเร็วของอนุภาคประจุที่เคลื่อนที่เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น ระหว่างกัน ในบริเวณใกล้เคียงกันเป็นอิสระมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานลดลง

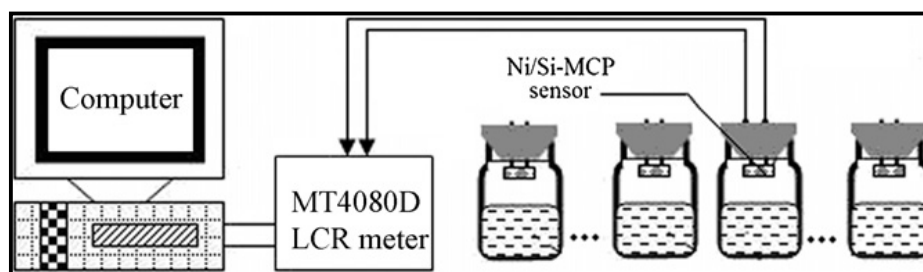
เซนเซอร์ความชื้นประเภทไดอิเล็กทริกใช้หลักการดูดซึมน้ำของโครงข่ายพอลิเมอร์ ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของน้ำ และพอลิเมอร์มีค่าต่างกันมาก คือ น้ำ จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์เท่ากับ 80 ส่วนพอลิเมอร์มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ประมาณ 5 ซึ่งเมื่อมีการดูดซึมน้ำ เข้าสู่โครงข่ายของพอลิเมอร์ จะส่งผลให้ค่าไดอิเล็กทริกของพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น จากหลักการนี้สามารถนำไปใช้สร้างเซนเซอร์ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปตามค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารวัดความชื้น ซึ่งสามารถวัดได้ง่าย วัสดุที่นิยมใช้เป็นชั้นไดอิเล็กทริกวัดความชื้น ได้แก่ พอลิไมด์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ทนทานต่อสารเคมีและการปนเปื้อน นอกจากนี้ Ralston (1994) ได้นำเสนอการใช้ PMMA เป็นวัสดุวัดความชื้น ซึ่งมีผลเสีย คือ มีความไม่แม่นยำ ที่ความชื้นสูง และมีฮิสเทอรีซิสมาก

2.1.5.1.4 ระบบการตรวจวัดความชื้น

ในการทดลอง และจากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาพบว่า ระบบการวัดความชื้นที่ใช้ทั่วไป มีอยู่ 2 ระบบ หลัก คือ ระบบที่ใช้ Mass flow ดังรูปที่ 2.31 โดยจะทำการปล่อยความชื้นเข้าไปที่ระบบวัด ซึ่งพบว่าระบบวิธีการนี้ จะค่อนข้างยุ่งยาก และซับซ้อน ส่วนอีกระบบหนึ่ง เป็นลักษณะระบบที่นิยมใช้เป็นอย่างมาก คือ ระบบแบบจุ่มกับความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่ได้จากการผสมสารละลายเกลือจนอิ่มตัว เป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูกและเป็นที่ยอมรับอยู่ในปัจจุบัน แสดงในรูป 2.32 ซึ่งเป็นงานวิจัยในปี 2010 ของ Fengjuan Miao ของชาวจีน และคณะ[31]



รูปที่ 2.33 ระบบการวัดเซนเซอร์ความชื้นแบบ Mass flow โดยระบบจะต่อ Mass flow เข้ากับขวดที่มีการปล่อยความชื้นต่างๆ และเก็บค่าเอาท์พุทออกมาด้วยเครื่อง LCR precision meter



รูปที่ 2.34 ระบบการวัดเซนเซอร์ความชื้นแบบจุ่มกับความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่ได้จากการผสมสารละลายเกลือจนอิ่มตัว[31]

ตารางที่ 2.8 ค่าความชื้นของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ[32]

ความชื้นสัมพัทธ์(%RH)			
อุณหภูมิ (°C)	ลิเทียมคลอไรด์ (lithium chloride)	โพแทสเซียมอะซิเตต (potassium acetate)	แมกนีเซียมคลอไรด์ (magnesium chloride)
0	11.23 ±0.54	-	33.66 ±0.33
5	11.26 ±0.47	-	33.60 ±0.28
10	11.29 ±0.41	-	33.47 ±0.24
15	11.30 ±0.35	23.28 ±0.53	33.30 ±0.21
20	11.31 ±0.31	23.40 ±0.32	33.07 ±0.18
25	11.30 ±0.27	23.11 ±0.25	32.78 ±0.16
30	11.28 ±0.24	22.51 ±0.32	32.44 ±0.14
35	11.25 ±0.22	21.61 ±0.53	32.05 ±0.13
40	11.21 ±0.21	-	31.60 ±0.13
45	11.16 ±0.21	-	31.10 ±0.13
50	11.10 ±0.22	-	30.54 ±0.13
55	11.03 ±0.23	-	29.93 ±0.16
60	10.95 ±0.26	-	29.26 ±0.18
65	10.86 ±0.29	-	28.54 ±0.21
70	10.75 ±0.33	-	27.77 ±0.25
75	10.64 ±0.38	-	26.94 ±0.29
80	10.51 ±0.44	-	26.05 ±0.34
85	10.80 ±0.51	-	25.11 ±0.39
90	10.23 ±0.59	-	24.12 ±0.46
95	10.07 ±0.67	-	23.07 ±0.52
100	09.90 ±0.77	-	21.97 ±0.60

ตารางที่ 2.8(ต่อ) ค่าความชื้นของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

ความชื้นสัมพัทธ์(%RH)			
อุณหภูมิ (°C)	โพแทสเซียมคาร์บอเนต (potassium carbonate)	แมกนีเซียมไนเตรด (magnesium nitrate)	โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride)
0	43.13 ±0.66	60.35 ±0.55	75.51 ±0.34
5	43.13 ±0.50	58.86 ±0.43	75.65 ±0.27
10	43.14 ±0.39	57.36 ±0.33	75.67 ±0.22
15	43.15 ±0.33	55.87 ±0.27	75.61 ±0.18
20	43.16 ±0.33	54.38 ±0.23	75.47 ±0.14
25	43.16 ±0.39	52.89 ±0.22	75.29 ±0.12
30	43.17 ±0.50	51.40 ±0.24	75.09 ±0.11
35	-	49.91 ±0.29	74.87 ±0.12
40	-	48.42 ±0.37	74.68 ±0.13
45	-	46.93 ±0.47	74.52 ±0.16
50	-	45.44 ±0.60	74.43 ±0.19
55	-	-	74.41 ±0.24
60	-	-	74.50 ±0.30
65	-	-	74.71 ±0.37
70	-	-	75.06 ±0.45
75	-	-	75.58 ±0.55
80	-	-	76.29 ±0.65
85	-	-	-
90	-	-	-
95	-	-	-
100	-	-	-

ตารางที่ 2.8(ต่อ) ค่าความชื้นของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

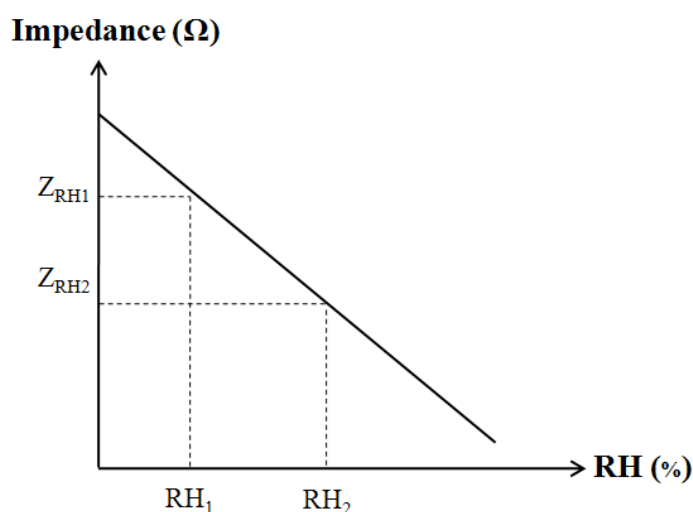
ความชื้นสัมพัทธ์(%RH)			
อุณหภูมิ (°C)	โพแทสเซียมคลอไรด์ (potassium chloride)	โพแทสเซียมอะซิเตด (potassium nitrate)	โพแทสเซียมซัลเฟต (potassium sulfate)
0	88.61 ±0.53	96.33 ±2.90	98.77 ±1.10
5	87.67 ±0.45	96.27 ±2.10	98.48 ±0.91
10	86.77 ±0.39	95.96 ±1.40	98.18 ±0.76
15	85.92 ±0.33	95.41 ±0.96	97.89 ±0.63
20	85.11 ±0.29	94.62 ±0.66	97.59 ±0.53
25	84.34 ±0.26	93.58 ±0.55	97.30 ±0.45
30	83.62 ±0.25	92.31 ±0.60	97.00 ±0.40
35	82.95 ±0.25	90.79 ±0.83	96.71 ±0.38
40	82.32 ±0.25	89.03 ±1.20	96.41 ±0.38
45	81.74 ±0.28	87.03 ±1.80	96.12 ±0.40
50	81.20 ±0.31	84.78 ±2.50	95.82 ±0.45
55	80.70 ±0.35	-	-
60	80.25 ±0.41	-	-
65	79.85 ±0.48	-	-
70	79.49 ±0.57	-	-
75	79.17 ±0.66	-	-
80	78.90 ±0.77	-	-
85	78.68 ±0.89	-	-
90	78.50 ±1.00	-	-
95	-	-	-
100	-	-	-

2.1.5.2 การตรวจสอบคุณลักษณะของเซนเซอร์วัดความชื้น[30,33]

2.1.5.2.1 ความถูกต้อง (Accuracy) โดยปกตินิยามเป็นความผิดพลาดที่มากที่สุดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างค่าที่อ่านได้กับค่าทางทฤษฎี บางครั้งค่านี้จะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกล เช่น เทอร์โมมิเตอร์อาจรับประกันความถูกต้องอยู่ภายใน 5%FSO (Full scale output, ค่าเต็มสเกลเอาต์พุต)

2.1.5.2.2 ความไว (Sensitivity) นิยามในเทอมของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ความไวโดยทั่วไปแล้วเป็นอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุต เมื่ออินพุตเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยความไวอาจแสดงในรูปของอนุพันธ์ของฟังก์ชันการถ่ายโอนเทียบกับสัญญาณอินพุต

ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์วัดความชื้นเทียบกับความชื้นที่เปลี่ยนไป แสดงในสมการที่ 2.21 รายละเอียดแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.35 ความไวของตัวตรวจวัดความชื้น

$$\text{Sensitivity (S)} = \Delta Z / \Delta RH \quad (2.21)$$

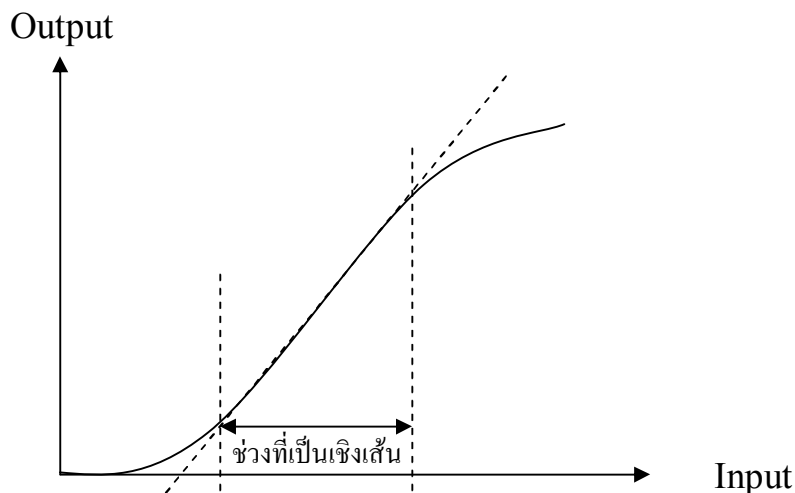
โดยที่ Sensitivity คือ ค่าความไวของเซนเซอร์วัดความชื้น มีหน่วยเป็น Ohm/%RH

ΔZ คือ ค่าผลต่างของอิมพีแดนซ์ในช่วงที่ทำการวัดมีหน่วยเป็น โอห์ม

ΔRH คือ ค่าผลต่างของความชื้นในช่วงที่ทำการวัดมีหน่วยเป็น %RH

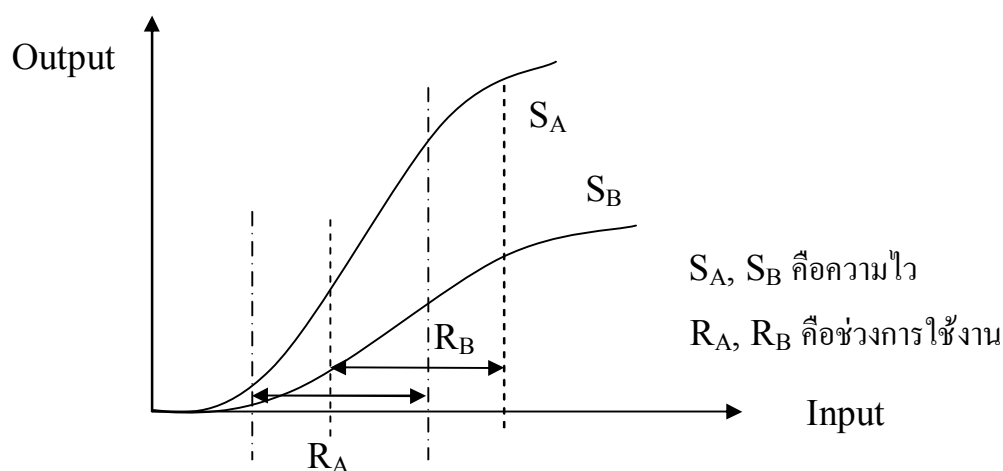
ชนิดของสัญญาณตอบสนองอาจเป็น ค่าความจุไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าหรืออื่น ๆ

2.1.5.2.3 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ความเป็นเชิงเส้นของเซนเซอร์ดูจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับอินพุตที่ใกล้เคียงกับเส้นตรงซึ่งอาจเป็นเส้นตรงในช่วงอินพุตแคบๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.34 โดยปกติการใช้งานเซนเซอร์จะใช้งานในช่วงที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น



รูปที่ 2.36 ความเป็นเชิงเส้นของเซนเซอร์

2.1.5.2.4 ช่วงการใช้งาน (Range) ช่วงการใช้งานของเซนเซอร์กำหนดว่าเป็นขีดจำกัดซึ่งตัวรับรู้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพช่วงการทำงานของเซนเซอร์ โดยปกติถูกกำหนดด้วยค่าอินพุตต่ำสุดและสูงสุดซึ่งสามารถจะวัดได้ช่วงการใช้งานจะแปรผกผันกับความไว กล่าวคือ ถ้าช่วงการใช้งานแคบความไวจะสูงถ้าช่วงการใช้งานกว้างความไวจะต่ำสิ่งที่สำคัญคือต้องไม่ทำการวัดนอกช่วงที่กำหนดเพราะจะทำให้เครื่องมือล้มเหลวในการทำงานหรืออุปกรณ์อาจเสียหายได้หรืออาจเสี่ยงต่อสุขภาพหรือความปลอดภัย



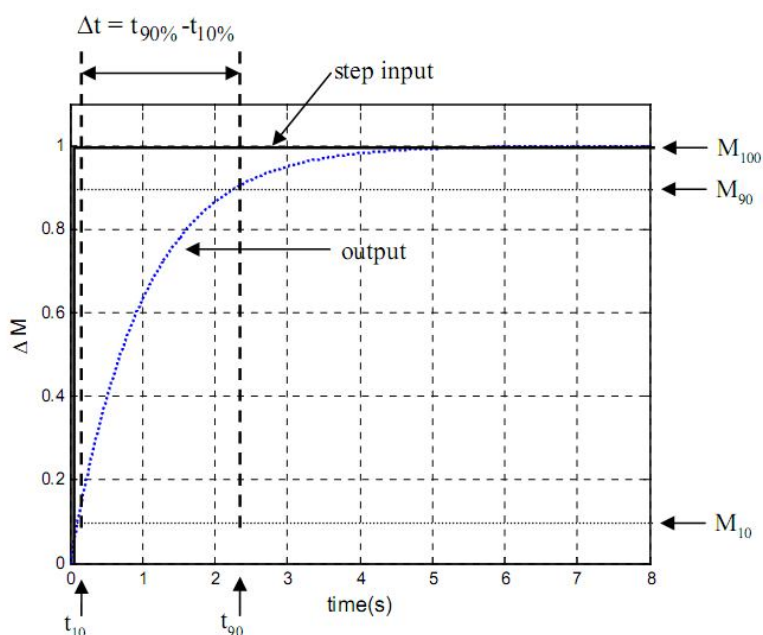
รูปที่ 2.37 ช่วงการใช้งานของเซนเซอร์

2.1.5.2.5 ความละเอียด (Resolution) ความละเอียดของเซนเซอร์จะสัมพันธ์กับอินพุตที่น้อยที่สุดหรือการเปลี่ยนแปลงอินพุตที่น้อยที่สุดที่มันสามารถตรวจจับได้โดยปกติจะแสดงในเทอมของการเพิ่มขึ้นที่น้อยที่สุดของอินพุตซึ่งสามารถวัดได้ถึงความละเอียดของการแสดงผลสูงขึ้นความสามารถในการวัดหรือถ้าจะมีขนาดเล็กลงตัวอย่างเช่น ตัวแสดงผลเป็นเลขทศนิยม 4 ตำแหน่ง 0.0001 หน่วยมีความละเอียดมากกว่าการแสดงผลการวัดด้วยทศนิยม 3 ตำแหน่ง 0.001 หน่วย

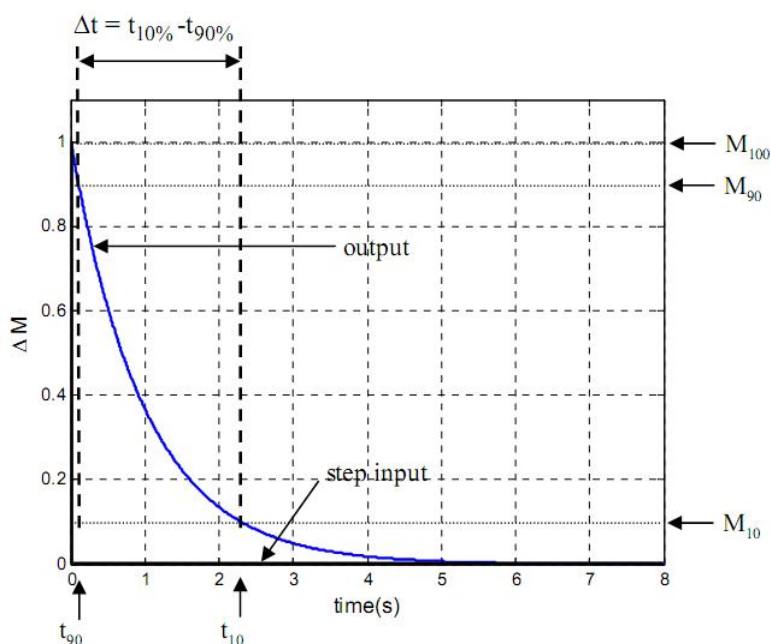
2.1.5.2.6 การตอบสนอง (Response) ความเร็วในการตอบสนองต่อความขึ้นทดสอบโดยการป้อนค่าความขึ้นแบบขั้นบันได โดยทั่วไปจะใช้การเพิ่มความขึ้นสัมพัทธ์จาก 1% จนถึง 93% และเทียบเวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์วัดความขึ้นเมื่อมีขนาดของการตอบสนองเพิ่มขึ้นเป็น 10% และ 90% แสดงในรูปที่ 2.36 สามารถคิดผลตอบสนองทางเวลาแบ่งเป็น เวลาขึ้น (Rise time) และเวลาลง (Fall time) ตามสมการที่ 2.22 และ 2.23 ซึ่งสามารถแสดงหลักการหาเวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์วัดความขึ้นแบบฟิล์มบาง โดยจากรูป M คือ ค่าเอาต์พุตที่วัดได้และ t คือ เวลาที่ใช้ มีหน่วยเป็นวินาที

$$\text{Rise time} = t_{M90} - t_{M10} \quad (2.22)$$

$$\text{Fall time} = t_{M90} - t_{M10} \quad (2.23)$$



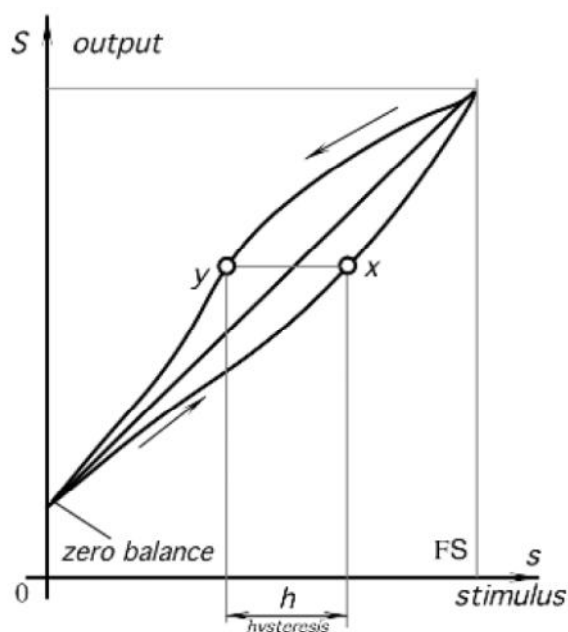
รูปที่ 2.38 ผลตอบสนองทางเวลาขาขึ้น (คายความขึ้น) ของเซนเซอร์วัดความขึ้น[30]



รูปที่ 2.39 ผลตอบสนองทางเวลาขาลง (คูชับความขึ้น) ของเซนเซอร์วัดความขึ้น[30]

2.1.5.2.7 การตอบสนองต่อความถี่ (Frequency Response) อินพุตที่ให้กับเซนเซอร์อาจมีค่าคงตัว หรือเปลี่ยนแปลงขึ้นลง จำนวนวัฏจักรของการเปลี่ยนแปลงค่าขึ้นลงในหนึ่งหน่วยเวลาเรียกว่าความถี่ เซนเซอร์แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการตอบสนองต่อความถี่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความถี่ธรรมชาติของเซนเซอร์ เซนเซอร์ที่มีความถี่ธรรมชาติสูงสามารถประยุกต์ใช้งานได้ทั้งการระสัดิต และการะพลวัต โดยทั่วไปเซนเซอร์ควรมีความถี่ธรรมชาติสูงกว่าความถี่ของสัญญาณอินพุตอย่างน้อย 2 เท่า ต้องไม่ใช่เซนเซอร์วัดสัญญาณอินพุตที่มีความถี่เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของเซนเซอร์เพราะจะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ ค่าที่ได้มีความผิดพลาดมาก และอาจทำให้เซนเซอร์เสียหาย

2.1.5.2.8 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) คือ ผลต่างสูงสุดของค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดจากค่าที่แท้จริงระหว่างการอ่านขึ้นกับการอ่านขาลงที่จุดๆเดียวกันดังรูปที่ 2.38 โดยจากรูป h แทนด้วย ค่าของฮิสเทอรีซิส ที่เกิดขึ้นกับเซนเซอร์



รูปที่ 2.40 ฮิสเทอรีซิส(Hysteresis) ที่เกิดขึ้นกับเซนเซอร์[34]

2.1.5.2.9 ความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability or Reproducibility) หรือความเที่ยง (Precision) ความสามารถในการทำซ้ำ คือจำนวนครั้งของการวัดได้ค่าเดิมภายใต้เงื่อนไขที่จำกัดเป็นการวัดความสามารถของเซนเซอร์เพื่อให้การแสดงผลค่าหรือการตอบสนองเหมือนเดิมหรือเท่าเดิมสำหรับการวัดซ้ำ ๆ ที่ค่าเดิมของปริมาณเดิมที่ถูกวัดความสามารถในการทำซ้ำ อาจจะทำให้ค่าเป็นบวกลบเปอร์เซ็นต์สูงสุดของการอ่านหรือภายใต้สภาวะจำกัดของแต่ละการอ่าน

2.1.5.2.10 ความเสถียร (Stability) ความเสถียรเป็นการวัดความเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุต จากเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขการป้อนอินพุตด้วยค่าคงตัวเป็นระยะเวลานาน ๆ

2.1.5.2.11 ความเชื่อมั่น (Reliability) คือความสามารถของเซนเซอร์ที่จะสามารถทำงานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด สำหรับเวลาที่กำหนดหรือจำนวนครั้งของการทำงานที่กำหนดขณะที่ยังคงอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของเซนเซอร์

2.1.5.2.12 อายุการใช้งาน (Operating life) ประโยชน์ของอายุการใช้งานของเซนเซอร์ คือเป็นเครื่องแสดงว่าระยะเวลาการใช้งานของเซนเซอร์ที่คาดว่าจะสามารถทำงานได้ภายใต้ข้อกำหนด อายุการใช้งานจะแสดงในรูปของเวลาหรือจำนวนครั้งของการใช้งานหรือจำนวนวัฏจักรที่เซนเซอร์ควรจะทนทานอยู่ได้

2.1.5.2.13 ความไวคู่ (Dual Sensitivity) ตามปกติเซนเซอร์จะถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการวัดปริมาณอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียวเท่านั้น เช่น วัดความดันหรือวัดแรง อย่างไรก็ตามเซนเซอร์อาจมีความไวต่อปริมาณอื่นด้วย เช่น อุณหภูมิ หรือความเร่ง ถ้านำตัวรับรู้ไปวัดปริมาณบางอย่างในกระบวนการที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เช่น ความดัน ก็สามารถเกิดความผิดพลาดขึ้นได้จากความไวคู่ คือเซนเซอร์วัดปริมาณสองปริมาณในเวลาเดียวกัน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทบทวนวรรณกรรม

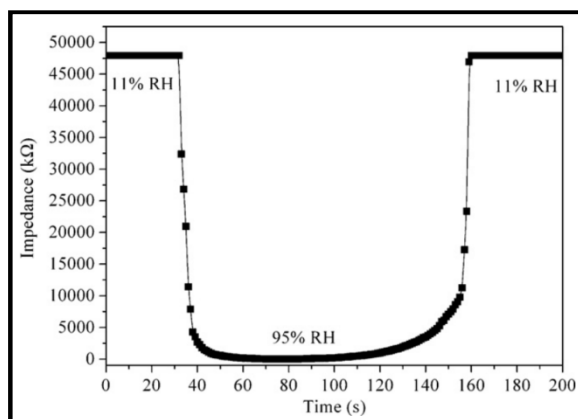
Seiyama (1983) สร้างเซนเซอร์วัดความชื้นโดยใช้วัสดุเซรามิก แบ่งออกเป็นแบบเซรามิกซ์ และแบบสารกึ่งตัวนำซึ่งใช้หลักการวัดค่าความต้านทานของที่เปลี่ยนไปของเซรามิก เมื่อได้รับความชื้น เซนเซอร์มีผลตอบสนองทางเวลา 15 วินาที มีความไว 36 ppm/%RH มีค่าความต้านทานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 25 MΩ Shimizu (1988) สร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบคิติดอล ใช้หลักการวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุเซนเซอร์วัดความชื้นมีความไว 2,922 ppm/%RH มีค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 285 pF มีผลตอบสนองทางเวลา 5 วินาที Denton (1990) สร้างเซนเซอร์วัดความชื้นโดยใช้พอลิอิมิด เป็นวัสดุไวความชื้นและสร้างวงจรที่สามารถแปลงความถี่ไฟฟ้าเป็นแรงดัน ซึ่งเซนเซอร์วัดความชื้นนี้มีผลตอบสนองทางเวลาเท่ากับ 600 วินาที มีความไว 13,470 ppm/%RH ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 0.49 V Blotshauser (1991) สร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุโดยใช้พอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น มีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบซี่หวี (Interdigitated) วัดความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% ได้ 1.5 pF และเซนเซอร์วัดความชื้นมีความไว 2,670 ppm/%RH แต่ผลตอบสนองทางเวลาช้ามาก ต่อมาได้พัฒนาเป็นเซนเซอร์วัดความชื้นแบบเทคโนโลยี CMOS เพื่อให้สามารถแปลงค่าความจุไฟฟ้าออกมาเป็นค่ากระแสไฟฟ้า ทำให้เซนเซอร์วัดความชื้นมีความไวเพิ่มขึ้นเป็น 5,333 ppm/%RH มีค่ากระแสไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 0.3 uA และเวลาในการตอบสนอง 30 วินาที

Sager (1995) สร้างเซนเซอร์วัดความชื้นโดยใช้การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกล (เปลี่ยนแปลงขนาด) ของพอลิอิมิดเมื่อได้รับความชื้น ผลที่ได้พบว่าเซนเซอร์วัดความชื้นมีความไว 60 ppm/%RH ผลตอบสนองทางเวลาอยู่ที่ 90 วินาที Kang (2000) ได้ออกแบบโครงสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบใหม่ ใช้หลักการของตัวเก็บประจุโครงสร้างของเซนเซอร์มีลักษณะเป็นแท่งไดอิเล็กทริกของพอลิอิมิด วางเรียงกันจำนวนมาก เพื่อเพิ่มความไวและมีตัวให้ความร้อนเพื่อให้เซนเซอร์วัดความชื้นคายความชื้นเร็ว ผลที่ได้ พบว่าเซนเซอร์วัดความชื้นมีความไว 2,307 ppm/%RH มีความเร็วในการตอบสนอง 1 วินาทีมีค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 13 pF Laville (2001) สร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุสำหรับใช้วัดความชื้นในลมหายใจ โดยใช้พอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น ผลตอบสนองทางเวลาของเซนเซอร์วัดความชื้นอยู่ที่ 1 วินาที เวลาในการคายความชื้นเท่ากับ 15 วินาที เซนเซอร์วัดความชื้นมีความไว 3,166 ppm/%RH และมีค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 12 pF ต่อมาในปี 2002 ได้พัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้น โดยติดตั้งตัวให้ความร้อนพบว่าผลตอบสนองทางเวลาลดลงอยู่ที่ 0.2 วินาที เวลาในการคายความชื้น 11 วินาที เซนเซอร์วัดความชื้นมีความไว 3,166 ppm/%RH และมีค่าความจุไฟฟ้าที่

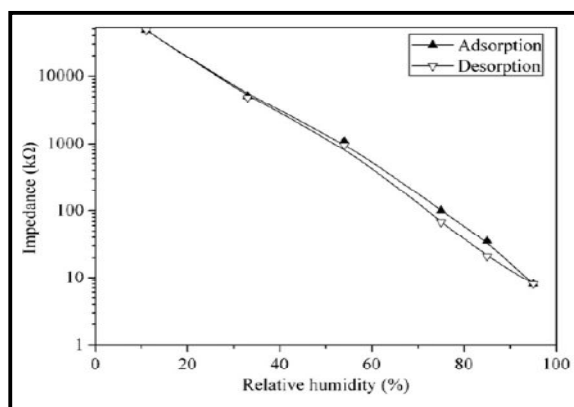
ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 12 pF Das (2003) พัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้น โดยใช้การวัดการเลื่อนเฟสของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ซึ่งจะป้อนสัญญาณเข้าสู่ตัวตรวจวัดความชื้นแบบซิลิคอนพอร์น และมีการชดเชยผลตอบสนองให้เป็นเชิงเส้นซึ่งผลตอบสนองทางเวลาของเซนเซอร์วัดความชื้น เท่ากับ 10 วินาที โดยวัดสัญญาณออกมาในรูปแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 3 mV เซนเซอร์วัดความชื้นมีความไว 333,333 ppm/%RH

Kann (2004) พัฒนาตัวเซนเซอร์วัดความชื้นโดยใช้ฟิล์มของซิลิคอนพอร์นเป็นวัสดุไวความชื้น วัดผลตอบสนองเป็นค่ากระแสไฟฟ้าโดยผลตอบสนองทางเวลาเท่ากับ 0.2 วินาที เซนเซอร์วัดความชื้นมีความไว 360,000 ppm/%RH มีค่ากระแสที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 1 nA Zhang (2005) พัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นโดยใช้ฟิล์มของ ZnO แบบเส้นนาโน (nanowires) และ ZnO แบบแท่งนาโน (nanorod) ซึ่งวัดความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุเมื่อได้รับความชื้น มีความต้านทานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 15 MΩ และมีความไว 20,700 ppm/%RH Packirisamy (2005) สร้างเซนเซอร์วัดความชื้น โดยวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฟิล์มพอลิไมด์ ซึ่งวางบนขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ผลตอบสนองทางเวลามีค่า 2 วินาที แต่มีข้อเสีย คือ เซนเซอร์วัดความชื้นมีผลตอบสนองต่อความชื้นสัมพัทธ์ 42% ขึ้นไป จึงไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการวัดความชื้นต่ำ และผลตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นยังไม่เป็นเชิงเส้น Steele (2006) พัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นความเร็วสูงแบบตัวเก็บประจุ โดยใช้ฟิล์มบางของอลูมิเนียมออกไซด์เป็นวัสดุไวความชื้น ซึ่งให้ผลตอบสนองทางเวลาเพียง 42 มิลลิวินาที โดยมีค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 55 pF และมีความไว 36,363 ppm/%RH แต่มีข้อเสีย คือ ผลตอบสนองที่ได้ไม่เป็นเชิงเส้น Ketthanom (2006) พัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นแบบเทคโนโลยีวงจรรวม โดยใช้การสเปกโตรสโกปีของพอลิไมด์เคลือบทับขั้วอิเล็กโทรดบนฐานรองซิลิคอน พบว่าเซนเซอร์วัดความชื้นมีผลตอบสนองที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 2.18 pF เซนเซอร์วัดความชื้นมีความไว 3,810 ppm/%RH เซนเซอร์มีเวลาในการดูดซึมความชื้น 1.3 วินาที มีเวลาในการคายความชื้น 247.1 วินาที

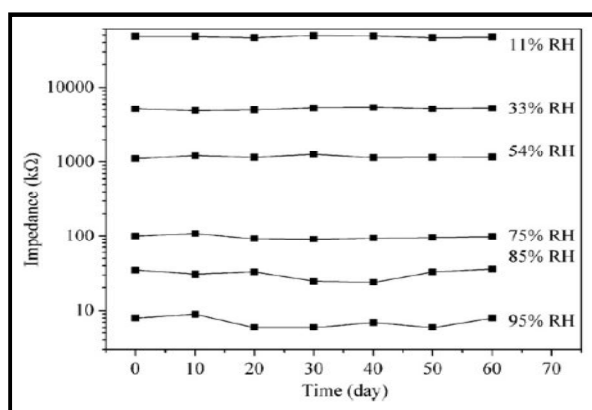
ปัจจุบันยังมีงานวิจัยที่ได้ที่ประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์วัดความชื้นอย่างต่อเนื่อง ในปี 2010 Hui-Juan Chen และคณะ [35] ได้ทำการสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบความจุไฟฟ้าโดยปลูกฟิล์มอะมอร์ฟัสคาร์บอนลงบนฐานรองรับซิลิคอนด้วยวิธี DC magnetron sputtering พบว่า เซนเซอร์มีการตอบสนองความชื้นตั้งแต่ 11-93%RH และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 33-95%RH มีเวลาในการดูดความชื้น 3 นาที และเวลาในการคายความชื้นเท่ากับ 4 นาที ซึ่งพบว่าการวิจัยนี้ ใช้เวลาในการตอบสนองนานมาก ในปีเดียวกัน Yong Zhang และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาสมบัติการตรวจวัดความชื้นจากเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นจากฟิล์ม $\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{TiO}_3$ ลงบนขั้วอินเตอร์ดิคิต ด้วยวิธีการ Spin-coat พบว่า เซนเซอร์มีการตอบสนองความชื้นตั้งแต่ 11-93%RH โดยมีเวลาในการดูดความชื้น 12 วินาที และเวลาในการคายความชื้นเท่ากับ 25 วินาที ที่ความถี่ 100 Hz และมีค่าฮิสเทอรีซิสเท่ากับ 3%RH แสดงในรูปที่ 2.39 – 2.41



รูปที่ 2.41 เวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์ทั้งช่วงเวลาในการดูดซับความชื้น และเวลาในการคายความชื้น



รูปที่ 2.42 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ที่เกิดขึ้นกับเซนเซอร์ความชื้น



รูปที่ 2.43 เสถียรภาพของเซนเซอร์ความชื้นที่วัดเป็นเวลา 70 วัน

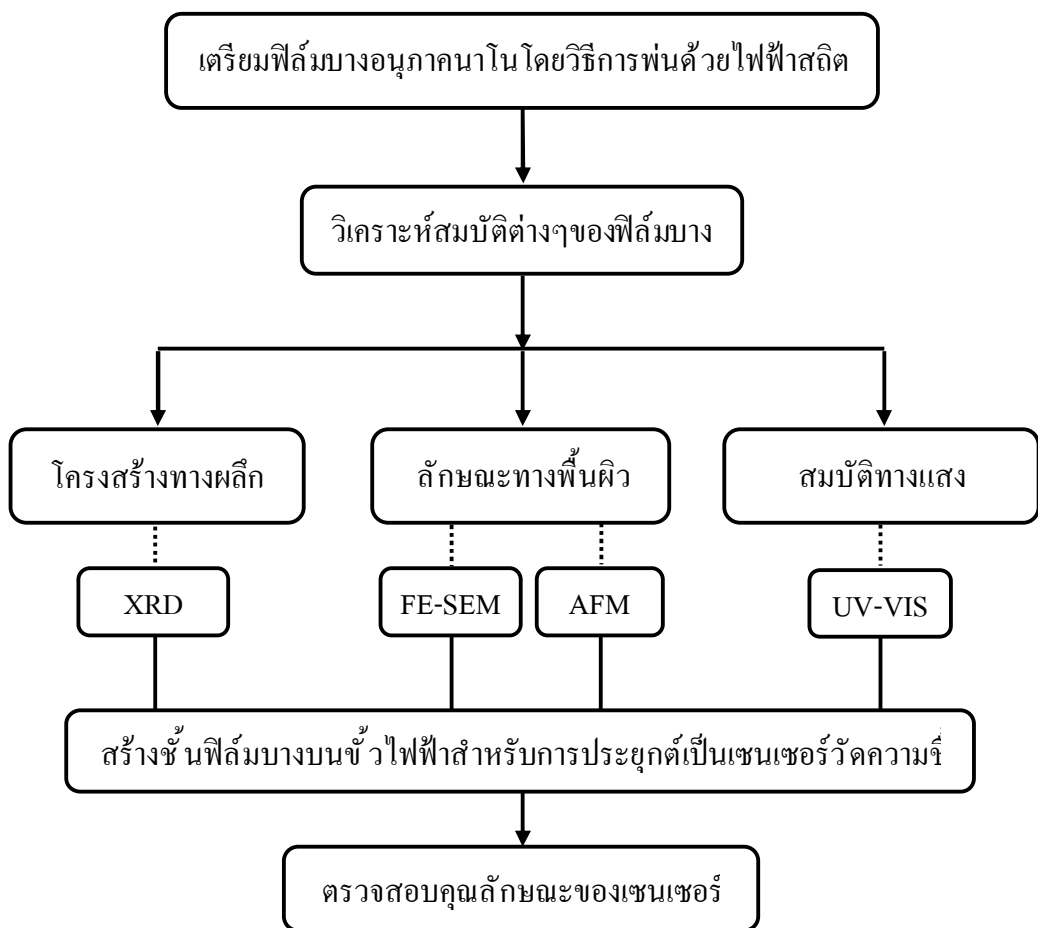
ตารางที่ 2.9 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นประเภทฟิล์มบาง[80]

ปี	ผู้ประพันธ์	หลักการ	วัสดุ	ความหนา ฟิล์ม (μm)	เวลาในการ ตอบสนอง (s)
1983	Hijikikawa, et al.	ความต้านทาน	พอลิเมอร์	10	100
1985	Tsuchitani, et al.	ความต้านทาน	ไอออนิก-โคพอลิเมอร์	10	120
1985	Jadhav, et al.	ความต้านทาน	AlOx	120 nm	20
1988	Shimizu, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์	1	15
1992	Sadaoka, et al.	แสง	พอลิเมอร์	5	60
1993	Bolzhauser, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์	10	30
1995	Roman, et al.	ความจุไฟฟ้า	PMMA	5-10	60-120
1996	Shibata, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์	1.3	15
2000	Kang, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์	2	1
2001	Qui, et al.	แรงดันไฟฟ้า	พอลิอิมิด์	3.8	20
2001	Laville, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์	0.65	1
2002	Laville, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์,BCB	0.65	0.4
2003	Tetelin, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์,BCB	1.6	0.4
2004	Kalkan, et al.	กระแสไฟฟ้า	ซิลิคอนนาโนเฟส	0.04-0.2	<0.2
2005	Kim, et al.	ความต้านทาน	คอปเปอร์-ไททานต	30-40	90
2008	Park, et al.	อิมพิแดนซ์	โพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต - ซิลเวอร์	-	120
2010	Chen, et al.	ความจุไฟฟ้า	อะมอร์ฟัสคาร์บอน	-	180
2010	Zhang, et al.	อิมพิแดนซ์	Bi _{0.5} K _{0.5} TiO ₃	-	12

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

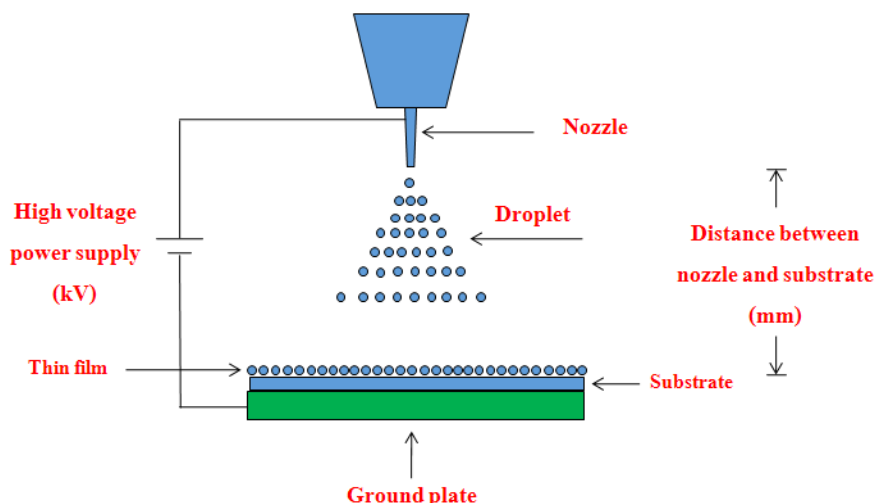
การดำเนินงานเริ่มจากการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน และศึกษาผลของเงื่อนไขที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินซึ่งได้แก่ โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิวและสมบัติทางแสง ด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งในขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางจะได้ทำการสร้างเงื่อนไขต่อไปและเมื่อตรวจสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบางจะนำเงื่อนไขที่เหมาะสมของการเตรียมฟิล์มบางสร้างเป็นชั้นฟิล์มบางบนขั้วไฟฟ้าเพื่อประยุกต์เป็นเซนเซอร์ความชื้นและจะทำการตรวจสอบคุณลักษณะของเซนเซอร์ต่อไปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยอธิบายได้ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ไคอะแกรมแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อประยุกต์ใช้งานในการเตรียมฟิล์มบางและสำหรับการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดยจากการศึกษาจากทฤษฎีเบื้องต้นพบว่า ระบบการเตรียมฟิล์มดังกล่าวมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง หลอด capillary หรือ หัวเข็มแผ่นกราวด์เพลท (ground plate) ระบบตรวจสอบการพ่น (Spray monitor) และห้องสำหรับการพ่น (Chamber) โดยไดอะแกรมของระบบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

3.1.1 องค์ประกอบของการเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

องค์ประกอบของระบบประกอบด้วย

3.1.1.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง (High voltage power supply, HV(kV))

ในงานวิจัยนี้ ใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงชนิดปรับค่าได้ -11 กิโลโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงชนิดปรับค่าได้

3.1.1.2 หลอดบรรจุสารและหัวเข็ม (Syringe and nozzle)

หลอดบรรจุสารในการทดลองใช้ขนาดบรรจุ 3 ml และหัวเข็มสำหรับการพ่นละอองฝอยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.300 mm



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 (ก) หลอดบรรจุสาร (ข) หัวเข็มสำหรับการพ่น

3.1.1.3 แผ่นกราวด์เพลท (Ground plate)

ในการทดลองใช้แผ่นโลหะนำไฟฟ้าได้แก่แผ่นอะลูมิเนียม และแผ่นทองแดง



(ก)

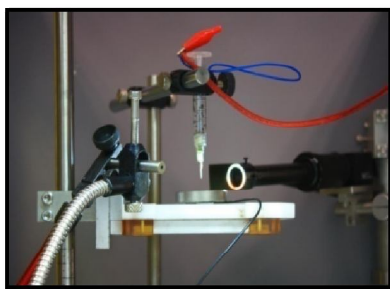


(ข)

รูปที่ 3.5 แผ่นโลหะนำไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (ก) แผ่นอะลูมิเนียม (ข) แผ่นทองแดง

3.1.1.4 ระบบตรวจดูการพ่น (Spray monitor)

ระบบดังกล่าวใช้สำหรับการตรวจดูค่าและละอองฝอยในการพ่น ประกอบด้วย กล้องและเลนส์กำลังขยายขนาดสูง



(ก)

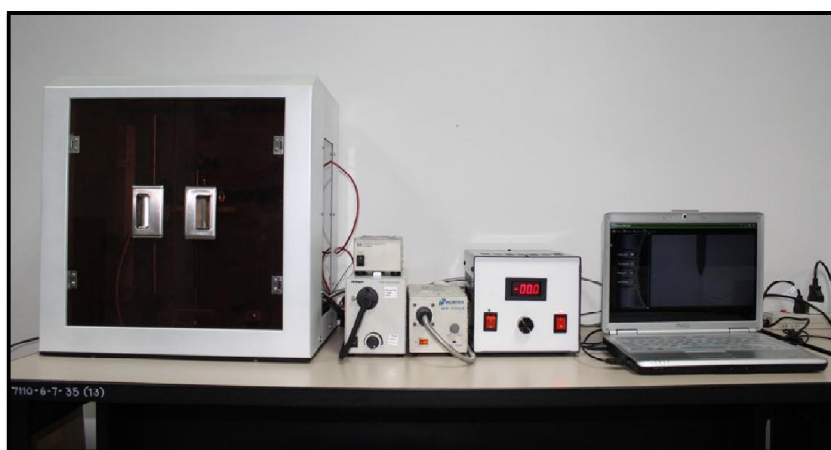


(ข)

รูปที่ 3.6 (ก) กล้องและเลนส์กำลังขยายสูง(ข) หน้าจอแสดงภาพถ่ายลำและละอองฝอย

3.1.1.5 ห้องสำหรับการพ่น (Chamber)

ระบบการเตรียมฟิล์มจะทำการสร้างห้องสำหรับการพ่น เพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมระหว่างการพ่น



รูปที่ 3.7 ระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

3.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ (Glass Substrate)

ในการเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องมีฐานรองรับ(substrate) เพื่อให้วัสดุของสารเกาะยึดบนฐานรองรับดังกล่าว ซึ่งก่อนที่เราจะนำฐานรองรับมาใช้งานนั้นจะต้องมีกระบวนการในการทำความสะอาดฐานรองรับเพื่อขจัดคราบสิ่งสกปรกที่ติดค้างอยู่เสียก่อน สำหรับฐานรองรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นกระจกใสของบริษัท W. Germy รุ่น SUPERIOUR ขนาด 76x26 มิลลิเมตร โดยใช้กระบวนการล้างที่เรียกว่า Alcohol process ซึ่งการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจะมีขั้นตอนการทำความสะอาดดังนี้

- (1) นำกระจกไปล้างด้วยน้ำยาล้างคราบน้ำมัน
- (2) ล้างกระจกด้วยน้ำ ำไว้ประจุในเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic cleaner) เป็นเวลา 15 นาที
- (3) ล้างกระจกด้วยอะซิโตน (Acetone; CH_3COCH_3) ในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที
- (4) ล้างกระจกด้วยเมทานอล (Methanol: CH_3OH) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
- (5) ล้างกระจกด้วยไอโซโพรพานอล (Isopropanol; $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
- (6) เป่าให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และอบที่อุณหภูมิ 120 องศา เป็นเวลา 30 นาที

3.3 การเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน

ในการทดลองจะทำการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยใช้ไฟฟ้าศักย์สูง 0 กิโลโวลต์ โดยจะทำการสร้างเงื่อนไขในการทดลอง 4 เงื่อนไข โดยเงื่อนไขแรกจะทำการหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอย ส่วนเงื่อนไขที่สองจะทำการดูการกระจายตัวของสารเมื่อปรับศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างต่างๆ เงื่อนไขที่สามจะทำการปรับระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับเพื่อหาระยะที่ได้ฟิล์มบางที่มีความสมบูรณ์มากที่สุด โดยมีความเรียบสม่ำเสมอ (uniform) และเป็นระเบียบ (homogeneous) มากที่สุด โดยในเงื่อนไขนี้จะทำการใช้ศักย์ไฟฟ้าเป็น 8 และ 10 กิโลโวลต์ ส่วนเงื่อนไขสุดท้ายจะทำการเตรียมฟิล์มบางที่ระยะห่างที่เหมาะสมและทำการปรับเวลาในการเตรียมต่างๆ กัน ซึ่งเงื่อนไขทั้งหมดมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 เงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยและละอองฝอยแบบ สมบูรณ์ (Taylor cone)

นาอนุภาคนาโนเงิน (Silver nanoparticle) จากบริษัท Aldrich (nanoparticles, <100 nm (TEM), 10 wt. % dispersion in ethylene glycol) มาใส่หลอดบรรจุสารทำการต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง (High voltage power supply) โดยขั้วบวกจะต่อเข้ากับปลายเข็ม ส่วนขั้วลบจะต่อเข้ากับแผ่นอะลูมิเนียม (Aluminum plate) และทำการพ่นอนุภาคนาโนเงินลงบนแผ่นกระดาษ ที่ระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับเป็น 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130 และ 150 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยการปรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงจนกระทั่งสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเงินดังกล่าวแตกตัวเป็นละอองฝอย และทำการบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้สารเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยและละอองฝอยแบบสมบูรณ์ที่ระยะต่างๆ

3.3.2 เงื่อนไขกระจายตัวของสารเมื่อปรับศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างต่างๆ

ทำการพ่นอนุภาคนาโนเงินลงบนแผ่นกระดาษเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวโดยการปรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงเท่ากับ 1-11 กิโลโวลต์ ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับฐานรองรับเท่ากับ 10-150 มิลลิเมตร และทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟิล์มที่เคลือบลงบนแผ่นกระดาษ

3.3.3 เงื่อนไขระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับแผ่นฐานรองรับ

เตรียมฟิล์มอนุภาคนาโนเงินบนฐานรองรับกระจก ด้วยศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 8 และ 10 กิโลโวลต์เป็นเวลา 5 นาที โดยระยะของการเตรียมที่ 8 กิโลโวลต์ จะกำหนดระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับเท่ากับ 20,30,40,50,60,70 และ 80 มิลลิเมตร ตามลำดับ และระยะของการเตรียมที่ 10 กิโลโวลต์ จะกำหนดระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับเท่ากับ 30,40,50,60,70,80 และ 90 มิลลิเมตร ตามลำดับ

3.3.4 เงื่อนไขการปรับระยะเวลาในการเตรียมฟิล์ม

เตรียมฟิล์มอนุภาคนาโนเงินบนฐานรองรับกระจก ด้วยศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเท่ากับ 60 มิลลิเมตร ที่เงื่อนไขของระยะเวลาเท่ากับ 1,2,4,6,8 และ 10 นาที ตามลำดับ

เงื่อนไขต่างๆของการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงแบบปรับค่าได้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงแบบปรับค่าได้

พารามิเตอร์การเตรียมฟิล์ม	เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์ม
ศักย์ไฟฟ้า	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 กิโลโวลต์
ระยะเวลาในการเตรียมฟิล์ม	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 และ 10 นาที
ระยะห่างระหว่างหัวเข็มถึงแผ่นฐานรองรับ	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 มิลลิเมตร
อุณหภูมิฐานรองรับ	อุณหภูมิห้อง

3.4 การเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

ในการทดลองจะทำการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีการผสมอยู่ในรูปสารละลายกระจายตัวผสมในสารละลายแอลกอฮอล์ โดยใช้ไฟฟ้าศักย์สูง 5 กิโลโวลต์ ทำการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนฐานรองรับกระจก ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเท่ากับ 40 มิลลิเมตร ที่ระยะเวลาเท่ากับ 60 นาที

เงื่อนไขต่างๆของการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงแบบปรับค่าได้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 เงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง

พารามิเตอร์การเตรียมฟิล์ม	เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์ม
ศักย์ไฟฟ้า	5 กิโลโวลต์
ระยะเวลาในการเตรียมฟิล์ม	60 นาที
ระยะห่างระหว่างหัวเข็มถึงแผ่นฐานรองรับ	40 มิลลิเมตร
อุณหภูมิฐานรองรับ	อุณหภูมิห้อง

3.5 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบาง

3.5.1 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์อาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมของการเลี้ยวเบนเรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน ซึ่งธาตุและสารประกอบแต่ละชนิดจะมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนเฉพาะตัวในการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะใช้เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) รุ่น D8 Discover with GADDS ของบริษัท Bruker แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD), Bruker รุ่น D8 Discover with GADDS

3.5.2 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างโดยการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ มีลักษณะภาพเป็นภาพขาวดำมีกำลังขยาย 10 - 300,000 เท่า ขึ้นกับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณนำสัญญาณไปขยายและสร้างเป็นภาพออกมาแล้วนำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างเป็นภาพแสดงบนหน้าจอ สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดใช้ในการตรวจวัดเป็นเครื่องของบริษัท Hitachi รุ่น 4700 ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดชนิดField Emission (FE-SEM) , Hitachi รุ่น S4700

3.5.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

องค์ประกอบหลักของระบบกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมคือการวัดแรงโดยใช้คานยื่น (Cantilever) ซึ่งเป็นแผ่นวัสดุแข็งที่มีวัสดุปลายแหลม หรือ “ ทิป ” (Tip) ติดอยู่ที่ปลาย คานยื่นทำจากวัสดุที่มีความแข็งสูงเช่น Silicon nitride (Si_3N_4) ยาว 100 – 500 μm หน้า 0.5- 5 μm แผนภาพแสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ทิปที่ติดปลายคานยื่นจะทำหน้าที่วัดแรงกระทำระหว่างตัวอย่างกับทิป โดยทิปจะสัมผัสกับตัวอย่างด้วยแรงในระดับนาโนนิวตันและเคลื่อนที่ไป กลับบนพื้นผิวตัวอย่างซึ่งวางอยู่บนวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric scanners) โดยสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ในสามทิศทาง (แกน x,y และ z) ทิปที่เคลื่อนที่ขึ้น – ลง ตามความสูง – ต่ำของพื้นผิวตัวอย่าง ระบบกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมระบบวัดอะตอมมิกฟอรัสมิโครสโคปจะวัดการตำแหน่งของทิปได้จากการใช้ลำแสงเลเซอร์ส่องไปที่คานยื่น แล้วสะท้อนกลับไปในส่วนรับสัญญาณแบบโฟโตไดโอด (Photodiode detector) ทำให้ทราบข้อมูลการเคลื่อนที่ขึ้นลงของคานยื่น หรือความสูงต่ำของพื้นผิวตัวอย่างได้ จากข้อมูลความสูงต่ำของแต่ละจุดเทียบกับตำแหน่งของทิป (โคออร์ดิเนต x,y,z) ทำให้ ระบบกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมสามารถสร้างภาพของพื้นผิวตัวอย่างได้ทั้ง สอง มิติ และ สาม มิติ

หลังจากทำการตรวจสอบพื้นผิวของฟิล์มบางที่ได้จะทำการวิเคราะห์ค่าความขรุขระในแต่ละเงื่อนไขของฟิล์มบาง



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอม(AFM), Seiko SPA-400

3.5.4 การตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

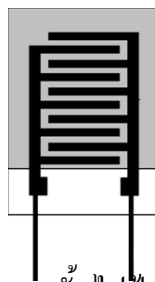
UV-VIS Spectrophotometer เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารโดยใช้หลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลตและช่วงที่ตามองเห็น นั่นก็คือช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 นาโนเมตร(nm) ของสารเคมีต่างๆ ได้แก่ สารอินทรีย์ (organic compound) สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) หรือสารอนินทรีย์ (inorganic compound) โดยนำสารตัวอย่างใส่ในที่ใส่ตัวอย่าง (Sample Holder) แล้ววางในบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดแสง สารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสี หรือแสงบางส่วนไว้ แสงที่ไม่ดูดกลืนจะผ่านออกมายังตัวตรวจวัดแสงที่เป็นโฟโตมัลติพลีเออร์ (photomultiplier tube, PMT) เครื่องวัดแสงจะทำการวัดปริมาณแสงที่ออกมา โดยการหักล้างกับปริมาณของแสงก่อนดูดกลืน จากนั้นจะทำการประมวลผลเป็นเส้นสเปกตรัม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และค่าความยาวคลื่น



รูปที่ 3.11 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer, PG Instrument รุ่น T90+

3.6 การประดิษฐ์เซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดความชื้น

จากการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางที่ได้ในข้างต้น จะเลือกใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมสร้างเป็นชั้นฟิล์มบางสำหรับการตอบสนองต่อความชื้นบนขั้วไฟฟ้าโดยเงื่อนไขที่เหมาะสม คือ ระยะห่างระหว่างหัวเข็มและฐานรองรับ 40 มิลลิเมตร ศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ สำหรับอนุภาคนาโนเงินและศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ สำหรับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยจะทำการเตรียมฟิล์มลงขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิต (Interdigitate electrode) ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 11.03x19.03 ตารางมิลลิเมตร โดยทำการออกแบบให้มีช่องว่าง (width, W) เป็น 380 ไมครอน และมีช่องทั้งหมด 10 ช่อง มีพื้นที่ในการตอบสนอง (Active area) เท่ากับ 11.03x13.90 ตารางมิลลิเมตร ลักษณะขั้วไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิต

ทำการพ่นเคลือบฟิล์มบางที่เงื่อนไขของระยะเวลาที่แตกต่างคือ 1, 5, 10 และ 10 นาที 2 ครั้งตามลำดับ สำหรับอนุภาคนาโนเงิน และจะทำการพ่นเคลือบฟิล์มบางเอทิลีนไกลคอล (Ethenediol 99.5+% (GLC) 1.1135g/mL glycerol determination CertiFied AR) จากบริษัท Fisher Scientific เพื่อเป็นเซนเซอร์สำหรับการอ้างอิงที่เงื่อนไขของระยะเวลาในการพ่นเคลือบฟิล์มเท่ากับ 5 นาที

เงื่อนไขต่างๆของการเตรียมฟิล์มอนุภาคนาโนเงินและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนชั้นไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มอนุภาคนาโนเงินบนชั้นไฟฟ้า

พารามิเตอร์การเตรียมฟิล์ม	เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์ม
ศักย์ไฟฟ้า	10 กิโลโวลต์
ระยะเวลาในการเตรียมฟิล์ม	1, 5, 10 และ 10 นาที 2 ครั้ง
ระยะห่างระหว่างหัวเข็มถึงแผ่นฐานรองรับ	40 มิลลิเมตร
อุณหภูมิฐานรองรับ	อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนชั้นไฟฟ้า

พารามิเตอร์การเตรียมฟิล์ม	เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์ม
ศักย์ไฟฟ้า	10 กิโลโวลต์
ระยะเวลาในการเตรียมฟิล์ม	1, 5, 10 และ 10 นาที 2 ครั้ง
ระยะห่างระหว่างหัวเข็มถึงแผ่นฐานรองรับ	40 มิลลิเมตร
อุณหภูมิฐานรองรับ	อุณหภูมิห้อง

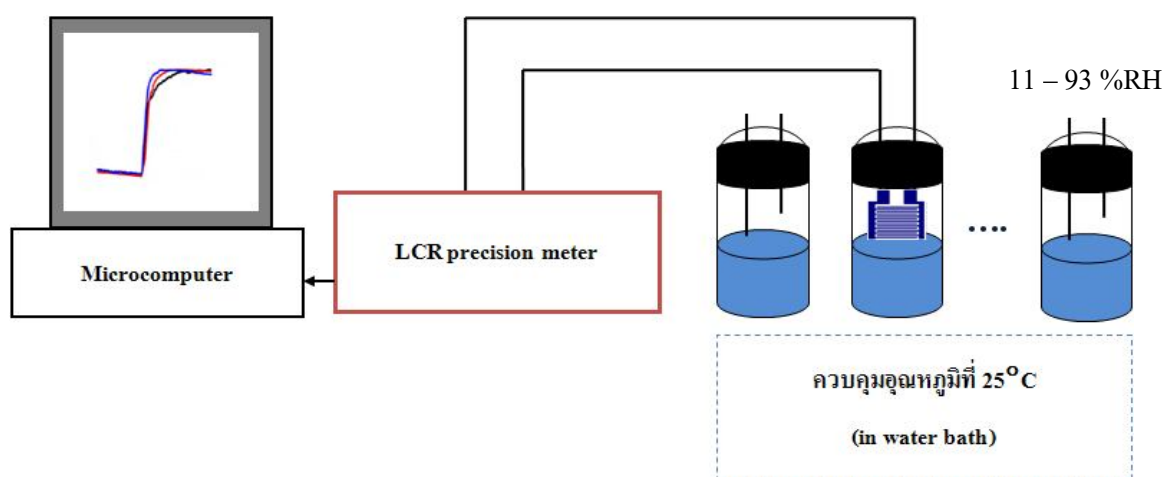
3.7 การตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้น

3.7.1 การตรวจสอบสมบัติพื้นผิวและความหนาของฟิล์มอนุภาคนาโนเงินที่เคลือบเป็นชั้นเซนเซอร์ความชื้น

ในการทดลองจะทำการเตรียมฟิล์มลงบนกระจกเพื่อตรวจสอบสมบัติพื้นผิวและความหนาของฟิล์มอนุภาคนาโนที่เคลือบเงื่อนไขเดียวกับที่ใช้เป็นชั้นเซนเซอร์ความชื้น

3.7.2 การตรวจสอบการตอบสนองต่อความชื้น

การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อความชื้น และสมบัติด้านต่างๆ ของเซนเซอร์ ทำได้โดยใช้วิธีทดสอบกับสารละลายมาตรฐาน LiCl , CH_3COOK , MgCl_2 , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, NaCl , KCl , KNO_3 ที่บรรจุอยู่ในขวดแก้ว โดยสารละลายมาตรฐานดังกล่าวมีความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, RH%) ที่อุณหภูมิ 25°C อยู่ที่ 11.30%, 23.11%, 32.78%, 52.89%, 75.29%, 84.34% และ 93.58% ตามลำดับ และทำการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนโดยเครื่อง LCR (Agilent EA980A Precision LCR Meter, 20 Hz to 2 MHz) โดยแอมป์ระบบวัดแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ระบบการวัดการตอบสนองต่อความชื้น

3.7.2.1 การวัดค่าการตอบสนองต่อความชื้น

ทำการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 11.30%, 23.11%, 32.78%, 52.89%, 75.29%, 84.34% และ 93.58% ตามลำดับในตอนเริ่มต้นเซนเซอร์จะถูกเก็บอยู่ที่ความชื้น 11.30% เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจะนำเซนเซอร์ไปวัดความชื้นที่ค่าต่างๆ โดยจะทำการวัดเป็นเวลา 1000 วินาที และเก็บค่าความสัมพันธ์ของเวลาและความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance)

3.7.2.2 การวัดเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้น (Response and Recovery time)

ทำการการวัดเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้น ซึ่งในการทดลองจะใช้ความชื้นสัมพัทธ์ที่น้อยสุด (11.30%, RH) กับความชื้นสัมพัทธ์ที่มากที่สุด (93.58%) โดยทำการวัด

ความขึ้นสลับกันระหว่างความขึ้นต่ำและความขึ้นสูงโดยในขณะที่เปลี่ยนจากความขึ้นต่ำไปยังความขึ้นสูงจะทำให้ได้ค่าเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับความชื้น(Response time) และจากความขึ้นสูงไปยังความขึ้นต่ำจะทำให้ได้ค่าเวลาในการตอบสนองต่อการคายความชื้น(Recovery time) ซึ่งในการตรวจสอบจะใช้เวลาการวัดทั้งหมดเป็น 1000 วินาที โดยจะสลับกันทุก 250 วินาที และเก็บค่าความสัมพันธ์ของเวลาและความต้านทานเชิงซ้อน(Impedance)

3.7.2.3 การวัดสภาพความไวในการตอบสนอง (Sensitivity)

สภาพความไวในการตอบสนอง(Sensitivity) พิจารณาได้จากความต้านทานเชิงซ้อนที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดและความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด

3.7.3 การตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของอุณหภูมิในการดูดซับและคายความชื้น

การตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของอุณหภูมิทำได้โดยการวัดการดูดซับความชื้นโดยเริ่มจากความชื้นต่ำไปยังความชื้นสูง(11.30%, 23.11%, 32.78%, 52.89%, 75.29%, 84.34% และ 93.58% ตามลำดับ) จากนั้นย้อนกลับเป็นกระบวนการคายความชื้นจากความชื้นสูงกลับไปสู่ความชื้นต่ำ (93.58%, 84.34%, 75.29%, 52.89%, 32.78%, 23.11% และ 11.30%, ตามลำดับ) โดยในการทดลองก็จะนำเซนเซอร์วัดความชื้นตามกระบวนการข้างต้นเป็นเวลาดำเนินการละ 1000 วินาที และทำการเก็บบันทึกข้อมูลค่าความต้านทานเชิงซ้อน(Impedance) ที่เวลา 500 วินาที

3.7.4 การตรวจสอบเสถียรภาพของเซนเซอร์

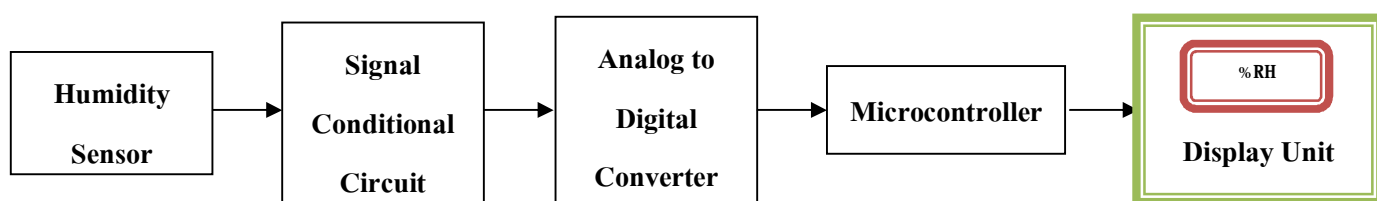
ทำการบันทึกค่าความต้านทานเชิงซ้อน(Impedance) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่างๆทุก 5 วัน เป็นระยะเวลา 40 วันเพื่อศึกษาถึงเสถียรภาพของเซนเซอร์

3.7.5 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี

ทำการวัดความจุไฟฟ้า (Capacitance) ค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ที่ความถี่ 20 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz และ 2 MHz ตามลำดับและจะทำการศึกษาถึงวงจรสมมูล (equivalent circuit หรือ model) ของเซนเซอร์ โดยจะทำการวัดที่ความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่างๆและเก็บค่าความต้านทานเชิงซ้อน(Impedance) กับมุมในรูปเรเดียน (radian) และนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานเชิงซ้อนจินตภาพ กับความต้านทานเชิงซ้อนจริง(-Zim & Zre) มาทำการพลอตกราฟหาแบบทางวงจรไฟฟ้าของเซนเซอร์ ที่เรียกว่า Nyquist plot หรือ Cole-Cole พล็อต

3.8 การสร้างต้นแบบอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดความชื้น

เครื่องต้นแบบสำหรับตรวจวัดความชื้นภาคสนามซึ่งระบบต้นแบบภาคสนามสำหรับตรวจวัดความชื้นจะประกอบด้วยหัววัดความชื้นที่สัมผัสกับสิ่งที่ต้องการวัดความชื้นโดยสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์จะถูกส่งผ่านไปยังวงจรปรับเงื่อนไขสัญญาณ (signal conditional circuit) แล้วจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลผ่านวงจรแปลงสัญญาณไปประมวลผลยังไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วแสดงผลการการวัดที่ได้ออกทางหน้าจอแสดงผล



รูปที่ 3.14 ไดอะแกรมเครื่องต้นแบบสำหรับการตรวจวัดความชื้น

บทที่ 4

ผลการวิจัย

บทนี้ เป็นผลการดำเนินงานวิจัยของการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ และการวิเคราะห์สมบัติฟิล์มบางอนุภาคนาโน และในส่วนของผลการนำอนุภาคนาโนไปประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น ซึ่งทั้งกระบวนการเตรียมฟิล์มบางและการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินด้วยแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้าศักย์สูง

1. ศึกษาการปรับศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยและละอองฝอยแบบสมบูรณ์
2. ศึกษาการกระจายตัวของสารเมื่อปรับศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างต่างๆ
3. ศึกษาระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน
4. ศึกษาการปรับระยะเวลาในการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน

การเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้าศักย์สูง

เป็นการเตรียมฟิล์มบางที่เงื่อนไขเดียวที่ระยะเวลาสูง(60 นาที) เพื่อนำเงื่อนไขดังกล่าวไปประยุกต์เป็นชั้นฟิล์มของเซนเซอร์ต่อไป

การนำอนุภาคนาโนเงินและซิงค์ออกไซด์ประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น

1. ศึกษาสมบัติของพื้นผิวและความหนาของฟิล์มอนุภาคนาโนเงินที่เตรียมนำไปใช้เป็นเซนเซอร์ความชื้น
2. ศึกษาการตรวจสอบการตอบสนองต่อความชื้น
 - 2.1 ศึกษาการตอบสนองต่อความชื้น
 - 2.2 ศึกษาเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้น
 - 2.3 ศึกษาสภาพความไวในการตอบสนอง
3. ศึกษาลักษณะอิทธิพลของอุณหภูมิในการดูดซับและคายความชื้น
4. ศึกษาเสถียรภาพของเซนเซอร์
5. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี

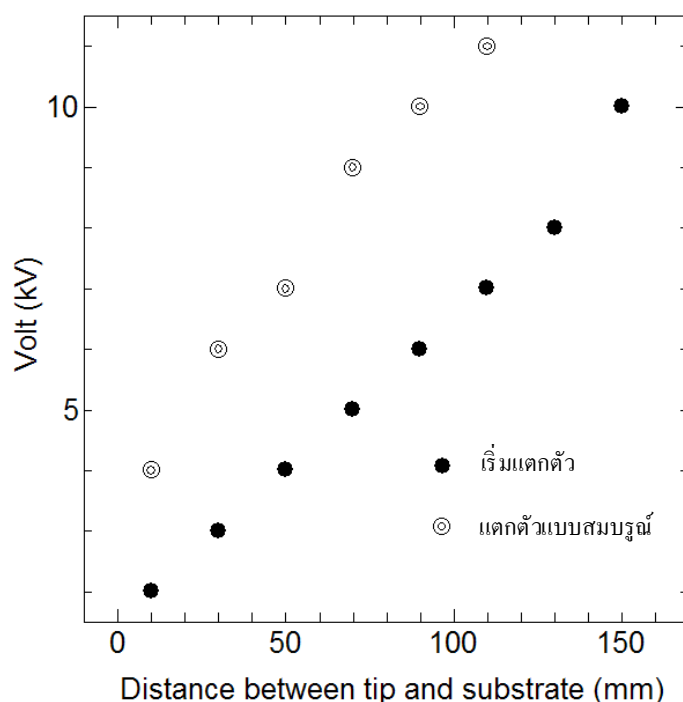
การนำอนุภาคนาโนเงินและซิงค์ออกไซด์ประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น

1. ศึกษาการตรวจสอบการตอบสนองต่อความชื้น
 - 1.1 ศึกษาการตอบสนองต่อความชื้น
 - 1.2 ศึกษาสภาพความไวในการตอบสนอง
2. ศึกษาลักษณะอิทธิพลของวัสดุในการดูดซับและคายความชื้น

4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน

4.1.1 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยและละอองฝอยแบบสมบูรณ์

ในการทดลองจะทำการพ่นอนุภาคนาโนเงินลงบนแผ่นกระดาษที่ระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับเป็น 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130 และ 150 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยการปรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงจนกระทั่งสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเงินดังกล่าวแตกตัวเป็นละอองฝอยและทำการบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้สารเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยและละอองฝอยแบบสมบูรณ์ที่ระยะต่างๆ ซึ่งผลการวิเคราะห์เป็นดังรูปที่ 4.1

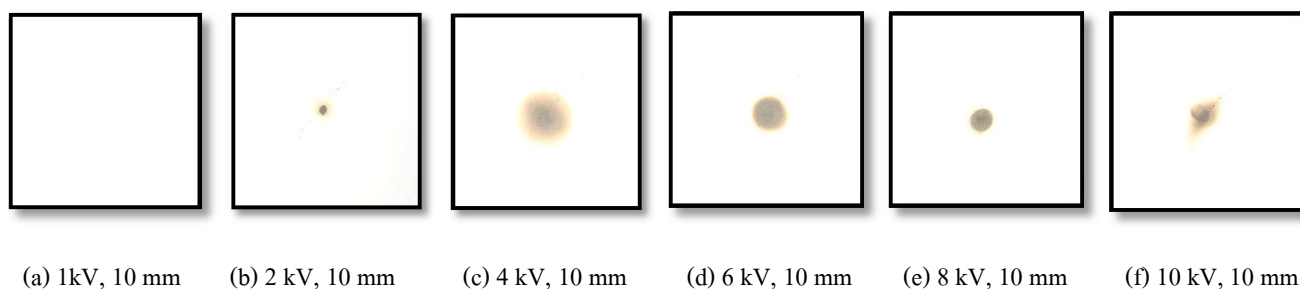


รูปที่ 4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มแตกตัวเป็นละอองฝอยและแตกตัวเป็นละอองฝอยแบบสมบูรณ์ที่ระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับขึ้นค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้สารแตกตัวและแตกตัวเป็นละอองฝอยแบบสมบูรณ์ก็จะมีค่ามากขึ้น โดยการแตกตัวสมบูรณ์(Cone jet) จะมีลักษณะ คือ มีรูปร่างเป็นโคน(cone) ที่ปลายแหลม และมีลำของเหลว(jet) ต่อจากโคน และปลายของ jet จะเกิดเป็นละอองฝอยเนื่องจากไฟฟ้า(Electrospray) โดยลักษณะของละอองฝอยที่เกิดจาก cone jet mode นี้ มีการกระจายตัวของละอองที่สม่ำเสมอเป็นการแตกตัวที่สมบูรณ์ ในส่วนของการแตกตัวไม่สมบูรณ์จะเป็นลักษณะของ Spindle หรือ Intermittent cone-jet ซึ่งจะมีลักษณะของการแตกตัวที่มีหยดน้ำเล็กๆ ผสมออกมากับหยดละอองฝอยโดยบันทึกการทดลองได้จากการตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเงินที่เคลือบบนพื้นผิวของฐานรองรับ(กระดาษสีขาว) และตรวจสอบจากระบบตรวจดูการพ่น(Spray monitor) ด้วยกล้องวิดีโอที่ติดตั้งในระบบ

4.1.2 ผลการกระจายตัวของสารเมื่อปรับแรงดันไฟฟ้า และระยะห่างต่างๆ

ในการทดลองจะทำการปรับระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับฐานรองรับเป็นระยะตั้งแต่ 10-150 มิลลิเมตร และปรับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 1-11 กิโลโวลต์ ซึ่งผลการทดลอง จะนำภาพตัวอย่างการสเปรย์ที่ระยะ 10 มิลลิเมตร โดยปรับแรงดันตั้งแต่ 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 กิโลโวลต์เป็นดังรูปที่ 4.2



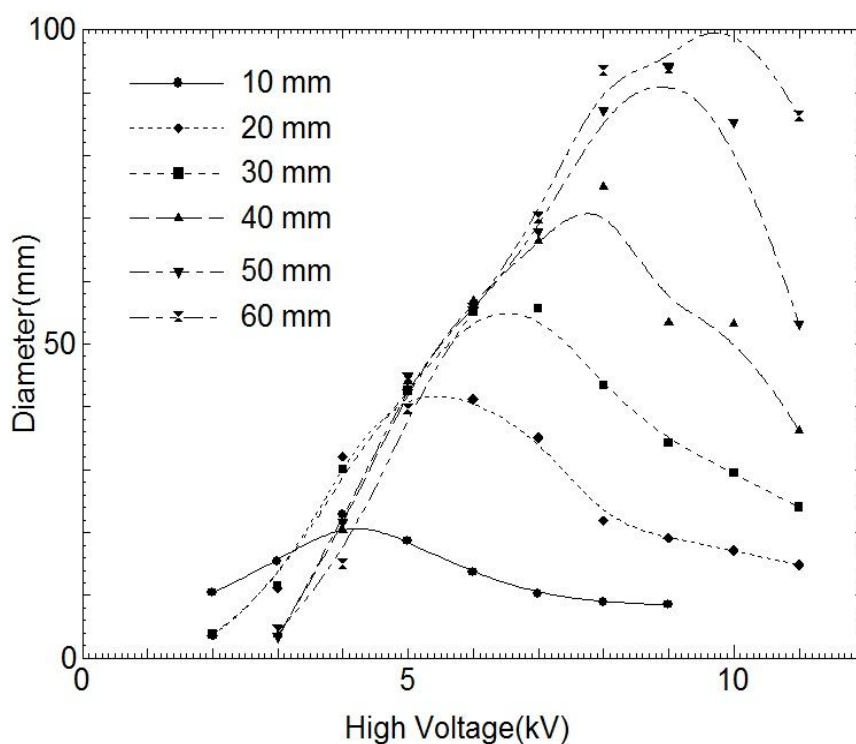
รูปที่ 4.2 ภาพลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเงินที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มและฐานรองรับเท่ากับ 10 mm และปรับแรงดันไฟฟ้าเป็น 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 กิโลโวลต์

จากการกระจายตัวดังกล่าวจะทำการเก็บข้อมูลการกระจายตัวโดยทดลองพ่นที่ระยะตั้งแต่ 10 – 150 มิลลิเมตร ข้อมูลดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระยะในการพ่นตั้งแต่ 0 – 150 มิลลิเมตร โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 1-11 กิโลโวลต์

ระยะห่าง (mm)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(mm) ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 1-11 kV										
	1 kV	2 kV	3 kV	4 kV	5 kV	6 kV	7 kV	8 kV	9 kV	10 kV	11 kV
10.00	-	-	-	22.75	18.55	13.67	10.14	8.89	8.48	-	-
20.00	-	-	-	-	42.84	41.20	35.12	21.88	19.12	17.15	14.84
30.00	-	-	-	-	-	55.20	55.59	43.38	34.22	29.51	24.03
40.00	-	-	-	-	-	-	66.43	75.02	53.32	53.12	36.25
50.00	-	-	-	-	-	-	67.89	87.19	93.94	85.15	53.19
60.00	-	-	-	-	-	-	-	93.49	93.79	104.90	86.22
70.00	-	-	-	-	-	-	-	-	>130.0	>130.0	>130.0
80.00	-	-	-	-	-	-	-	-	>130.0	>130.0	>130.0
90.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	>130.0	>130.0
100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	>130.0	>130.0
110.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	>130.0
120.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	>130.0
130.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	>130.0
140.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	>130.0
150.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	>130.0

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 นำมาเขียนกราฟแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดและขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง

จากรูปที่ 4.3 พบว่าที่ฟิล์มทุกระยะตั้งแต่ 10 - 60 มิลลิเมตร จะมีลักษณะคล้ายกันคือ เมื่อทำการค่อยๆ เพิ่มแรงดันไฟฟ้า (High volt) ขึ้น จะพบว่าลักษณะการกระจายตัวของวงสเปรย์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยดูจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงสเปรย์ แต่เมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงสเปรย์มีค่าลดน้อยลง เนื่องมาจากที่ระยะห่างจุดนั้น มีค่าสนามไฟฟ้าที่สูงมากทำให้สามารถบังคับลำสเปรย์ของสารให้บีบลง จนทำให้ขนาดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงสเปรย์ลดลง

จากผลของการกระจายตัวที่ระยะต่างๆ เพื่อแสดงให้เห็นความสมมาตรเนื่องจากการพ่นดังกล่าว โดยทำการหาอัตราส่วนระหว่างแนวตั้งฉากกับแนวราบของเส้นผ่านศูนย์กลางสเปรย์ดังตารางที่ 4.2

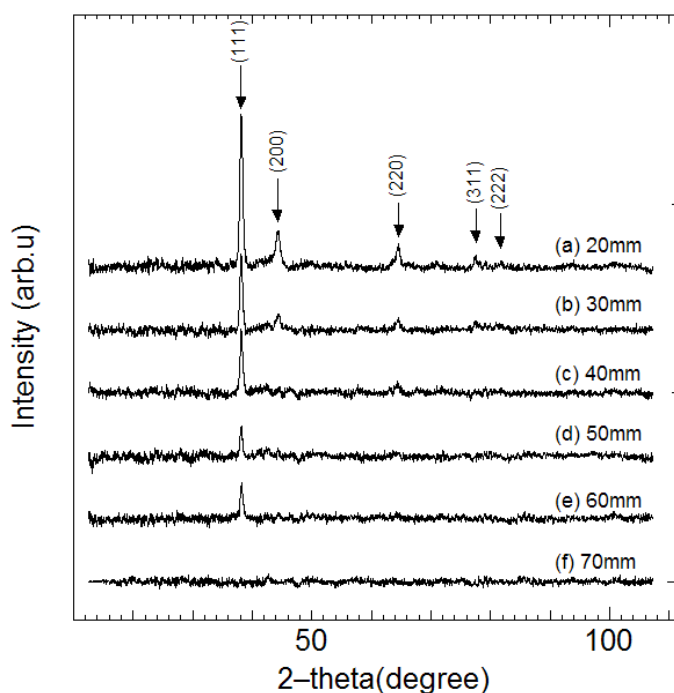
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนระหว่างแนวตั้งฉากกับแนวราบของเส้นผ่านศูนย์กลางสปรีที่ระยะในการพ่นตั้งแต่ 10 – 150 มิลลิเมตร โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1-11 กิโลโวลต์

ระยะห่าง (mm)	อัตราส่วนระหว่างแนวตั้งฉากกับแนวราบของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 1-11 kV										
	1 kV	2 kV	3 kV	4 kV	5 kV	6 kV	7 kV	8 kV	9 kV	10 kV	11 kV
10.00	-	-	-	1.04	1.03	1.00	0.98	1.01	1.04	-	-
20.00	-	-	-	-	1.02	1.03	1.00	1.04	1.04	1.01	1.03
30.00	-	-	-	-	-	0.99	1.03	0.99	0.94	0.98	1.01
40.00	-	-	-	-	-	-	0.90	0.96	0.96	0.99	1.01
50.00	-	-	-	-	-	-	1.03	1.00	0.98	1.00	1.04
60.00	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.96	1.00	1.01
70.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
130.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
140.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
150.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4.1.3 ผลของระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับ

ผลการปรับระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับเพื่อหาระยะที่ได้ฟิล์มบางที่มีความสมบูรณ์มากที่สุด โดยมีความเรียบสม่ำเสมอ(uniform) และเป็นระเบียบ (homogeneous) มากที่สุด โดยในเงื่อนไขนี้จะทำการใช้ศักย์ไฟฟ้าเป็น 8 และ 10 กิโลโวลต์ ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดมีดังต่อไปนี้

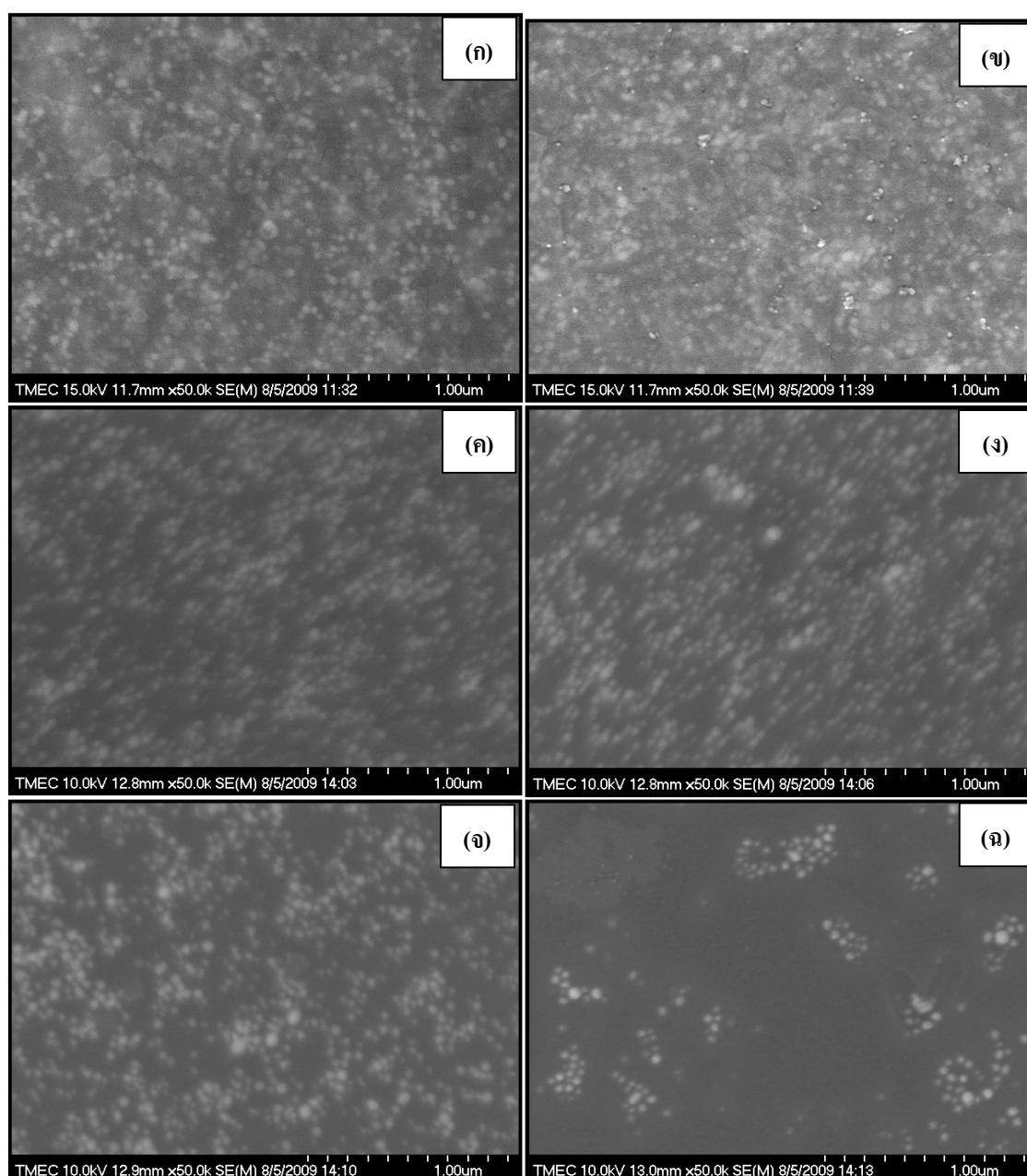
ในการทดลองจะทำการวิเคราะห์ฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง 8 กิโลโวลต์ โดยทำการปรับระยะทางระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเป็น 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อศึกษาถึงสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะต่างกัน

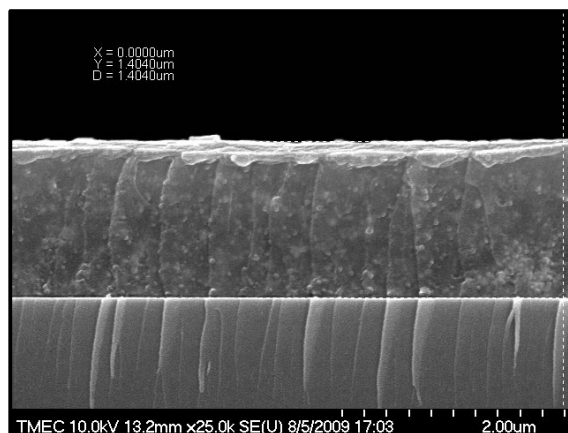
จากรูปที่ 4.4 พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยมียอดการเลี้ยวเบนที่มุม 38.2, 44.3, 64.4 และ 77.4 องศา ตามลำดับ ซึ่งตรงกันระนาบการเลี้ยวเบนที่ (111), (200), (220) และ (311) ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าเป็นระนาบการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนเงินที่มีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (Cubic structure) และจากกราฟจะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับทำให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 4.1(a) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเท่ากับ 20 มิลลิเมตรมีความเข้มของพีคมากที่สุด นั่นคือมีความเป็นผลึกมากที่สุด เนื่องมาจากเมื่อทำการพ่นสารลงมาที่บริเวณฐานรองรับที่เป็นกระจก เมื่อระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับต่ำๆ จะทำให้สารมาทับถมที่ฐานรองรับเป็นจำนวนมาก การกระจายตัวของผลึกจะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เมื่อวัดการเลี้ยวเบนของผลึก ฟิล์มจะมีความเป็นผลึกมากที่สุด จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับขึ้น ความเป็นผลึกของฟิล์มจะลดลงตามลำดับ

ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เตรียมโดยการปรับระยะทางระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเป็น 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มจากเครื่องFE-SEM โดยระยะในการเตรียมฟิล์มต่างกัน

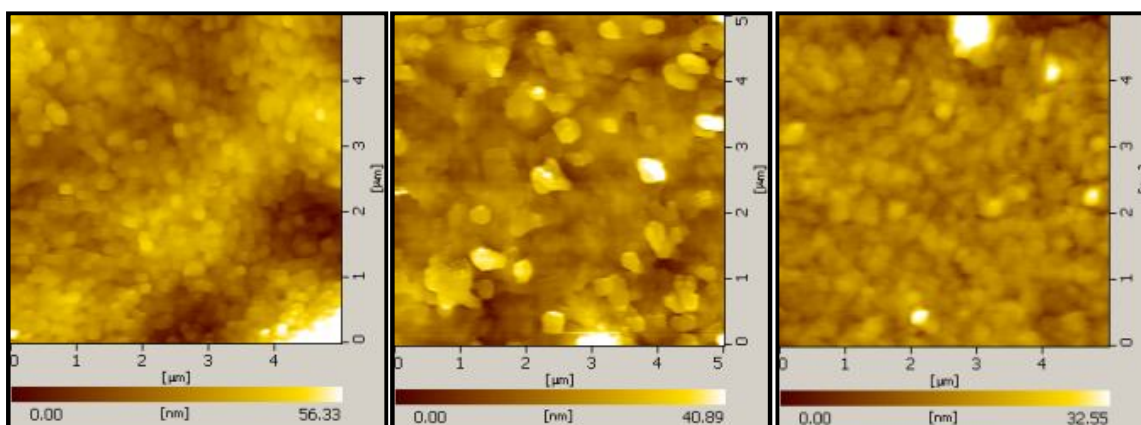
(ก)-(จ) เท่ากับ 20, 30, 40, 50 และ 70 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมฟิล์ม 20 มิลลิเมตร
มีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 1.40 ไมครอน

จากรูปที่ 4.5 พบว่ารูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ฟิล์มจะมีลักษณะเป็นรูพรุน โดยรูปที่ 4.5(ก) ที่ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับเท่ากับ 20 มิลลิเมตร จะมีความเป็นรูพรุนมากที่สุด เนื่องจากการทับถมของเนื้อสารเป็นจำนวนมาก เนื้อฟิล์มจะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ในขณะเดียวกันเมื่อทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับขึ้น เนื้อฟิล์มที่เคลือบบนฐานรองรับจะทับถมได้ดีขึ้น มีการกระจายตัวของสารได้ดีขึ้น ทำให้เนื้อฟิล์มเป็นรูปแบบมากขึ้น (uniform) จากรูปที่ 4.5(ง) และ (จ) ที่ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับเป็น 50 มิลลิเมตร และ 60 มิลลิเมตร จะมีการกระจายตัวบนแผ่นฟิล์มได้ดีที่สุด และจากรูปที่ 4.5(ฉ) แสดงให้เห็นถึงภาพถ่ายของฟิล์มที่ระยะห่างเท่ากับ 70 มิลลิเมตร พบว่าฟิล์มที่ได้จะกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบเนื่องมาจากระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับมากเกินไป ทำให้แรงไฟฟ้าสถิตที่จะบังคับให้สารพ่นลงมามีค่าลดลง ทำให้สารกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และจากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มที่ระยะการเตรียมฟิล์มเป็น 20 มิลลิเมตร พบว่าความหนาของชั้นฟิล์มบางเท่ากับ 1.40 ไมครอน

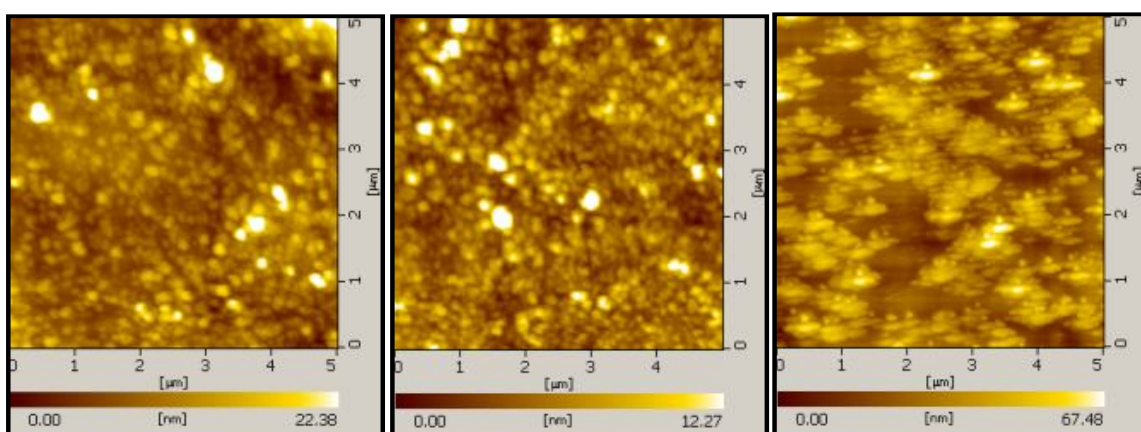
ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เตรียมโดยการปรับระยะทางระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเป็น 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 มิลลิเมตรตามลำดับเพื่อศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.7



(ก) 20 มิลลิเมตร

(ข) 30 มิลลิเมตร

(ค) 40 มิลลิเมตร



(ง) 50 มิลลิเมตร

(จ) 60 มิลลิเมตร

(ฉ) 70 มิลลิเมตร

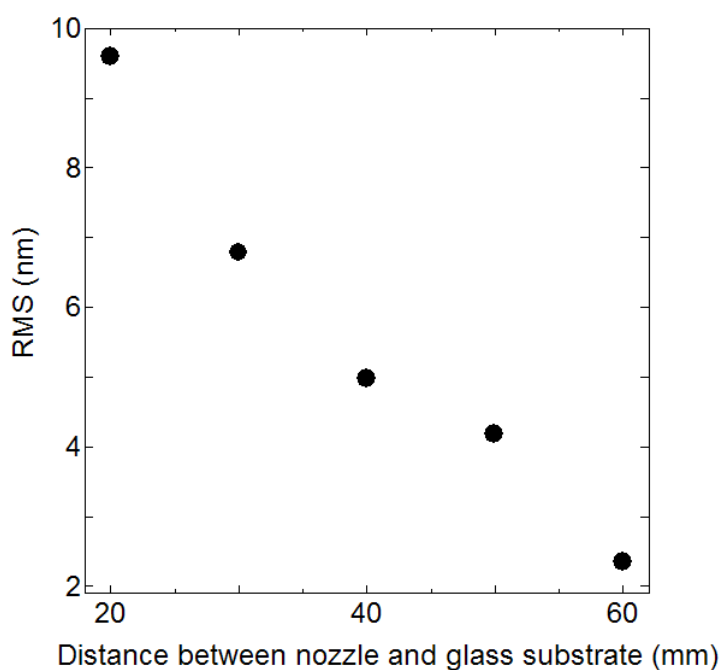
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจากจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม โดยที่ระยะห่างการเตรียมฟิล์มต่างๆ

จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมดังรูปที่ 4.7 พบว่าฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ โดยรูปที่ 4.7(ก) ที่ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับเท่ากับ 20 มิลลิเมตร จะมีความขรุขระของพื้นผิวมากที่สุด เนื่องจากการทับถมของเนื้อสารเป็นจำนวนมาก เนื้อฟิล์มจะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ในขณะที่เดียวกันเมื่อทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับขึ้น เนื้อฟิล์มที่เคลือบบนฐานรองรับจะทับถมได้ดีขึ้น มีการกระจายตัวของสารได้ดีขึ้น มีความขรุขระของพื้นผิวลดลง และทำให้เนื้อฟิล์มเป็นรูปแบบมากขึ้น (uniform) จากรูปที่ 4.7(ง) และ(จ) ที่ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับเป็น 50 มิลลิเมตร และ 60 มิลลิเมตร จะมีการกระจายตัวบนแผ่นฟิล์มได้ดีที่สุด และจากรูปที่ 4.7(ฉ) แสดงให้เห็นถึงภาพถ่ายของฟิล์มที่ระยะห่างเท่ากับ 70 มิลลิเมตร พบว่าฟิล์มที่ได้จะอยู่กระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบเนื่องมาจากระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับมาก

เกินไป ทำให้แรงไฟฟ้าสถิตที่จะบังคับให้สาหร่ายลงมามีค่าลดลง ทำให้สารกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งในการทดลองฟิล์มที่ระยะห่างเท่ากับ 70 มิลลิเมตร จะไม่นำมาทำวิเคราะห์หาค่าความขรุขระ(RMF) และสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง

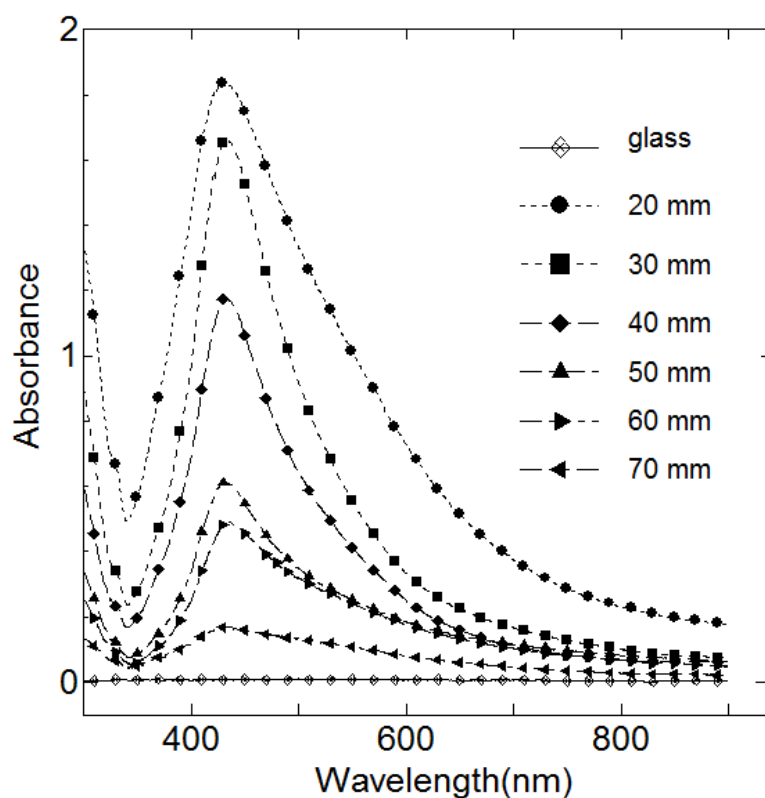
ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของฟิล์มที่ระยะต่างๆ กับ ค่าความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์ม

ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับ (มิลลิเมตร)	ค่าความขรุขระของพื้นผิว (นาโนเมตร)
20.00	9.59
30.00	6.78
40.00	4.97
50.00	4.18
60.00	2.35



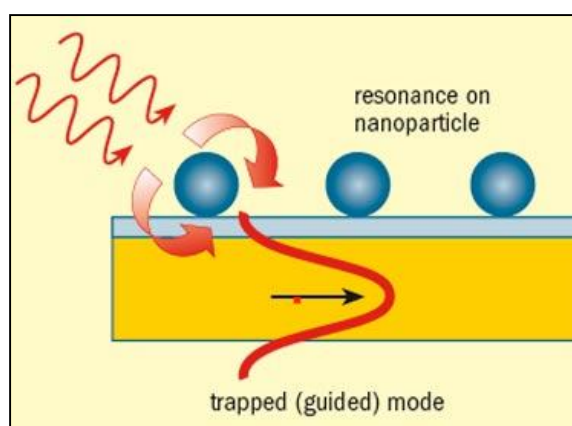
รูปที่ 4.8 ค่าของความขรุขระของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน

ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยการปรับระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเป็น 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิเมตร ตามลำดับเพื่อศึกษาสมบัติทางแสงด้วยระบบยูวีวิสิเบิล สเปกโตรสโกปี ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.9



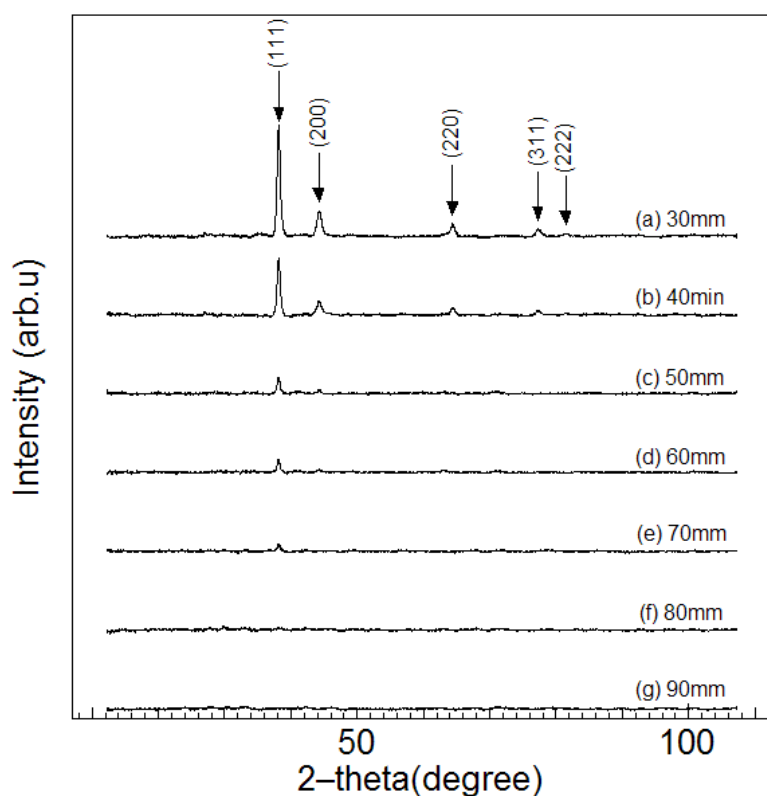
รูปที่ 4.9 กราฟดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.9 พบว่าในการทดลองจะทำการวัดการดูดกลืนของแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-900 นาโนเมตร พบว่ามียอดการดูดกลืนหลักของแสงที่ตำแหน่ง 436 นาโนเมตร ซึ่งเป็นไปตามหลักการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนโลหะ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอน เรโซแนน (surface plasmon resonance, SPR) และ เมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับ พบว่ายอดการดูดกลืนของแสงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาของฟิล์มมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 4.10 ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance, SPR)

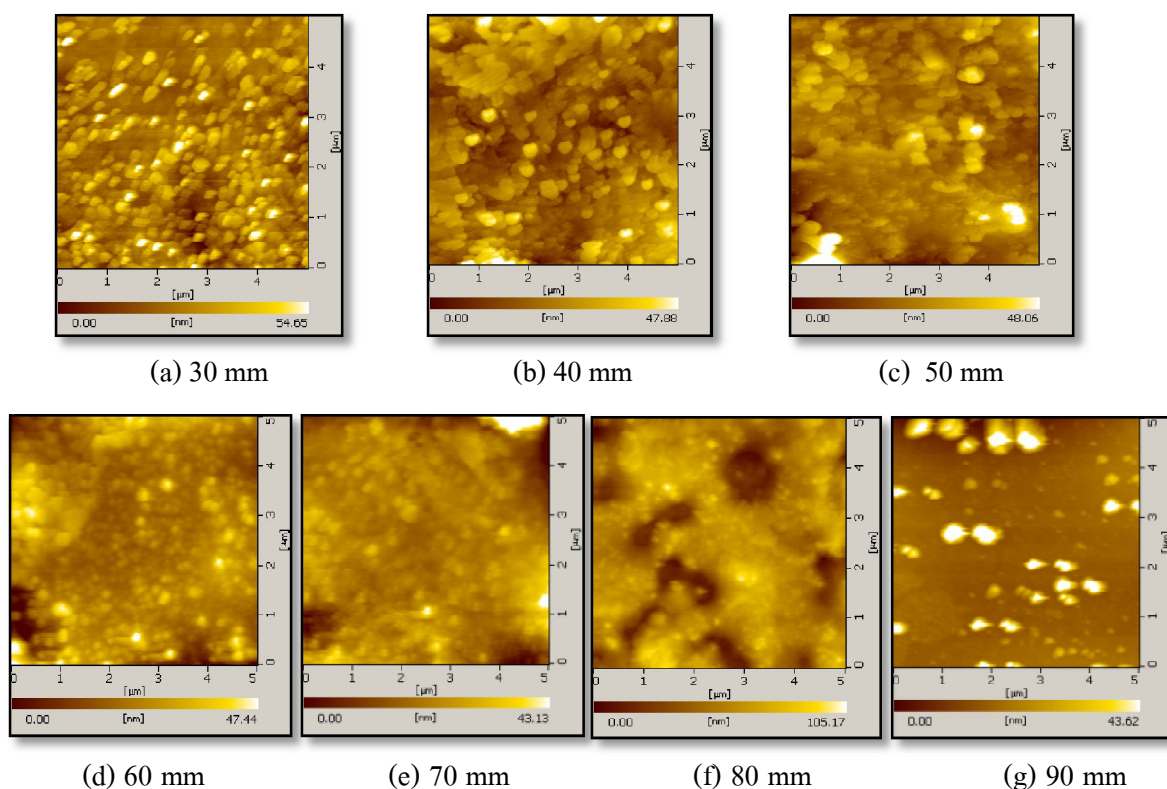
ในส่วนที่สองจะเป็นผลของการวิเคราะห์ฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง 10 กิโลโวลต์ โดยทำการปรับระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเป็น 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อศึกษาถึงสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะต่างกัน

จากรูปที่ 4.11 พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยมียอดการเลี้ยวเบนที่มุม 38.2, 44.3, 64.4 และ 77.4 องศา ตามลำดับ ซึ่งตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนที่ (111), (200), (220) และ (311) ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่า เป็นระนาบการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนเงินที่มีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (Cubic structure) และ จากกราฟจะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับทำให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 4.11(a) ระยะห่างเท่ากับ 30 มิลลิเมตร มีความเข้มของผลึกมากที่สุด นั่นคือ มีความเป็นผลึกมากที่สุด เนื่องจาก เมื่อระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับมีค่าน้อย จะทำให้เกิดการทับถมที่ฐานรองรับเป็นจำนวนมาก (ความหนาของชั้นฟิล์มมีค่ามาก) การกระจายตัวของผลึกจะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เมื่อวัดการเลี้ยวเบนของผลึก ฟิล์มจะมีความเป็นผลึกมากที่สุด จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับขึ้น ความเป็นผลึกของฟิล์มจะลดลงตามลำดับ

ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เตรียมโดยการปรับระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับเป็น 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12

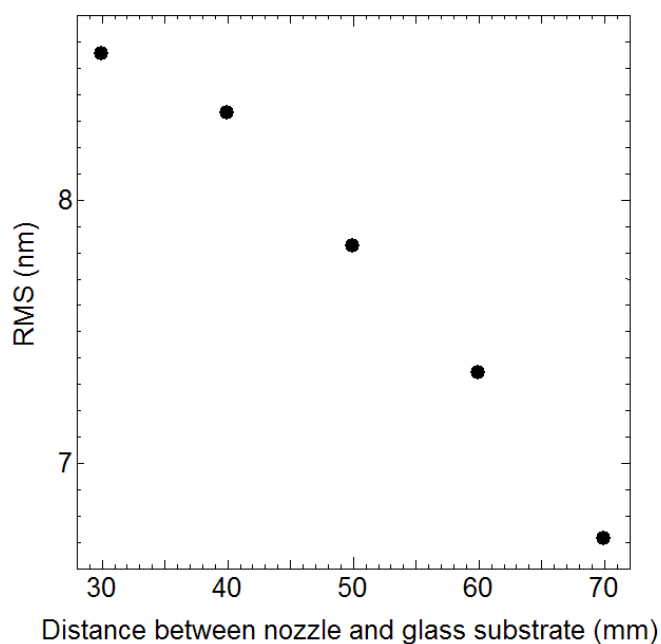


รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม โดยมีระยะการเตรียมฟิล์มฟิล์มต่างๆ กัน (a)-(g) แสดงภาพถ่ายด้านบนพื้นผิว (top view)

จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมดังรูปที่ 4.12 พบว่าฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ โดยรูปที่ 4.12(a,h) ที่ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับเท่ากับ 30 มิลลิเมตร จะมีความขรุขระของพื้นผิวมากที่สุด เนื่องจากการทับถมของเนื้อสารเป็นจำนวนมาก เนื้อฟิล์มจะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ในขณะที่เดียวกันเมื่อทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับขึ้น เนื้อฟิล์มที่เคลือบบนฐานรองรับจะทับถมได้ดีขึ้น มีการกระจายตัวของสารได้ดีขึ้น มีความขรุขระของพื้นผิวลดลง และทำให้เนื้อฟิล์มเป็นรูปแบบมากขึ้น(uniform) โดยจากรูปที่ 4.12(c,j) และ(d,k) ที่ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับเป็น 50 มิลลิเมตร และ 60 มิลลิเมตร จะมีการกระจายตัวบนแผ่นฟิล์มได้ดีที่สุด และจากรูปที่ 4.12(f,m) และ(g,n) แสดงให้เห็นถึงภาพถ่ายของฟิล์มที่ระยะห่างเท่ากับ 70 และ 80 มิลลิเมตร พบว่าฟิล์มที่ได้จะกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ เนื่องมาจากระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับมากเกินไป ทำให้ค่าแรงไฟฟ้าสถิตที่จะบังคับให้สารสเปรย์ลงมามีค่าลดลง ทำให้สารกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งในการทดลองฟิล์มที่ระยะห่างเท่ากับ 70 และ 80 มิลลิเมตร จะไม่นำมาทำวิเคราะห์หาค่าความขรุขระ(RMF)

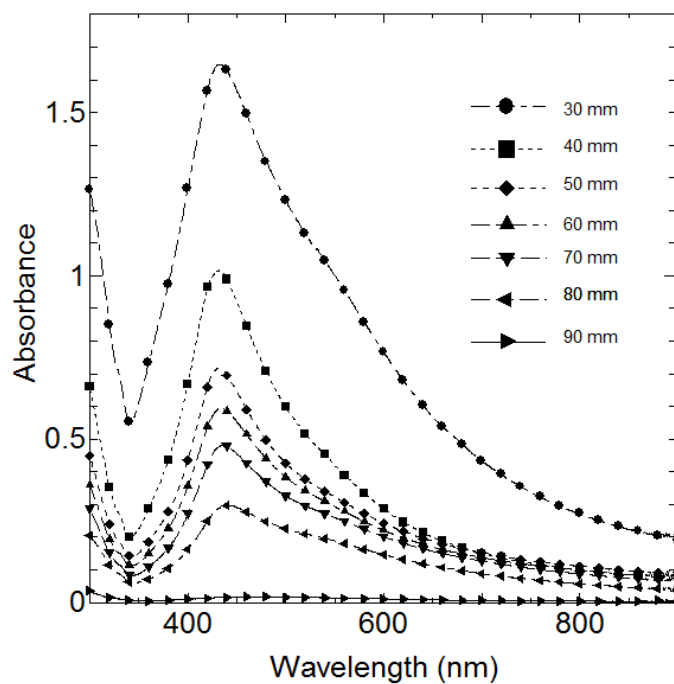
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของฟิล์มที่ระยะต่างๆ กับ ค่าความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์ม

ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับ (มิลลิเมตร)	ค่าความขรุขระของพื้นผิว (นาโนเมตร)
30.00	8.56
40.00	6.78
50.00	4.97
60.00	4.18
70.00	2.35
80.00	-
90.00	-



รูปที่ 4.13 ค่าของความขรุขระของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน

ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เตรียมโดยการปรับระยะทางระหว่างปลายเข็มฉีดยากับฐานรองรับเป็น 30, 40, 50, 70, 80 และ 90 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่.14

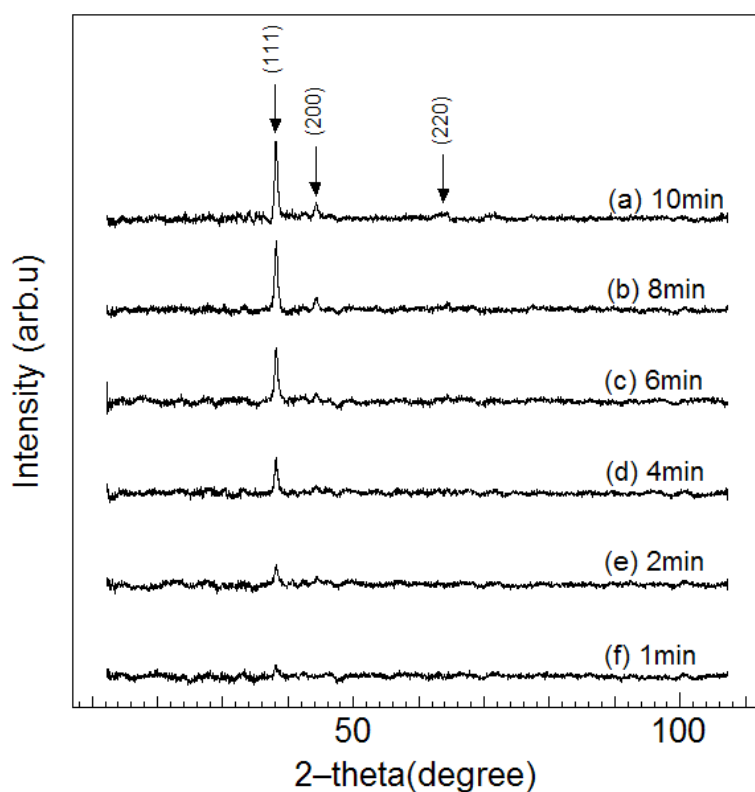


รูปที่ 4.14 กราฟดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.14 พบว่าในการทดลองจะทำการวัดการดูดกลืนของแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-900 นาโนเมตร พบว่ามีพีคหลักของการดูดกลืนของแสงที่ตำแหน่ง 436 นาโนเมตร และเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับ พบว่าค่าการดูดกลืนของแสงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาของฟิล์มมีค่ามากขึ้น

4.1.4 ผลของเวลาในการเตรียมฟิล์มบาง

ในการทดลองจะทำการวิเคราะห์ฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เตรียมโดยการปรับเวลาในการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินเป็น 1, 2, 4, 6, 8, และ 10 นาที ตามลำดับ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของเวลาต่อสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอซ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.15

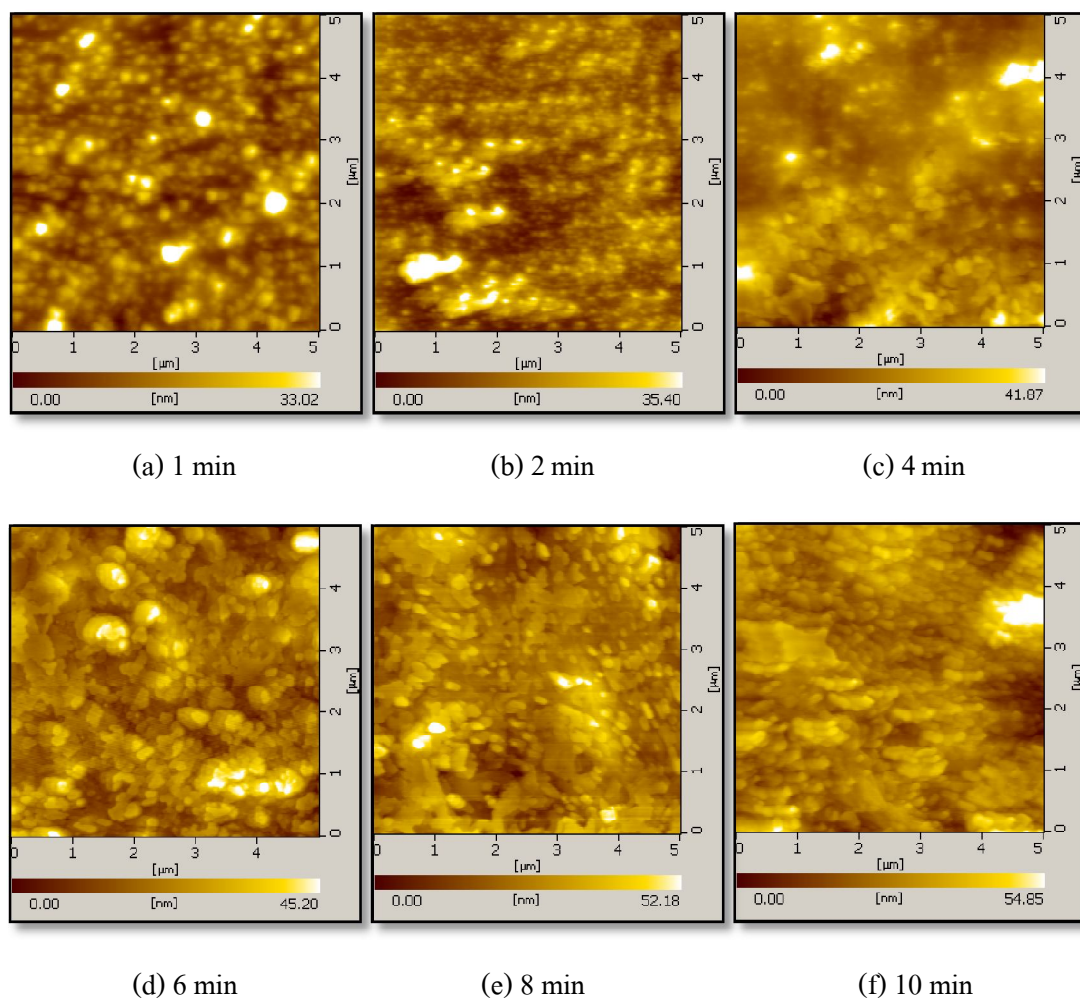


รูปที่ 4.15 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.15 พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยมียอดการเลี้ยวเบนที่มุม 38.2, 44.3, 64.4 และ 77.4 องศา ตามลำดับ ซึ่งตรงกับระยะนาบการเลี้ยวเบนที่ (111), (200), (220) และ (311) ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าป็นระยะนาบการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนเงินที่มี

โครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (Cubic structure) และจากกราฟจะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินมากขึ้น จะทำให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้น ซึ่งจากรูปเส้นกราฟ 4.15(a) ใช้เวลาในการเตรียมฟิล์มบางเท่ากับ 10 นาที และกราฟมีความเข้มของพีกมากที่สุด นั่นคือมีความเป็นผลึกมากที่สุด เนื่องมาจากเมื่อใช้เวลาในการพ่นสารนานมาก ก็จะทำให้สารมาทับถมที่ฐานรองรับเป็นจำนวนมากการกระจายตัวของผลึกจะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เมื่อวัดการเลี้ยวเบนของผลึก ฟิล์มจะมีความเป็นผลึกมากที่สุด จากนั้นเมื่อทำการลดเวลาในการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินน้อยลงความความเป็นผลึกของฟิล์มจะลดลง ตามลำดับ

ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เตรียมโดยการปรับเวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์มเป็นเป็น 1,2,4,6,8 และ 10 นาที ตามลำดับ จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16

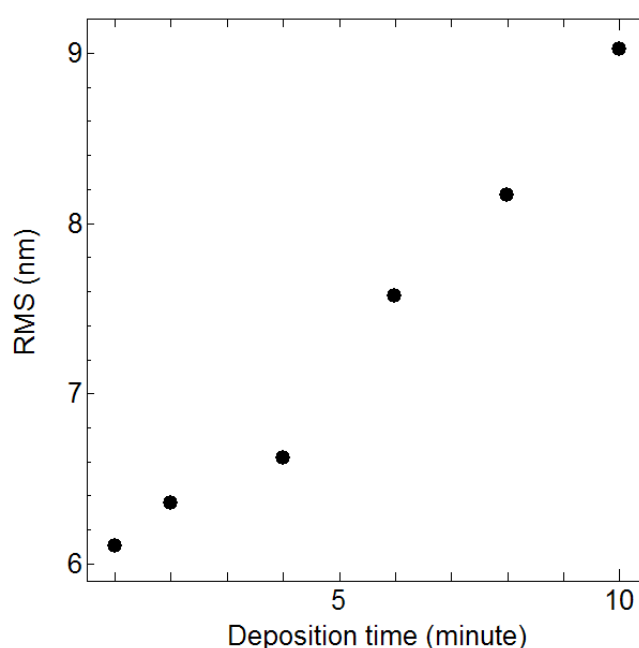


รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจากจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม โดยเวลาในการเตรียมฟิล์มต่างๆ กัน (a)-(f) แสดงภาพถ่ายด้านบนพื้นผิว(top view)

จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมดังรูปที่ 4.16 พบว่าฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ โดยรูปที่ 4.16(f,i) ที่ระยะเวลาในการปลูกฟิล์มเท่ากับ 10 นาที จะมีความขรุขระของพื้นผิวมากที่สุดเนื่องจากการทับถมของเนื้อสารเป็นจำนวนมาก เนื้อฟิล์มจะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ในขณะที่เวลาในการทำลดระยะเวลาในการปลูกให้น้อยลงเนื้อฟิล์มที่เคลือบบนฐานรองรับจะทับถมได้ดีขึ้น มีการกระจายตัวของสารได้ดีขึ้น มีความขรุขระของพื้นผิวลดลง และทำให้เนื้อฟิล์มเป็นรูปแบบมากขึ้น(uniform) โดยจากรูปที่ 4.16(c,i) และ(d,j) ที่ระยะเวลาในการปลูกเป็น 4 นาที และ 6 นาที จะมีการกระจายตัวบนแผ่นฟิล์มได้ดีที่สุด

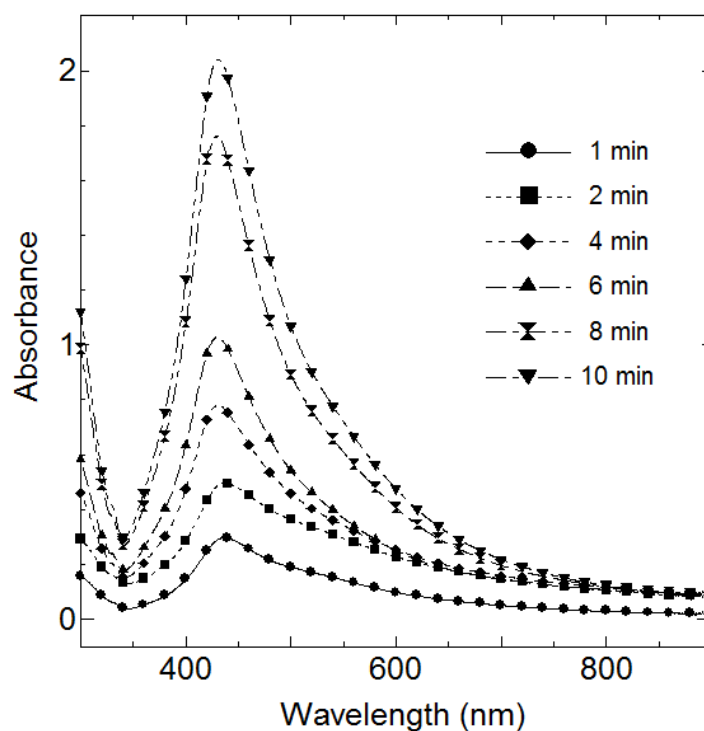
ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มต่างๆกับ ค่าความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์ม

เวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม(นาที)	ค่าความขรุขระของพื้นผิว(นาโนเมตร)
1.00	6.10
2.00	6.35
4.00	6.62
6.00	7.57
8.00	8.16
10.00	9.02



รูปที่ 4.17 ค่าของความขรุขระของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่โดยเวลาในการเตรียมฟิล์มต่างๆ กัน

ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เตรียมการปรับเวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์มเป็น 1,2,4,6,8 และ 10 นาที ตามลำดับจะได้ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เวลาในการเตรียมต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.18 พบว่าในการทดลองจะทำการวัดการดูดกลืนของแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-900 นาโนเมตร พบว่ามีพีคหลักของการดูดกลืนของแสงที่ตำแหน่ง 436 นาโนเมตร และเมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในการเตรียมฟิล์มมากขึ้น พบว่าค่าการดูดกลืนของแสงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาของฟิล์มมีค่ามากขึ้น

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปเงื่อนไขที่ดีที่สุด ในการเลือกนำไปใช้ในการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ความชื้น ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระยะในการพ่นตั้งแต่ 0 – 150 มิลลิเมตร โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1-11 กิโลโวลต์

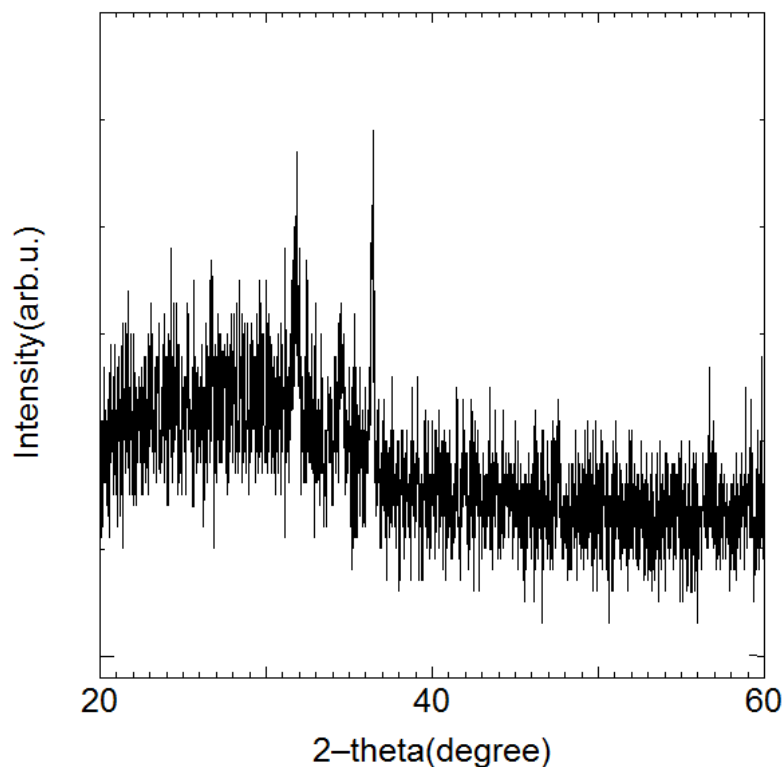
ระยะห่าง (mm)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(mm) ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 1-11 kV										
	1 kV	2 kV	3 kV	4 kV	5 kV	6 kV	7 kV	8 kV	9 kV	10 kV	11 kV
10.00	-	-	-	22.75	18.55	13.67	10.14	8.89	8.48	-	-
20.00	-	-	-	-	42.84	41.20	35.12	21.88	19.12	17.15	14.84
30.00	-	-	-	-	-	55.20	55.59	43.38	34.22	29.51	24.03
40.00	-	-	-	-	-	-	66.43	75.02	53.32	53.12	36.25
50.00	-	-	-	-	-	-	67.89	87.19	93.94	85.15	53.19
60.00	-	-	-	-	-	-	-	93.49	93.79	104.90	86.22
70.00	-	-	-	-	-	-	-	-	>130.0	>130.0	>130.0

ซึ่งจากข้อมูลดังตารางจะเห็นว่าเมื่อทำการเตรียมฟิล์มบางโดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์เป็นเวลา 5 นาที ที่ระยะ 20 – 30 มิลลิเมตร จากการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างพบความเป็นผลึกของฟิล์มบางสูง แต่ยังมีข้อสังเกตจากการทดลองคือพื้นผิวของฟิล์มบนฐานรองรับกระจกหลังการเตรียมฟิล์ม 5 นาทีนั้น พบว่ามีลักษณะเป็นของเหลวเกาะตัวกันขึ้นก่อนที่จะระเหยไปในอากาศ และเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางขึ้น ลักษณะการทับถมกันในรูปของของเหลว) โดยเมื่อทำเปรียบเทียบกับฟิล์มบางที่ระยะห่างเป็น 40 มิลลิเมตร พบว่าหลังการเตรียมฟิล์ม จะได้ฟิล์มที่มีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเงินที่สม่ำเสมอ และไม่รวมตัวกันในลักษณะของเหลว ดังนั้นในเบื้องต้นจึงทำการพิจารณาเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มที่ระยะ 40 มิลลิเมตร ขึ้นไป

จากข้อมูลในตารางตัวแปรที่นำมาพิจารณาคือเงื่อนไขที่ระยะ 40 – 60 มิลลิเมตร (เนื่องจากที่ระยะห่าง 70 มิลลิเมตรขึ้นไปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟิล์ม > 130 มิลลิเมตร) ในเบื้องต้นพบว่าที่ระยะห่าง 40 มิลลิเมตร ลักษณะของเส้นผ่านศูนย์กลางของวงสเปร์ย์มีขนาดเหมาะสมและสามารถครอบคลุมพื้นที่ของหน้ากาก (mask) ที่ปกคลุมขั้วอินเตอร์ดิจิตพอดี้ เมื่อเปรียบเทียบเรื่องของความหนาของฟิล์มบางจะได้ฟิล์มที่มีค่าความหนามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะ 50 และ 60 มิลลิเมตร (เนื่องจากระยะไกลเส้นผ่านศูนย์กลางวงสเปร์ย์สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าอินเตอร์ดิจิต) ดังนั้นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบางสำหรับการประดิษฐ์เซนเซอร์ความชื้น คือการเตรียมฟิล์มบางที่ระยะห่าง 40 มิลลิเมตร ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ ระยะเวลาในการเตรียมฟิล์ม 5 นาที

4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

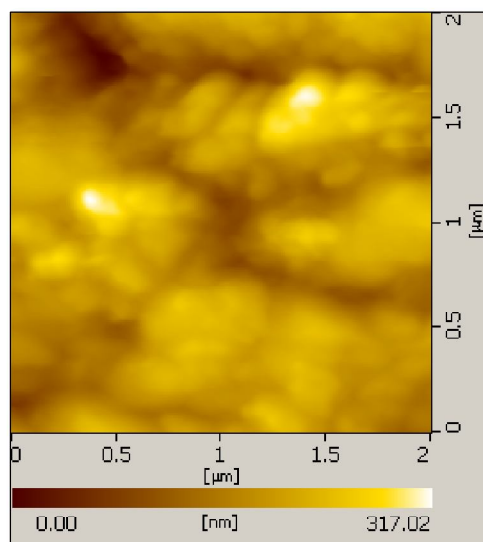
ผลของการวิเคราะห์ฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง 5 กิโลโวลต์ โดยปรับระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเป็น 40 มิลลิเมตรที่ระยะเวลาเท่ากับ 60 นาที่ เพื่อศึกษาถึงสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

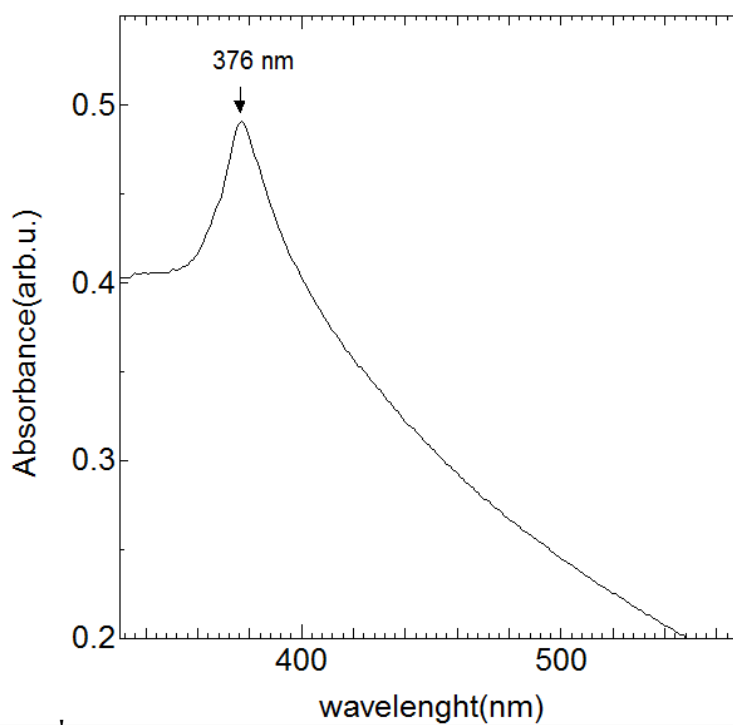
จากภาพที่ 4.19 พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยมียอดการเลี้ยวเบนที่มุม 31.8, 34.5, 36.3 47.6 และ 56.7 องศา ตามลำดับ ซึ่งตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนที่ (100), (002), (101), (102) และ (110) ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ พบว่าเป็นระนาบการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal)

ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ดังกล่าวผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.21



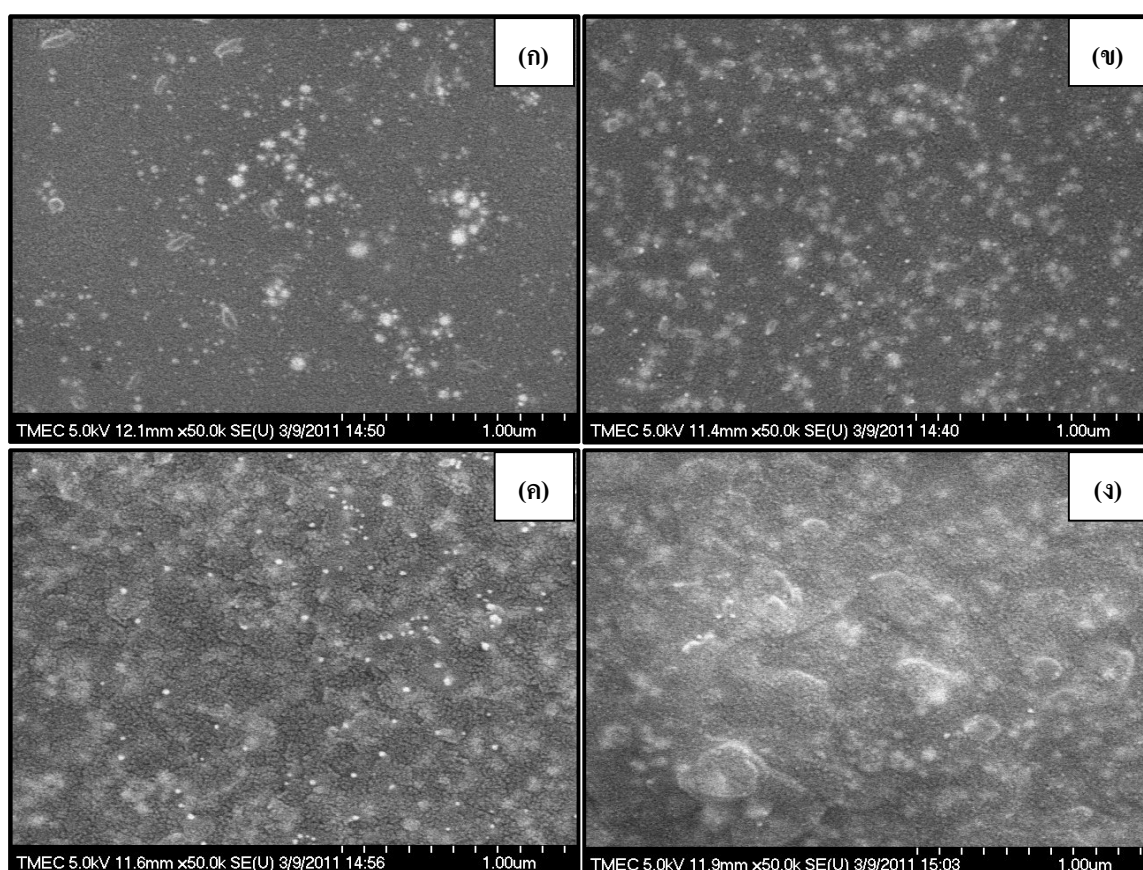
รูปที่ 4.21 กราฟดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

จากรูปที่ 4.21 พบว่าในการทดลองจะทำการวัดการดูดกลืนของแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-900 นาโนเมตร พบว่ามีพีคหลักของการดูดกลืนของแสงที่ตำแหน่ง 376 นาโนเมตร ซึ่งแสดงถึงสมบัติของความเป็นอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์

4.3 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้นจากอนุภาคนาโนเงิน

4.3.1 ผลการตรวจสอบสมบัติพื้นผิวและความหนาของฟิล์มอนุภาคนาโนเงินที่เคลือบเป็นชั้นเซนเซอร์ความชื้น

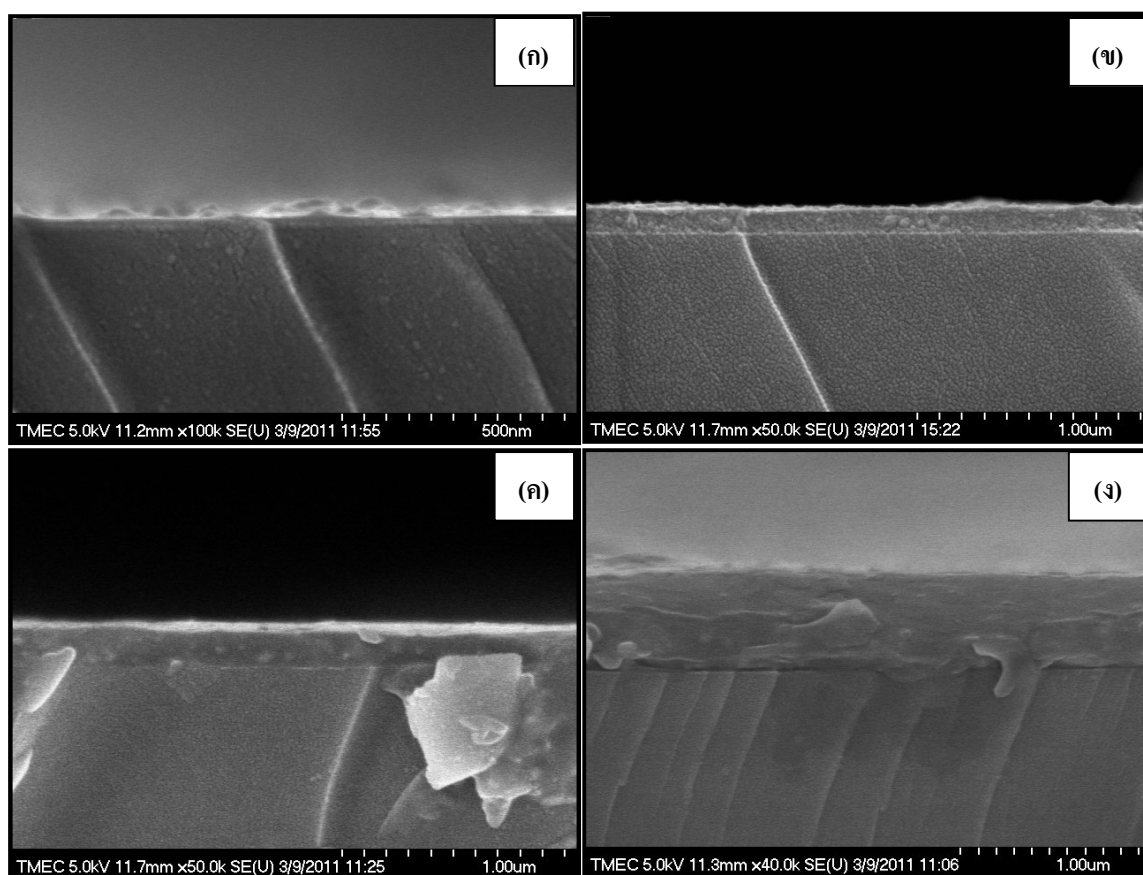
ในการทดลองทำการพ่นอนุภาคนาโนเงินลงบนกระจกเพื่อทำการตรวจสอบสมบัติพื้นผิวและความหนาของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินซึ่งผลการทดลองทั้งหมดเป็นดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มอนุภาคนาโนเงินจากเครื่อง FE-SEM ที่ระยะห่างเท่ากับ 40

มิลลิเมตร โดยเวลาในการเตรียมฟิล์มต่างกัน ((ก) = 1 นาที, (ข) = 5 นาที, (ค) = 10 นาที, (ง) = 10 นาที 2 ครั้ง)

จากรูปที่ 4.19 พบว่ารูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด โดยรูปที่ 4.19(ก) ที่เวลาการเตรียมฟิล์ม 1 นาที สภาพพื้นผิวจะค่อนข้างเรียบและบาง และเมื่อทำการพ่นฟิล์มให้เวลานานขึ้นเป็น 5 นาที ดังรูป 4.19(ข) ฟิล์มจะมีความหนามากขึ้นและเริ่มมีความเป็นรูพรุนเนื่องจากการทับถมของอนุภาคนาโนเงินในขณะที่ยังเพิ่มเวลาในการปลูกฟิล์มเป็น 10 นาที ดังรูป 4.19(ค) พบว่าเนื้อฟิล์มจะจับเริ่มจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และเมื่อใช้เวลาในการเตรียมฟิล์มเป็นเวลา 10 นาที 2 ครั้ง ดังรูป 4.19(ง) พบว่าฟิล์มจะมีความหนามากที่สุด และจะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ มีความขรุขระของพื้นผิวมาก



รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมฟิล์ม 40 มิลลิเมตร มีความหนาของชั้นฟิล์มเป็นเป็นดังตารางที่ 4.6

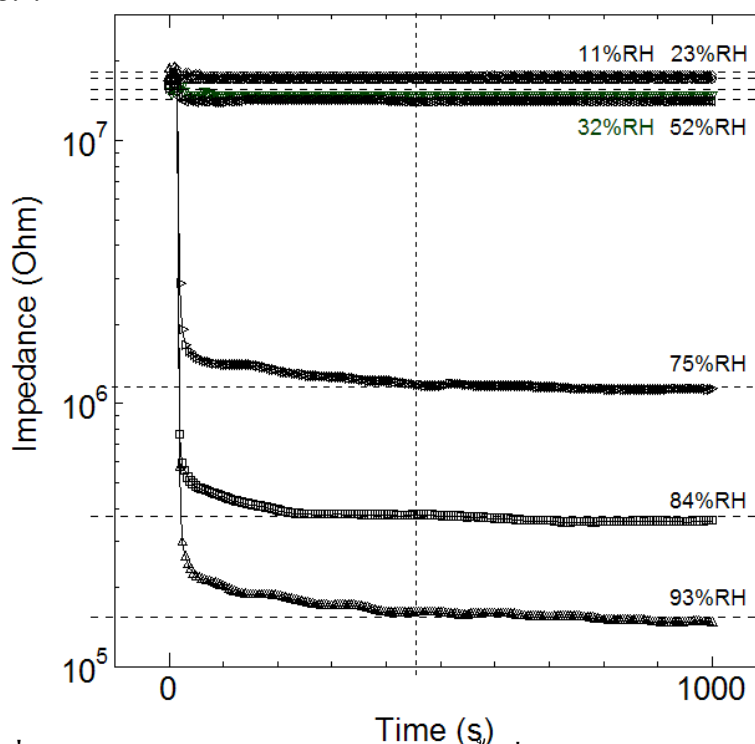
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มต่างๆกับค่าความหนาของชั้นฟิล์มอนุภาคนาโนเงิน

เวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม (นาทีก)	ค่าความหนาของฟิล์ม(นาโนเมตร)
(ก) 1	21.33 ± 1.15
(ข) 5	109.67 ± 6.11
(ค) 10	188.00 ± 8.48
(ง) 10 (2 ครั้ง)	549.00 ± 28.93

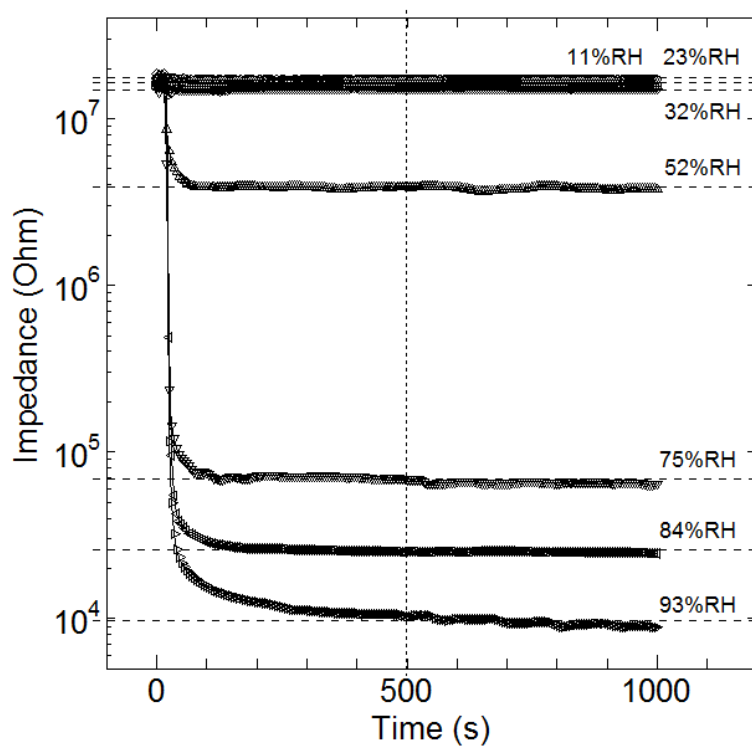
4.3.2 ผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อความชื้น

ในการทดลองจะใช้เซนเซอร์ที่ทำการพันเคลือบฟิล์มบางที่เงื่อนไขของระยะเวลาที่แตกต่างกัน คือ 1, 5, 10 และ 20 นาที มาทำการการวัดค่าการตอบสนองต่อความชื้น โดยในการทดลองจะวัดที่ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 11.30%RH, 23.11%RH, 32.78%RH, 52.89%RH, 75.29%RH, 84.34%RH และ 93.58%RH ตามลำดับ โดยในการทดลองก่อนทำการวัดจะทำการจุ่มเซนเซอร์ที่ความชื้น 11%RH เป็นเวลา 5 นาที และจากนั้นก็จะนำเซนเซอร์ไปจุ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ โดยจะทำการวัดเป็นเวลา 1000 วินาที และเก็บค่าความสัมพันธ์ของเวลาและความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ซึ่งผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อเซนเซอร์ความชื้นเป็นดังต่อไปนี้

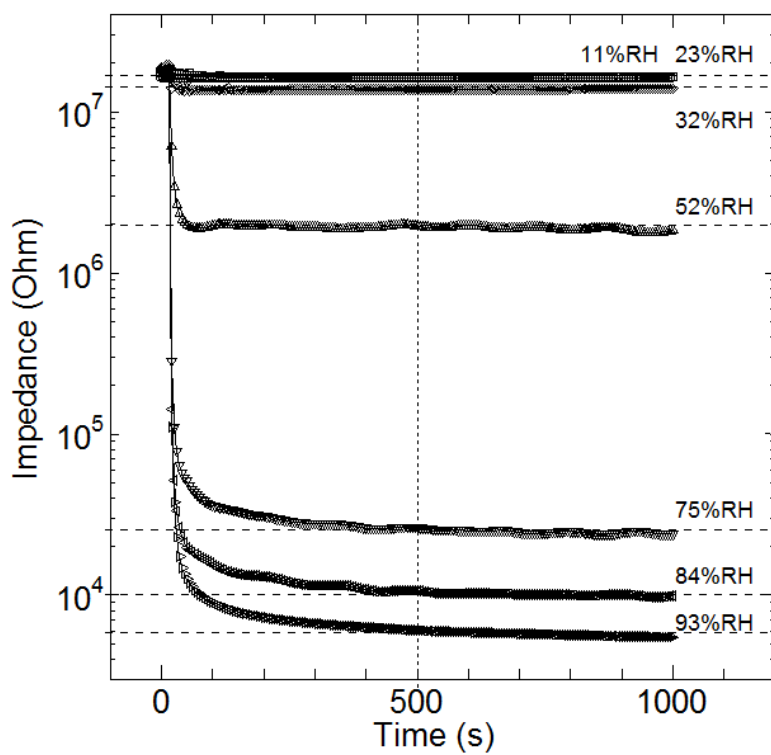
4.3.2.1 ผลการวัดค่าการตอบสนองต่อความชื้น



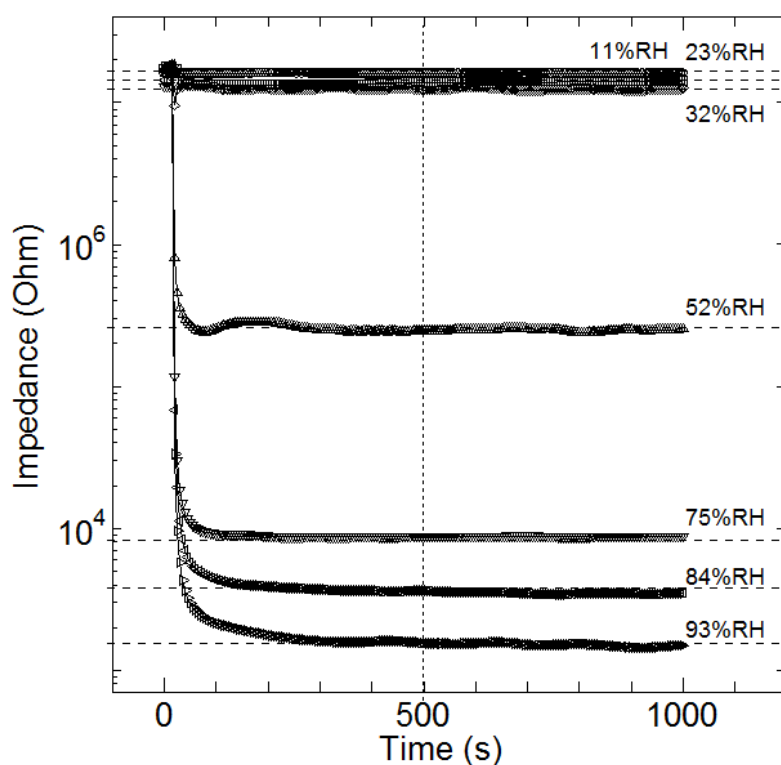
รูปที่ 4.24 การตอบสนองของเซนเซอร์ความชื้นที่ใช้เวลาพันสารเคลือบฟิล์ม 1 นาที



รูปที่ 4.25 การตอบสนองของเซนเซอร์ความชื้นที่ใช้เวลาพ่นสารเคลือบฟิล์ม 5 นาที

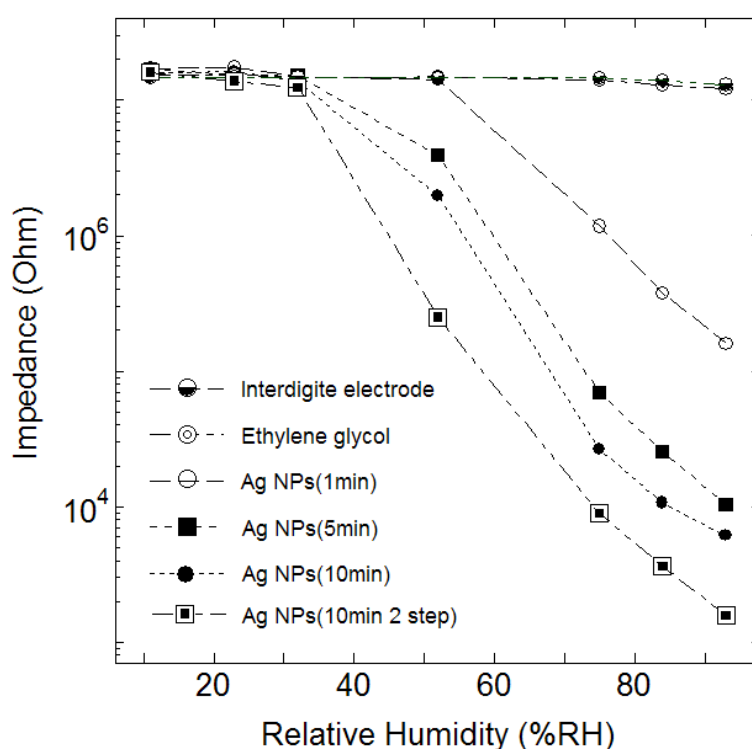


รูปที่ 4.26 การตอบสนองของเซนเซอร์ความชื้นที่ใช้เวลาพ่นสารเคลือบฟิล์ม 10 นาที



รูปที่ 4.27 การตอบสนองของเซนเซอร์ความชื้นที่ใช้เวลาพ่นสารเคลือบฟิล์ม 10 นาที 2 ครั้ง

จากรูปที่ 4.21-4.24 เป็นการแสดงรูปการตอบสนองเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาพ่นสารเคลือบฟิล์มเป็น 1, 5, 10 และ 10 นาที 2 ครั้งตามลำดับ เมื่อเซนเซอร์เก็บค่าได้นิ่งแล้ว เลือกจุดที่เวลา 500 วินาที เก็บค่าอิมพีแดนซ์และนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, RH%) กับค่าอิมพีแดนซ์ดังเป็นดังรูปที่ 4.25



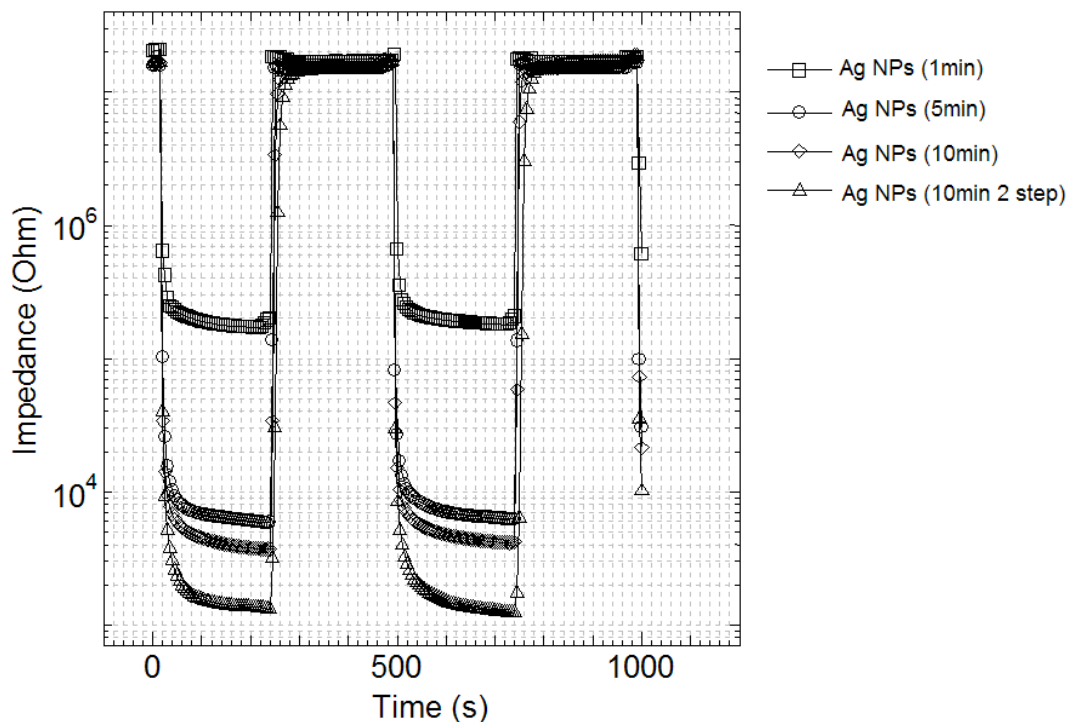
รูปที่ 4.28 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาเตรียมฟิล์มต่างกัน

จากรูปที่ 4.25 เมื่อทำการตรวจการตอบสนองต่อเซนเซอร์วัดความชื้นใช้เวลาพ่นสารเคลือบฟิล์มเป็นเวลาต่างๆ พร้อมทั้งการตอบสนองต่อความชื้นของเอทีลิน ไกลคอล และขั้วไฟฟ้า (Interdigite) พบว่าเซนเซอร์มีการตอบสนองต่อความชื้นในช่วง 11%RH - 93%RH มีช่วงการตอบสนองที่ดี และมีระยะความต่างที่กว้าง (3 order of magnitude $\sim 10^3$) และจากกราฟพบว่า เมื่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้น จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณไอน้ำมากขึ้นทำให้ไอน้ำเกิดการเกาะตัวที่เซนเซอร์มากขึ้น โมเลกุลของน้ำ ที่มีโครงสร้างแบบ H_2O จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน มาจับตัวกับอนุภาคนาโนเงิน (Ag) ต่อกันเป็น โครงข่ายตามลักษณะความชื้นที่มากขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซนเซอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นและนำไฟฟ้าได้ดี [37] นอกจากนี้ จะเห็นว่าการตอบสนองต่อความชื้นของเอทีลิน ไกลคอล และขั้วไฟฟ้า (Interdigite) มีค่าน้อยมาก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการตอบสนองของเอทีลิน ไกลคอล และขั้วไฟฟ้าโดยตรงอย่างเดียว ไม่มีผลต่อการตอบสนองความชื้นของเซนเซอร์ที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนเงิน

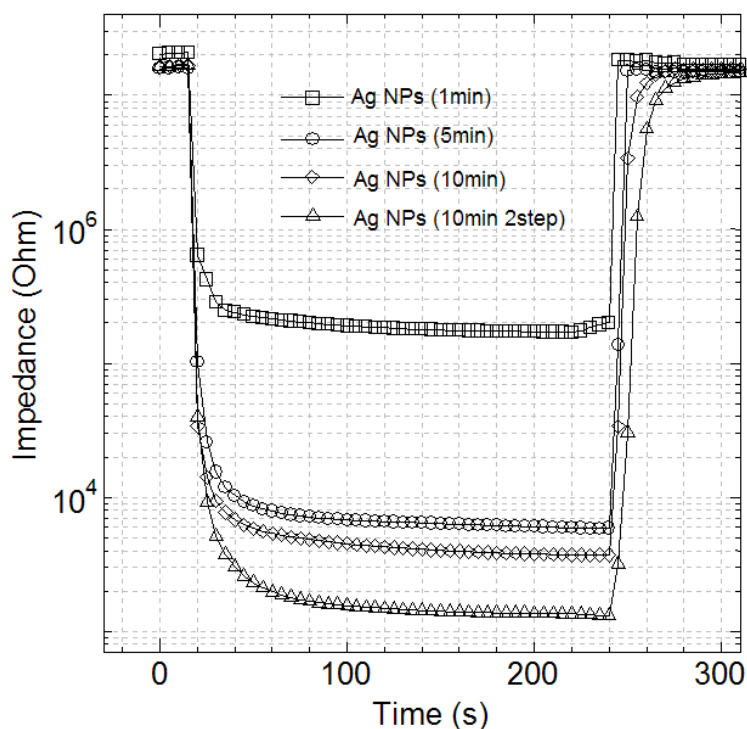
4.3.2.2 ผลการวัดเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้น

ในการทดลองจะใช้เซนเซอร์ที่ทำกรพ่นเคลือบฟิล์มบางที่เงื่อนไขของระยะเวลาที่แตกต่างกันคือ 1, 5, 10 และ 20 นาที ตามลำดับมาทำการวัดเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้น โดยในการทดลองจะทำการใช้ความชื้นสัมพัทธ์ที่น้อยสุด (11%RH) กับความชื้น

สัมพัทธ์ที่มากที่สุด(93%RH) มาทำการตรวจสอบการตอบสนองเซนเซอร์แต่ละตัว โดยจะใช้เวลาการวัดทั้งหมดเป็น1000 วินาที และในระหว่างการทดลองจะทำการเปลี่ยนขดความชื้นสลับกันทุก 250 วินาที และเก็บค่าความสัมพัทธ์ของเวลาและความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ซึ่งผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.26 – 4.27



รูปที่ 4.29 การตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นของเซนเซอร์



รูปที่ 4.30 การตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นของเซนเซอร์ในช่วงเวลา 300 วินาที

จากรูปที่ 4.26 – 4.27 พบว่าเซนเซอร์ทุกเงื่อนไขของเวลาเมื่อมีการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นที่ดี และจากรูปสามารถหาเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับและการคายความชื้นของเซนเซอร์แต่ละตัวได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 คุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้น

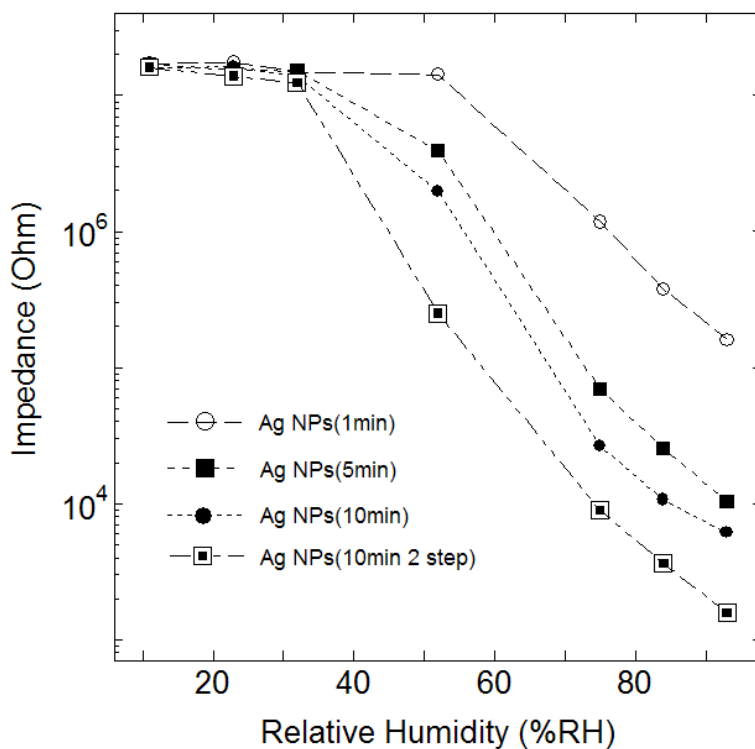
เซนเซอร์	เวลาในการดูดซับความชื้น(วินาที)	เวลาในการคายความชื้น(วินาที)
Ag NPs (1min)	4.00	2.00
Ag NPs (5min)	4.00	2.00
Ag NPs (10min)	4.00	15.00
Ag NPs (10min 2step)	4.00	34.00

จากตารางที่ 4.7 จะพบว่า เซนเซอร์ AgNPs ที่เวลาในการเตรียมฟิล์มเท่ากับ 1 นาที และ 5 นาที จะมีเวลาในการคายความชื้นที่ 2 วินาที โดยจะเห็นว่าเวลาในการคายความชื้นที่เงื่อนไขทั้งสองนี้ จะน้อยกว่าเวลาในการดูดซับความชื้น ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการในการทดลองขณะทำการวัด ใช้วิธีการสลับค่าความชื้นมาตรฐานระหว่างความชื้นที่ 1%RH กับ ความชื้น 93%RHZ(ทำการยกอุปกรณ์เซนเซอร์สลับไปมาและมีการบันทึกค่าอุปกรณ์ในทุกๆ 5 วินาที) ซึ่งกระบวนการวัดดังกล่าวอาจจะมีการคลาดเคลื่อนของการบันทึกเวลาในช่วงคายความชื้น แนวทางการแก้ไขคือการแก้ไขระบบวัดให้เป็นระบบปิดโดยใช้ระบบวัดที่ได้จากการผสมกันระหว่างอากาศแห้งกับอากาศชื้นและมีอุปกรณ์ควบคุมตัวอย่างเช่น mass flow controller ต่อไป สำหรับเซนเซอร์ที่เตรียมที่เงื่อนไขของเวลาเท่ากับ 10 นาที และ 10 นาที 2 ครั้ง ความหนาในชั้นฟิล์มบางบนเซนเซอร์มีค่ามาก ทำให้กระบวนการดูดซับปริมาณของไอน้ำมีมาก ดังนั้นจะพบเวลาในการคายความชื้นที่มีค่ามาก ซึ่งเวลาในการดูดซับและคายดังกล่าวเป็นปัจจัยหนึ่งในการเลือกใช้งานของเซนเซอร์ต่อไป

4.3.2.3 ผลการวัดสภาพความไวในการตอบสนอง

ในการทดลองจะใช้เซนเซอร์ที่ทำการพ่นเคลือบฟิล์มบางที่เงื่อนไขของระยะเวลาที่แตกต่างกันคือ 1, 5, 10 และ 20 นาที มาทำการการวัดค่าการตอบสนองต่อความชื้น โดยในการทดลองจะวัดที่ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 11%, 23%, 32%, 52%, 75%, 84% และ 93%RH ตามลำดับ โดยในการทดลองก่อนทำการวัดจะทำการจุ่มเซนเซอร์ที่ความชื้น 1%RH เป็นเวลา 5 นาที และจากนั้นก็จะนำเซนเซอร์ไปจุ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ โดยจะทำการวัดเป็นเวลา 1000 วินาที และเก็บค่า

ความสัมพันธ์ของเวลาและความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) แล้วคำนวณหาความไวในการตอบสนองต่อความชื้นได้จากรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.31 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาพ่นสารเคลือบฟิล์มเป็นเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.28 พบว่าเซนเซอร์มีสภาพความไวในการตอบสนองต่อความชื้นที่ดี โดยจะสามารถแบ่งช่วงการตอบสนองสภาพความไวในการตอบสนอง เป็นช่วงความชื้นต่างๆ และสามารถเปรียบเทียบสภาพความไวในการตอบสนองต่อความชื้นของเซนเซอร์แต่ละตัวได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 สภาพความไวของเซนเซอร์วัดความชื้น

เซนเซอร์	ความไวในการตอบสนอง (Ohm/%RH)		
	ช่วง 11-32 %RH	ช่วง 32-93 %RH	ช่วง 11-93 %RH
Ag NPs (1min)	8.25×10^5	2.46×10^5	2.17×10^5
Ag NPs (5min)	7.02×10^5	2.48×10^5	1.84×10^5
Ag NPs (10min)	7.30×10^5	2.30×10^5	1.92×10^5
Ag NPs (10min 2 step)	7.24×10^5	2.03×10^5	1.90×10^5

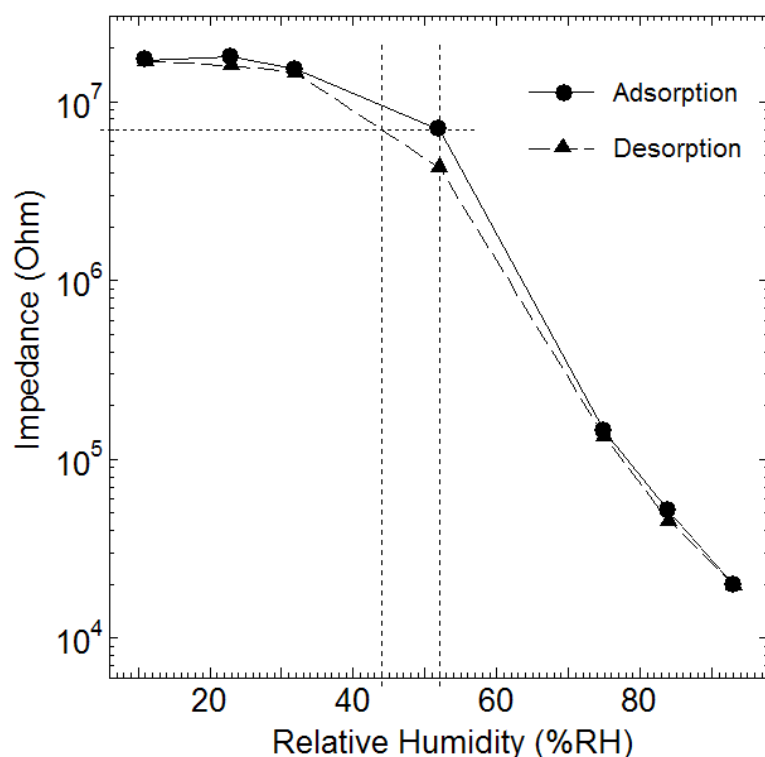
ตารางที่ 4.9 สภาพความไวของเซนเซอร์วัดความชื้น

เซนเซอร์	ความไวในการตอบสนอง (Ohm at 11%RH/93%RH)
	ช่วง 11-93 %RH
Ag NPs (1min)	105.29
Ag NPs (5min)	2594.50
Ag NPs (10min)	4220.43
Ag NPs (10min 2 step)	11709.62

จากการทดสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์ความชื้นเบื้องต้น พบว่าเซนเซอร์ที่ใช้เวลาในการเตรียมเป็น 5, 10 และ 10 นาที 2 ครั้งจะมีค่าการตอบสนองต่อความชื้นในช่วง 11%RH - 93%RH ที่ดี และเมื่อตรวจสอบช่วงเวลาดูดซับและคายความชื้น พบว่าเซนเซอร์ที่เวลาในการเตรียม 1 และ 5 นาที จะมีช่วงเวลาในการตอบสนองที่เร็ว (4 และ 2 วินาที) และจากตารางที่ 4.1 สภาพความไวของเซนเซอร์มีค่าอยู่ในช่วง 10^5 เมื่อพิจารณาสภาพความไวจากตารางที่ 4.9 พบว่าเซนเซอร์ที่เวลาในการเตรียมเท่ากับ 5 นาที มีค่าสูงกว่า ซึ่งสามารถสรุปในเบื้องต้นได้ว่า เซนเซอร์ดังกล่าวเป็นเซนเซอร์ที่ดีที่สุดในการนำมาใช้งาน จากนั้นนำเซนเซอร์ดังกล่าวมาทดสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์ด้านอื่นๆ ต่อไป

4.3.3 ผลการตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้น

ในการทดลองจะใช้เซนเซอร์ที่ทำการเตรียมเป็นเวลา 5 นาที มาทำการตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้นโดยการทดลองจะวัดจากความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงความชื้นสัมพัทธ์มากที่สุด (11% → 23% → 32% → 52% → 75% → 84% → 93%RH ตามลำดับ) หลังจากนั้นก็นำเซนเซอร์วัดที่ความชื้นสัมพัทธ์มากที่สุดและลดลงมาจนถึงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำที่สุด (93% → 84% → 75% → 52% → 32% → 23% → 11%RH ตามลำดับ) โดยในการทดลองก็จะนำเซนเซอร์ไปจุ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ โดยจะทำการวัดเป็นเวลา 1000 วินาที และเก็บค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ที่เวลา 500 วินาที ของแต่ละความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งผลการทดลองเป็นดังรูป 4.29

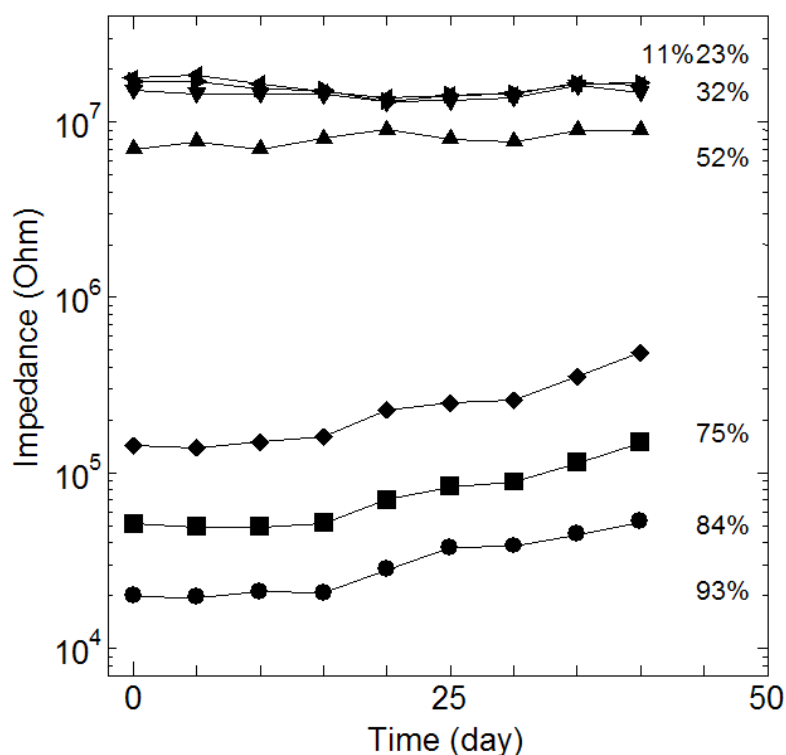


รูปที่ 4.32 การตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของอุณหภูมิในการดูดซับและคายความชื้น

จากรูปที่ 4.29 พบว่า การตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของอุณหภูมิในการดูดซับและคายความชื้นของ เซนเซอร์ จะเกิดอิทธิพลที่มากที่สุดเท่ากับ 8%RH

4.3.4 ผลการตรวจสอบเสถียรภาพของเซนเซอร์

โดยการทดลองจะใช้เซนเซอร์ที่ทำการเตรียมฟิล์มเป็นเวลา 5 นาที มาทำการตรวจสอบ เสถียรภาพของเซนเซอร์ โดยในการทดลองจะทำการวัดที่ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 11%, 23%, 32%, 52%, 75%, 84% และ 93%RH ตามลำดับแล้วบันทึกผลระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ กับค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) โดยจะทำการวัดทุก 5 วัน และวัดเป็นระยะเวลาทั้งหมดเป็น ระยะเวลา 40 วัน และผลของการตรวจสอบเสถียรภาพของเซนเซอร์เป็นดังรูปที่ 4.30

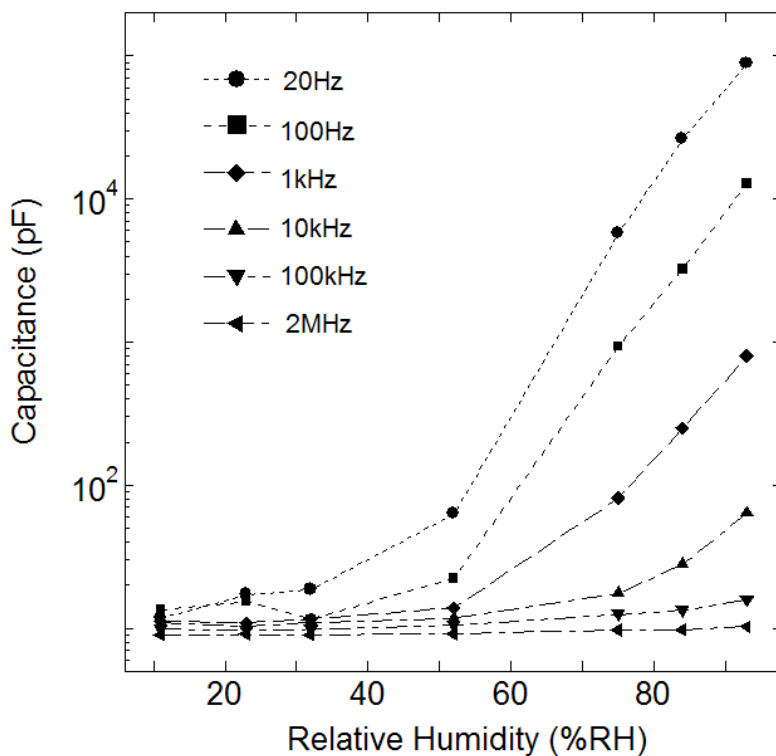


รูปที่ 4.33 การตรวจสอบเสถียรภาพของเซนเซอร์เมื่อเวลาผ่านไป 40 วัน

จากรูปที่ 4.30 พบว่าเสถียรภาพของเซนเซอร์ โดยเมื่อเวลาผ่านไป 40 วัน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนในระดับหนึ่งประมาณ 32 kΩ ที่ 93%RH ซึ่งเกิดมาจากอุปกรณ์เซนเซอร์เมื่อใช้งานไปสักระยะ จะมีสิ่งสกปรกจำพวกฝุ่นละอองที่มีอยู่ในอากาศมาเกาะที่บริเวณชั้นฟิล์มบางของเซนเซอร์ ทำให้เวลาวัดครั้งต่อไป เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น แนวทางการแก้ไขต่อไป อาจนำโพลิเมอร์บางชนิดมาห่อหุ้ม หรืออาจมีการใช้อุปกรณ์ห่อหุ้มโดยการใช้ตาข่ายสแตนเลสขนาดเล็กมากๆ (sieve mesh > 200 mesh) มาหุ้มหรือคลุมอุปกรณ์เซนเซอร์ดังกล่าว [38,39]

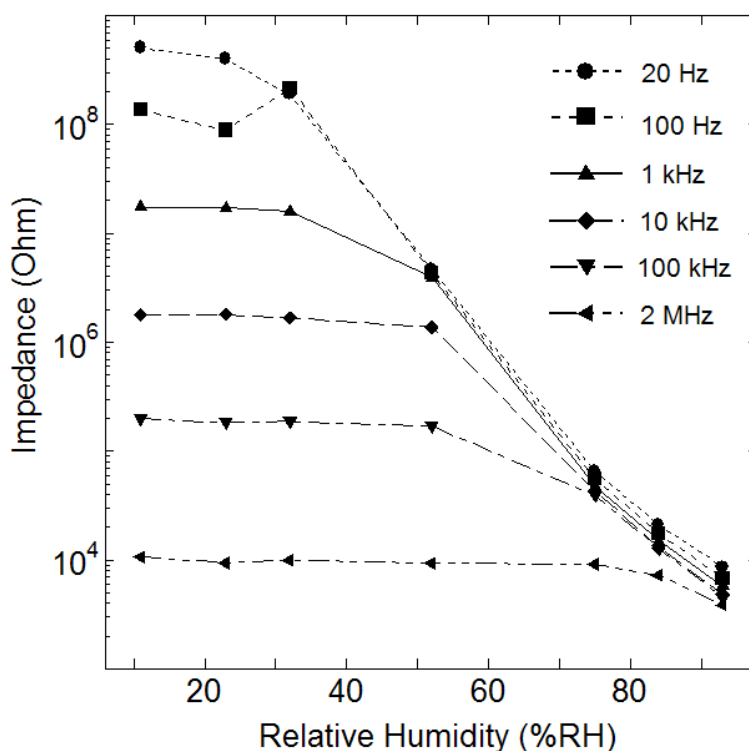
4.3.5 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี

ในการทดลองจะทำการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่ความถี่ 20 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz และ 2 MHz ตามลำดับและจะทำการศึกษาถึงวงจรสมมูล (equivalent circuit หรือ model) ของเซนเซอร์ โดยจะทำการวัดที่ความถี่สัมพัทธ์ค่าต่างๆและเก็บค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) กับมุมในรูปเรเดียน (radian) และนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานเชิงซ้อนจินตภาพ กับความต้านทานเชิงซ้อนจริง (-Zim & Zre) มาทำการเขียนกราฟหารูปแบบทางวงจรไฟฟ้าของเซนเซอร์



รูปที่ 4.34 ความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ในกรณีความถี่แตกต่างกัน

สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางความจุไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 4.31 โดยที่เมื่อความชื้นเพิ่มสูงขึ้นความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีความชื้นต่ำ อธิบายได้โดยการที่ไอน้ำที่แทรกอยู่ในชั้นฟิล์มประพจน์ตัวเปรียบได้กับการที่มีการเพิ่มของค่าไดโพลอิเล็กทริก (การเพิ่มขึ้นของปริมาณไอน้ำ) ซึ่งโมเลกุลของน้ำถือว่าเป็นโมเลกุลที่มีอิเล็กทริกไดโพลโมเมนต์ (electric dipole moment) แบบถาวร (หรือเป็นโมเลกุลที่มีขั้วทางไฟฟ้า polar) และเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจะพยายามจัดเรียงตัวกันให้อยู่ในแนวของสนามไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อมีการจัดเรียงตัวกันจะทำให้มีการประพจน์ตัวเป็นตั้เก็บประจุ ซึ่งเมื่อมีปริมาณไอน้ำมากขึ้นความจุไฟฟ้าดังกล่าวย่อมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และผลของความถี่ในกรณีความถี่สูงค่าความจุไฟฟ้าดังกล่าวเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับกรณีของความถี่ต่ำ นั่นหมายถึง ความถี่ที่สูงมากมีผลทำให้การจัดเรียงตัวของโมเลกุลน้ำ ดังกล่าวไม่สามารถจัดเรียงตัวได้ดีถึงแม้ว่าจะมีปริมาณของไอน้ำ มากก็ตาม[35]

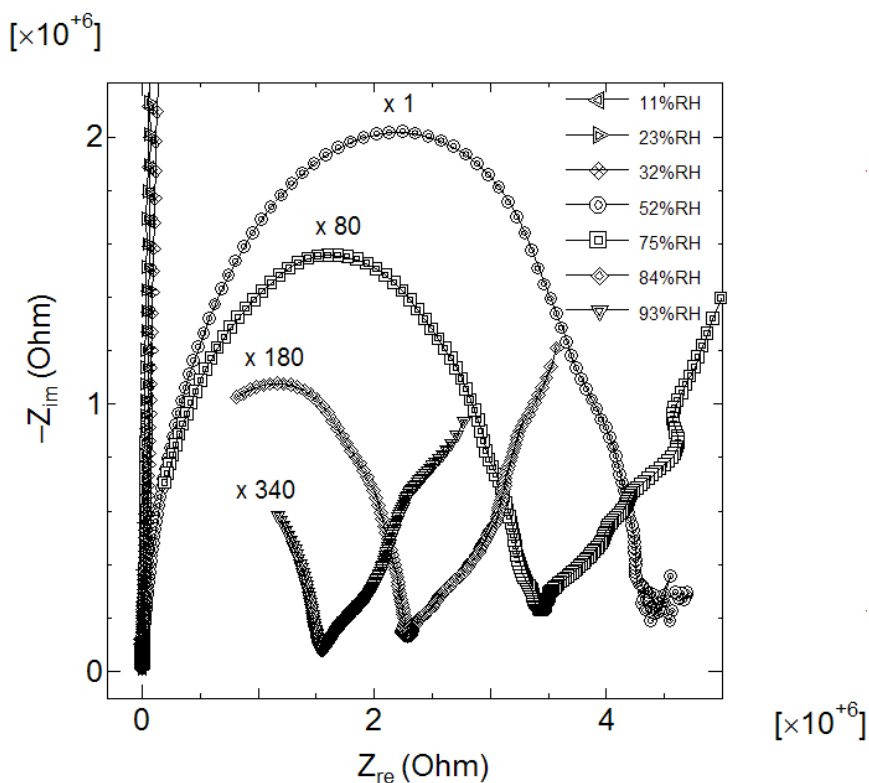


รูปที่ 4.35 ความต้านทานเชิงซ้อนที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆในกรณีความถี่แตกต่างกัน

สำหรับผลของความถี่ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจากรูปที่ 4.32 พบว่าที่ความถี่ต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ความถี่สูงอันเนื่องมาจากผลของโพลาไรเซชันของโมเลกุลของน้ำ โดยสามารถอธิบายได้จากกรณีของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าข้างต้น โดยผลจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าและความต้านทานเชิงซ้อนจากรูปที่ 4.31 และ 4.32 สามารถสรุปได้ว่า ปรากฏการณ์ไดอิเล็กตริก (Dielectric Phenomenon) จะเกิดขึ้นน้อยมากหรือไม่ปรากฏขึ้นเลยในกรณีที่สนามไฟฟ้ามีความถี่ค่าสูงๆ[36]

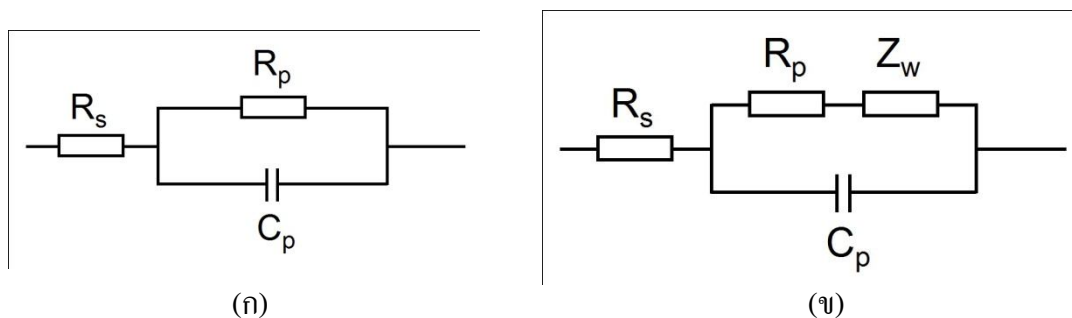
และจากการวิเคราะห์คุณลักษณะวงจรด้วยวิธีคอมเพล็กซ์อิมพีแดนซ์ (Complex Impedance) เพื่อทำการศึกษาถึงวงจรสมมูล (equivalent circuit หรือ model) ของเซนเซอร์ โดยใช้ความถี่ในช่วงความถี่ 20 Hz ถึง 2 MHz ในช่วงความชื้น 11%RH – 93%RH และเก็บค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) กับมุมในรูปเรเดียน (radian) และนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานเชิงซ้อนจินตภาพกับความต้านทานเชิงซ้อนจริง (-Zim & Zre) มาทำการพลอตกราฟที่เรียกว่า Nyquist plot หรือ Cole-Cole plot ดังแสดงในรูปที่ 4.33 ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ได้ถึงรูปแบบทางวงจรไฟฟ้าของเซนเซอร์ได้จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่าความต้านทานเชิงซ้อนเกิดได้จากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานส่วนจริง $R(f)$ และส่วนจินตภาพ $jX(f)$ ซึ่งหมายถึงค่าของความต้านทาน (Resistance) และค่าของความจุไฟฟ้า (Capacitance) แสดงได้ดังสมการ 4.1

$$Z(f) = R(f) + jX(f) \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.36 การวิเคราะห์คุณลักษณะวงจรด้วยวิธีคอมเพล็กซ์อิมพีแดนซ์ (Complex Impedance)

สำหรับที่ความชื้นในช่วง 11%-32% RH Nyquist plot แสดงให้เห็นถึงรูปแบบในลักษณะเส้นตรงโดยที่ความถี่สูงสุดที่สามารถพลอตได้อยู่ในช่วงความถี่ < 10 kHz (มีรายงานวิจัยถึงในย่านความชื้นต่ำ จะเกิดลักษณะครึ่งวงกลมที่กว้างมากเมื่อเทียบกับความชื้นค่าสูง ดังนั้นในการวัดจะสามารถพบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเชิงซ้อนในช่วงความถี่ต่ำเท่านั้น [40,41] สำหรับที่ความชื้น 52%RH จะพบรูปแบบครึ่งวงกลมที่ชัดเจน โดยรูปแบบการเกิดครึ่งวงกลมดังกล่าวเกิดจาก ปฏิกิริยาการนำไฟฟ้าไอออน และการส่งผ่านประจุ เมื่อพิจารณาในช่วงความชื้น 75%RH – 93%RH รูปแบบครึ่งวงกลมจะเริ่มลดลงและเกิดลักษณะเส้นตรงในช่วงความถี่สูงตามความชื้นที่สูงขึ้นอธิบายได้โดยเกิดการนำไฟฟ้า (electrical conduction) โดยปรากฏการณ์การส่งผ่านประจุเป็นปัจจัยหลักที่อยู่เหนือปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน และสามารถอธิบายถึงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้ โดยรูปที่ 4.34



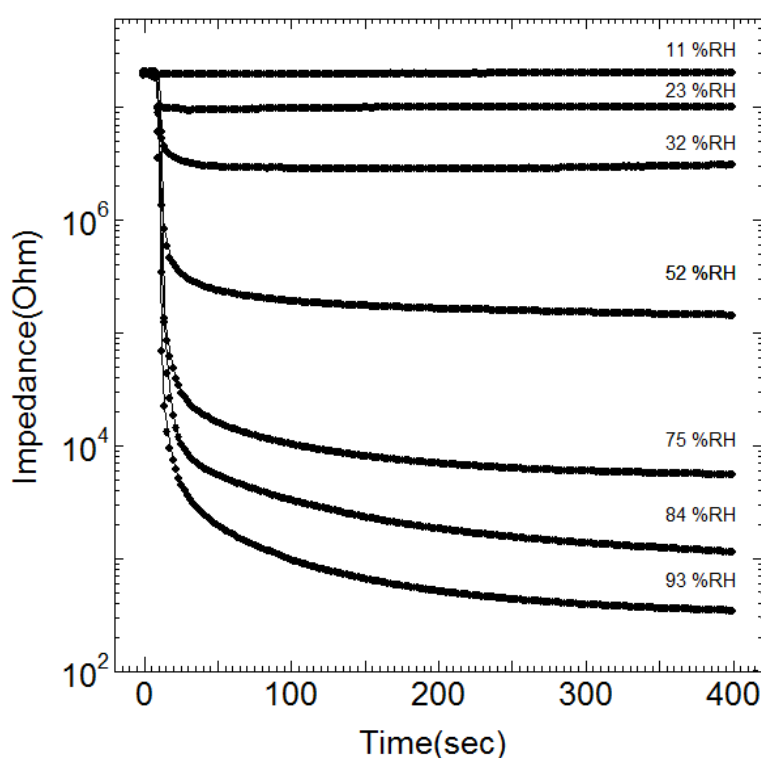
รูปที่ 4.37 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซนเซอร์ความชื้นในช่วง (ก) ความชื้นต่ำ (ข) ความชื้นสูง

ในเบื้องต้นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าอธิบายได้จาก วงจรขนานระหว่างค่าความต้านทาน R_{p1} (Resistance) และค่าความจุไฟฟ้า C_{p1} (Capacitance) ที่เกิดจากบริเวณรอยต่อของชั้นฟิล์มอนุภาคนาโนเงินกับขั้วไฟฟ้า (Electrode contact) ต่ออยู่กับวงจรขนานระหว่างค่าความต้านทาน R_{p2} และค่าความจุไฟฟ้า C_{p2} ซึ่งแสดงถึงบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคนาโนเงิน (Intergranular contact) ในช่วงความชื้นต่ำเซนเซอร์ความชื้นเป็นไปตามกลไกของ hopping mechanism สำหรับในช่วงความชื้นสูงเซนเซอร์ประพฤติตัวตามกระบวนการ ion diffusion

4.4 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้นจากอนุภาคซิงค์ออกไซด์

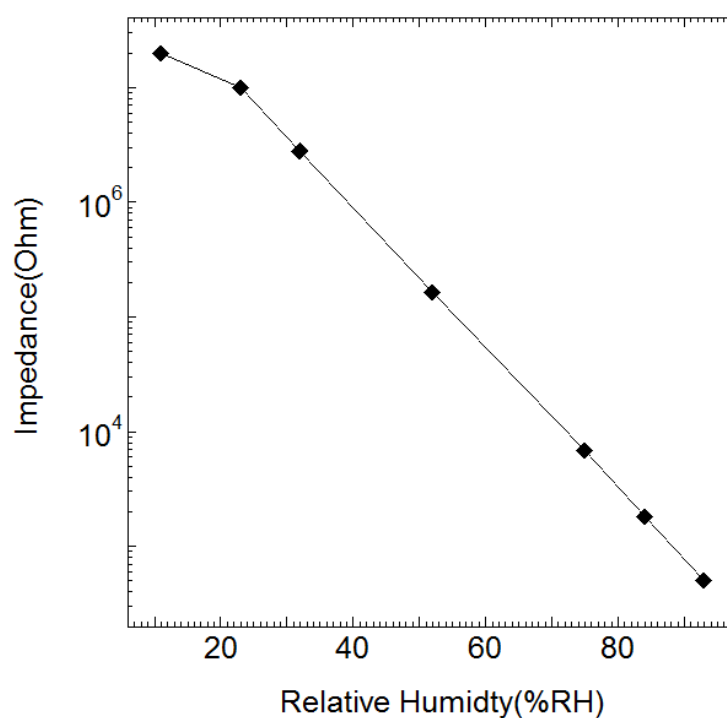
4.4.1 ผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อความชื้น

ในการทดลองจะใช้เซนเซอร์ที่ทำการพันเคลือบฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มาทำการวัดค่าการตอบสนองต่อความชื้น โดยในการทดลองจะวัดที่ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 11.30%RH, 23.11%RH, 32.78%RH, 52.89%RH, 75.29%RH, 84.34%RH และ 93.58%RH ตามลำดับ โดยในการทดลองก่อนทำการวัดจะทำการจุ่มเซนเซอร์ที่ความชื้น 11%RH เป็นเวลา 5 นาที และจากนั้นก็นำเซนเซอร์ไปจุ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ โดยจะทำการวัดเป็นเวลา 400 วินาที และเก็บค่าความต้านทานของเวลาและความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ซึ่งผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อเซนเซอร์ความชื้นเป็นดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.38 การตอบสนองของเซนเซอร์ความชื้นจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

จากรูปที่ 4.21 เป็นการแสดงรูปการตอบสนองเซนเซอร์วัดความชื้นจากอนุภาคนาโนซึ่งคือ ออกไซด์ เมื่อเซนเซอร์เก็บค่าได้นิ่งแล้ว เลือกจุดที่เวลา 200 วินาที เก็บค่าอิมพีแดนซ์และนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, RH%) กับค่าอิมพีแดนซ์ดังเป็นดังรูปที่ 4.25

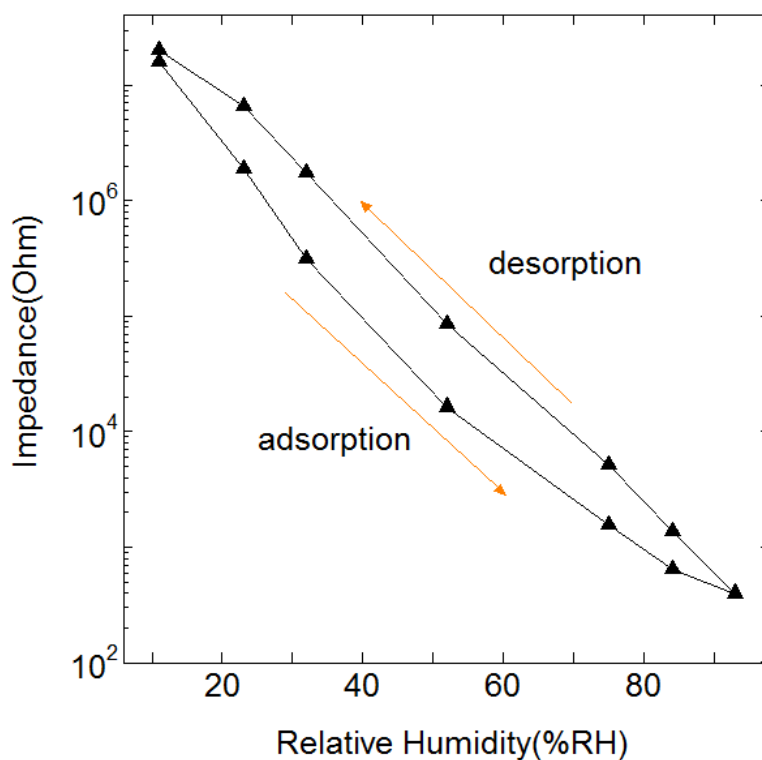


รูปที่ 4.39 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้น (Impedance, Ω)

จากรูปที่ 4.25 เมื่อทำการตรวจวัดการตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นพบว่าเซนเซอร์ มีการตอบสนองต่อความชื้นในช่วง 11%RH - 93%RH มีช่วงการตอบสนองที่ดี และมีระยะความ ต่างที่กว้าง (5 order of magnitude $\sim 10^5$) และจากกราฟพบว่า เมื่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้น จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณไอน้ำมากขึ้นทำให้ไอน้ำเกิดการเกาะตัวที่ เซนเซอร์มากขึ้น โดยโมเลกุลของน้ำ ที่มีโครงสร้างแบบ H_2O จะเกิดการแตกตัวเป็นไฮดรอกไซด์ มาจับ ตัวกับอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์เกิดเป็นกระบวนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ผิวของโลหะ ออกไซด์

4.4.2 ผลการตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้น

ในการทดลองจะใช้เซนเซอร์ที่ทำการเตรียมเป็นเวลา 5 นาที มาทำการตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้น โดยในการทดลองจะวัดจากความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงความชื้นสัมพัทธ์มากที่สุด (11% → 23% → 32% → 52% → 75% → 84% → 93% RH ตามลำดับ) หลังจากนั้นก็นำเซนเซอร์วัดที่ความชื้นสัมพัทธ์มากที่สุดและลดลงมาจนถึงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำที่สุด (93% → 84% → 75% → 52% → 32% → 23% → 11% RH ตามลำดับ) โดยในการทดลองก็จะนำเซนเซอร์ไปจุ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ โดยจะทำการวัดเป็นเวลา 400 วินาที และเก็บค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ที่เวลา 200 วินาที ของแต่ละความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งผลการทดลองเป็นดังรูป 4.29



รูปที่ 4.40 การตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้น

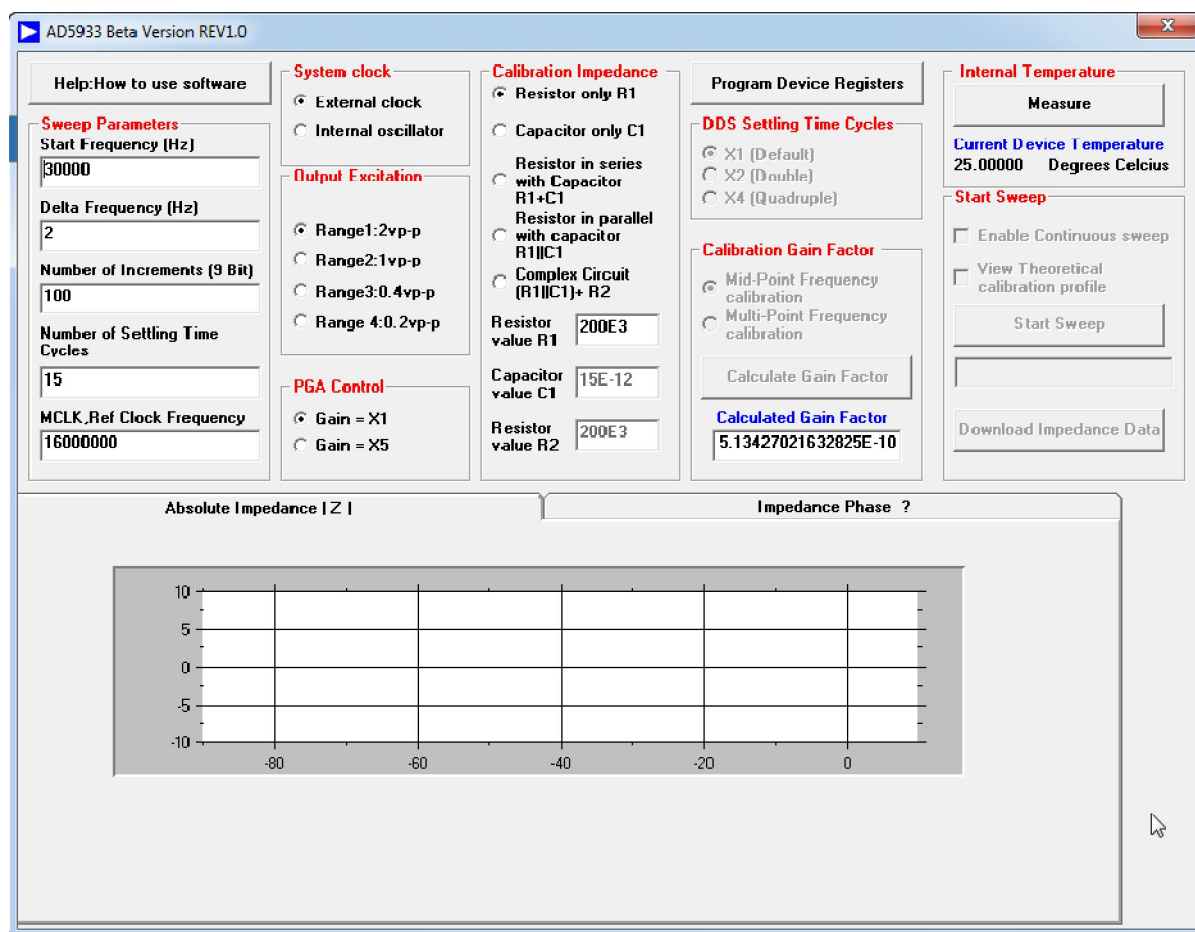
จากรูปที่ 4.29 พบว่า การตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้นของเซนเซอร์ จะเกิดอิทธิพลที่มากที่สุดเท่ากับ 12% RH

4.5 ผลการทดสอบเครื่องต้นแบบการตรวจวัดความชื้น

เครื่องต้นแบบสำหรับตรวจวัดความชื้นภาคสนามซึ่งระบบต้นแบบภาคสนามสำหรับตรวจวัดความชื้นจะประกอบด้วยหัววัดความชื้นที่สัมผัสกับสิ่งที่ต้องการวัดความชื้นโดยสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์จะถูกส่งผ่านไปยังวงจรปรับเงื่อนไขสัญญาณ (signal conditional circuit) แล้วจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลผ่านวงจรแปลงสัญญาณไปประมวลผลยังไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วแสดงผลการการวัดที่ได้ออกทางหน้าจอแสดงผลในที่นี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับคอมพิวเตอร์พกพา, แท็บเล็ต หรือสมาร์ทโฟนได้ ผ่านการเชื่อมต่อพอร์ต USB



รูปที่ 4.41 ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์ต้นแบบ



รูปที่ 4.42 ภาพถ่ายโปรแกรมสำหรับตรวจวัดความถี่ในชุดอุปกรณ์ต้นแบบ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยได้มีการนำอนุภาคนาโนเงินใช้ในงานวิจัยและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มาประยุกต์ใช้ในการสร้างเป็นชั้นฟิล์มบางสำหรับการประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นซึ่งในเบื้องต้นได้ศึกษาถึงพหุศาสตร์ถึงเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนดังกล่าว

การประดิษฐ์เซนเซอร์วัดความชื้นจากอนุภาคนาโนเงินสามารถเตรียมได้จากเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มที่ระยะเวลา 1, 5, 10 และ 10 นาที 2 ครั้ง โดยความหนาของชั้นฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินเท่ากับ 21.33 ± 1.15 , 109.67 ± 6.11 , 188.00 ± 8.48 และ 549.00 ± 28.93 นาโนเมตร ตามลำดับและเมื่อทำการวิเคราะห์การตอบสนองต่อการวัดความชื้น พบว่าเซนเซอร์มีการตอบสนองต่อความชื้นในช่วง 11%RH - 93%RH มีช่วงการตอบสนองที่ดี และมีระยะความต่างที่กว้าง (3 order of magnitude $\sim 10^3$) โดยเมื่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้น จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณไอน้ำมากขึ้นทำให้ไอน้ำเกิดการเกาะตัวที่เซนเซอร์มากขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของเซนเซอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นและเมื่อทำการวิเคราะห์เวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับ และคายความชื้น พบว่า เซนเซอร์มีการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นที่ดี โดยมีเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับเป็น 4 วินาที ในทุกเซนเซอร์ และเวลาในการคายความชื้นของเซนเซอร์แต่ละตัวได้เป็น 2, 2, 15 และ 34 วินาที สภาพความไวในการตอบสนองต่อความชื้นเท่ากับ 2.17×10^5 , 1.84×10^5 , 1.92×10^5 และ 1.90×10^5 Ohm/%RH เมื่อวัดช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 11-93 %RH ของทุกเซนเซอร์ ตามลำดับ สำหรับการตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้นของฟิล์มในเงื่อนไขของเวลาเท่ากับ 5 นาที พบว่ามีค่าอิทธิพลมากที่สุดเท่ากับ 8%RH

การประดิษฐ์เซนเซอร์วัดความชื้นจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ สามารถเตรียมได้จากเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มที่เวลาในการเตรียมฟิล์มเท่ากับ 60 นาที ตามลำดับ และเมื่อทำการวิเคราะห์การตอบสนองต่อการวัดความชื้น พบว่าเซนเซอร์มีการตอบสนองต่อความชื้นในช่วง 11%RH - 93%RH มีช่วงการตอบสนองที่ดี และมีระยะความต่างที่กว้าง (5 order of magnitude $\sim 10^5$) สำหรับการตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้นของฟิล์มในเงื่อนไขของเวลาเท่ากับ 5 นาที พบว่ามีค่าอิทธิพลมากที่สุดเท่ากับ 12 %RH

ในการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ต้นแบบได้มีการนำอุปกรณ์ตรวจวัดจากอนุภาคนาโนเงินสำหรับเป็นชุดหัววัดและสามารถเชื่อมต่อและประมวลผลได้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับในทุกภาคส่วนทั้งในด้านเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Cao, Y.G. Zhao, H.C. Ong, S.T. Ho, J.Y. Dai, J.Y. Wu, R.P.H. Chang, “Ultraviolet lasing in resonators formed by scattering in semiconductor polycrystalline films”, **Applied Physics Letter**, vol. 73, 1998, pp. 3656.
- [2] S. Bethke, H. Pan, B.W. Wesseis, “Luminescence of heteroepitaxial zinc oxide”, **Applied Physics Letter**, vol. 52, 1988, pp. 138.
- [3] Y. Chen, D.M. Bagnall, H.J. Koh, K.T. Park, K. Hiraga, Z. Zhu, T. Yao, “Plasma assisted molecular beam epitaxy of ZnO on c-plane sapphire:Growth and characterization”, **Journal of Applied Physics**, vol. 84, 1998, pp. 3912.
- [4] J. Ma, F. Ji, D.H. Zhang, H.L. Ma, S.Y. Li, “Optical and electronic properties of transparent conducting ZnO and ZnO:Al films prepared by evaporating method”, **Thin Solid Films**, vol. 357, 1999, pp. 98.
- [5] Y. Xiong, H. Wu, Y. Guo, Y. Sun, D. Yang, D. Da, “Preparation and characterization of nanostructured silver thin films deposited by radio frequency magnetron sputtering”, **Thin Solid Films**, vol. 375, 2000, pp. 300-303.
- [6] A. Subrahmanyam, Ullash Kumar Barik, “Synthesis of P-type transparent conducting silver:indium oxide (AIO) thin films by reactive electron beam evaporation technique”, **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, vol. 66, 2005, p. 817–822.
- [7] Feng-Jin Li, Byeong-GyuRoh, Hyun-Taek Lim, Ji-Soo Kim, Jae-Yong Park, Hong-Woo Yu, Seung-Chul Park, Yoon Heung Tak, Byung-Chul Ahn, “Mechanism of droplet generation in silver thin films for organic light-emitting diode displays”, **Thin Solid Films**, vol. 517, 2009, pp. 2941–2944.
- [8] Dongjo Kim, Sunho Jeong, Sul Lee, Bong Kyun Park, Jooho Moon, “Organic thin film transistor using silver electrodes by the ink-jet printing technology”, **Thin Solid Films** vol. 515, 2007, pp. 7692–7696.
- [9] C.M. Ghimbeu, J. Schoonman, M. Lumbreras, M. Siadat, “Electrostatic spray deposited zinc oxide films for gas sensor applications”, **Applied Surface Science**, vol. 253, 2007, pp. 7483–7489.

- [10] J. Li, H. Fan, X. Jia, J. Chen, Z. Cao, X. Chen, “Electrostatic spray deposited polycrystalline zinc oxide films for ultraviolet luminescence device applications”, **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 481, 2009, pp. 735–739.
- [11] J. Zhang, L. B. Chen, C. C. Li, and T. H. Wang, “Amorphous SnO₂–SiO₂ thin films with reticular porous morphology for lithium-ion batteries”, **Applied Physics Letter**, vol. 93, 2008, pp. 264102.
- [12] S. Silver, L.T. Phung, G. Silver, “Silver as biocides in burn and wound dressings and bacterial resistance to silver compounds”, **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, vol. 33, 2006, pp. 627-634.
- [13] J.B. Wright, K. Lam, D. Hansen, R.E. Burrell, “Efficacy of topical silver against fungal burn wound pathogens”, **American Journal of Infection Control**, vol. 27, 1999, pp. 344-350.
- [14] M.C. Daniel, D. Astruc, “Gold nanoparticles : assembly, supramolecular chemistry, quantum-size-related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology”, **Chemical Reviews**, vol. 104, 2004, pp. 293-346..
- [15] A. Kiesow, J. E. Morris, C. Radehaus, A. Heilmann, “Switching behavior of plasma polymer films containing silver nanoparticles”, **Journal of Applied Physics**, vol. 94, 2003, pp. 6988-6990.
- [16] H.J. Park, S.H. Kim, H.J. Kim, S.H. Choi, “A New Composition of Nanosized Silica-Silver for Control of Various Plant Diseases”, **The Plant Pathology Journal**, vol. 22, 2006, pp. 295-302.
- [17] “นาโนเทคโนโลยีและการประยุกต์ใช้” , [online], Available :
http://www.ostc.thaiembdc.org/document/nanotech/report_sec2.pdf
- [18] “ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี” , [online], Available :
<http://www.mwit.ac.th/~ponchai/Nano/basicnano.doc>
- [19] Yusheng Liu, Shimou Chen, Lei Zhong, Guozhong Wu, “Preparation of high-stable silver nanoparticle dispersion by using sodium alginate as a stabilizer under gamma radiation”, **Radiation Physics and Chemistry**, vol. 78, 2009, pp. 251–255.
- [20] Dongjo Kim, Sunho Jeong, Sul Lee, Bong Kyun Park, Jooho Moon, “Organic thin film transistor using silver electrodes by the ink-jet printing technology”, **Thin Solid Films**, vol. 515, 2007, pp. 7692–7696.

- [21] S.L. Smitha, K.M. Nissamudeen, Daizy Philip, K.G. Gopchandran, “Studies on surface plasmon resonance and photoluminescence of silver nanoparticles”, **Spectrochimica Acta Part A**, vol. 71, 2008, pp. 186–190.
- [22] [online], Available:
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/DataSheetPage.do?brandKey=ALDRICH&symbol=658804>
- [23] Kyu-Seog Hwang, Seung Hwangbo, Jin-Tae Kim, “Silver-doped calcium phosphate nanopowders prepared by electrostatic spraying”, **J Nanopart Res**, vol. 10, 2008, pp. 1337–1341.
- [24] Claudio Girotto, Barry P. Rand, Soeren Steudel, Jan Genoe, Paul Heremans, “Nanoparticle-based, spray-coated silver top contacts for efficient polymer solar cells”, **Organic Electronics**, vol. 10, 2009, pp. 735–740.
- [25] Madhavi V. Fuke, Prajakta Kanitkar, Milind Kulkarni, B.B. Kale, R.C. Aiyer, " Effect of particle size variation of Ag nanoparticles in Polyaniline composite on humidity sensing", **Talanta**, vol. 81, 2010, pp. 320–326.
- [26] ทศิยาภรณ์ ทิววงศ์. “การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำชนิด p-ชนิดและสารอินทรีย์คอปเปอร์ฟทาโลไซยาไนด์และสารอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์โดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน” วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2552.
- [27] A. Jaworek, “Electrospray droplet sources for thin film deposition”, **Journal of Materials Science**, vol. 42, 2007, pp. 266-297.
- [28] Oliver Wilhelm. “Electrohydrodynamic spraying – Transport, mass and heat transfer of charged droplets and their application to the deposition of thin functional films” Doctor of sciences Swiss Federal Institute of Technology Zurich. 2004.
- [29] ภัทรพงศ์ จำคม. “การสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมโพลิเมอร์แบบนาโนไฟเบอร์โดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต” วิทยานิพนธ์ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2551.
- [30] มาโนทย์ มาปะโท. “การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูงโดยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2550.

- [31] Fengjuan Miao, Bairui Tao, Li Sun, Tao Liu, Jinchuan You, Lianwei Wang, P. K. Chuc, "Capacitive humidity sensing behavior of ordered Ni/Si microchannel plate nanocomposites", **Sensors and Actuators A**, vol. 160, 2010, pp. 48–53.
- [32] ชิตพงษ์ เกตุพนอม. "การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2549.
- [33] สมนึก บุญพาไสว, "ตัวรับรู้และทรานสดิวเซอร์", [online], Available : <http://www.ipst.ac.th/design/document/Sensor&transducer.pdf>. 2011
- [34] Jacob Fraden, **Handbook of modern sensors : physics, designs, and applications**, New York: Springer-Verlag, 1996.
- [35] Hui-Juan Chen, Qing-Zhong Xue, Ming Ma, Xiao-Yan Zhou, "Capacitive humidity sensor based on amorphous carbon fillm/n-Si heterojunctions", **Sensors and Actuators B**, vol. 150, 2010, pp. 487-489.
- [36] Yong Zhang, Xuejun Zheng, Tong Zhang, Lunjun Gong, Shunhong Dai, Yiqiang Chen, "Humidity sensing properties of the sensor based on $\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{TiO}_3$ powder", **Sensors and Actuators B**, vol. 147, 2010, pp.180-184.
- [37] Zhi Chen, Chi Lu, "Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms", **Sensor Letters**, vol. 3, 2005, pp. 274–295.
- [38] Nam-Bu Cho, Tai-Ho Lim, Young-Min Jeon, Myoung-Seon Gong, "Humidity sensors fabricated with photo-curable electrolyte inks using an ink-jet printing technique and their properties", **Sensors and Actuators B**, vol. 130, 2008, pp. 594-598.
- [39] Min-Su Park, Tae-Ho Lim, Young-Min Jeon, Jong-Gyu Kim, Sang-Woo Joo, Myoung-Seon Gong, "Humidity sensitive properties of copoly(TEAMPS/VP)/silver nanocomposite films", **Sensors and Actuators B**, vol. 133, 2008, pp. 166-173.
- [40] Jing Wang, Mei-Ying Su, Jin-Qing Qi, Ling-Qian Chang, "Sensitivity and complex impedance of nanometer zirconia thick fillm humidity sensors", **Sensors and Actuators B**, vol. 139, 2009, pp. 418-424.
- [41] P.M. Faia, C.S. Furtado, A.J. Ferreira, "AC impedance spectroscopy: a new equivalent circuit for titania thick film humidity sensors", **Sensors and Actuators B**, vol. 107, 2005, pp. 353-359.

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัวหัวหน้าคณะวิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวศุติยาภรณ์ ทิรวางศ์

ตำแหน่งปัจจุบันอาจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ.	ฟิสิกส์อุตสาหกรรม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร เหนือ	2541
วท.ม.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	2545
ปร.ด.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	2552

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ Thin film technology, Optical Characterization , Nanomaterials

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. S. Khantham, **B. Tunhoo**, K. Onlaor, T. Thiawong, J. Nukeaw, “Electrical properties of dye-doped color tunable organic light emitting diode”, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **90** (2012) 903-908. (IF2011: 0.748)
2. K. Onlaor, **B. Tunhoo**, P. Keeratithiwakorn, T. Thiawong, J. Nukeaw, “Electrical bistable properties of copper phthalocyanine at different deposition rates”, *Solid-State Electronics*, **72** (2012) 60-66. (IF2011: 1.397)
3. K. Onlaor, **B. Tunhoo**, T. Thiawong, J. Nukeaw, “Electrical bistability of tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq3)/ZnSe organicinorganic bistable device”, *Current Applied Physics*, **12** (2012) 331-336. (IF2011: 1.900)
4. S. Vanitparinyakul, P. Pattamang, A. Chanhom, T. Thiawong, **B. Tunhoo**, S. Porntheeraphat and J. Nukeaw, “Study of PDMS Compounds Using the Adhesion Force Determined by AFM Force Distance Curve Measurements”, *Advanced Materials Research*, **93-94** (2010) 141-144.

5. Y. Boonnuk, A. Chanhom, T. Thiawong, **B. Tunhoo**, and J. Nukeaw, "Surface Morphology and Optical Properties of Silver Thin Film Prepared by Electrostatic Spray Deposition", *Advanced Materials Research*, **93-94** (2010) 149-152.
6. K. Onlaor, S. Khantham, **B. Tunhoo**, T. Thiawong, J. Nukeaw, "Charge Transfer Mechanism in Organic Memory Device", *Advanced Materials Research*, **93-94** (2010) 235-238.
7. P. Keeratithivakorn, **B. Tunhoo**, T. Thiawong, J. Nukeaw, "CoPc/CdS Hybrids Photovoltaic Device", *Advanced Materials Research*, **93-94** (2010) 570-573.
8. T. Thiawong, J. Nukeaw, "Organic/Inorganic Multilayer Hybrid Thin Film of:Effect of Substrate Temperature", *Materials Research Innovations*, VOL 13 NO 3, 2009. pp. 165-167. (IF2009: 1.723)

การเสนอผลงานวิชาการ

1. **B. Tunhoo** and T. Thiawong, "Measurement Technique for the Thickness of Transparent Material", *Proceeding of International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2007)*, Thailand, 2007, pp. 889-891.
2. **B. Tunhoo**, T. Thiawong and J. Nukeaw, "Properties of CuPc/Se Organic-Inorganic Hybrid Thin Films Grown by Electron Beam Evaporation Technique", *Proceeding of the 7th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO 2007)*, 2007, pp. 994-997.
3. T. Thiawong, **B. Tunhoo** and J. Nukeaw, "Structural and Optical Properties of CuPc/ZnSe Multilayer Hybrid Thin Films Prepared by Electron Beam Evaporator", *Proceeding of the 7th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO 2007)*, 2007, pp. 58-61.
4. T. Thiawong, **B. Tunhoo** and J. Nukeaw, "Crystalline Structure and Morphology of ZnSe/CuPc Hybrid Thin Film Prepared by Electron Beam", *Proceeding of the 2nd Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2007)*, 2007, pp. 630-633.
5. T. Thiawong, **B. Tunhoo** and J. Nukeaw, "Influence of Substrate Temperature on CuPc/ZnSe Multilayer Hybrid Thin Films Grown by Electron Beam Evaporator", *The 2nd International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO2007)*, June 19-22, 2007, Japan.

ประวัติส่วนตัวผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-สกุล นายเบญจพล ต้นธุ์

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	2544
วท.ม.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	2548
ปร.ด.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	2552

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ ฟิสิกส์บาง สารกึ่งตัวนำ ไมโครคอนโทรลเลอร์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

9. S. Khantham, **B. Tunhoo**, K. Onlaor, T. Thiawong, J. Nukeaw, “Electrical properties of dye-doped color tunable organic light emitting diode”, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **90** (2012) 903-908. (IF2011: 0.748)
10. K. Onlaor, **B. Tunhoo**, P. Keeratithiwakorn, T. Thiawong, J. Nukeaw, “Electrical bistable properties of copper phthalocyanine at different deposition rates”, *Solid-State Electronics*, **72** (2012) 60-66. (IF2011: 1.397)
11. K. Onlaor, **B. Tunhoo**, T. Thiawong, J. Nukeaw, “Electrical bistability of tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq3)/ZnSe organicinorganic bistable device”, *Current Applied Physics*, **12** (2012) 331-336. (IF2011: 1.900)
12. S. Vanitparinyakul, P. Pattamang, A. Chanhom, T. Thiawong, **B. Tunhoo**, S. Porntheeraphat and J. Nukeaw, “Study of PDMS Compounds Using the Adhesion Force Determined by AFM Force Distance Curve Measurements”, *Advanced Materials Research*, **93-94** (2010) 141-144.

13. Y. Boonnuk, A. Chanhom, T. Thiawong, **B. Tunhoo**, and J. Nukeaw, "Surface Morphology and Optical Properties of Silver Thin Film Prepared by Electrostatic Spray Deposition", *Advanced Materials Research*, **93-94** (2010) 149-152.
14. K. Onlaor, S. Khantham, **B. Tunhoo**, T. Thiawong, J. Nukeaw, "Charge Transfer Mechanism in Organic Memory Device", *Advanced Materials Research*, **93-94** (2010) 235-238.
15. P. Keeratithivakorn, **B. Tunhoo**, T. Thiawong, J. Nukeaw, "CoPc/CdS Hybrids Photovoltaic Device", *Advanced Materials Research*, **93-94** (2010) 570-573.
16. **B. Tunhoo** and J. Nukeaw, "Structural and Optical Properties of Low Temperature Evaporated Iron Phthalocyanine Thin Films", *Materials Research Innovations*, **13** (2009) 145-148. (IF2009: 1.723)
17. J. Nukeaw, K. Upracoat, S. Rahong, **B. Tunhoo**, and W. Yindeesuk, "Observation of optical transition energy in ZnSe/tris(8-hydroxyquinoline) aluminum(Alq3)/ZnSe single quantum wells by photoreflectance spectroscopy", *Physica E: low-dimensional systems & nanostructures*, **21** (2004) 1070-1073. (IF2004: 0.898)

การเสนอผลงานวิชาการ

6. Jiti Nukeaw and **Benchapol Tunhoo**, "Characterization of Copper Phthalocyanine Thin Film Photovoltaic on PET Substrate Prepared by Electron-Beam Evaporation Technique", *IEEE International NanoElectronics Conference (INEC-2010)*, January 3-8, 2010, Hong-Kong.
7. **B. Tunhoo** and T. Thiawong, "Measurement Technique for the Thickness of Transparent Material", *Proceeding of International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2007)*, Thailand, 2007, pp. 889-891.
8. **B. Tunhoo**, T. Thiawong and J. Nukeaw, "Properties of CuPc/Se Organic-Inorganic Hybrid Thin Films Grown by Electron Beam Evaporation Technique", *Proceeding of the 7th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO 2007)*, 2007, pp. 994-997.
9. T. Thiawong, **B. Tunhoo** and J. Nukeaw, "Structural and Optical Properties of CuPc/ZnSe Multilayer Hybrid Thin Films Prepared by Electron Beam Evaporator", *Proceeding of the 7th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO 2007)*, 2007, pp. 58-61.
10. S. Kamoldilok, **B. Tunhoo**, S. Sumriddetchkajorn and J. Nukeaw, "The Effect of Substrate Temperature Control on Structure and Optical properties of Copper(II)

- phthalocyanine(CuPc) Thin Films Prepared by Organic Evaporator", *Proceeding of the 2nd Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems(IEEE-NEMS 2007)*, 2007, pp. 604-607.
11. T. Thiawong, **B. Tunhoo** and J. Nukeaw, "Crystalline Structure and Morphology of ZnSe/CuPc Hybrid Thin Film Prepared by Electron Beam", *Proceeding of the 2nd Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2007)*, 2007, pp. 630-633.
 12. T. Thiawong, **B. Tunhoo** and J. Nukeaw, "Influence of Substrate Temperature on CuPc/ZnSe Multilayer Hybrid Thin Films Grown by Electron Beam Evaporator", *The 2nd International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO2007)*, June 19-22, 2007, Japan.
 13. **B. Tunhoo** and J. Nukeaw, "Optical and Structure of Copper (II) Phthalocyanine (CuPc) Organic Thin Films Grown by Electron-Beam Evaporation Technique", *Proceeding of the 2nd Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2007)*, 2007, pp. 764-767.
 14. **B. Tunhoo** and J. Nukeaw, "Structure and Optical Properties of CuPc Nano-rod like structure Organic Thin Film", *International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-4)*, November 14-17, 2005, Japan.
 15. N. Porntheeraphat, **B. Tunhoo** and J. Nukeaw, "XRD Characterization of InN Thin Films grown by Reactive Gas-timing RF Magnetron Sputtering", *Proceeding of the International Conference on Smart Materials (SmartMat-'04)*, 2004, pp. 343-345.
 16. N. Porntheeraphat, **B. Tunhoo**, and J. Nukeaw, "Photoreflectance Study of InN Thin Films Growth by Reactive Gas-timing RF Magnetron Sputtering", *International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT2003)*, December 7-12, 2003, Singapore.

ภาคผนวก

การยื่นจดสิทธิบัตร

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการยื่นจดสิทธิบัตร จำนวน ๑ เรื่อง ได้แก่

เลขที่คำขอ 1301001554

ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์

อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นจากฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมโดยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตย์

(Humidity sensor based on zinc oxide nanoparticle thin films prepared by electrostatic spray deposition)

สำเนา

แบบ สป/สพ/อสป/001-ก
หน้า 1 ของจำนวน 3 หน้า



คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

- ☒ การประดิษฐ์
☐ การออกแบบผลิตภัณฑ์
☐ อนุสิทธิบัตร

ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้
ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร
พ.ศ.2522 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่2)
พ.ศ.2535 และพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่3) พ.ศ.2542

สำหรับเจ้าหน้าที่

วันรับคำขอ 26 ส.ค. 2556

เลขที่คำขอ

วันยื่นคำขอ 26 ส.ค. 2556

1301001554

สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ

ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์

ประเภทผลิตภัณฑ์

วันประกาศโฆษณา

เลขที่ประกาศโฆษณา

วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่

1.ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์

"อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นจากฟิล์มบางอนุภาคนาโนซึ่งค่ออกไซด์ที่เตรียมโดยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสติกซ์"

2.คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่
ในจำนวน คำขอ ที่อื่นในคราวเดียวกัน

3.ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ)
อยู่ที่หน้า 3

3.1 สัญชาติ ไทย

3.2 โทรศัพท์ -

3.3 โทรสาร -

3.4 อีเมล -

4.สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

☒ ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ

☐ ผู้รับโอน

☐ ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น

5.ตัวแทน (ถ้ามี)/ที่อยู่ (เลขที่ ถนน จังหวัด รหัสไปรษณีย์)

5.1 ตัวแทนเลขที่

5.2 โทรศัพท์

5.3 โทรสาร

5.4 อีเมล

6.ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ)
อยู่ที่หน้า 3

7.คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม

ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้ถือว่าได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตร

เลขที่ วันยื่น เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ

☐ คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง

☐ ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ

☐ ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ

หมายเหตุ ในกรณีที่ไม้อาจระบุรายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่แสดงรายละเอียด
เพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

8.การยื่นคำขออนุญาตนำเข้า				
วันยื่นคำขอ	เลขที่คำขอ	ประเทศ	สัญลักษณ์จำแนกการ ประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	สถานะคำขอ
8.1				
8.2				
8.3				
8.4 ☐ ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรให้ถือว่า ได้ยื่นคำขอนี้ ในวันที่ ได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ในต่างประเทศเป็นครั้งแรก โดย ☐ ได้ยื่นเอกสารหลักฐานพร้อมคำขอนี้ ☐ ขอยื่นเอกสารหลักฐานหลังจากวันยื่นคำขอนี้				
9.การแสดงผลการประดิษฐ์หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ได้แสดงผลการประดิษฐ์ที่หน่วยงานของรัฐเป็นผู้จัด วันแสดง วันเปิดงานแสดง ผู้จัด				
10.การประดิษฐ์เกี่ยวกับจุลชีพ				
10.1 เลขทะเบียนฝากเก็บ	10.2 วันที่ฝากเก็บ	10.3 สถาบันฝากเก็บ/ประเทศ		
11.ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอยื่นเอกสารภาษาต่างประเทศก่อนในวันที่ยื่นคำขอนี้ และจะจัดยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ที่ จัดทำเป็นภาษาไทยภายใน 90 วัน นับจากวันยื่นคำขอนี้ โดยขอขึ้นเป็นภาษา ☐ อังกฤษ ☐ ฝรั่งเศส ☐ เยอรมัน ☐ ญี่ปุ่น ☐ อื่น ๆ				
12.ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้อธิบดีประกาศโฆษณาคำขอรับสิทธิบัตร หรือรับจดทะเบียน และประกาศโฆษณาอนุสิทธิบัตรนี้ หลังจากวันที่ เดือน พ.ศ. ☐ ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้ใช้รูปเขียนหมายเลข ในการประกาศโฆษณา				
13.คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ประกอบด้วย			14.เอกสารประกอบด้วย	
ก.แบบพิมพ์คำขอ	3	หน้า	☐ เอกสารแสดงสิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	
ข.รายละเอียดการประดิษฐ์ หรือคำพรรณนาแบบผลิตภัณฑ์	4	หน้า	☐ หนังสือรับรองการแสดงผลการประดิษฐ์/การออกแบบ ผลิตภัณฑ์	
ค.ข้อถ้อยสิทธิ	1	หน้า	☐ หนังสือมอบอำนาจ	
ง.รูปเขียน 4 รูป	3	หน้า	☐ เอกสารรายละเอียดเกี่ยวกับจุลชีพ	
จ.ภาพแสดงแบบผลิตภัณฑ์			☐ เอกสารการขอรับวันยื่นคำขอในต่างประเทศเป็นวันยื่น คำขอ ในประเทศไทย	
☐ รูปเขียน รูป - หน้า			☐ เอกสารขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ	
☐ ภาพถ่าย รูป - หน้า			☐ เอกสารอื่น ๆ	
ฉ.บทสรุปการประดิษฐ์	1	หน้า		
15.ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ☒ การประดิษฐ์นี้ไม่เคยยื่นขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรมาก่อน ☐ การประดิษฐ์นี้ได้พัฒนาปรับปรุงมาจาก.....				
16.ลายมือชื่อ (☒ ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร; ☐ ตัวแทน)				
(นางสาวกัญญากรณ์ ทิววงศ์)	(นายเบญจพล ตันธุ์)	(นายกรกรช อ่อนละออ)	(นายดิเรกฤทธิ์ จันทวงษ์)	(นายจิติ หนูแก้ว)
ผู้ขอรับสิทธิบัตร	ผู้ขอรับสิทธิบัตร	ผู้ขอรับสิทธิบัตร	ผู้ขอรับสิทธิบัตร	ผู้ขอรับสิทธิบัตร

หมายเหตุ บุคคลใดยื่นขอรับสิทธิบัตรการประดิษฐ์หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ หรืออนุสิทธิบัตร โดยการแสดงข้อความอันเป็นเท็จแก่พนักงานเจ้าหน้าที่
เพื่อให้ได้ไปซึ่งสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตร ต้องระวางโทษจำคุกไม่เกินหกเดือน หรือปรับไม่เกินห้าพันบาท หรือทั้งจำทั้งปรับ

3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร

3.1. นางสาวศุติยาภรณ์ ทิวาวงศ์

อยู่ที่ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 คลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 ประเทศไทย

สัญชาติ ไทย โทรศัพท์ 0859891595 โทรสาร 023298265 อีเมล tthiwawong@gmail.com

3.2. นายเบญจพล ต้นธุ์

อยู่ที่ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 คลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 ประเทศไทย

สัญชาติ ไทย โทรศัพท์ 0899853231 โทรสาร 023298265 อีเมล ktbencha@kmitl.ac.th

3.3. นายกรกช อ่อนละออ

อยู่ที่ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 คลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 ประเทศไทย

สัญชาติ ไทย โทรศัพท์ 0865754704 โทรสาร 023298265 อีเมล korakot_28@hotmail.com

3.4. นายดิเรกฤทธิ์ จันทร์วงษ์

อยู่ที่ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 คลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 ประเทศไทย

สัญชาติ ไทย โทรศัพท์ 023264111 ต่อ 3034 โทรสาร 023298265 อีเมล -

3.5. นายจิตติ หนูแก้ว

อยู่ที่ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 คลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 ประเทศไทย

สัญชาติ ไทย โทรศัพท์ 023264111 ต่อ 3034 โทรสาร 023298265 อีเมล knjiti@kmitl.ac.th

6. ผู้ประดิษฐ์

6.1. นางสาวศุติยาภรณ์ ทิวาวงศ์

อยู่ที่ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 คลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 ประเทศไทย

6.2. นายเบญจพล ต้นธุ์

อยู่ที่ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 คลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 ประเทศไทย

6.3. นายกรกช อ่อนละออ

อยู่ที่ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 คลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 ประเทศไทย

6.4. นายดิเรกฤทธิ์ จันทร์วงษ์

อยู่ที่ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 คลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 ประเทศไทย

6.5. นายจิตติ หนูแก้ว

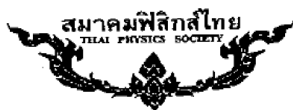
อยู่ที่ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 คลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 ประเทศไทย

การประชุมวิชาการ

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการ 2 เรื่องได้แก่

1. T.Thiwawong, K. Onlaor, B. Tunhoo, **“Electrostatic Spray Deposited Silver Nanoparticles Thin Films for Humidity Sensor Applications”**, Siam Physics Congress (SPC) 2012 Phra Nakorn Sin Ayutthaya, Thailand.
2. T. Thiwawong, W Kerdsawat, D. Chantarawong, P. Keeratithiwakorn, K. Onlaor, and B. Tunhoo, **“Impedance Humidity Sensor Based on ZnO Nanoparticle Thin Films”**, Siam Physics Congress (SPC) 2013 Chaing Mai, Thailand.



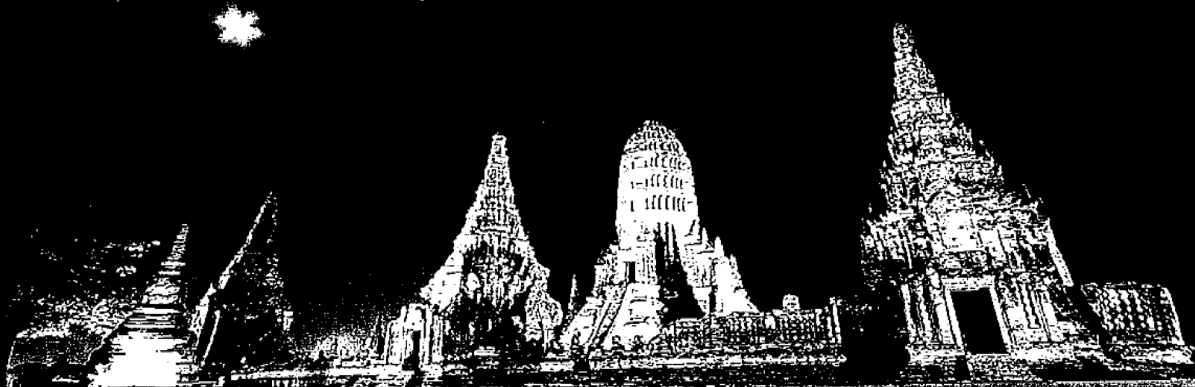
THEP
CENTER

NARIT



Past, Present and Future of Physics

SPC2012



THE 7TH ANNUAL CONFERENCE OF THE THAI PHYSICS SOCIETY
SIAM PHYSICS CONGRESS 2012

BOOK OF ABSTRACTS

May 9-12, 2012
Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand

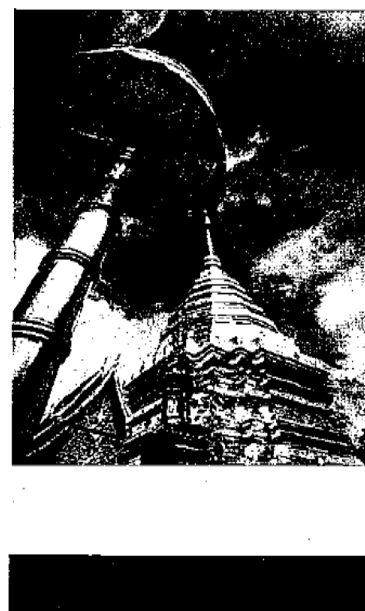
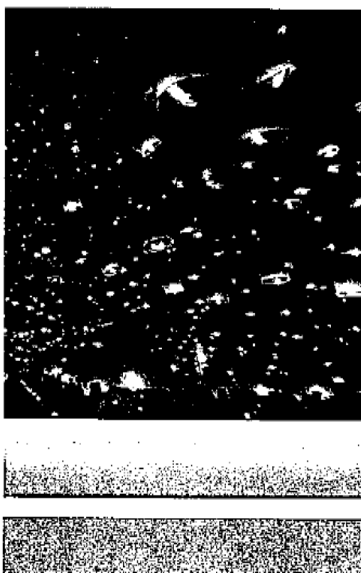
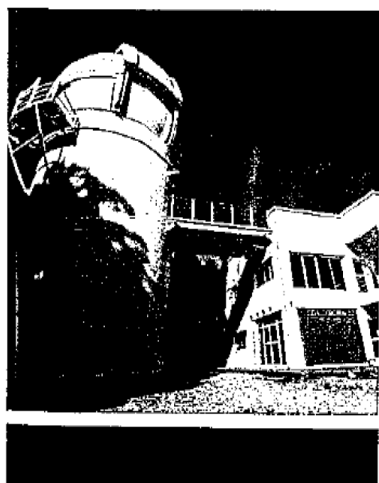
The 8th Annual Conference of Thai Physics Society
Chiang Mai, Thailand

March 21-23, 2013



Book of Abstracts

SPC 2013





Impedance Humidity Sensor Based on ZnO Nanoparticle Thin Films

T. Thiawong^{1,2*}, W Kerdawat³, D. Chantarawong^{1,2}, P. Keeratithiwakorn^{1,2}, K. Onlaor^{1,2}, and B. Tunhoo^{1,2}

¹Electronics and Control System for Nanodevice Research Laboratory,

College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Bangkok 10520, Thailand

²Thailand Center of Excellence in Physics, Commission on Higher Education, Ministry of Education, 328 Si Ayutthaya Road, Bangkok 10400, Thailand

³Department of Industrial Physics and Medical Instrumentation, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Piboonsongkram Road, Bangkok 10800, Thailand

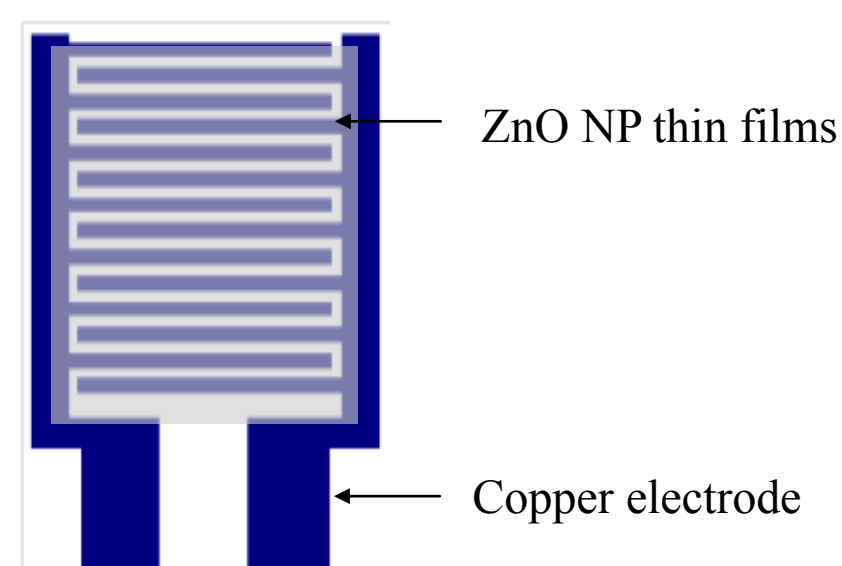


Abstract

Impedance humidity sensor based on zinc oxide (ZnO) nanoparticle thin films was deposited on interdigitated electrodes by electrostatic spray deposition. The sensitivity and response time of sensor were observed by using LCR precision meter at condition of dc bias 1 V and frequency of 1 kHz. The response characteristic of humidity sensor decreases by about five orders of magnitude with increase in relative humidity (RH) (from 11% to 93%). In addition, the device exhibits the linearity and high sensitivity between relative humidity and impedance characteristics.

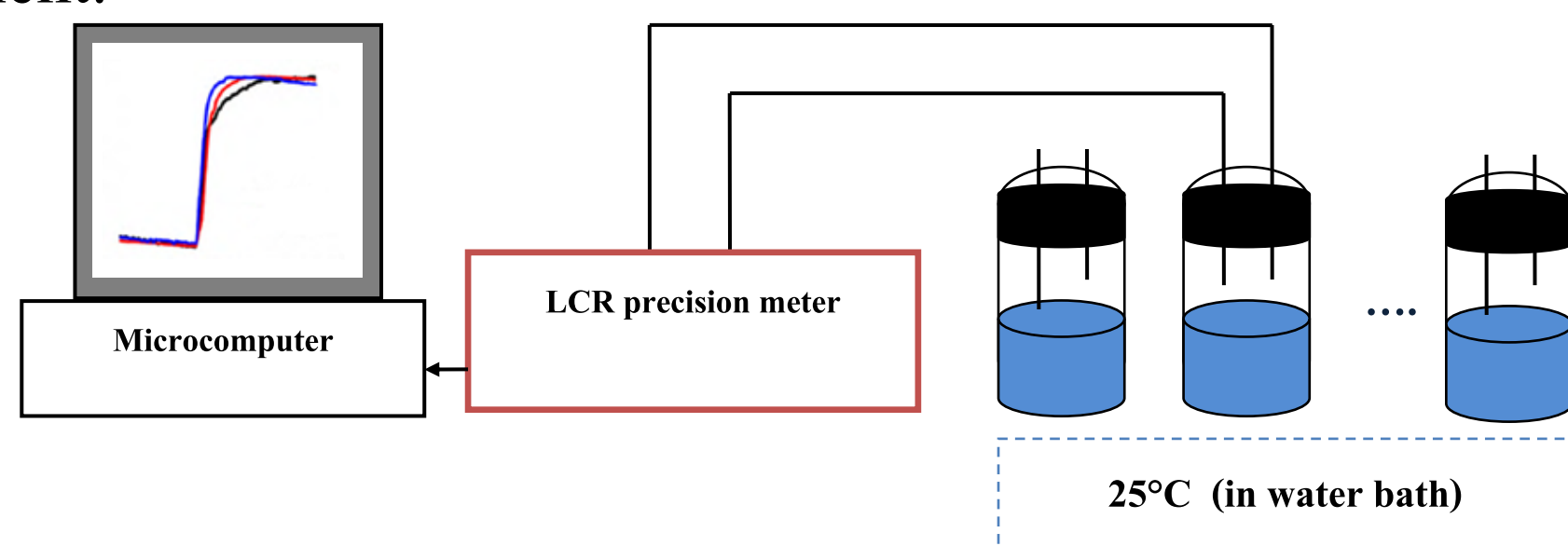
Materials and Methods

For the deposition of the films a vertical ESD setup working under ambient atmosphere was used. The liquid precursor solution was fed by a syringe pump through a plastic syringe to the tip of a stainless steel nozzle (inside diameter, 0.1 mm). When the high voltage is applied by a DC high voltage power supply between the nozzle and the substrate holder, the precursor solution is atomized at the tip of the nozzle into an aerosol of very fine droplets. This aerosol of highly charged droplets is directed to the substrate under the electrostatic force. When the droplets attached the substrate, the droplets are losing their charge and spreading, drying and decomposition of the precursor solution occur. In this way, a thin layer is formed on the substrate surface.



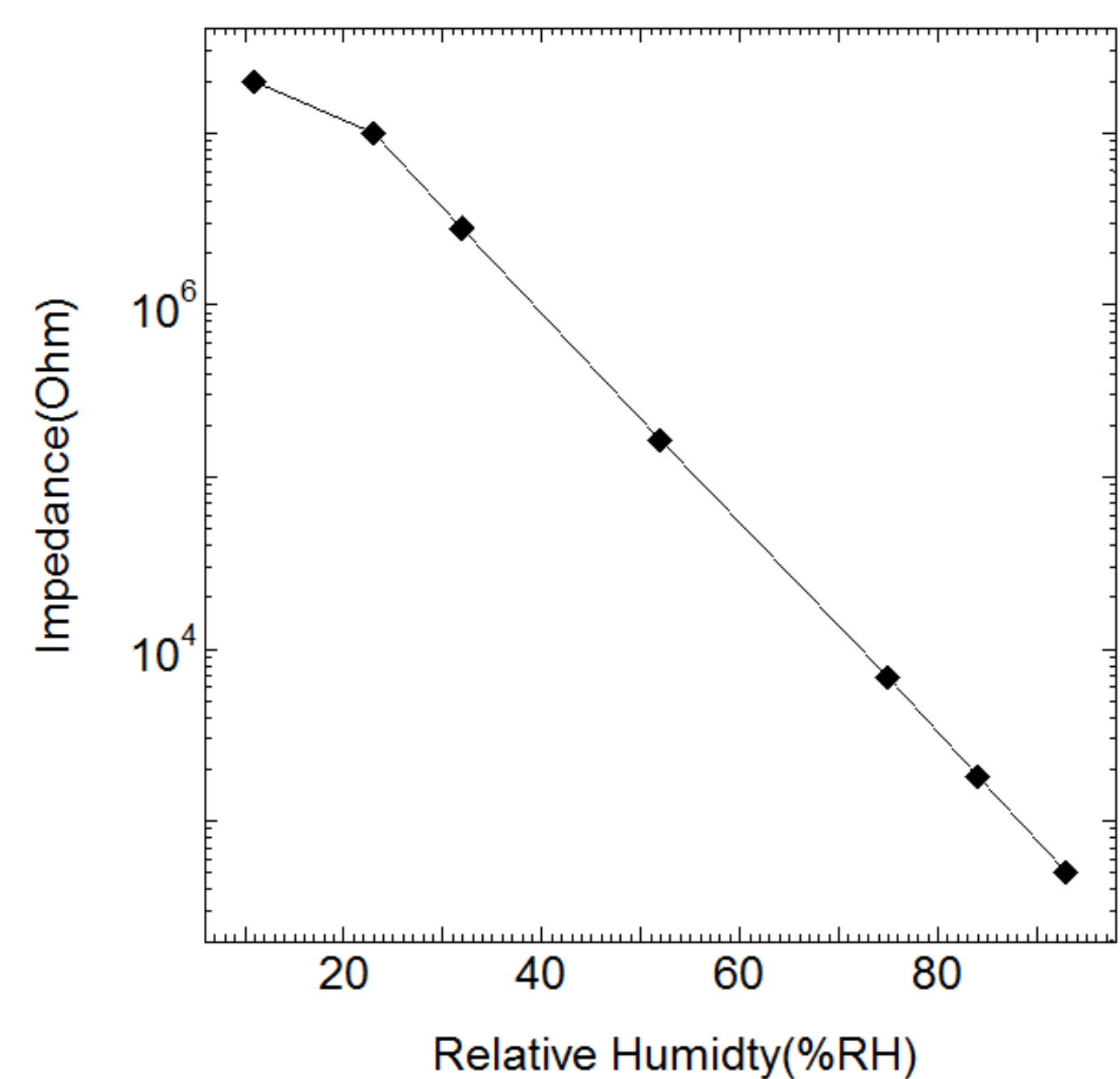
A schematic view of ZnO NP thin films sensor construction

The humidity-controlled environments 11, 23, 32, 52, 75, 84, 93% RH, were achieved using saturated aqueous solution of LiCl, CH₃COOK, MgCl₂, Mg(NO₃)₂, NaCl, KCl and KNO₃, respectively. A precision LCR meter (Agilent, E4980A) was used to measure the impedance characteristics during the humidity measurement.

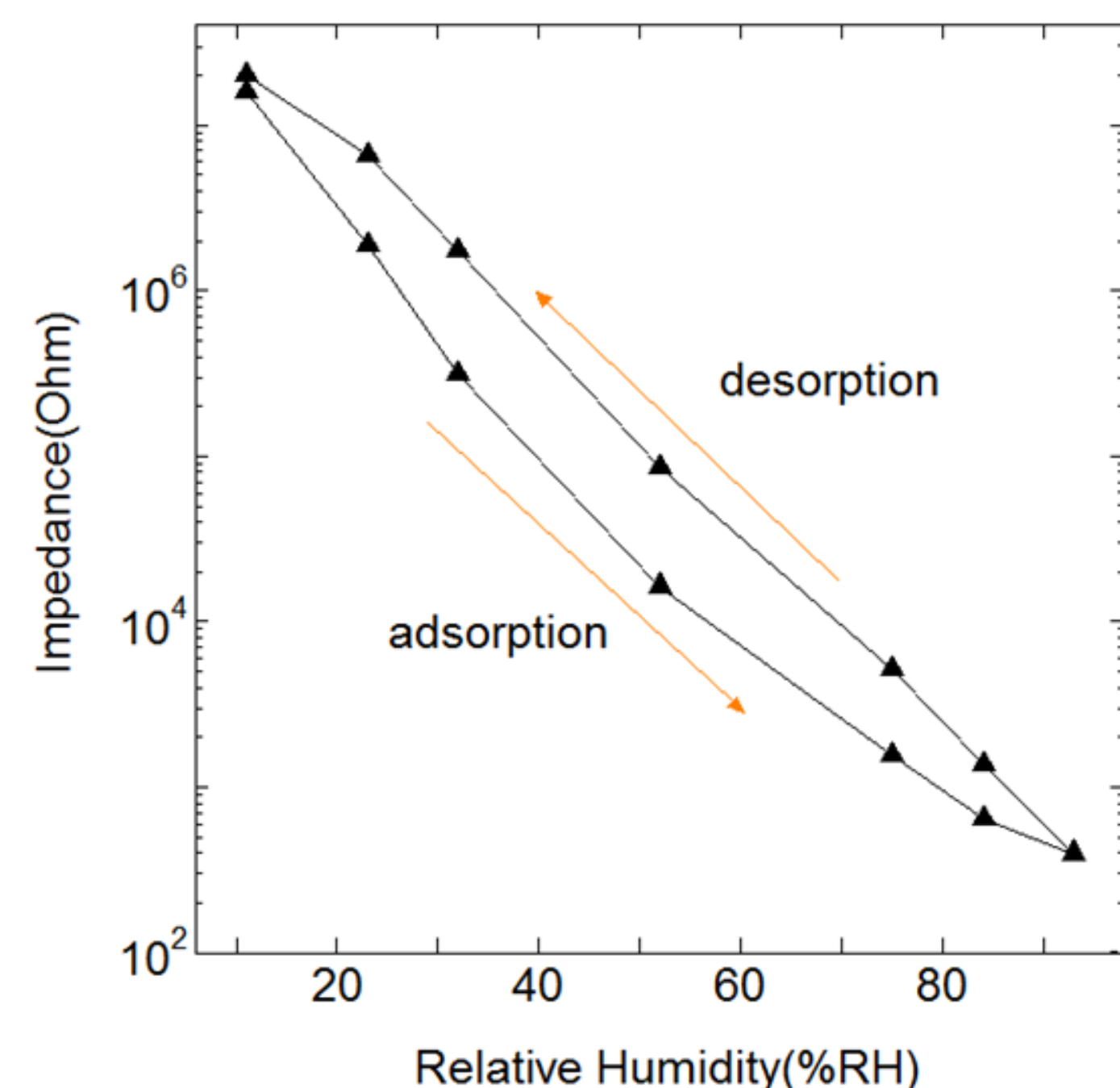


A schematic of impedance humidity sensor measurement system

Results and Discussion



Impedance response of ZnO NPs sensors.



Hysteresis characteristics of ZnO NPs sensors

Conclusion

The zinc oxide nanoparticle thin films impedance humidity sensor can be fabricated onto the interdigitated electrodes. The sensor shows a impedance variation of five order of magnitude in the range 11% and 93% RH. The sensor exhibits the linearity and high sensitivity between relative humidity and impedance characteristics with hysteresis characteristic within 12.2 % RH between adsorption and desorption is associated with surface of zinc oxide nanoparticle thin films .

Acknowledgments

This work has partially been supported by the National Nanotechnology Center (NANOTEC), NSTDA, Ministry of Science and Technology, Thailand, through its program of Center of Excellence Network and the National Research Council of Thailand.

Corresponding author. E-mail: tthiawong@gmail.com



การตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ เรื่องได้แก่

1. T.Thiwawong, K. Onlaor, B. Tunhoo, **“Electrostatic Spray Deposited Silver Nanoparticles Thin Films for Humidity Sensor Applications”**, Thai journal of physics Serie 8, 2012, pp 102-105.

Electrostatic Spray Deposited Silver Nanoparticles Thin Films for Humidity Sensor Applications

T. Thiawong^{1,2*}, K. Onlaor^{1,2}, B. Tunhoo^{1,2}

¹Electronics and Control System for Nanodevice Research Laboratory, College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

²ThEP Center, CHE, 328 Si Ayutthaya Rd., Bangkok, 10400, Thailand

In this work, thin films of silver nanoparticles for humidity sensor applications were deposited by electrostatic spray deposition technique. The influence of the nozzle to substrate distance on properties of films was studied. The crystal structures of sample films and, their surface morphology, and optical properties have been investigated by X-ray diffraction (XRD), field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), atomic force microscope (AFM) and UV-VIS spectrophotometer, respectively. Silver nanoparticle thin films were founded in the orientation of (100), (200), (311) and (222) plane of cubic structure at diffraction angle $2\theta = 38.2^\circ, 44.3^\circ, 64.4^\circ$ and 77.4° . Moreover, the silver nanoparticles thin films humidity sensor was fabricated onto the interdigitated electrodes. The sensor exhibits the humidity adsorption and desorption properties. The characteristics of sensing device were also elucidated

Keywords: Silver Nanoparticles Films, Electrostatic Spray Deposition.

1. INTRODUCTION

Metallic thin films usually give adequate performances for mirrors in optical instruments. Among them, silver (Ag) has several advantages with respect to other metals [1]: (i) for the full IR region and down to a wavelength of 400 nm it has the highest reflectivity and the lowest polarization splitting; (ii) it is completely stable in aqueous solutions of any pH as long as oxidizing agents or complexing substances are not present. However, the disadvantage of using Ag layers is that they tarnish under ordinary atmospheric conditions and do not have the high reflectance below 400 nm [2]. Several methods, such as radio frequency magnetron sputtering, reactive electron beam evaporation technique, thermal evaporation method and ink-jet printing technology [3–6], have been used in the preparation of silver thin films. However, these methods are expensive and require high vacuum and other stringent conditions. In the past few years, electrostatic spray deposition (ESD) technique has been used to prepare a variety of functional metal oxide thin films. Compared with other film fabrication techniques, ESD is a simple set-up, low cost, a wide choice of precursors, relatively large film growth rate, ambient atmosphere operation, a good control of the morphology of the deposited layers. The ESD technique was used so far to deposit thin films of functional metal oxide with application in different fields, i.e. rechargeable lithium batteries [7], solid oxide fuel cells [8], heat exchange reactors [9], biomedical implants [10] and sensors [11,12].

In this paper, we report the preparation of silver nanoparticles thin film by ESD technique. The surface

morphology, structural and optical properties were investigated in order to using for application in the humidity sensor applications.

2. MATERIALS AND METHODS

For the deposition of the films a vertical ESD setup working under ambient atmosphere was used. The liquid precursor solution was fed by a syringe pump through a plastic syringe to the tip of a stainless steel nozzle (inside diameter, 0.1 mm). When the high voltage is applied by a DC high voltage power supply between the nozzle and the substrate holder, the precursor solution is atomized at the tip of the nozzle into an aerosol of very fine droplets. This aerosol of highly charged droplets is directed to the substrate under the electrostatic force. When the droplets attached the substrate, the droplets are losing their charge and spreading, drying and decomposition of the precursor solution occur. In this way, a thin layer is formed on the substrate surface.

Silver nanoparticle (Ag NP) thin films have been prepared by ESD. Silver nanoparticle (Aldrich, nanoparticles, <100nm (TEM), 10 wt. % dispersion in ethylene glycol) was used as precursor solution. Glass substrate with dimension of 10x20 mm and thickness 1 mm was cleaned by alcohol process and put on aluminum ground plate. ESD conditions were optimized by varying distance between nozzle and glass substrate between 20 mm and 60 mm, time deposition was fixed at 5 minutes. A positive voltage (kV) was applied to the nozzle, breaking the liquid at the tip of the nozzle in an aerosol composed of very small droplets. The morphology of thin films was studied by atomic force microscope (SPA400, Seiko). Their crystal structures were analyzed by X-ray diffraction (Bruker). The optical absorption spectra have been characterized using UV-VIS spectrophotometer (HELIOS

*Corresponding author.
E-mail: kthutiy@gmail.com

Gamma, Thermo Spectronic). The Ag NP films were employed as the humidity sensitive material for sensor development. The sensor devices were fabricated by deposited the Ag NP onto the interdigitated electrode. After that, the device was tested in the humidity-controlled measurement system. The humidity-controlled environments 11, 23, 32, 52, 75, 84, 93% RH, were achieved using saturated aqueous solution of LiCl, CH₃COOK, MgCl₂, Mg(NO₃)₂, NaCl, KCl and KNO₃, respectively. A precision LCR meter (Agilent, E4980A) was used to measure the impedance characteristics during the humidity measurement.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

XRD spectra of the Ag NP films at a fixed deposition time of 5 min for various nozzle to substrate distances are shown in Fig. 1. XRD pattern exhibits a polycrystalline nature, with the diffraction peaks indexed and compared with standard data in the JCPDS-ICDD. The peaks were observed at $2\theta=38.2^\circ$, 44.3° , 64.4° and 77.4° , which correspond to the (100), (200), (311) and (222) plane of cubic structure, respectively. The intensity of peaks increases with increasing deposition time, whereas the full width at the half maximum (FWHM) decrease with increasing deposition time. The decrease in FWHM can be explained by the decrease in the concentration of lattice imperfections, due to the decrease in the internal microstrain within the films, and an increase in the crystalline size. Typically, stress also occurs in the film due to the lattice misfit. Nevertheless, the stress has two components: thermal stress arising from the difference in the expansion coefficient of the film and substrate, and internal stress due to the accumulating effect of the crystallographic flaws built into the films during deposition.

Fig. 2 shows the room temperature optical absorption spectra of Ag NP film at a fixed deposition time of 5 min for various nozzle to substrate distances in the wavelength region 300–900 nm. In this spectral performed, the main absorption peak was observed at around 440 nm. This result agrees well with the Mie theory for the surface plasmon peak of nanoparticles in UV-Vis absorption spectra. According to the Mie theory, silver nanoparticles of diameters ranging from 1 to 10 nm have the plasmon peak width increasing linearly with the reciprocal of the particle diameter [13, 14]. The surface plasmon peak of a larger nanoparticle is more narrowed (intrinsic size effect) [15]. However, when the particle diameter increases further (> 20 nm) the peak width increases with the particle diameter (extrinsic size effect). Surface morphology of thin films was obtained by AFM image. Fig. 3 depicts the AFM topographic images of Ag NP films at a fixed deposition time of 5 min for various nozzle to substrate distance.

It is found that the surface roughness (RMS) decrease when the distance between nozzle and substrate was increased because of when increases distance between nozzle and substrate will pile up of silver nanoparticle on substrate. As can be observed, the RMS roughness decreases from 9.59 nm to 2.35 nm when distance between nozzle and substrate was increased from 20 mm to 60 mm.

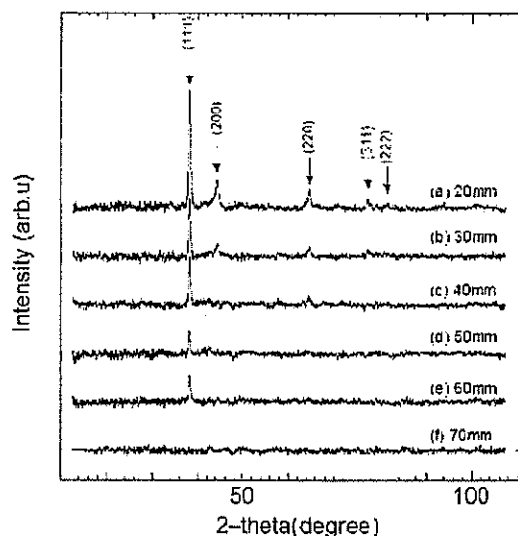


FIGURE 1. XRD patterns of Ag NP deposited at a fixed deposition time of 5 min for various nozzle to substrate distances.

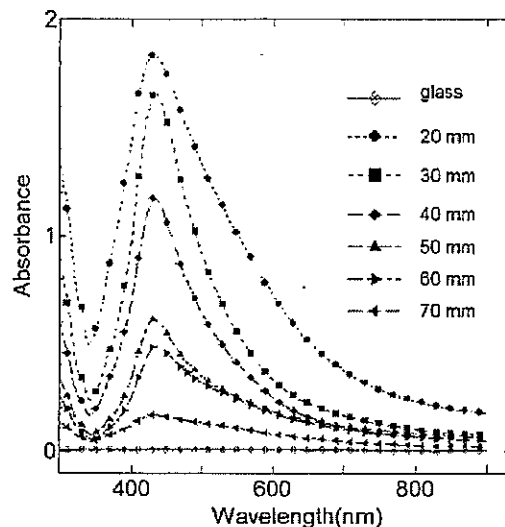


FIGURE 2. Optical absorption spectra of Ag NP films at a fixed deposition time of 5 min for various nozzle to substrate distances.

The results were founded that the grain size of films near around 100 nm at distance between nozzle and substrate of 60 mm.

To investigate the humidity sensing properties of Ag NP films, the humidity sensor device has been fabricated by deposited Ag NP films at nozzle to substrate distance of 40 mm with a fixed deposition time of 5 min on the interdigitated electrodes. When the humidity environment changes, the Ag NP films can be absorbed the moisture and lead to the change of their impedance characteristics. With the relative humidity increasing, the impedance of Ag NP sensor shifted to the lower impedance monotonically. The relationships between the shifted impedance for Ag NP sensor and the relative humidity were presented in Fig. 4. The tested humidity levels ranged from 11%RH to 93%RH.

To study the sensor's repeatability, the sensors were tested in two fixed humidity levels repeatedly and the

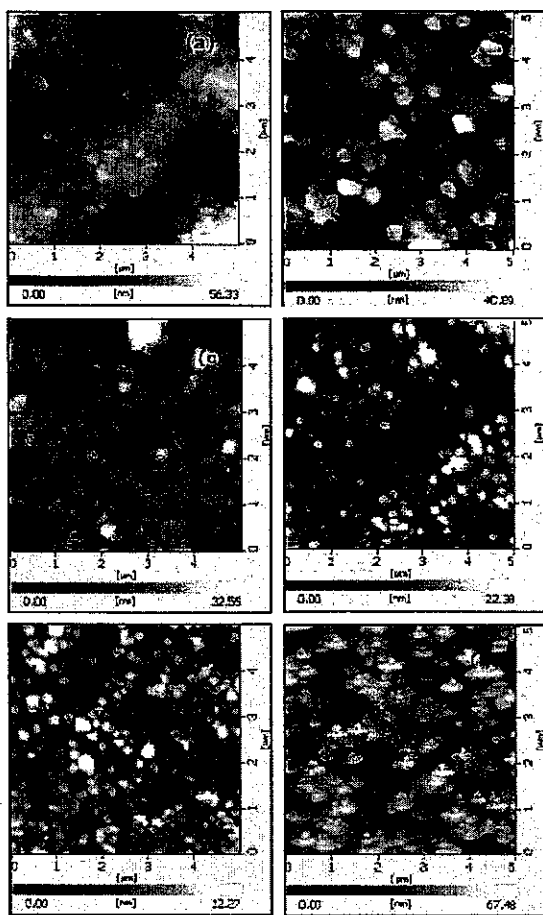


FIGURE 3. AFM images of Ag NP films at fixed deposition time of 5 min for different nozzle to substrate distance (a) 20 mm (b) 30 mm (c) 40 mm (d) 50 mm (e) 60 mm and (f) 70 mm.

continuous impedance values were recorded. The sensor responses under two humidity conditions which corresponded to 11%-93%-11%RH, respectively, were tested and the results were shown in Fig. 5. It is found that the magnitude of the responds in the two state of %RH is about 10^3 values. The time constants for absorption and desorption of the Ag NP sensor can be evaluated from the graph with the values about 4 and 2 second, respectively. When the %RH is increased, the device impedance decreases due to the effect of water moisture in the Ag NP sensing layer. Normally at the higher %RH, the ion of water moisture can be captured with the silver nanoparticles network and the mobility of electron in Ag NP has been increased [16].

4. CONCLUSION

The thin films of silver nanoparticles for humidity sensor applications have been deposited by electrostatic spray deposition technique. The effect of the nozzle to substrate distance on properties of films was investigated. The crystal structure of silver nanoparticle thin films were founded in the orientation of (100), (200), (311) and (222) plane of cubic structure at diffraction angle $2\theta = 38.2^\circ$, 44.3° , 64.4° and 77.4° , respectively. The optical absorption

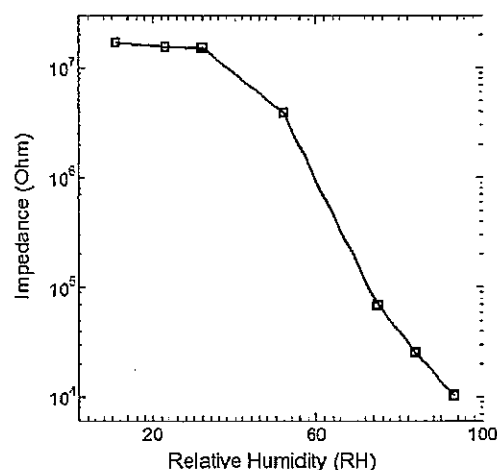


FIGURE 4. The relationships between the impedance for Ag NP sensor and the relative humidity.

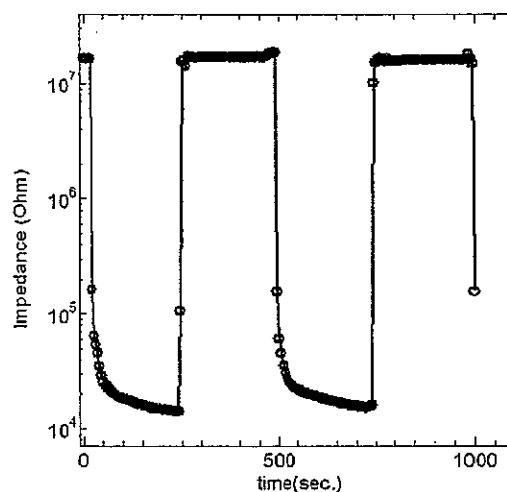


FIGURE 5. The impedance response curve of Ag NP sensor under humidity cycling of 11%-93%-11%RH.

peak was observed at around 440 nm which is the surface plasmon peak of nanoparticles in UV-Vis absorption spectra. The surface roughness of Ag NP films decrease when the distance between nozzle and substrate was increased. Moreover, the silver nanoparticles thin films humidity sensor was fabricated onto the interdigitated electrodes. The sensor exhibits the humidity adsorption and desorption properties with the responsibility in ranges of 11%RH to 93%RH. The time constants for absorption and desorption of the Ag NP sensor in can be evaluated from the cycling measurement with the values about 4 and 2 second, respectively.

ACKNOWLEDGMENTS

This work has partially been supported by the National Nanotechnology Center (NANOTEC), NSTDA, Ministry of Science and Technology, Thailand, through its program of Center of Excellence Network and the National Research Council of Thailand.

1. Scott, M.L., Arendt, P.N., Springer, R.W., Damage in Laser Materials, Nat. Bur. Stand. (US) Spec. Publ., Boulder, Colorado, Vol. 746, pp. 419, 1987
2. Thomas, N., Erlandson, A., Farmer, J., et al, Laser-Induced Damage in Optical Materials, Proceeding of SPIE, Boulder, Colorado, Vol. 3578, pp. 277, 1999
3. Xiong, Y., Wu, H., Guo, Y., et al, Preparation and characterization of nanostructured silver thin films deposited by radio frequency magnetron sputtering, Thin Solid Films, Vol. 375, pp. 300-303, 2000
4. Subrahmanyam, A., Barik, U.K., Synthesis of P-type transparent conducting silver:indium oxide (AIO) thin films by reactive electron beam evaporation technique, Physics and Chemistry of Solids, Vol. 66, pp. 817-822, 2005
5. Li, F.J., Roh, B.G., Lim, H.T., et al, Mechanism of droplet generation in silver thin films for organic light-emitting diode displays, Thin Solid Films, Vol. 517, pp. 2941-2944, 2009
6. Kim, D., Jeong, S., Lee, S., et al, Organic thin film transistor using silver electrodes by the ink-jet printing technology, Thin Solid Films, Vol. 515, pp. 7692-7696, 2007
7. Chen, C.H., Buysman, A.A.J., Kelder, E.M., Schoonman, J., Fabrication of LiCoO_2 thin film cathodes for rechargeable lithium battery by electrostatic spray pyrolysis, Solid State Ionics, Vol. 80, pp. 1-4, 1995
8. Wilhelm, O., Pratsinis, S.E., Perednis, D., et al, Electrospray and pressurized spray deposition of yttria-stabilized zirconia films, Thin Solid Films, Vol. 479, pp. 121-129, 2005
9. Nomura, M., Meester, B., Schoonman, J., et al, Preparation of thin porous titania films on stainless steel substrates for heat exchange (HEX) reactors, Sep. Purif. Technol., Vol. 32, pp. 387-395, 2003
10. Leeuwenburgh, S.C.G., Wolke, J.C. G., Schoonman, et al, Deposition of calcium phosphate coatings with defined chemical properties using the electrostatic spray deposition technique, J. Eur. Ceram. Soc., Vol. 26, pp. 487-493, 2006
11. Diagne, E.H.A., Lumbreras, M., Elaboration and characterization of tin oxide-lanthanum oxide mixed layers prepared by the electrostatic spray pyrolysis technique, Sens. Actuators B, Vol. 78, pp. 98-105, 2006
12. Gourari, H., Lumbreras, M., Van Landschoot, R., et al, Electrode nature effects on stannic oxide type layers prepared by electrostatic spray deposition, Sens. Actuators B, Vol. 58, pp. 365-369, 1999
13. Mafune, F., Kohno, J.-Y., Takeda, Y., et al, Structure and Stability of Silver Nanoparticles in Aqueous Solution Produced by Laser Ablation, J. Phys. Chem, Vol. 104, pp. 8333-8337, 2000
14. Petit, C., Lixon, P., Pileni, M.P., In situ synthesis of silver nanocluster in AOT reverse micelles, J. Phys. Chem, Vol. 97, pp. 12974-12983, 1993
15. Kreibitz, U., Vollmer, M., Optical properties of metal clusters, Springer, Berlin, 1995.
16. Chen, Z., Lu, C., Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms, Sensor Letters, Vol. 3, pp. 274-295, 2005

การตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

ในงานวิจัยนี้ได้นำส่งเพื่อตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติซึ่งอยู่ในขั้นตอนการจัดรูปแบบและตีพิมพ์ต่อไปในวารสาร *Advances in Materials Science and Engineering* (impact factor = 0.4) จำนวน 1 เรื่องได้แก่

“A humidity sensor based on silver nanoparticles thin film prepared by electrostatic spray deposition process”

**Hindawi Publishing Corporation**
Hindawi

Thutiyaporn Thiwawong Update My Account Logout



Submit a Manuscript Author Activities

640428.v2 (Research Article)

Title	 A humidity sensor based on silver nanoparticles thin film prepared by electrostatic spray deposition process
Journal	Advances in Materials Science and Engineering
Issue	Regular
Additional Files	 Reply to review reports
Manuscript Number	640428 (Research Article)
Resubmitted On	2013-05-10
Authors	 Thutiyaporn Thiwawong,  Benchapol Tunhoo,  Korakot Onlaor
Editor	 Zhimin Liu (Assigned on 2013-05-10)
Decision Date	2013-05-19
Status	In Press
Supplementary Materials	View Supplementary Materials

Manuscript History

 View Version 1

COMPOSE

[How To Publish A Book - www.ChooseYourPublisher.com](#) - Get Access with the Right Publisher Free Guide on How To Publish A Book☐ Why this a

Inbox (532)

Starred

Important

Drafts (23)

Circles 

Notes

Personal

Travel

More

640428: Your manuscript has been accepted

Inbox x

People (4)

 **Zhimin Liu** amse@hindawi.com [via](#) amazonses.com
to me, liuzm, ktbencha, korakot_28May 19 (10 days ago) 

Zhimin Liu

[Show details](#)

Dear Dr. Thiwawong,

The review of the Research Article 640428 titled "A humidity sensor based on silver nanoparticles thin film prepared by electrostatic spray deposition process," by Thutiyaporn Thiwawong, Benchapol Tunhoo and Korakot Onlaor submitted to Advances in Materials Science and Engineering, has been completed, and I am pleased to inform you that your manuscript has now been accepted for publication in the journal.

The publication process of your manuscript will be initiated upon the receipt of the electronic files. Please login to the Manuscript Tracking System at the link below using your username and password, and upload the electronic files of your final accepted version within the next 2-3 days.

http://mts.hindawi.com/author/640428/upload_files/

The electronic files should include the following:

- 1- Source file (Word or TeX/LaTeX).
- 2- Final PDF file of the accepted manuscript.
- 3- Editable Figure files (each figure in a separate eps/postscript/word file) if any, taking into consideration that tiff, jpg, jpeg, bmp formats are not editable.

Thank you again for submitting your manuscript to Advances in Materials Science and Engineering.

Best regards,

Zhimin Liu

Ads - Why these ads?



Lumosity.com

Get smarter, think faster - Tra

IOSR Engineering Journals

Publish Your Research Article In

International Journal:IOSR

JOURNALS

iosrjournals.org



Journal Menu

- About this Journal
- Abstracting and Indexing
- Aims and Scope
- Article Processing Charges
- Articles in Press
- Author Guidelines
- Bibliographic Information
- Citations to this Journal
- Contact Information
- Editorial Board
- Editorial Workflow
- Free eTOC Alerts
- Publication Ethics
- Reviewers Acknowledgment
- Submit a Manuscript
- Subscription Information
- Table of Contents

• Open Special Issues

Articles in Press [13 articles]

- ▶ Fluorescent Thiol-Derivatized Gold Clusters Embedded in Polymers, Gianfranco Carotenuto, Sergio De Nicola, and Luigi Nicolais
- ▶ Redistribution and effect of various elements on the morphology of primary graphite in cast iron, J. Lacaze, N. Valle, Koenraad Theuvsen, Jon Sertucha, Brahime El Adib, and Lydia Laffont
- ▶ Materials Selection, Synthesis and Dielectric Properties of PVC Nano-composites, Youssef Mobarak, Mohamed Bassyouni, and Mahdi Almutawa
- ▶ Improving barrier properties of PET by depositing a layer of DLC films on surface, Zhiguo Zhang, Riheng Song, Guoneng Li, Guilin Hu, Youqu Zheng, and Yaoyu Sun
- ▶ Seismic Response Analysis of Masonry Minaret and Possible Strengthening by Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Materials, Murat TURK
- ▶ Stress-softening and residual strain effects in suture materials, Alex Elias-Zuniga, Beatriz Montoya, Wendy Ortega-Lara, Eduardo Flores, Ciro A. Rodriguez, Hector Siller, Oscar Martinez-Romero, and José Antonio Díaz
- ▶ A humidity sensor based on silver nanoparticles thin film prepared by electrostatic spray deposition process, Thutiyaporn Thiwawong, Benchapol Tunhoo, and Korakot Onlaor
- ▶ A Current Transport Mechanism on the Surface of Pd-SiO₂ Mixture for Metal-Semiconductor-Metal GaAs Diodes, Shih-Wei Tan and Shih-Wen Lai

ชุดอุปกรณ์เครื่องต้นแบบระบบวัดความชื้น

ในงานวิจัยนี้ ได้มีขั้นตอนการสร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับวัดความชื้นโดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการหรือภาคสนามได้ โดยอุปกรณ์ประกอบด้วย หัววัดความชื้น ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์เก็บค่าสัญญาณอิมพีแดนซ์แล้วผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อพอร์ตUSB โดยสามารถนำไปเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์พกพาแท็บเล็ต หรือสมาร์ทโฟนได้ ให้เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละพื้นที่



AD5933 Beta Version REV1.0

Help:How to use software

Sweep Parameters

Start Frequency (Hz)

30000

Delta Frequency (Hz)

2

Number of Increments (9 Bit)

100

Number of Settling Time Cycles

15

MCLK_Ref Clock Frequency

16000000

System clock

☒ External clock
☐ Internal oscillator

Calibration Impedance

☒ Resistor only R1
☐ Capacitor only C1

☐ Resistor in series with Capacitor R1+C1
☐ Resistor in parallel with capacitor R1||C1
☐ Complex Circuit (R1||C1)+ R2

Resistor value R1

200E3

Capacitor value C1

15E-12

Resistor value R2

200E3

Output Excitation

☒ Range1:2vp-p
☐ Range2:1vp-p
☐ Range3:0.4vp-p
☐ Range 4:0.2vp-p

PGA Control

☒ Gain = X1
☐ Gain = X5

Program Device Registers

DDS Settling Time Cycles

☒ X1 (Default)
☐ X2 (Double)
☐ X4 (Quadruple)

Calibration Gain Factor

☒ Mid-Point Frequency calibration
☐ Multi-Point Frequency calibration

Calculate Gain Factor

Calculated Gain Factor

5.13427021632825E-10

Internal Temperature

Measure

Current Device Temperature

25.00000 Degrees Celcius

Start Sweep

☐ Enable Continuous sweep
☐ View Theoretical calibration profile

Start Sweep

Download Impedance Data

Absolute Impedance |Z|

Impedance Phase ?

10

5

0

-5

-10

-80

-60

-40

-20

0