

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปลูกฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับการ
ประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ความชื้น

PREPARATION OF SILVER NANOPARTICLE THIN FILMS BY
ELECTROSTATIC SPRAY DEPOSITION FOR HUMIDITY SENSOR



ยูวัฒน์ บุญหนัก

YUWAT BOONNUK

พ.ศ.
๒๕๕๔
๒๕๕๔

คชพ.
เลขทะเบียน 117022
วัน เดือน ปี 21 มี.ค. 2554

12331119

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2554

KMITL-2011-NT-M-001-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PREPARATION OF SILVER NANOPARTICLE THIN FILMS BY
ELECTROSTATIC SPRAY DEPOSITION FOR HUMIDITY SENSOR**



YUWAT BOONNUK

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2011

KMITL-2011-NT-M-001-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2011

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปลูกฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ความชื้น

นักศึกษา

นายชัชวาล บัญหนัก

รหัสประจำตัว

51614255

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

พ.ศ.

2554

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.ทศยาภรณ์ ทิวาวงศ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปลูกฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินถูกเตรียมขึ้นบนฐานรองรับที่เป็นกระจก มีเงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มบาง ได้แก่ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับ เวลาในการเตรียมฟิล์มบางและความเข้มข้นของสสารไฟฟ้า ตามลำดับ ทำการตรวจสอบวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีระบบยูวี-วิสิเบิล จากการปลูกฟิล์มพบว่าสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางที่ได้มีสมบัติความเป็นผลึกบนระนาบ (100), (200), (311) และ (222) มียอดของการเลี้ยวเบนที่มุม $2\theta = 38.2, 44.3, 64.4$ และ 77.4 องศา มีโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะแบบคิวบิก

เซนเซอร์ความชื้นสร้างขึ้นโดยการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินบนขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิต จากการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของเซนเซอร์ความชื้นพบว่าที่ความชื้น 93%RH มีค่าความต้านทานเชิงซ้อนเท่ากับ 10.3 กิโลโอห์ม สภาพความไว $1.84 \times 10^5 \text{ Ohm}/\% \text{RH}$ และมีค่าฮิสเทอรีซิสอยู่ที่ 8 %RH เวลาในการดูดซับและคายความชื้นเท่ากับ 4 และ 2 วินาที ตามลำดับ

คำสำคัญ : การปลูกฟิล์มบางโดยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต, ฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน,

สิ่งประดิษฐ์ตรวจวัดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Preparation of Silver Nanoparticle Thin Films by Electrostatic Spray Deposition for Humidity Sensor
Student	Mr. Yuwat Boonnuk
Student ID	51614255
Degree	Master of Science
Program	Nanoscience and Nanotechnology
Year	2011
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Jiti Nukeaw
Thesis Coadvisor	Dr. Thutiaporn Thiawong

ABSTRACT

This research is a study of preparation of silver nanoparticle thin films by electrostatic spray deposition (ESD) for humidity sensor application. Silver nanoparticle thin films were deposited on glass substrate. The thin films growth condition such as distance between nozzle and substrate, deposition time, and electrostatic field were investigated. 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 microscopic (AFM) and UV-VIS spectrophotometer (UV-VIS). Silver nanoparticle 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°

The silver nanoparticle 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 $1.84 \times 10^5 \text{ Ohm}/\% \text{RH}$, and hysteresis of 8 %RH. Humidity adsorption and desorption time are 4 and 2 seconds, respectively.

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.ทศยาภรณ์ ทิววงศ์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ทั้งทางด้านทฤษฎี และทางปฏิบัติ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ศุภนิช พรธีระภัทร ดร.ปิติพร ถนอมงาม และ ดร.เบญจพล ดันฐ์ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ให้คำชี้แนะและการตรวจแก้วิทยานิพนธ์ให้สำเร็จ ได้ด้วยความเรียบร้อย

ขอขอบพระคุณ ดร.วิรัตน์ เจริญบุญ สำหรับคำแนะนำ และช่วยให้ความอนุเคราะห์ ประกอบเครื่องกำเนิดแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสวิตซ์สูง ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ทศยาภรณ์ ทิววงศ์ ที่คอยช่วยเหลือในทุกๆ เรื่อง และคอยให้ คำปรึกษาและให้คำแนะนำที่ดีที่สุดแก่ข้าพเจ้า ในการทำงานวิจัยและทุกสถานการณ์ที่เกิดขึ้น ตลอด ระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) และสถาบันนิติวิทยาศาสตร์ กระทรวงยุติธรรม สำหรับทำให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดและวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ พี่โม พี่เบญ พี่เก่ง พี่บี พี่อัย พี่นัม โบว์ แคน โอเล่ บอย สอง และเพื่อนพี่น้อง สมาชิกห้องปฏิบัติการ Central Laboratory และ ห้องปฏิบัติการ Electronics and Control for Nanodevices Laboratory ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้า ในการทำงานวิจัย และในทุกสถานการณ์ที่เกิดขึ้น ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณ พี่น้อง พี่อง พี่อง พี่อง ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังทุกท่าน ที่มีสุข ทุกข์ ร่วมเสพกัน ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว บุญหนัก สำหรับกำลังใจและความอบอุ่นที่มีให้ เสมอมา คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขออุทิศแด่ครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทั้งในด้านวิชาการและศีลธรรมแก่ข้าพเจ้าตลอดในช่วงชีวิตของ ข้าพเจ้า

สุดท้ายขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว อาจารย์ที่มีส่วนร่วมทุกท่าน และเพื่อนสมาชิก ค่ายจิตอาสาทุกคน ที่ได้วางรากฐานกิจกรรมดีๆ ในการตอบสนองสังคมไทย ที่ซึ่งยังมีผู้ยากไร้ และ ด้อยโอกาสอยู่ ข้าพเจ้าก็ขอเป็นกำลังใจให้ทุกท่าน รวมทั้งตัวข้าพเจ้าเอง ให้สืบทอดกิจกรรมที่ดี เหล่านี้ควบคู่ไปกับงานวิจัย และควบคู่ไปกับชีวิตจิตอาสาทุกท่านตลอดไป

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.....	3
1.5 รายละเอียดของงานวิจัย.....	3

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 อนุภาคนาโนเงิน.....	5
2.1.1 อนุภาคนาโน.....	5
2.1.2 อนุภาคนาโนโลหะ.....	6
2.1.3 สมบัติของอนุภาคนาโนเงิน.....	6
2.1.3.1 สมบัติทางโครงสร้างของอนุภาคนาโนเงิน.....	6
2.1.3.2 สมบัติทางพื้นผิวของอนุภาคนาโนเงิน.....	7
2.1.3.3 สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนเงิน.....	8
2.1.4 การประยุกต์ใช้งานอนุภาคนาโนเงิน.....	9
2.2 ระบบเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	13
2.2.1 การเตรียมฟิล์มบาง.....	13
2.2.2 การเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	16
2.2.2.1 แรงที่มีผลต่อการกระทำกับสารที่พ่นออกมา.....	25
2.2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อเตรียมฟิล์มโดยกระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	25
2.2.3 การประยุกต์ใช้งานจากการเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์ม.....	28
2.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	28
2.3.2 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	31
2.3.3 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....	33
2.3.4 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยระบบยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี.....	36
2.4 เซนเซอร์ความชื้น.....	39
2.4.1 หลักการของเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น.....	39
2.4.1.1 ความชื้น.....	39
2.4.1.2 เซนเซอร์ความชื้น.....	40
2.4.1.3 ประเภทของเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น.....	42
2.4.1.4 ระบบการตรวจวัดความชื้น.....	43
2.4.2 การตรวจสอบคุณลักษณะของเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น.....	47
2.4.2.1 ความถูกต้อง (Accuracy).....	47
2.4.2.2 ความไว (Sensitivity).....	47
2.4.2.3 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity).....	48
2.4.2.4 ช่วงการใช้งาน (Range).....	48
2.4.2.5 ความละเอียด (Resolution).....	49
2.4.2.6 การตอบสนอง (Response).....	49
2.4.2.7 การตอบสนองต่อความถี่ (Frequency response).....	50
2.4.2.8 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis).....	50
2.4.2.9 ความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability or Reproducibility).....	51
2.4.2.10 ความเสถียร (Stability).....	51
2.4.2.11 ความเชื่อมั่น (Reliability).....	51
2.4.2.12 อายุการใช้งาน (Operating life).....	51
2.4.2.13 ความไวคู่ (Dual Sensitivity).....	51
2.4.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสิ่งประดิษฐ์เซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น.....	52

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ขั้นตอนการทำงานวิจัย.....	56
3.1 การเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน โดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	57
3.1.1 องค์ประกอบของการเตรียมฟิล์มบาง โดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	57
3.1.1.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง.....	57
3.1.1.2 หลอดบรรจุสารและหัวเข็ม.....	58
3.1.1.3 แผ่นกราวด์แพลท.....	58
3.1.1.4 ระบบตรวจดูการพ่น.....	58
3.1.1.5 ห้องสำหรับการพ่น.....	59
3.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ.....	59
3.3 การเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน.....	60
3.3.1 เงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอย และละอองฝอยแบบสมบูรณ์.....	60
3.3.2 เงื่อนไขกระจายตัวของสารเมื่อปรับศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างต่างๆ.....	61
3.3.3 เงื่อนไขระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับแผ่นฐานรองรับ.....	61
3.3.4 เงื่อนไขระยะเวลาในการเตรียมฟิล์ม.....	61
3.4 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน.....	62
3.4.1 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	62
3.4.2 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบเลือนกราด.....	62
3.4.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	63
3.4.4 การตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยระบบยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี.....	64
3.5 การประดิษฐ์เซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดความชื้น.....	65
3.6 การตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้น.....	66
3.6.1 การตรวจสอบสมบัติพื้นผิวและความหนาของฟิล์มอนุภาคนาโนเงินที่ เคลือบเป็นชั้นเซนเซอร์ความชื้น.....	66
3.6.2 การตรวจสอบการตอบสนองต่อความชื้น.....	66
3.6.2.1 การวัดค่าการตอบสนองต่อความชื้น.....	67
3.6.2.1 การวัดค่าการตอบสนองต่อความชื้น.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VI และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.6.2.3 การวัดสภาพความไวในการตอบสนอง.....	67
3.6.3 การตรวจสอบลักษณะฮิสเทอรีซิสในการดูดซับและคายความชื้น.....	68
3.6.4 การตรวจสอบเสถียรภาพของเซนเซอร์.....	68
3.6.5 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี.....	68
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	69
4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน.....	70
4.1.1 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอย และละอองฝอยแบบสมบูรณ์.....	70
4.1.2 ผลของการกระจายตัวของสารเมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าและระยะห่างต่างๆ.....	71
4.1.3 ผลของระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับ.....	74
4.1.4 ผลของเวลาในการเตรียมฟิล์มบาง.....	85
4.2 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้น.....	90
4.2.1 ผลการตรวจสอบสมบัติพื้นผิวและความหนาของฟิล์มอนุภาคนาโนเงินที่ เคลือบเป็นชั้นเซนเซอร์วัดความชื้น.....	90
4.2.2 ผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อความชื้น.....	92
4.2.2.1 ผลการวัดค่าการตอบสนองต่อความชื้น.....	92
4.2.2.2 ผลการวัดเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับ และคายความชื้น.....	95
4.2.2.3 ผลการวัดสภาพความไวในการตอบสนอง.....	97
4.2.3 ผลการตรวจสอบลักษณะฮิสเทอรีซิสในการดูดซับและคายความชื้น.....	99
4.2.4 ผลการตรวจสอบเสถียรภาพของเซนเซอร์.....	100
4.2.5 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยเทคนิค อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี.....	101

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	106
เอกสารอ้างอิง.....	108
ผลงานวิจัยที่ได้รับตีพิมพ์.....	112
ประวัติผู้เขียน.....	113



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอนุภาคนาโนเงินที่ใช้ในการทดลอง.....	8
2.2 การแบ่งประเภทของเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบาง.....	14
2.3 สารละลายที่ใช้ในการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต แล้วทำให้เกิดการแตกตัวแบบ cone jet.....	21
2.4 ค่าของความยาวคลื่น, พลังงาน และชนิดของการ excitation.....	39
2.5 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของหลักการวัดความขึ้นแบบต่างๆ.....	41
2.6 ค่าความขึ้นของสารละลายเกลืออิมิตัวที่อุณหภูมิต่างๆ.....	44
2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซนเซอร์ตรวจวัดความขึ้นประเภทฟิล์มบาง.....	55
3.1 เงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน โดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงแบบปรับค่าได้.....	61
3.2 เงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มอนุภาคนาโนเงินบนขั้วไฟฟ้า.....	66
4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระยะในการพ่นตั้งแต่ 10 – 150 มิลลิเมตร โดยใช้ระดับแรงดันเท่ากับ 1-11 กิโลโวลต์.....	72
4.2 อัตราส่วนระหว่างแนวตั้งฉากกับแนวราบของเส้นผ่านศูนย์กลางวงสเปรย์ที่ระยะในการพ่น ตั้งแต่ 10 – 150 มิลลิเมตร โดยใช้ระดับแรงดันเท่ากับ 1-11 กิโลโวลต์.....	74
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของฟิล์มที่ระยะต่างๆ กับค่าความขรุขระ ของพื้นผิวฟิล์ม.....	79
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของฟิล์มที่ระยะต่างๆ กับ ค่าความขรุขระ ของพื้นผิวฟิล์ม.....	83
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มต่างๆ กับ ค่าความขรุขระ ของพื้นผิวฟิล์ม.....	87
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มต่างๆ กับค่าความหนาของชั้นฟิล์ม อนุภาคนาโน.....	91
4.7 คุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความขึ้น.....	97
4.8 สภาพความไวของเซนเซอร์วัดความขึ้น.....	98
4.9 สภาพความไวของเซนเซอร์วัดความขึ้น.....	99

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนเงิน	
(a) ตัวอย่างที่วัดหลังจากทำการเตรียมสารเสร็จ (b) ตัวอย่างที่วัดหลังจากผ่านไป 6 เดือน.....	7
2.2 ภาพถ่ายแสดงขนาดอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้โดยมีขนาดประมาณ 20 นาโนเมตร.....	7
2.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเงินที่ปริมาณอัตราส่วนต่างๆ กัน.....	8
2.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด แสดงอนุภาคนาโนเงินที่เข้าไปผสมกับแคลเซียมฟอสเฟตหลังจากทำการแอลนีลที่ 500 °C.....	9
2.5 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli เมื่อทำการเจืออนุภาคนาโนเงินเข้าไปผสม.....	10
2.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด แสดงชั้นของอนุภาคนาโนเงินที่แอนนีลที่อุณหภูมิเป็น (a) 100 °C, (b) 140 °C และ (c) 180 °C.....	10
2.7 ความสัมพันธ์กราฟ IV ของโซล่าเซลล์.....	11
2.8 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนเงินที่ผสมกับโพลีเอทิลีน เมื่อขนาดของอนุภาคนาโนเงินที่ผสมเข้าไปมีขนาดต่างๆ กัน.....	11
2.9 การตอบสนองของความชื้นของฟิล์มบางโพลีเอทิลีนที่มีการผสมอนุภาคนาโนเงินในขนาดที่แตกต่างกัน.....	12
2.10 สภาพความไวในการตอบสนองของฟิล์มบางโพลีเอทิลีนที่มีการผสมอนุภาคนาโนเงินในขนาดที่แตกต่างกันที่ความชื้น 5%RH.....	12
2.11 กระบวนการในการเตรียมฟิล์มบาง.....	13
2.12 การหยดแบบเรย์เลย์ (Rayleigh).....	19
2.13 โหมดการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบต่างๆ.....	20
2.14 ลักษณะของโคน (cone shape) และลักษณะหยดละอองฝอยและลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับแรงของของเหลวที่มากกระทำ.....	22
2.15 ผลของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีผลต่อการแตกตัวเป็นละอองฝอย.....	23
2.16 การเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (a) ระบบแบบหัวเข็มธรรมดา (b) ระบบแบบหัวเข็มที่สามารถกรองได้.....	24
2.17 การติดตั้งระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (ESD).....	26
2.18 สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	26
2.19 การติดตั้งระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (ESD) ที่เตรียมขึ้นบน	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต	27
2.21 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในผลึกตามกฎของแบรกก์	28
2.22 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในกรณีคลื่นแทรกสอดและเสริมกัน	29
2.23 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	30
2.24 โครงสร้างหลักกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด	32
2.25 ผลจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง	33
2.26 คาน (Cantilever) ที่ใช้ในการวัด	33
2.27 แผนภาพระบบแสงที่ใช้วัดการโค้งงอของคาน	34
2.28 ระบบการวัดกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	34
2.29 กราฟแรงอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่ขึ้นอยู่กับระยะห่าง	35
2.30 ลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง	37
2.31 ระบบการวัดเซนเซอร์ความชื้นแบบ Mass flow	43
2.32 ระบบการวัดเซนเซอร์ความชื้นแบบจุ่มกับความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่ได้จากการผสมสารละลายเกลืออนอัมตัว	43
2.33 ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น	47
2.34 ความเป็นเชิงเส้นของเซนเซอร์	48
2.35 ช่วงการใช้งานของเซนเซอร์	48
2.36 ผลตอบสนองทางเวลาขาขึ้น (คายความชื้น) ของเซนเซอร์วัดความชื้น	49
2.37 ผลตอบสนองทางเวลาขาลง (ดูดซับความชื้น) ของเซนเซอร์วัดความชื้น	50
2.38 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ที่เกิดขึ้นกับเซนเซอร์	51
2.39 เวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์ทั้งช่วงเวลาในการดูดซับความชื้น และเวลาในการคายความชื้น	54
2.40 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ที่เกิดขึ้นกับเซนเซอร์ความชื้น	54
2.41 เสถียรภาพของเซนเซอร์ความชื้นที่วัดเป็นเวลา 70 วัน	54
3.1 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	56
3.2 ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต	57
3.3 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง (ก) ชนิดคงที่ (ข) ชนิดปรับค่าได้	57
3.4 (ก) หลอดบรรจุน้ำ (ข) หัวเข็มสำหรับการพ่น	58
3.5 แผ่นโลหะนำไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (ก) แผ่นอะลูมิเนียม (ข) แผ่นทองแดง	58

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 (ก) กล้องและเลนส์กำลังขยายสูง (ข) หน้าจอแสดงภาพถ่ายลำและละอองฝอย	59
3.7 ระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต	59
3.8 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD), Bruker รุ่น D8 Discover with GADDS	62
3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดชนิด Field Emission(FE-SEM) , Hitachi รุ่น S4700	63
3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอม(AFM), Seiko SPA-400	64
3.11 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer,PG Instrument รุ่น T90+	65
3.12 ลักษณะข้อไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิต	65
3.13 ระบบการวัดการตอบสนองต่อความชื้น	67
4.1 คำศัพท์ไฟฟ้าที่เริ่มแตกตัวเป็นละอองฝอยและแตกตัวเป็นละอองฝอย แบบสมบูรณ์ที่ระยะห่างต่างๆ	70
4.2 ภาพลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเงินที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็ม และฐานรองรับเท่ากับ 10 mm และปรับแรงดันไฟฟ้าเป็น 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 กิโลโวลต์	71
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง	73
4.4 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะต่างกัน	75
4.5 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มจากเครื่อง FE-SEM โดยระยะในการเตรียมฟิล์มต่างกัน (ก)-(จ) เท่ากับ 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 มิลลิเมตร	76
4.6 ภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมฟิล์ม 20 มิลลิเมตร มีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 1.40 ไมครอน	77
4.7 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม โดยที่ระยะห่างการเตรียมฟิล์มต่างๆ	78
4.8 ค่าของความขรุขระของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน	79
4.9 กราฟดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน	80
4.10 ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนน (surface plasmon resonance, SPR)	81
4.11 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะต่างกัน	81
4.12 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม โดยมี ระยะการเตรียมฟิล์มฟิล์มต่างๆ กัน (a)-(g) แสดงภาพถ่ายด้านบนพื้นผิว (top view)	82
4.13 ค่าของความขรุขระของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน	84

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 กราฟดูตกئينของแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน	84
4.15 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เวลาต่างๆ	85
4.16 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมโดย เวลาในการเตรียมฟิล์มต่างๆ กัน (a)-(f) แสดงภาพถ่ายด้านบนพื้นผิว (top view)	86
4.17 ค่าของความขรุขระของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่โดยเวลาในการเตรียมฟิล์มต่างๆ กัน	87
4.18 กราฟดูตกئينของแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เวลาในการเตรียมต่างๆ กัน	88
4.19 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มอนุภาคนาโนเงินจากเครื่อง FE-SEM ที่ระยะห่างเท่ากับ 40 มิลลิเมตร โดยเวลาในการเตรียมฟิล์มต่างกัน ((ก) = 1 นาที, (ข) = 5 นาที, (ค) = 10 นาที, (ง) = 10 นาที 2 ครั้ง)	90
4.20 ภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมฟิล์ม 40 มิลลิเมตร	91
4.21 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาพ่นสารเคลือบฟิล์ม 1 นาที	92
4.22 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาพ่นสารเคลือบฟิล์ม 5 นาที	93
4.23 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาพ่นสารเคลือบฟิล์ม 10 นาที	93
4.24 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาพ่นสารเคลือบฟิล์ม 10 นาที 2 ครั้ง	94
4.25 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาเตรียมฟิล์มต่างกัน	95
4.26 การตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นของเซนเซอร์	96
4.27 การตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นของเซนเซอร์ในช่วงเวลา 300 วินาที	96
4.28 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาพ่นสารเคลือบฟิล์มเป็นเวลาต่างๆ	98
4.29 การตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้น	100
4.30 การตรวจสอบเสถียรภาพของเซนเซอร์เมื่อเวลาผ่านไป 40 วัน	101
4.31 ความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ในกรณีความถี่แตกต่างกัน	102
4.32 ความต้านทานเชิงซ้อนที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ในกรณีความถี่แตกต่างกัน	103
4.33 การวิเคราะห์คุณลักษณะวงจรด้วยวิธีคอมเพล็กซ์อิมพีแดนซ์ (Complex Impedance)	104
4.34 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซนเซอร์ความชื้น	105

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันการเตรียมฟิล์มบางเพื่อศึกษาสมบัติทางด้านต่างๆ ของฟิล์มบางและเพื่อศึกษาแนวทางการนำฟิล์มบางไปประยุกต์ใช้ทำอุปกรณ์ทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมนั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธี Radio frequency magnetron sputtering, Metal organic chemical vapor deposition, Molecular beam epitaxy และ Pulsed laser deposition[1-4] นอกจากนี้ยังมีหลายวิธีที่สามารถเตรียมฟิล์มบางอนุภาคเงินได้ เช่น radio frequency magnetron sputtering, reactive electron beam evaporation technique, thermal evaporation method และ ink-jet printing technology[5-8] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วิธีการทั้งหมดที่กล่าวมานี้จะมีกระบวนการที่ซับซ้อน ทำได้ยาก ราคาแพง และต้องทำในระบบมีความเป็นสุญญากาศสูง ทำให้ในไม่กี่ปีมานี้ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตได้มีการพัฒนาและสนใจเป็นอย่างมากในการเตรียมฟิล์มบาง

การเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic spray deposition : ESD) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการพัฒนางานในระดับนาโนเมตร ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่มีความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถเตรียมฟิล์มบางได้ และฟิล์มบางที่ได้มีการกระจายตัวได้ดีในระดับหนึ่ง นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังใช้ต้นทุนต่ำ (Low cost) ทำได้ง่ายไม่ซับซ้อน ติดตั้งได้ง่าย สามารถทำได้ทั้งสภาวะบรรยากาศปกติ ซึ่งมีส่วนช่วยในการพัฒนาการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และการประยุกต์ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และสิ่งแวดล้อม เช่น ได้มีงานวิจัยของ C. M. Ghimbeu และคณะได้ทำการวิจัยการเตรียมฟิล์มบางซิงออกไซด์(ZnO) โดยวิธีการสเปรย์ด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อนำไปใช้ทำอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซ[9] และงานวิจัยของ J. L. Huiqing Fan และคณะได้ทำการวิจัยการเตรียมโพลีคริสตัลไลน์ซิงค์ออกไซด์(Polycrystalline ZnO) ฟิล์มเพื่อการประยุกต์ใช้ทำอุปกรณ์การเปล่งแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ต[10] และงานวิจัยของ J. Zhang และคณะได้ทำการวิจัยการเตรียมฟิล์มบางอะมอร์ฟัส $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ ที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นรูพรุนแบบตาข่ายสำหรับการทำลิเทียมไอออนแบตเตอรี่[11] นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้งานทางด้านเกษตรและสิ่งแวดล้อมได้ เป็นต้น

อนุภาคนาโนเงิน(Nano-Silver) ปัจจุบันนี้ได้รับความนิยมในการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมาก เนื่องจากอนุภาคนาโนเงินมีคุณสมบัติหลาย ๆ ประการที่น่าสนใจ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น ในทางการแพทย์ สามารถนำไปใช้สำหรับฆ่าเชื้อและผลิตเครื่องมือสำหรับการเอกซเรย์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่าตัด[12,13] ทางอุตสาหกรรมใช้อุณหภูมิเงินเป็นสารเร่งปฏิกิริยา[14] นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำอนุภาคนาโนเงินไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์[15] และในทางการเกษตรได้อีกด้วย[16] ตัวอย่างที่ชัดเจนอีกตัวอย่างหนึ่ง คือ เลื่อนาโน ซึ่งเลื่อนามีสมบัติของอนุภาคนาโนเงินเข้าไปแทรกซึมในเส้นใยของผ้า ทำให้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย ทำให้แบคทีเรียตายลง ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นสมบัติพิเศษของอนุภาคนาโนเงิน ซึ่งเหมาะต่อการศึกษาและทำวิจัย

ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาข้างต้นนี้ จึงได้มีการศึกษาถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต และสมบัติต่างๆของอนุภาคนาโนเงิน เพื่อหาแนวทางในการนำฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ ด้านอุตสาหกรรม และด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการพัฒนาเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องทางด้านเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษากระบวนการและวิธีการเตรียมฟิล์มบาง โดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic spray deposition : ESD)
- 1.2.2 ศึกษาสมบัติของอนุภาคนาโนเงิน ที่นำมาใช้ในเตรียมฟิล์มบางโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต
- 1.2.3 ศึกษาสมบัติเฉพาะทางโครงสร้างผลึก สมบัติทางพื้นผิว และสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินด้วยวิธีการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Field emission scanning electron microscope: FE-SEM), กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) และระบบวัดทางแสง (UV-VIS Spectroscopy) ตามลำดับ
- 1.2.4 เพื่อศึกษาแนวทางการนำฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดความชื้น

1.3 ขอบเขตการดำเนินวิจัย

ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน และนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม โดยอนุภาคนาโนเงินจะถูกเตรียมโดยผ่านกระบวนการ ESD โดยจะทำการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจก ซึ่งมีเงื่อนไขต่างๆ คือ เงื่อนไขของของศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยและละอองฝอยแบบสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขของการกระจายตัวของสารเมื่อปรับศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างต่างๆ เงื่อนไขปรับระยะห่างในการเตรียมฟิล์มบาง และเงื่อนไขการปรับระยะเวลาในการเตรียมฟิล์มบาง จากนั้นจะนำฟิล์มที่ได้มาทำการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาสมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดและกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม และสุดท้ายจะทำการตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer จากนั้นนำเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางที่ดีดังกล่าวสร้างเป็นเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดความชื้นและทำการตรวจสอบคุณลักษณะที่สำคัญของเซนเซอร์ต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 มีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับระบบและวิธีการเตรียมโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic spray deposition:ESD)
- 1.4.2 มีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับสมบัติของอนุภาคนาโนเงิน ที่นำมาใช้ใน เตรียมฟิล์ม โดยกระบวนการ ESD
- 1.4.3 มีความรู้และความเข้าใจ สมบัติเฉพาะทางโครงสร้างผลึก สมบัติทางพื้นผิว และสมบัติทางแสง ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน รวมทั้งสามารถวัดและ วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (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 ขอบเขตของการดำเนินวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะประกอบไปด้วย ทฤษฎีของอนุภาคนาโนเงิน ทฤษฎีการเตรียมฟิล์มบางโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต และสุดท้าย คือ การกล่าวถึงทฤษฎีของเซนเซอร์วัดความชื้น ซึ่งเป็นปลายทางของงานวิจัยนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการทดลองต่างๆ ของงานวิจัย ตั้งแต่กระบวนการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต รวมถึงการตรวจสอบฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน ด้วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง และท้ายสุดจะเป็นการกล่าวถึงกระบวนการประดิษฐ์เซนเซอร์ความชื้น

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด ตั้งแต่กระบวนการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ผลของการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน และผลของการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้น

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของอนุภาคนาโน และอนุภาคนาโนเงิน ปัจจัยที่ทำให้อนุภาคหรืออุปกรณ์ในระดับนาโนเมตรมีสมบัติใหม่ที่ต่างไปจากอนุภาคเดิมที่มีขนาดใหญ่ สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางพื้นผิว และสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนเงิน

นอกจากนี้ในบทนี้ยังกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของเทคโนโลยีการเตรียมฟิล์มบาง รวมทั้งระบบการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนโดยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบดังกล่าวในการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน จากนั้นจะกล่าวถึงหลักการเครื่องมือวิเคราะห์ฟิล์มบาง สุดท้าย จะกล่าวถึงหลักการของเซนเซอร์และเซนเซอร์ความชื้น สมบัติสำคัญต่างๆ ของเซนเซอร์ทั่วไป และเซนเซอร์วัดความชื้นตามลำดับ

2.1 อนุภาคนาโนเงิน (silver nanoparticle)

2.1.1 อนุภาคนาโน (nanoparticles) [17,18]

อนุภาคนาโน (nanoparticles) อนุภาคนาโนของสารหนึ่งๆเมื่อถูกออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 100 นาโนเมตร จะทำให้เกิดคุณสมบัติใหม่ๆหรือเพิ่มระดับความสามารถจากเดิม อย่างเช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ซึ่งสามารถมองเห็นได้ ถ้าอยู่ในระดับนาโนเมตรแต่ยังคงมีคุณสมบัติในการดูดซึมและสะท้อนแสงแดดได้อยู่ จึงถูกนำมาใช้ทำครีมกันแดด หรือสารเคมีอื่นๆ ในระดับอนุภาคนาโนสามารถนำมาทำสีทาบ้านหรือสีเคลือบรถยนต์รวมถึงเป็นส่วนประกอบในเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม สินค้าเครื่องสำอางที่ประกอบไปด้วยอนุภาคนาโนที่สามารถแทรกซึมเข้าไปในชั้นผิวหนังได้ลึกมากขึ้นก็ถูกนำมาใช้ทำครีมเพื่อต่อต้านริ้วรอย เช่น ผลิตภัณฑ์บางชนิด ใช้เทคนิคในการบรรจุวิตามินไว้ในแคปซูลขนาดเล็กมากที่ทำหน้าที่เป็นเหมือนฟองน้ำเก็บกักครีมไว้และจะปล่อยออกมาเมื่อชั้นแคปซูลภายนอกละลายภายใต้ผิวหนัง

นอกจากการประดิษฐ์อนุภาคนาโนขึ้นจากสารเคมีเดิมที่มีอยู่แล้ว ยังมีการประกอบอนุภาคนาโนเข้ากับสิ่งอื่นๆอย่างเช่น การสร้างวัสดุนาโนผสมเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม การพัฒนาฟิล์มพลาสติกนาโนคอมโพสิตที่มีความสามารถในการสกัดกั้นการผ่านของก๊าซบางชนิด และไอน้ำ เพื่อใช้ทำบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุความสดของผักและผลไม้และเพิ่มมูลค่าการส่งออก การผลิตบรรจุภัณฑ์หรือเครื่องมือทางการแพทย์เพื่อใช้ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ไวรัส หรือทำให้ไม่เปียกน้ำ

เอกสารนี้เป็นต้นฉบับเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 อนุภาคนาโนโลหะ (metal nanoparticle)

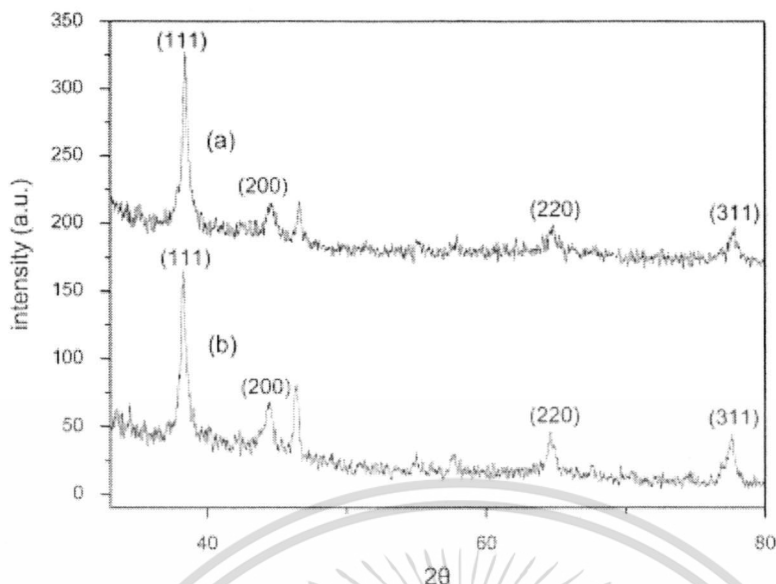
อนุภาคนาโนโลหะ เช่น อนุภาคนาโนทองและอนุภาคนาโนเงิน สมบัติซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนโลหะ คือ ปรากฏการณ์เซอ์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance, SPR) โดยอนุภาคนาโนโลหะส่วนใหญ่ จะมีความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในช่วงใกล้อินฟราเรด โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวของอนุภาคนาโนโลหะ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

2.1.3 สมบัติอนุภาคนาโนเงิน

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

2.1.3.1 สมบัติทางโครงสร้างของอนุภาคนาโนเงิน

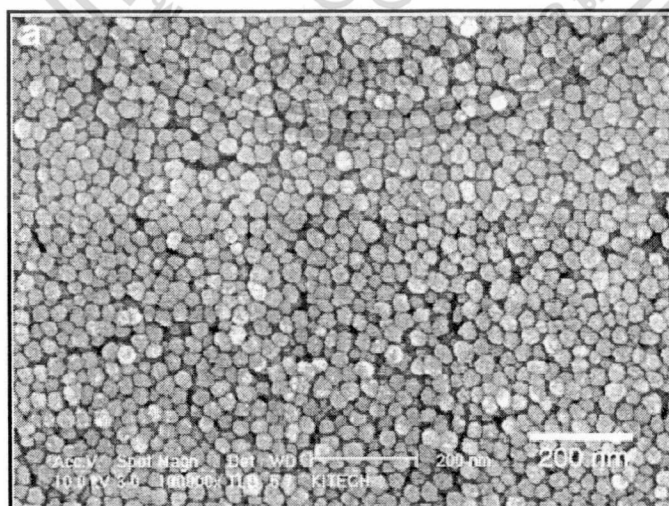
จากรายงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษาถึงโครงสร้างอนุภาคนาโนเงิน จะพบว่าโครงสร้างที่สำคัญคือ โครงสร้างเป็นแบบคิวบิก (Cubic structure) Yusheng Liu และคณะ[19] ได้ทำการวิจัยในเรื่องของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินขนาด 6-30 นาโนเมตร ด้วยเทคนิค gamma radiation อนุภาคนาโนเงินที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก เฟซเซนเตอร์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



รูปที่ 2.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนเงิน (a) ตัวอย่างที่วัดหลังจากทำการเตรียมสารเสร็จ (b) ตัวอย่างที่วัดหลังจากผ่านไป 6 เดือน

2.1.3.2 สมบัติทางพื้นผิวของอนุภาคนาโนเงิน

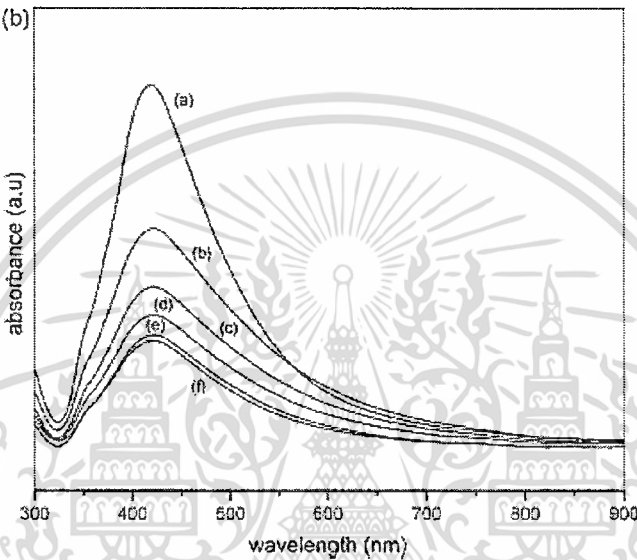
และจากรายงานการวิจัยของ Dongio Kim และคณะ[20] ได้ทำการศึกษาถึงการเตรียมฟิล์มบางออร์แกนิกทรานซิสเตอร์ โดยใช้อนุภาคนาโนเงินทำเป็นขั้วด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์อิงค์เจ็ท โดยในการทดลองพบว่า น้ำหมึกอนุภาคนาโนเงินที่นำมาผ่านกระบวนการสังเคราะห์มีขนาดอนุภาค 20 นาโนเมตร ดังรูปที่ 2.2 และนอกจากนี้ ยังพบว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินให้มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง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



รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายแสดงขนาดอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้โดยมีขนาดประมาณ 20 นาโนเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.3 สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนเงิน

และจากรายงานการวิจัยของ S.L. Smitha และคณะ[21] ได้ทำการศึกษาถึงการเกิดปรากฏการณ์เซอ์เฟส พลาสมอน เรโซแนนท์ (Surface Plasmon Resonance) และปรากฏการณ์โฟโด้ลูมิเนสเซนส์ของอนุภาคนาโนเงิน โดยในการทดลองพบว่าสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนเงินจะมีช่วงสเปกตรัมการดูดกลืนของแสงอยู่ในช่วง 300-600 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเงินที่ปริมาณอัตราส่วนของโพแทสเซียมคลอไรด์ต่างๆ กัน

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอนุภาคนาโนเงินที่ใช้ในการทดลอง[22]

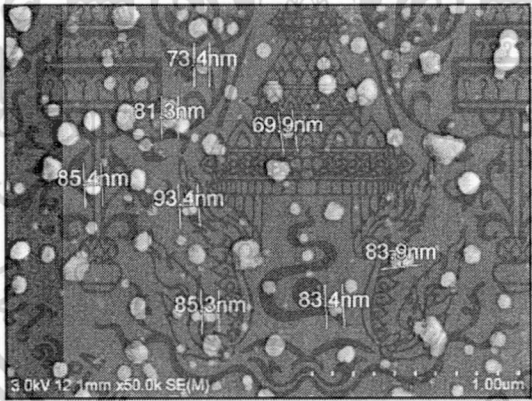
สมบัติของสาร	Silver, dispersion, nanoparticles, <100 nm particle size (TEM), 10 wt. % in ethylene glycol
สถานะ	ของเหลวกระจายตัว (Liquid dispersion)
มวลโมเลกุล	107.87
ลักษณะของสี	น้ำตาลแกมเทา
ขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ย	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 นาโนเมตร
จุดเดือด	198 °C ที่ 1.013 hPa

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

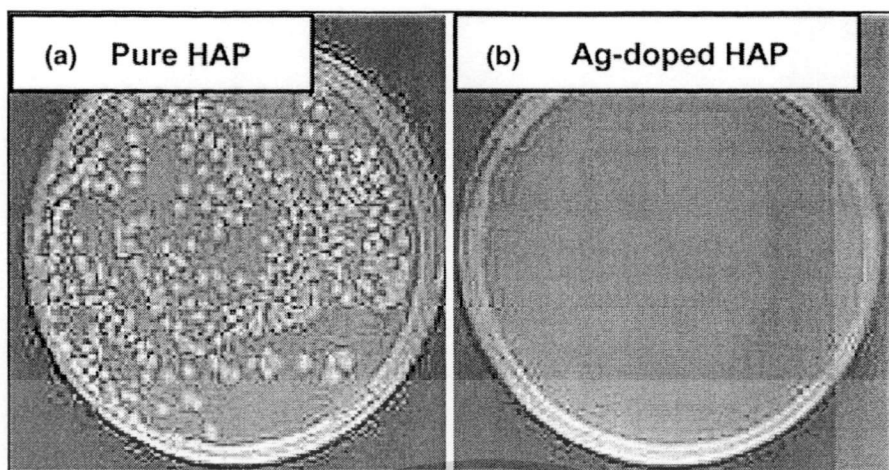
2.1.4 การประยุกต์ใช้งานอนุภาคนาโนเงิน

จากการศึกษาสมบัติของอนุภาคนาโนมาข้างต้น พบว่าอนุภาคนาโนมีสมบัติที่เป็นประโยชน์อย่างมากมาย ช่วยทำให้โครงสร้างมีสมบัติที่พิเศษขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทั้งในงานวิจัย และอุตสาหกรรมได้ ตัวอย่างของอนุภาคนาโนที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบันคือ อนุภาคนาโนเงิน เนื่องจากอนุภาคนาโนดังกล่าวมีคุณสมบัติหลายๆ ประการที่น่าสนใจ ซึ่งได้มีรายงานการวิจัยในการนำอนุภาคนาโนเงินไปประยุกต์ใช้ดังต่อไปนี้



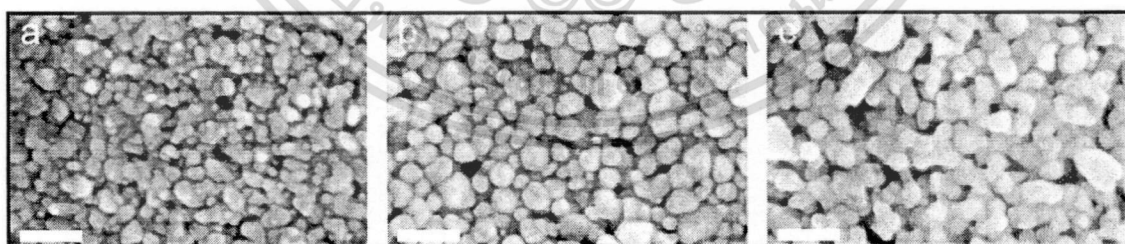
รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด แสดงอนุภาคนาโนเงินที่เข้าไปผสมกับแคลเซียมฟอสเฟตหลังจากทำการแอลนีลที่ 500 °C

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

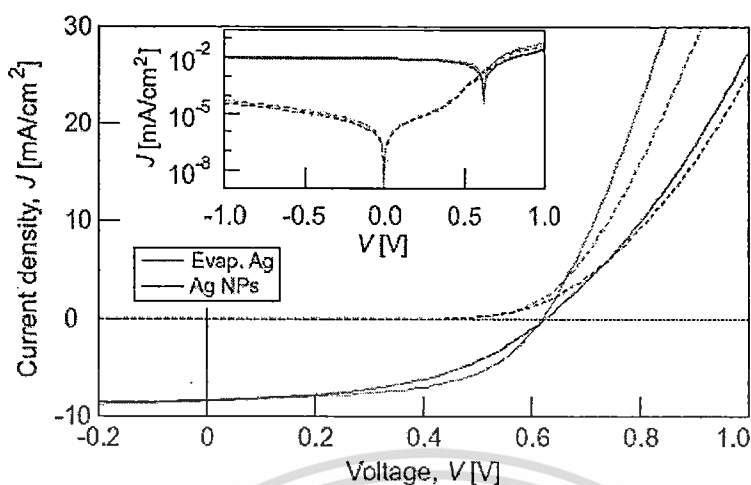


รูปที่ 2.5 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli จากการเจือปนอนุภาคนาโนเงิน

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

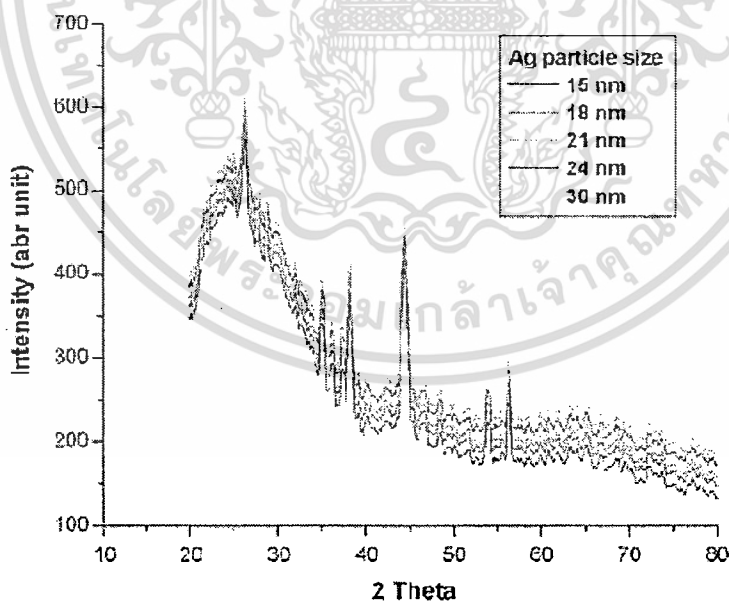


รูปที่ 2.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด แสดงชั้นของอนุภาคนาโนเงินที่แอนนีสที่อุณหภูมิเป็น (a) 100 °C, (b) 140 °C และ (c) 180 °C

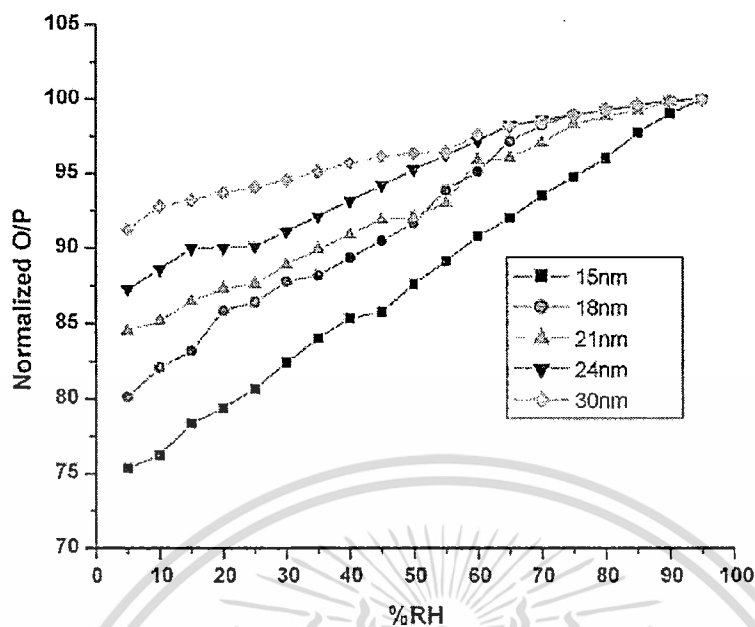


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์กราฟ IV ของโซล่าเซลล์

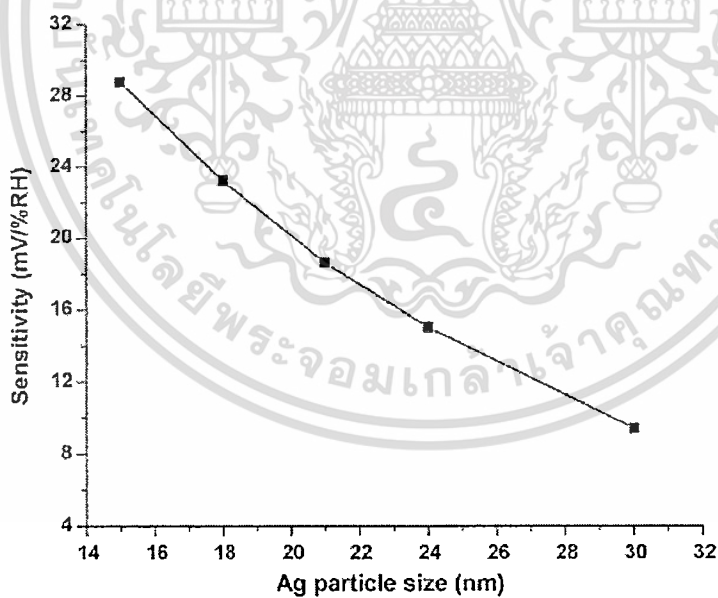
และในงานวิจัยของ Madhavi V. Fuke และคณะ[25] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการนำขนาดของอนุภาคนาโนเงินต่างๆ กัน เข้าไปผสมกับโพลีเอทิลีน เพื่อใช้ในการตรวจวัดความชื้น ซึ่งในการทดลองพบว่า ขนาดของอนุภาคนาโนเงินที่มีขนาดเล็กถึง จะทำให้สภาพความไวต่อการตอบสนองความชื้น และค่าการตอบสนองต่อความชื้นดีขึ้น แสดงในรูปที่ 2.8 – 2.10



รูปที่ 2.8 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนเงินที่ผสมกับโพลีเอทิลีน เมื่อขนาดของอนุภาคนาโนเงินที่ผสมเข้าไปมีขนาดต่างๆ กัน



รูปที่ 2.9 การตอบสนองของความชื้นของฟิล์มบางโพลีเอทิลีนที่มีการผสมอนุภาคนาโนเงินในขนาดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.10 สภาพความไวในการตอบสนองของฟิล์มบางโพลีเอทิลีนที่มีการผสมอนุภาคนาโนเงินในขนาดที่แตกต่างกันที่ความชื้น 5%RH

2.2 ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

2.2.1 การเตรียมฟิล์มบาง[26,27]

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



รูปที่ 2.11 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. การพ่นลงข้อแคโทด หรือนำไปปรับใช้กับการเตรียมพวกชั้นโลหะ

เอกสาร3.เป้ การเตรียมฟิล์มโดยการควบแน่นของไอระเหยของสารนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ตารางที่ 2.2 การแบ่งประเภทของเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบาง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2(ต่อ) การแบ่งประเภทของเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบาง (ต่อ)

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

มีหลายวิธีที่ทำให้สารจำนวนมากที่เกิดการสูญเสียโดยไปติดเกาะอยู่กับห้องสุญญากาศ ขณะที่วิธีการฟ้นละอองของข้าวแคโทด วิธีการระเหยเป็นไอทางเคมี และการควบแน่นของไอระเหย ได้มีการนำมาใช้ เมื่อสารละลายหรือสารแขวนลอยได้นำมาพ่นด้วยเครื่องทำให้แตกตัวก็จะทำให้สารก่อตัวขึ้นเป็นชั้น โดยชั้นจะไม่ค่อยมีความเรียบและไม่ค่อยสมบูรณ์ ซึ่งส่งผลให้ความหนาไม่สมบูรณ์ตามไปด้วย ซึ่งในการแบ่งประเภทของการปลูกฟิล์มอาจแบ่งได้ในหลายลักษณะดังแสดงดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.2.2 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต[27,28]

การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic spray deposition) เป็นกระบวนการที่สามารถทำให้ของเหลวแตกตัว หยดของเหลว(droplet) ที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีความเป็นประจุสูงซึ่งเป็นไปตามกฎของเรเลย์ (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

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยธรรมชาติ ซึ่งกระบวนการที่กล่าวมานี้เรียกว่า การเหนี่ยวนำให้เกิดประจุ ซึ่ง ลอร์ด เคลวิน (Lord Kelvin's) ได้ยกตัวอย่างและอธิบายไว้จากการทำเครื่องหยดน้ำ ในปี ค.ศ.1876 โดย ลอร์ด เคลวิน ได้อธิบายว่าประจุที่เกิดขึ้น จะเกิดจากการหยดของหยดน้ำจากปลายเข็ม 2 หัว ที่เคำทำการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าไป 10 kV และในปี 1915 Zeleny ทำการวิจัยการเกิดละอองด้วยไฟฟ้า (Electrospray) ของสารละลายเอทานอล ด้วยการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1-5 kV การเกิดละอองดังกล่าวมีปัจจัยที่สำคัญ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของของเหลว สมบัติของของเหลว และระยะห่างระหว่างปลายหลอดแก้วถึงแผ่นแพลท(Ground plate)

กระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีการที่ทำให้ของเหลวแตกตัวเป็นหยดเล็กๆ ด้วยแรงทางไฟฟ้า (electrical force) หรือ เรียกว่าแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) หัวเข็มที่ทำให้แตกตัวเป็นไอออนนี้จะทำจากหลอดโลหะซึ่งมีปลายเข็มที่เล็กมาก ซึ่งเมื่อทำการให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงเข้าไป จะเกิดการกดด้านข้าง(shear stress) บนพื้นผิวของของเหลว เนื่องจากเกิดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น ทำให้เกิดการยืดตัวของของเหลวที่ปลายเข็ม และเจ็ทออกมา จากนั้นจะมีการแตกสลายตัวของของเหลวกลายเป็นหยดเล็กๆ กระจัดกระจายออกมา โดยหยดเล็กๆ ที่ได้จากกระบวนการพ่นนี้จะมีขนาดเล็กมาก ๆ ซึ่งมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ข้อดีของการวิธีการนี้ คือ ละอองหยดจะมีความเป็นประจุสูงมากซึ่งเป็นไปตามกฎของเรเลย์ (Rayleigh limit) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับประจุของหยดที่ตกลงมา ซึ่งประจุพวกนี้จะสามารถเอาชนะแรงดึงดูดของพื้นผิวแล้วทำให้เกิดแตกตัวของอะตอมในที่สุด 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 ปรับขนาดความต่างศักย์ที่ให้เข้าไปที่บริเวณหัวเข็ม หยดเล็กๆ ที่ความเป็นประจุจะสามารถกระจายออกมาได้เนื่องจากเกิดแรงผลักรของคูลอมบ์ (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 ค่าความเข้มข้นของมวลชั้นต้นของหยดเล็กๆ, 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 แต่ก็มีข้อบกพร่องที่สำคัญ คือ วิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตนี้จะถูกจำกัดในการใช้ทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งจะใช้ได้ช่วงหนึ่ง ซึ่งวิธีการแก้ปัญหานี้ ได้มีการนำหัวแบบหลายหัว (multi-nozzle) หรือ หัวแบบสลิต (slit-nozzle) มาใช้ในระบบ เครื่องระบบการพ่นที่มีโรตารี หรือมีหัวฉีดแบบนิวเมติก ที่มีกราวด์และขั้วบวกของไฟฟ้าแรงสูง จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของขั้วทั้งสองทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุจำนวนมาก อย่างไรก็ตามประจุที่เกิดขึ้นจะเกิดตามกระบวนการนี้จะมีขนาดเล็กกว่าของเรเลย์ (Rayleigh limit)

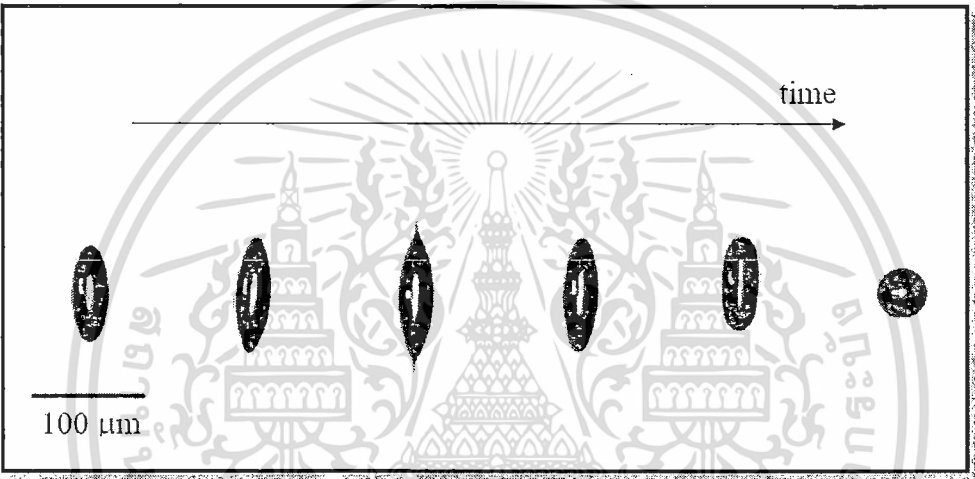
ข้อที่สำคัญอย่างมากในการแบ่งลักษณะระบบการพ่นก็คือ โหมดในการพ่นสเปรย์ ซึ่งมีอยู่หลายโหมดด้วยกันที่นำมาถ่วงถึงตามรายงายวิจัยต่างๆ แต่จะสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

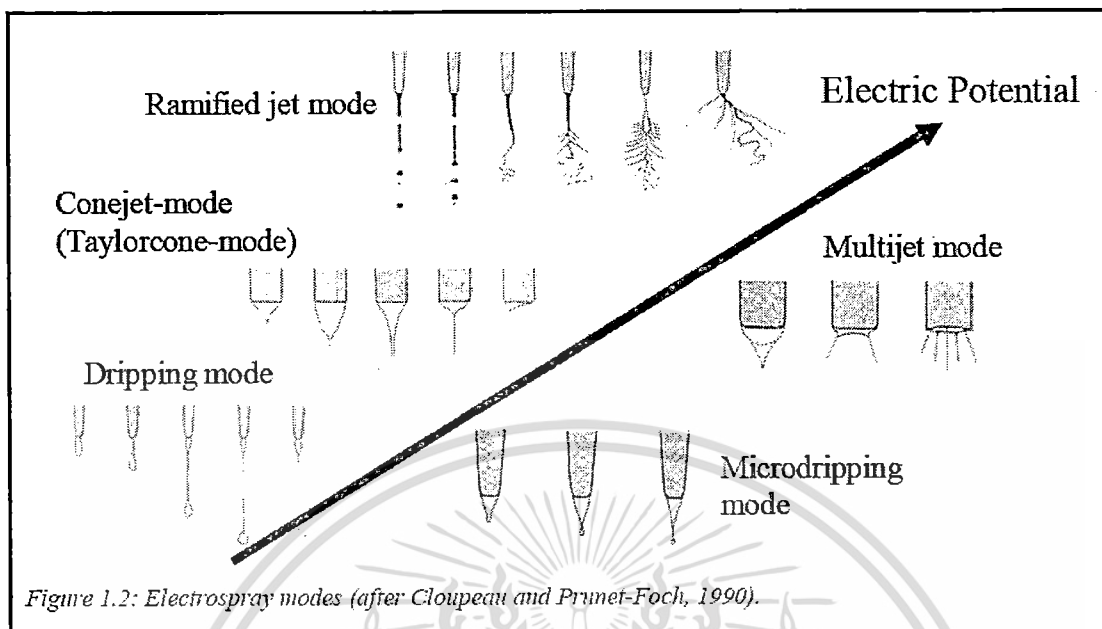
สังเกตจะพบว่าการเป็นฝอยหยดเล็กๆ จะมีความราบเรียบและความสมบูรณ์มาก และบางครั้งจะเห็นรัศมีของการเป็นฝอยเกิดขึ้นบริเวณปลายเข็มเกิดขึ้น

หยดของเหลวเกิดจากการปลดปล่อยในโหมด liquid jet และจากปรากฏการณ์ดังกล่าว จะสามารถอธิบายไปสู่การแตกตัวแบบการพ่น(Electrostatic spray) ได้ต่อไป โดยในปี 2003 Duft และคณะวิจัย มีการศึกษาถึงผลของขนาดหยดของเหลว (ethylene glycol droplet) โดยมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไข ทำให้ได้ขนาดหยดของของเหลวจาก 58 ไมโครเมตรลดลงถึง 24 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การหยดแบบเรเลย์ (Rayleigh)

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



รูปที่ 2.13 โหมดการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบต่างๆ[28]

- Dripping mode มีลักษณะเป็นแบบหยดต่อหยด (drop by drop) ลักษณะดังกล่าวเกิดจากการเพิ่มศักย์ไฟฟ้า จากศูนย์ จนกระทั่งของเหลวไหลลงและเกิดเป็นหยดของเหลวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าปลายหลอด capillary
- Micro dripping mode มีลักษณะเป็นหยดของเหลวที่มีขนาดเล็กกว่าใน Dripping mode โดยลักษณะที่ปลายหลอด และหยดของเหลวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าปลายหลอด capillary
- Cone jet mode (Taylorcone-mode) มีลักษณะหยด คือ มีรูปร่างเป็นโคน(cone) ที่ปลาย capillary มีลำของเหลว(jet) ต่อจาก cone และปลายของ jet จะเกิดเป็นละอองฝอยเนื่องจากไฟฟ้า(Electrospray) โดยลักษณะของละอองฝอยที่เกิดจาก cone jet mode นี้ มีการกระจายตัวของละอองที่สม่ำเสมอ เป็นการแตกตัวที่สมบูรณ์
- Multijet mode มีลักษณะของละอองฝอยที่เกิดจากการเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูง และเกิดละอองฝอยที่ปลายของหลอด capillary
- Ramified jet mode มีลักษณะของ jet 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 ในที่นี้มีทั้ง 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 2.3 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)

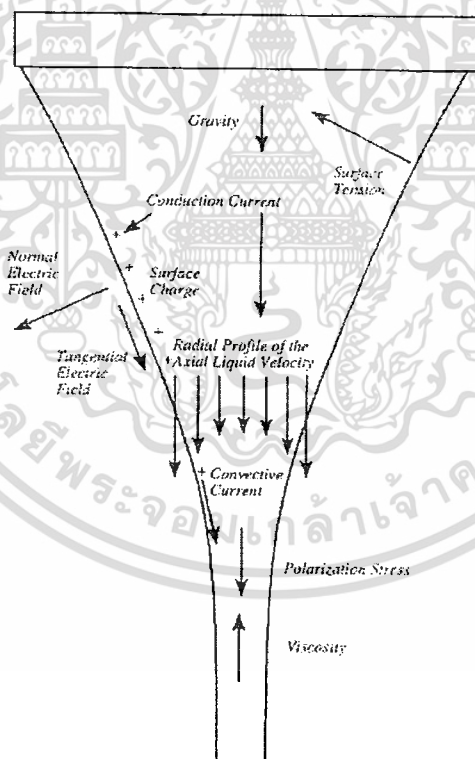
$$I = f(\epsilon) \left(\frac{\gamma Q K}{\epsilon} \right)^{0.5} \quad (2.6)$$

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 2.14 ลักษณะของโคน (cone shape) และลักษณะหยดละอองฝอยและลักษณะของ กระแสไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับแรงของของเหลวที่มากกระทำ[28]

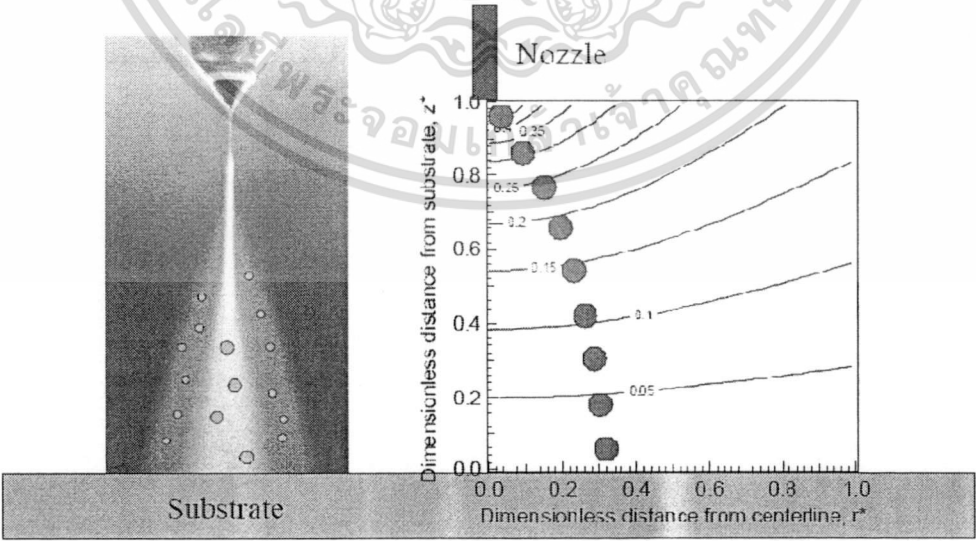
จากภาพดังกล่าวสามารถอธิบายผลกระทบที่เกิดจาก ค่าการนำ และความหนืดของของเหลวได้จากสมการ

$$G = \left(\frac{\gamma^3 \varepsilon_0^2}{\mu^3 K^2 Q} \right)^{1/3} \tag{2.7}$$

- โดย μ คือ หยดของของเหลว
- K คือ ค่าการนำไฟฟ้า, γ คือ ค่าแรงตึงผิว
- ε คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

สำหรับการพัฒนาการพ่นแบบ Cone jet มีส่วนที่สำคัญได้แก่ การปรับปรุงรูปร่างของ cone, การทำให้ของเหลวแตกตัวจากปลาย cone และ การส่งผ่านละอองของเหลวลงบนแผ่นเพท

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 ในท้ายที่สุดสามารถประมาณค่าความเร็วของเหลวที่พื้นผิวของ cone ได้ จากที่กล่าวข้างต้นกระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ ดังรูป 2.15

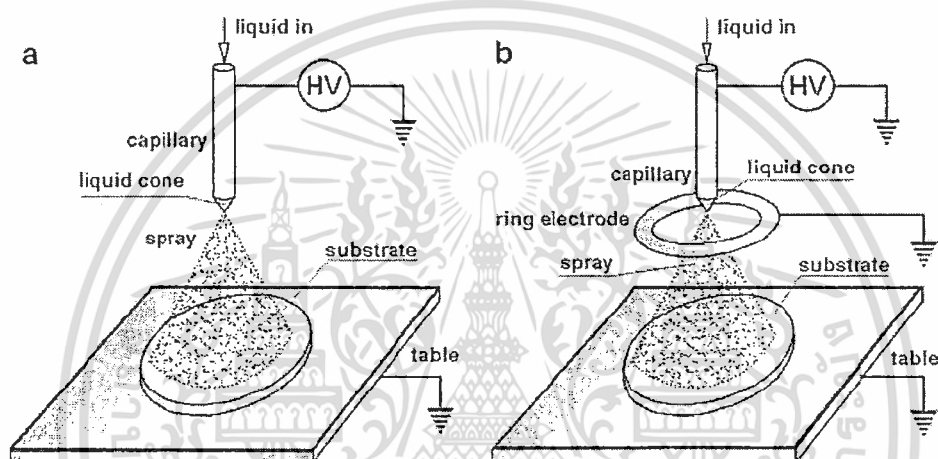


รูปที่ 2.15 ผลของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีผลต่อการแตกตัวเป็นละอองฝอย[28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบหลักๆ ของการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางจะมีอยู่ 2 ระบบหลักๆ คือ

1. ระบบแบบหัวเข็มธรรมดาซึ่งจะทำการพ่นละอองออกมายังฐานรองรับโดยตรง ความต่างศักย์แรงสูงจะถูกป้อนเข้าไปให้ที่ระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับซึ่งฐานรองรับจะวางอยู่บนจั่วไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่เป็นกราวด์ของระบบดังรูปที่ 2.16 (a)
2. ระบบแบบหัวเข็มที่สามารถกรองได้ ซึ่งในระบบจะสามารถแยกทำได้อย่างอิสระต่อกันจากฐานรองรับ ที่บริเวณหัวเข็มจะทำการให้ความต่างศักย์ขณะที่ตัวกรองและฐานรองรับจะเป็นกราวด์ในระบบดังรูปที่ 2.16 (b)



รูปที่ 2.16 การเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (a) ระบบแบบหัวเข็มธรรมดา (b) ระบบแบบหัวเข็มที่สามารถกรองได้[27]

ข้อเสียของระบบแรก คือ ระบบจะมีหัวเพียงตำแหน่งเดียวที่บริเวณฐานรองรับ โดยจะไม่สามารถให้กระแสผ่านไปยังฐานรองรับได้โดยตรง เพราะจะทำให้มีการเสียหายเกิดขึ้นที่ฐานรองรับ ในขณะที่ระบบที่สองจะมีตัวกรองเป็นหัวด้วย นอกเหนือจากที่บริเวณฐานรองรับแล้ว อย่างไรก็ตามข้อเสียของระบบที่สองนี้ก็คือ มีการแยกจำนวนของละอองหยดเล็กๆ ด้วยหัวตัวกรอง และยังต้องมีการใช้อย่างเฉพาะและระมัดระวังเพื่อที่จะทำการขัดขวางละอองบางส่วนที่จะตกลงไปยังฐานรองรับ โดยระบบนี้ได้มีการใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งในระบบนี้ก็สามารถที่จะทำให้เกิดหยดละอองเล็กๆ แรงตกลงมาด้วยสนามไฟฟ้าและลงมายังแผ่นฐานรองรับในที่สุด

2.2.2.1 แรงที่มีผลต่อการกระทำกับสารที่พ่นออกมา

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

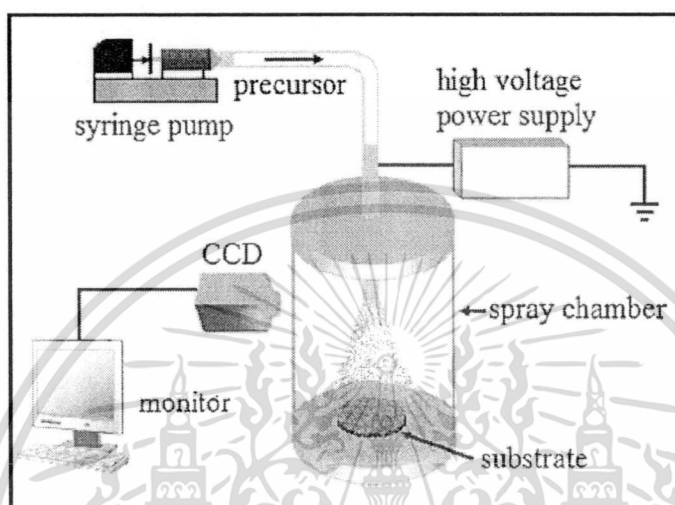
2.2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อเตรียมฟิล์มโดยกระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต[29]

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

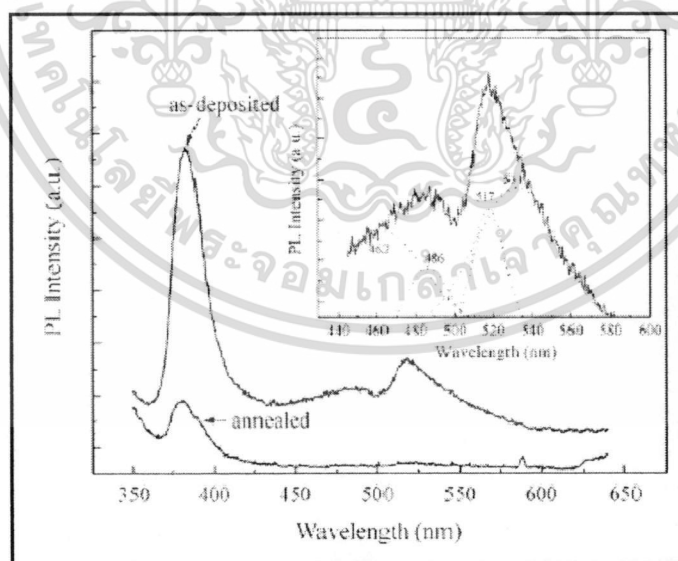
2.2.3 การประยุกต์ใช้งานจากการเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

การพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายสาขามากมาย รวมไปถึงการพ่นสีหรือการปลูกฟิล์มบาง วิธีทางกายภาพและเคมีจะใช้สำหรับปลูกฟิล์มบางและฟิล์มหนาจากก๊าซสารละลาย ของเหลว หรือของแข็ง ซึ่งเป็นไปตามการอ้างอิงของอาร์เทินเบิร์ก (Altenburg) แต่ก็มีงานบางส่วนที่ได้รับความสนใจเช่นกัน นั่นคือ วิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต เมื่อไม่นานมานี้ ชอย (Choy) ได้ทำการเรียบเรียงและอ้างอิงถึงการให้กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์เพื่อใช้ในการพัฒนากระบวนการการปลูกฟิล์มด้วยการระเหยเป็นไอทางเคมี (chemical vapour deposition processes) รวมถึงการนำฟิล์มที่ได้จากการปลูกไปประยุกต์ใช้งาน ด้วยการนำเสนอการใช้วิธีการพ่นทางไฟฟ้าสถิต ดังนั้นจึงได้ทำการสรุปและนำเสนอถึงกระบวนการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตและการนำฟิล์มบางที่ได้ไปประยุกต์ใช้ ดังนี้

จากรายงานการวิจัยของ Jin Li และคณะ[10] ได้ทำการเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์โพลิคริสตัลไลน์ โดยวิธีพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (ESD) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นอุปกรณ์ ultraviolet luminescence แสดงในรูปที่ 2.17 – 2.18 ข้อดี ของงานวิจัยนี้ คือ สามารถเตรียมฟิล์มได้ง่าย ไม่ซับซ้อน ด้วยวิธี ESD และในงานวิจัยยังพบว่าฟิล์มบางมีการตอบสนองการเปล่งแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่น UV



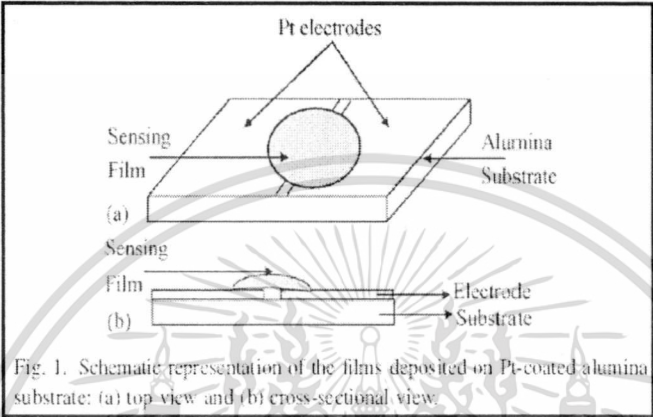
รูปที่ 2.17 การติดตั้งระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (ESD)



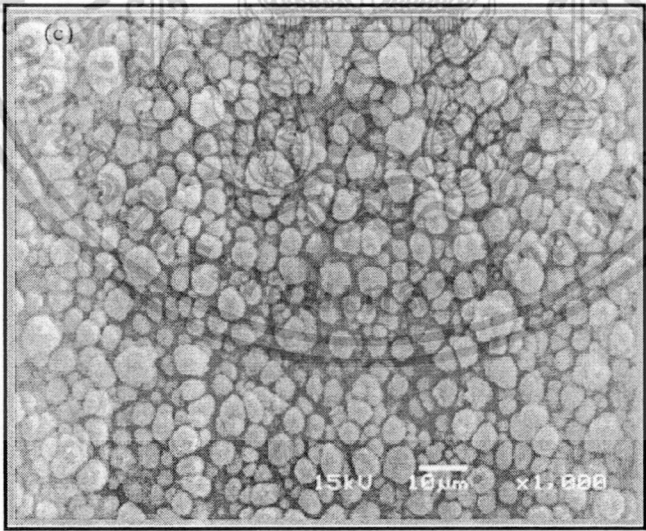
รูปที่ 2.18 สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.19 การติดตั้งระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (ESD) ที่เตรียมขึ้นบนฐานรองรับแผ่นอะลูมินา (a) ภาพถ่ายด้านบน (b) ภาพถ่ายแนวตัดขวาง

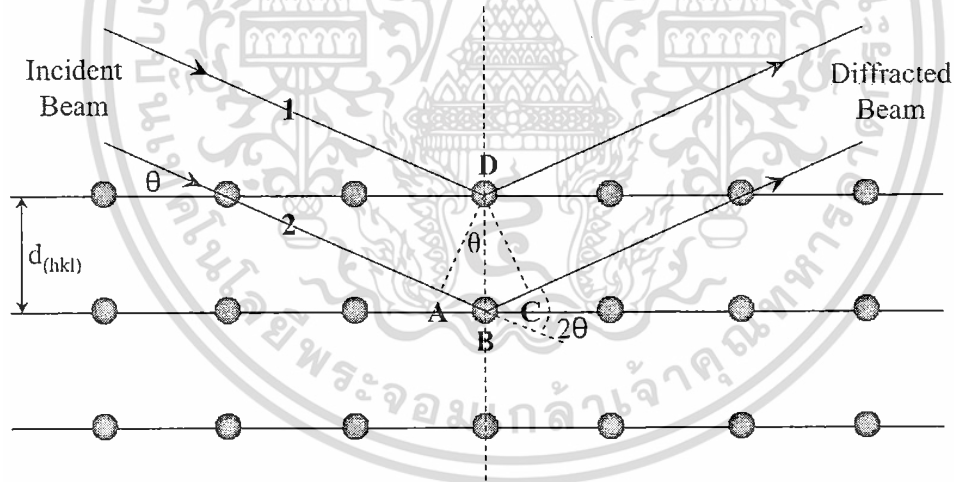


รูปที่ 2.20 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

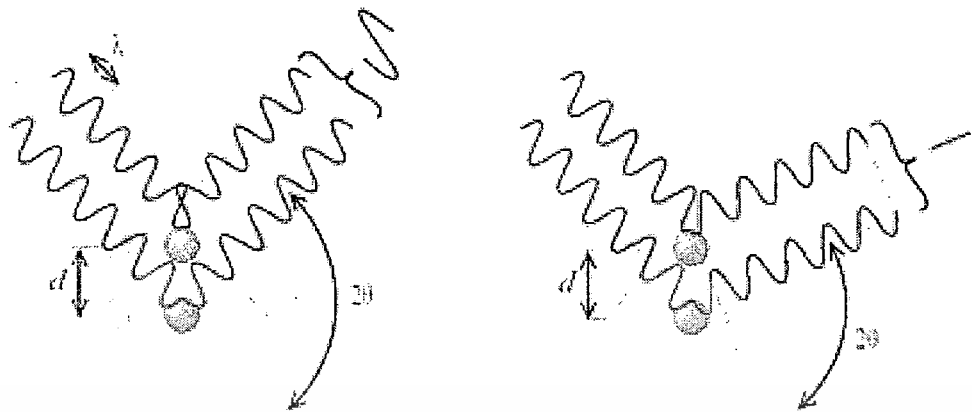
2.3 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์ม[26]

2.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มทำให้เราทราบว่าฟิล์มนั้นมีค่าคงที่แลตติซ (Lattice constant) เท่าใดและมีระนาบอะไรบ้างในฟิล์มรังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงและความยาวคลื่นระหว่าง $0.5\text{-}2.5\text{ \AA}$ รังสีเอกซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงมากวิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนักเช่น ทองแดงผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอกซ์ 2 ชนิด คือรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) รังสีเอกซ์จะแสดงสมบัติเชิงคลื่นคือการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึกและหลังจากคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมา จะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและแบบหักล้างกันถ้าหากพิจารณาเฉพาะบริเวณที่รังสีเอกซ์ตกกระทบอะตอมรังสีเอกซ์จะแสดงสมบัติเชิงอนุภาคคือกระเจิงออกทุกทิศทางเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบกับอะตอมซึ่งเรียงตัวอยู่บนระนาบของโครงสร้างผลึกอะตอมนี้ จะทำหน้าที่กระเจิงรังสีเอกซ์ทำให้มีสภาพเหมือนกับว่ารังสีเอกซ์ที่ตกกระทบลงมามีการสะท้อน



รูปที่ 2.21 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในผลึกตามกฎของแบรกก์



รูปที่ 2.22 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

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \tag{2.8}$$

เมื่อ $n =$ ลำดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ $1,2,3,\dots$

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

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

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

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

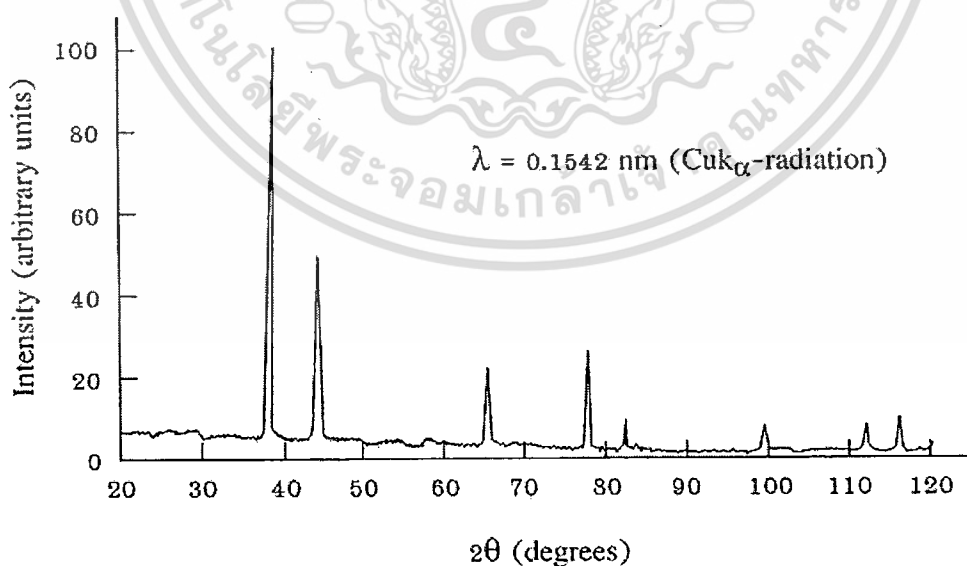
$$\frac{1}{d^2} = \frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.10)$$

เมื่อ a คือ ค่าคงที่แลตทิซ

λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

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



รูปที่ 2.23 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 ($0.89 \leq K \leq 0.94$)

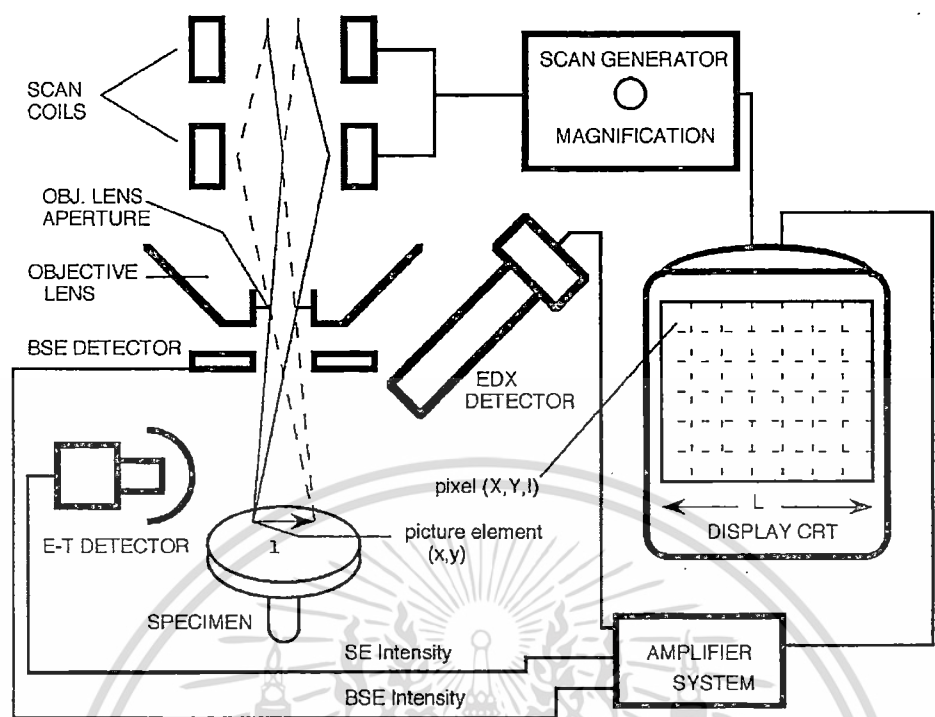
θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

$\beta_{2\theta}$ คือ ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน (Full width at half-Maximum of the diffraction peak : FWHM)

λ_x คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

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

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดพิจารณาได้จากรูปที่ 2.8 ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดได้ดังนี้ แหล่งกำเนิดของอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งเป็นขั้วแคโทดมีอยู่ 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 2.24 โครงสร้างหลักกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเคลื่อนกราด

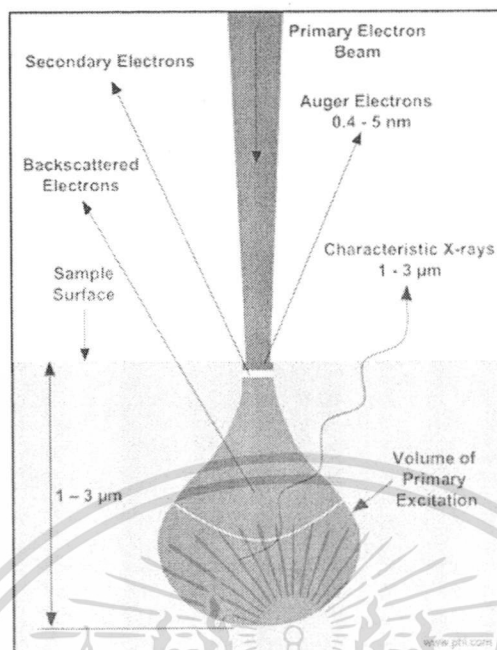
1. การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)

เมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งเป็นอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) ตกกระทบลงบนตัวอย่างทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิกระเจิงออกมาและมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนซึ่งน้อยมากให้กับอะตอมของตัวอย่างอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาเราเรียกว่า Backscatter electron ซึ่งสามารถนำสัญญาณดังกล่าวมาสร้างเป็นสัญญาณภาพบนจอ CRT 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

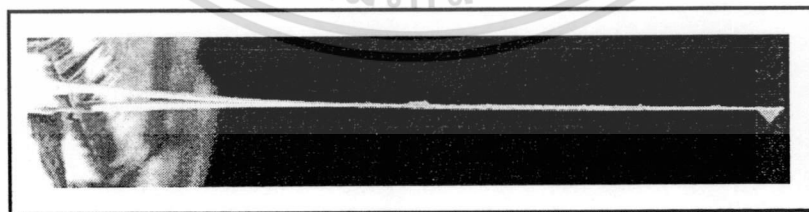
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 ผลจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง

2.3.3 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope : AFM)

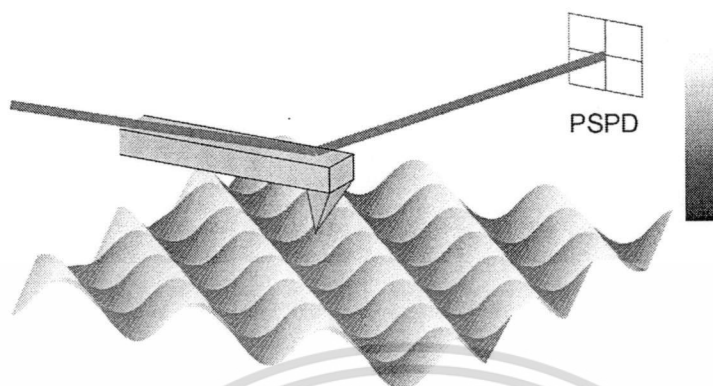
กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) ได้สร้างขึ้นในปี 1986 โดย Binnig, Quate และ Gerber ซึ่งใช้หัวโพรบปลายแหลมเคลื่อนที่กวาดไปทั่วทั้งผิวหน้าของชิ้นงาน โดยที่โพรบก็คือเข็มปลายแหลมเล็กๆ ที่ติดอยู่บริเวณปลายของคาน (Cantilever) ที่สามารถโค้งงอได้ตามแรงที่เกิดขึ้นระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงาน



รูปที่ 2.26 คาน (Cantilever) ที่ใช้ในการวัด

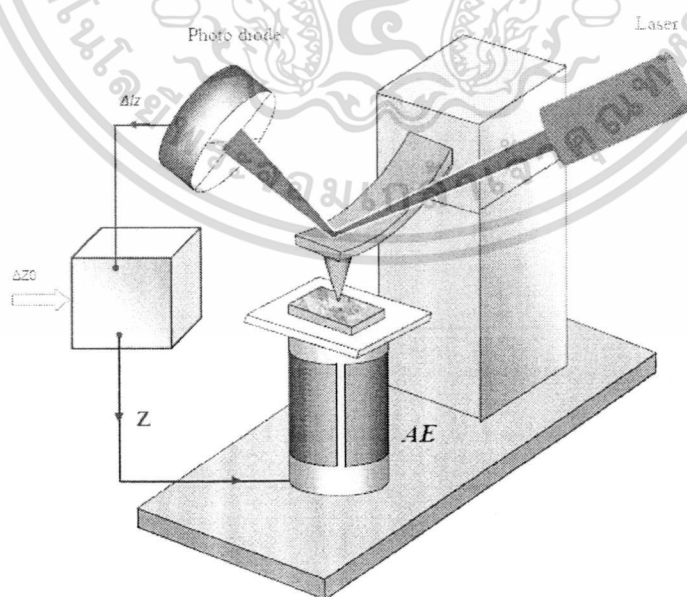
ในช่วงเริ่มแรก กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมใช้การทะลุผ่านกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนที่ปลายคานเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคาน แต่ในปัจจุบัน กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมใช้เทคนิคทางแสงเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคานแทนดังรูปที่ 2.27 ได้แสดงให้เห็นการทำงานของกล้องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุลทรรศน์แรงอะตอมซึ่งสามารถโค้งงอได้ โดยแสงเลเซอร์เดินทางตกกระทบบนคานแล้ว สะท้อนออกมาตกกระทบบนตัวตรวจจับทางแสงสองตัวที่อยู่ติดกัน จากนั้นทำการวัดผลต่างของ สัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับทางแสงจึงทำให้สามารถวัดการ โค้งงอของคานได้



รูปที่ 2.27 แผนภาพระบบแสงที่ใช้วัดการโค้งงอของคาน

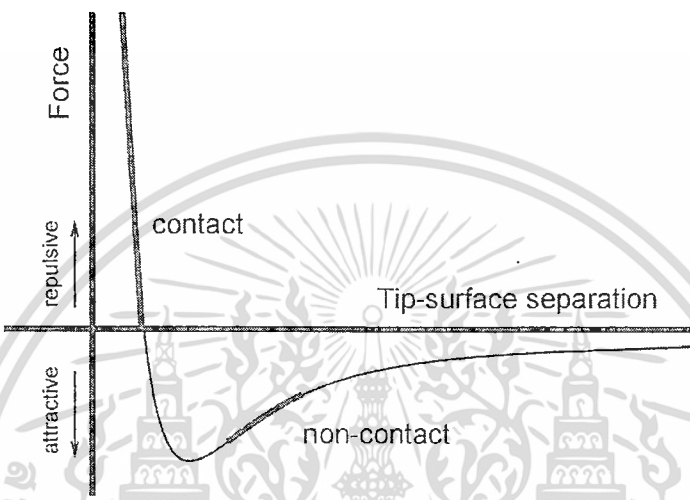
การเคลื่อนที่ของเข็มหรือชิ้นงานที่มีความแม่นยำสูงนั้นใช้อุปกรณ์ที่สร้างจากสารเซรามิก เปียโซอิเล็กทริกเป็นส่วนของการเคลื่อนที่ของฐานดูได้จากรูปที่ 2.28 โดยการเคลื่อนที่ของวัสดุเปียโซอิเล็กทริกนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงก็เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่เข้าไปกระตุ้น ซึ่งส่วนมากมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ตัวควบคุมการเคลื่อนที่ที่สามารถควบคุมได้แม่นยำในระดับอังสตรอม ในแนวแกน x , y และ z โดยที่แกน z คือแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน



รูปที่ 2.28 ระบบการวัดกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมสามารถทำงานได้ในสองโหมดหลัก คือ การทำงานแบบมีการควบคุมแบบย้อนกลับและ การทำงานแบบไม่มีการควบคุมแบบย้อนกลับ โดย การทำงานแบบมีการควบคุมแบบย้อนกลับนั้นจะกำหนดให้ปิเอโซเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของ ชีงงาน (หรือ เข็ม) สามารถเคลื่อนที่ขึ้นและลงได้โดย รักษาระยะห่างระหว่างเข็มกับชีงงานมี ค่าคงที่ส่งผลให้แรงระหว่างเข็มกับชีงงานมีค่าคงที่ด้วย ซึ่งโหมดนี้เรียกว่า โหมดแรงคงที่ (Constant force) ทำให้สามารถแสดงให้เห็นภาพลักษณะพื้นผิวของชีงงานที่น่าเชื่อถือได้



รูปที่ 2.29 กราฟแรงอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่ขึ้นอยู่กับระยะห่าง

ส่วนการทำงานแบบที่สองไม่มีการควบคุมแบบย้อนกลับ เป็นโหมดที่ควบคุมให้การเคลื่อนที่ในตำแหน่งแนวแกน z คงที่ และวัดการโค้งงอของคาน ซึ่งโหมดนี้มีประโยชน์สำหรับชีงงานที่มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบมากที่มีความละเอียดสูง

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

โหมดสัมผัส คือ เป็นวิธีการวัดพื้นฐานที่ใช้กันทั่วไปของ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมซึ่งเข็มและชีงงานมีระยะใกล้กันมากขณะที่ลากเข็มผ่านชีงงาน โดยการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับชีงงานนั้นใกล้กันในระดับที่มีแรงผลักระหว่างโมเลกุลเกิดขึ้น บริเวณที่เกิดแรงผลักรถือบริเวณที่เส้นกราฟอยู่เหนือแกน x ปัญหาที่สำคัญของโหมดสัมผัส นั้นคือมีแรงซึ่งมีค่ามากเกิดในแนวตามพื้นผิวขณะที่ลากเข็มผ่านชีงงาน

โหมดสัมผัสแบบตบเป็นโหมดการทำงานพื้นฐานอีกชนิดหนึ่งที่ใช้กับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมทั่วไป ขณะทำงานคานจะเกิดการสั่นด้วยความถี่ที่เหมาะสมและมีตำแหน่งอยู่เหนือพื้นผิว

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของชิ้นงาน ด้วยการสัมผัสพื้นผิวชิ้นแบบสันนี้ทำให้แรงเสียดทานมีค่าน้อยมาก แต่การสัมผัสระหว่างjemกับชิ้นงานนั้นยังอยู่ในช่วงที่เกิดการผลึกเหมือนเดิม เนื่องจากการสัมผัสระหว่างjemกับชิ้นงานเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงตามแนวพื้นผิวลดลงขณะที่jemลากผ่านพื้นผิวชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานมีความอ่อนมาก การวัดด้วยโหมดสัมผัสแบบสันจึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่าการวัดด้วยโหมดสัมผัส

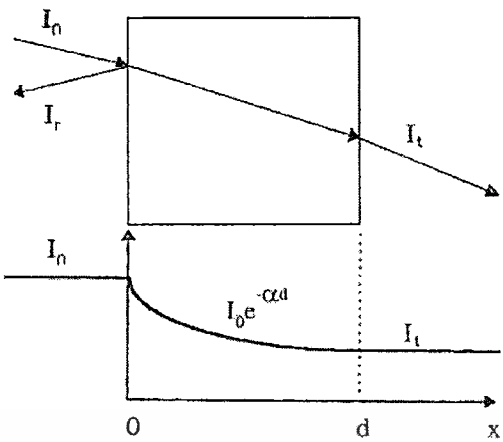
โหมดไม่สัมผัส เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการสร้างภาพของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมได้ ซึ่งคันต้องอยู่เหนือพื้นผิวของชิ้นงาน โดยที่ระยะห่างระหว่างjemกับชิ้นงานต้องไม่ห่างเกินกว่าขอบเขตของแรงผลักระหว่างโมเลกุล โหมดการทำงานนี้สร้างขึ้นได้ยากภายใต้สภาวะปกติ ซึ่งสามารถใช้วัดสิ่งเจือปนที่อยู่บนพื้นผิวได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้า

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

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

2.3.4 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยระบบยูวี-วิสสิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-Visible Spectroscopy)

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



รูปที่ 2.30 ลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบผิววัสดุ
 I_r คือ ความเข้มแสงที่สะท้อนจากผิววัสดุ
 I_t คือ ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านผิววัสดุ

เราสามารถให้นิยามของสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง R (Optical Reflectivity Coefficient) สัมประสิทธิ์การดูดกลืน α (Optical Absorption Coefficient) และสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง (Optical Transmittance Coefficient) ได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
$$R = \frac{I_r}{I_0} \tag{2.13}$$

ดังนั้นความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่ตัวกลางมีค่า
$$I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \tag{2.14}$$

จากนั้นเมื่อแสงเดินทางเข้าไปในวัสดุแสงจะถูกดูดกลืน จากรูปจะเห็นว่าแสงจะมีค่าความเข้มแสงลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง d

ในกรณีที่มีการสะท้อนที่ผิวด้านหลัง ความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านออกด้านหลังของวัสดุ คือ

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ในการศึกษาสมบัติทางแสงของสารอินทรีย์นั้น โดยระดับพลังงานในแต่ละช่วง มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงภายในของโมเลกุลที่มีสภาวะการเร้าต่าง ๆ กันของการวัด โดยที่ช่วงของรังสีแกมมา(γ -ray) และรังสีเอกซ์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนและทำให้เกิดการแตกของพันธะซึ่งนำไปสู่รายละเอียดของการวิเคราะห์โครงสร้างของสารได้ช่วงของ รังสีไกลอินฟราเรด (far infrared) คาบเกี่ยวกับไมโครเวฟมีผลต่อการเร้าให้เกิดการหมุนหรือการเคลื่อนที่ของโมเลกุล

ระดับพลังงานในช่วงของอัลตราไวโอเลตจะทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดพันธะเกิดสภาวะเร้าสู่ระดับออร์บิทัลที่มีพลังงานสูงขึ้น ซึ่งจะสามารถบอกลักษณะของโมเลกุล ของสารประกอบอินทรีย์บางอย่างได้เช่น มีพันธะคู่ที่คอนจูเกต (conjugated double bond) เนื่องจากผลจากการเคลื่อนที่ย้ายของอิเล็กตรอน (electron delocalization) เป็นผลให้ช่องว่างของระดับพลังงานระหว่าง HOMO และ LUMO ลดลง ซึ่งหมายถึงพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นการเร้าของอิเล็กตรอนก็จะน้อยลงด้วย การดูดซับพลังงานของโมเลกุลประเภทนี้จึงอยู่ที่ความถี่ต่ำลง

ในการดูดกลืนแสงช่วงยูวีปริมาณแสงที่พอเหมาะทำให้เกิดการเร้าอิเล็กตรอน (electronic excitation) จากสภาวะพื้น (ground state) ไปสู่สภาวะเร้า (excited state) กล่าวคืออิเล็กตรอนจากระดับที่มีพลังงานต่ำจะถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานที่สูงกว่า พลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลหรืออะตอมนั้นจะมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานที่สูงกว่า พลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลหรืออะตอมนั้นจะมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงาน (ΔE) ระหว่างสภาวะเร้ากับสภาวะพื้น

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

โมเลกุลที่ดูดกลืนแสงยูวีช่วงความยาวคลื่นต่ำประมาณ 150 นาโนเมตรลงมามักจะประกอบด้วยพันธะซิกมาเนื่องจากเป็นพลังงานที่สามารถเร้าอิเล็กตรอนของพันธะซิกมาได้ แต่เนื่องจากช่วงของความยาวคลื่นที่ใช้มักอยู่ที่ประมาณ 200 -400 นาโนเมตรสำหรับยูวีและช่วง 200–800 nm สำหรับยูวี-วิสิเบิล ดังนั้นโมเลกุลส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับยูวีสเปกโทรโฟโตมิเตอร์มักจะมีสารประกอบที่มีพันธะไพ

ตารางที่ 2.4 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

2.4 เซนเซอร์ความชื้น (Humidity Sensor)

2.4.1 หลักการของเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น

2.4.1.1 ความชื้น (Humidity)[30]

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

$$RH(\%) = P_w/P_s \times 100 \tag{2.19}$$

- โดยที่ RH(%) คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
P_w คือ ความดันไอน้ำบางส่วน (mbar)
P_s คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (mbar)

ความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) คือ อัตราส่วนมวลของไอน้ำต่อปริมาตรของอากาศ หรือแก๊ส อาจเปรียบได้ว่าเป็นความหนาแน่น หรือความเข้มข้นของไอน้ำในอากาศ (Suzuki, 2004) แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

(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 ปริมาตรของอากาศแห้งและไอน้ำรวมกัน (m^3)

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) คือ อุณหภูมิซึ่งความดันไอน้ำจริงในอากาศหรือแก๊ส มีค่าเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว ณ อุณหภูมินี้ ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าเป็น 100% และไอน้ำเริ่มเกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำ อากาศ หรือ แก๊สจะไม่สามารถเก็บกักปริมาณไอน้ำได้มากไปกว่านี้ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลงกว่าจุดนี้ ความดันไอน้ำอิ่มตัวก็จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ในขณะที่ความดันไอน้ำจริงยังคงเท่าเดิม ส่งผลให้ความดันไอน้ำจริงในอากาศมีค่าเกินกว่าค่าความดันไอน้ำอิ่มตัว และเกิดการควบแน่นของไอน้ำกลายเป็นหยดน้ำมากขึ้นตามลำดับ เหมือนกับปรากฏการณ์ที่มีหยดน้ำเกาะอยู่รอบ ๆ แก้ว ที่มีน้ำแข็งใส่อยู่ สามารถอธิบายได้ว่าอุณหภูมิของน้ำในแก้วมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศในขณะนั้น จึงทำให้เกิดการควบแน่นและกลายเป็นหยดน้ำที่ข้างแก้วและอุณหภูมิจุดน้ำค้างจะแปรเปลี่ยนตามค่าความดันในขณะนั้นด้วย

นอกจากนี้ความชื้น (Humidity) ยังเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงปริมาณของน้ำในสถานะแก๊สที่ปนอยู่ในอากาศหรือ แก๊สชนิดอื่น โดยมีหน่วยวัดเป็นความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity) หรือความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ความชื้นสัมบูรณ์เป็นการวัดอัตราส่วนของมวลไอน้ำ เทียบกับมวลอากาศแห้งที่รวมตัวอยู่ในปริมาตรเดียวกัน แต่หน่วยการวัดความชื้นที่นิยมใช้มากกว่า คือความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นการวัดความชื้นโดยคิดอัตราส่วนมวลของไอน้ำในอากาศ เทียบกับค่ามวลไอน้ำในอากาศอิ่มตัวสูงสุดที่อุณหภูมิเดียวกัน มีหน่วยเป็น %RH ความชื้นมีผลต่อชีวิตประจำวันในทางอุตสาหกรรมต้องมีการควบคุมปริมาณความชื้นอย่างดี โดยเฉพาะอุตสาหกรรมอาหารและยาความชื้นมีผลโดยตรงต่อคุณภาพ และระยะเวลาในการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์วงจรรวม และในอุตสาหกรรมอีกหลาย ๆ ประเภท

2.4.1.2 เซนเซอร์ความชื้น (Humidity Sensor)[30]

เซนเซอร์ความชื้น คือ อุปกรณ์ตัวตรวจวัดปริมาณไอน้ำในบรรยากาศและสามารถบอกปริมาณความชื้นในบรรยากาศขณะนั้นได้อยู่ในรูปของความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) โดยเซนเซอร์วัดความชื้นที่ดีสามารถใช้งานด้านต่างๆ ได้อย่างกว้าง จะต้องมีความไวสูงในช่วงพิสัย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 2.5 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของหลักการวัดความชื้นแบบต่างๆ[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	ไม่ต้องทำการปรับเทียบ	- ต้องเปลี่ยนไส้กรองและเติมน้ำกลั่นอยู่เสมอ - ต้องการอากาศไหลผ่านด้วยอัตราการไหลสูง
ใช้วิธีวัดจุดน้ำค้าง	ใช้การวัดอุณหภูมิจุดน้ำค้างด้วยการตรวจรู้การควบแน่นโดยใช้ความเย็น	- มีความแม่นยำสูง - ย่านพลวัตกว้าง - ไม่ต้องทำการปรับเทียบ	- มีขนาดใหญ่ - ราคาแพง - ใช้พลังงานสูง - ต้องมีการทำความสะอาดสม่ำเสมอ
วัดรังสีอินฟราเรด	เลือกการดูดกลืนสเปกตรัมอินฟราเรดของไอน้ำ	- ใช้ได้กับแก๊สที่กีดกร่อน - ย่านพลวัตกว้าง	- ราคาแพง - อาจเกิดการรบกวนจากแก๊สชนิดอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.3 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

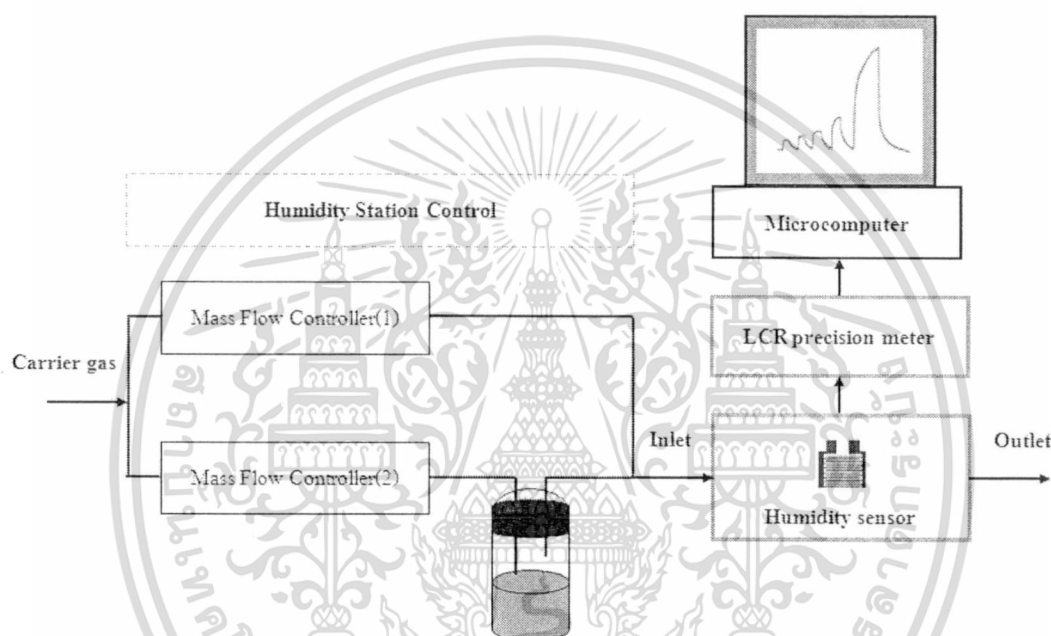
เซนเซอร์ที่ใช้วัสดุพอลิเมอร์เป็นตัวตรวจวัด(Polymer-based humidity sensor) เซนเซอร์ความชื้นประเภทนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากกว่าวัสดุเซรามิก เนื่องจากวัสดุเซรามิกจะเน้นไปทำงานประเภทความร้อนสูง และสภาพแวดล้อมมีการกัดกร่อน ซึ่งงานโดยทั่วไปจะใช้งานที่อุณหภูมิปกติ วัสดุพอลิเมอร์ที่นำมาใช้สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ พอลิอิเล็กโทรไลต์ และไดอิเล็กทริก ซึ่งการวัดความชื้นจะใช้การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ความจุไฟฟ้า ความต้านทาน คลื่นเสียงพื้นผิว (Penza, et al., 1999) และเพียโซรีซิสทีฟ โดยเซนเซอร์วัดความชื้นประเภทพอลิอิเล็กโทรไลต์ จะใช้ความนำไอออน ของวัสดุประเภทไอออนิก เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น วัสดุจะมีความนำไอออนิกเพิ่มขึ้น กลไกการตรวจรู้ค่าอัตราเร็วของอนุภาคประจุไอออนิก ซึ่งเคลื่อนที่เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก หรือความเข้มข้นประจุพาหะ (Yamazoe, 1986) สมดุลของประจุเกิดจากการที่ไอออนเคลื่อนที่ตรงกันข้ามประจุนั้น คือ มีแรงไฟฟ้าสถิตดึงดูดกลุ่มขั้วที่อยู่กับที่ เมื่อน้ำดูดซึมผ่านวัสดุ อัตราเร็วของอนุภาคประจุที่เคลื่อนที่เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นระหว่างกันภายในบริเวณใกล้ ๆ กันเป็นอิสระมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานลดลง

เซนเซอร์ความชื้นประเภทไดอิเล็กทริกใช้หลักการดูดซึมน้ำของโครงข่ายพอลิเมอร์ ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของน้ำและพอลิเมอร์มีค่าต่างกันมาก คือ น้ำจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์เท่ากับ 80 ส่วนพอลิเมอร์มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ประมาณ 5 ซึ่งเมื่อมีการดูดซึมน้ำเข้าสู่โครงข่ายของพอลิเมอร์ จะส่งผลให้ค่าไดอิเล็กทริกของพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น จากหลักการนี้สามารถนำไปใช้สร้างเซนเซอร์ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปตามค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารวัดความชื้น ซึ่งสามารถวัดได้ง่าย วัสดุที่นิยมใช้เป็นชั้นไดอิเล็กทริกวัดความชื้น ได้แก่ พอลิไมด์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ทนทานต่อสารเคมีและการปนเปื้อน นอกจากนี้ Ralston (1994) ได้นำเสนอการใช้ PMMA เป็นวัสดุวัดความชื้น ซึ่งมีผลเสีย คือ มีความไม่เป็นเชิงเส้น ที่ความชื้นสูง และมีฮิสเทอรีซิสมาก

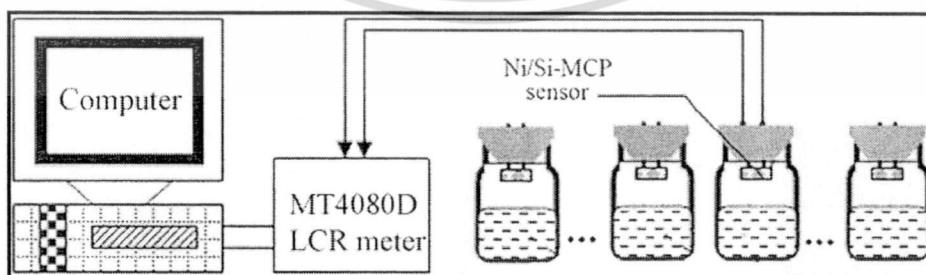
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.4 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 ราคาถูก และเป็นที่ยอมรับอยู่ในปัจจุบัน แสดงในทีรูป 2.32 ซึ่งเป็นงานวิจัยในปี 2010 ของ Fengjuan Miao ของชาวจีน และคณะ[31]



รูปที่ 2.31 ระบบการวัดเซนเซอร์ความชื้นแบบ Mass flow โดยระบบจะต่อ Mass flow เข้ากับขวดที่มีการปล่อยความชื้นต่างๆ และเก็บค่าเอาที่พุทออกมาด้วยเครื่อง LCR precision meter



รูปที่ 2.32 ระบบการวัดเซนเซอร์ความชื้นแบบจุ่มกับความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่ได้จากการผสมสารละลายเกลือจนอิ่มตัว[31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ค่าความชื้นของสารละลายเกลืออิมิตัวที่อุณหภูมิต่างๆ[32]

ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
อุณหภูมิ (°C)	ลิเทียมคลอไรด์ (lithium chloride)	โพแทสเซียมอะซิเตด (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 2.6(ต่อ) ค่าความชื้นของสารละลายเกลืออิมิตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

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	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6(ต่อ) ค่าความชื้นของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

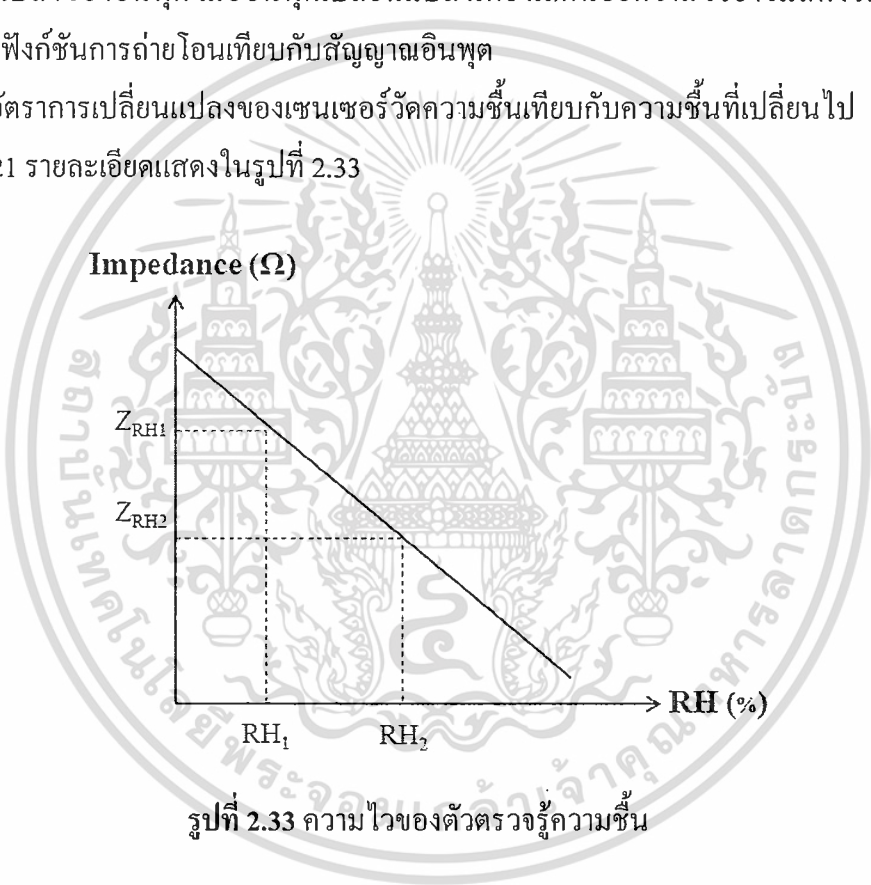
ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
อุณหภูมิ (°C)	โพแทสเซียมคลอไรด์ (potassium chloride)	โพแทสเซียมอะซิเตด (potassium nitrate)	โพแทสเซียมซัลเฟต (potassium sulfate)
0	88.61 ±0.53	96.33 ±2.90	98.77 ±1.10
5	87.67 ±0.45	96.27 ±2.10	98.48 ±0.91
10	86.77 ±0.39	95.96 ±1.40	98.18 ±0.76
15	85.92 ±0.33	95.41 ±0.96	97.89 ±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	-	-	-

2.4.2 การตรวจสอบคุณลักษณะของเซนเซอร์วัดความชื้น[30,33]

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

2.4.2.2 ความไว (Sensitivity) นิยามในเทอมของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ความไวโดยทั่วไปแล้วเป็นอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุต เมื่ออินพุตเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยความไวอาจแสดงในรูปของอนุพันธ์ของฟังก์ชันการถ่ายโอนเทียบกับสัญญาณอินพุต

ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์วัดความชื้นเทียบกับความชื้นที่เปลี่ยนไป แสดงในสมการที่ 2.21 รายละเอียดแสดงในรูปที่ 2.33

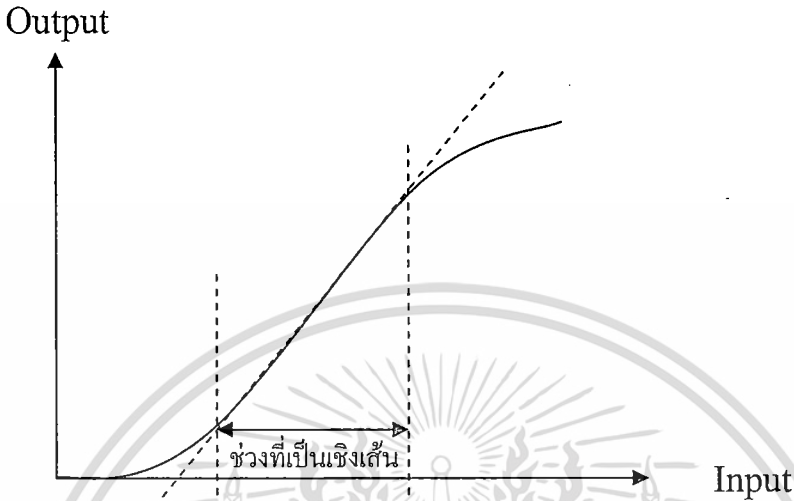


รูปที่ 2.33 ความไวของตัวตรวจวัดความชื้น

Sensitivity (S) = ΔZ/ΔRH (2.21)

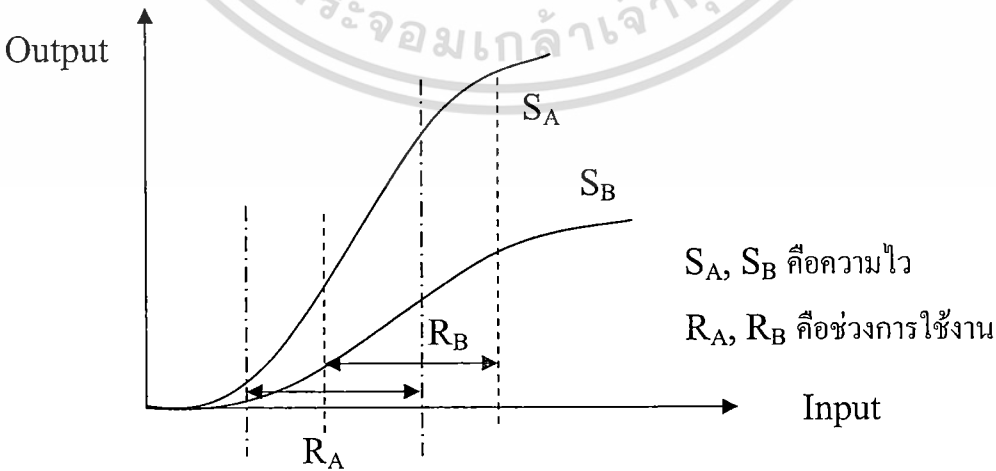
โดยที่ Sensitivity คือ ค่าความไวของเซนเซอร์วัดความชื้น มีหน่วยเป็น Ohm/%RH
ΔZ คือ ค่าผลต่างของอิมพีแดนซ์ในช่วงที่ทำการวัดมีหน่วยเป็น โอห์ม
ΔRH คือ ค่าผลต่างของความชื้นในช่วงที่ทำการวัดมีหน่วยเป็น %RH
ชนิดของสัญญาณตอบสนองอาจเป็น ค่าความจุไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าหรืออื่น ๆ

2.4.2.3 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ความเป็นเชิงเส้นของเซนเซอร์ดูจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับอินพุตที่ใกล้เคียงกับเส้นตรงซึ่งอาจเป็นเส้นตรงในช่วงอินพุตแคบๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.34 โดยปกติการใช้งานเซนเซอร์จะใช้งานในช่วงที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น



รูปที่ 2.34 ความเป็นเชิงเส้นของเซนเซอร์

2.4.2.4 ช่วงการใช้งาน (Range) ช่วงการใช้งานของเซนเซอร์กำหนดว่าเป็นขีดจำกัดซึ่งตัวรับรู้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพช่วงการทำงานของเซนเซอร์ โดยปกติถูกกำหนดด้วยค่าอินพุตต่ำสุดและสูงสุด ซึ่งสามารถจะวัดได้ช่วงการใช้งานจะแปรผกผันกับความไว กล่าวคือ ถ้าช่วงการใช้งานแคบความไวจะสูงถ้าช่วงการใช้งานกว้างความไวจะต่ำสิ่งที่สำคัญคือต้องไม่ทำการวัดนอกช่วงที่กำหนดเพราะจะทำให้เครื่องมือล้มเหลวในการทำงานหรืออุปกรณ์อาจเสียหายได้หรืออาจเสี่ยงต่อสุขภาพหรือความปลอดภัย

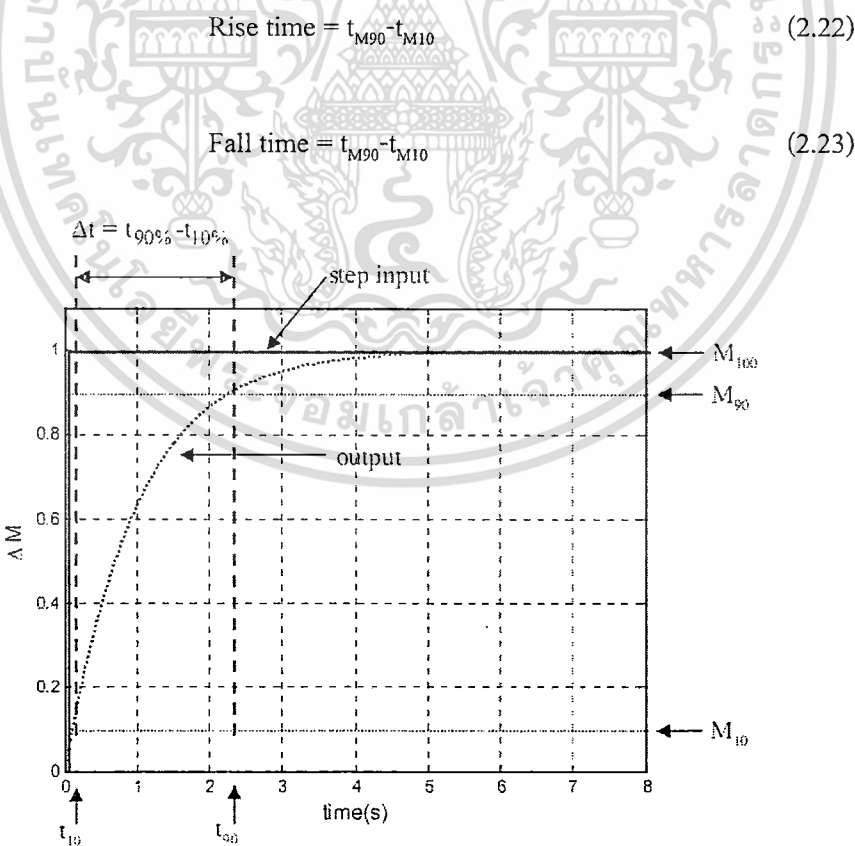


รูปที่ 2.35 ช่วงการใช้งานของเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

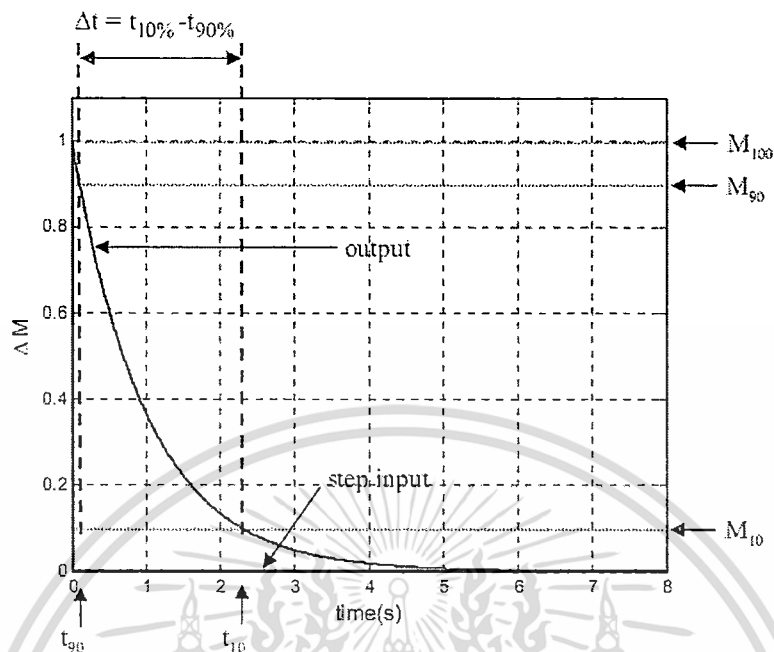
2.4.2.5 ความละเอียด (Resolution) ความละเอียดของเซนเซอร์จะสัมพันธ์กับอินพุตที่น้อยที่สุดหรือการเปลี่ยนแปลงอินพุตที่น้อยที่สุดที่มันสามารถตรวจจับได้โดยปกติจะแสดงในเทอมของการเพิ่มขึ้นที่น้อยที่สุดของอินพุตซึ่งสามารถวัดได้ถึงความละเอียดของการแสดงผลสูงขึ้นความสามารถในการวัดหรือก็จะมีขนาดเล็กลงตัวอย่างเช่น ตัวแสดงผลเป็นเลขทศนิยม 4 ตำแหน่ง 0.0001 หน่วยมีความละเอียดมากกว่าการแสดงผลการวัดด้วยทศนิยม 3 ตำแหน่ง 0.001 หน่วย

2.4.2.6 การตอบสนอง (Response) ความเร็วในการตอบสนองต่อความขึ้นทดสอบโดยการป้อนค่าความขึ้นแบบขั้นบันได โดยทั่วไปจะใช้การเพิ่มความขึ้นสัมพัทธ์จาก 11% 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 ค่าเอาต์พุตที่วัดได้ และ t คือ เวลาที่ใช้ มีหน่วยเป็นวินาที



รูปที่ 2.36 ผลตอบสนองทางเวลาขาขึ้น(คายความขึ้น) ของเซนเซอร์วัดความขึ้น[30]

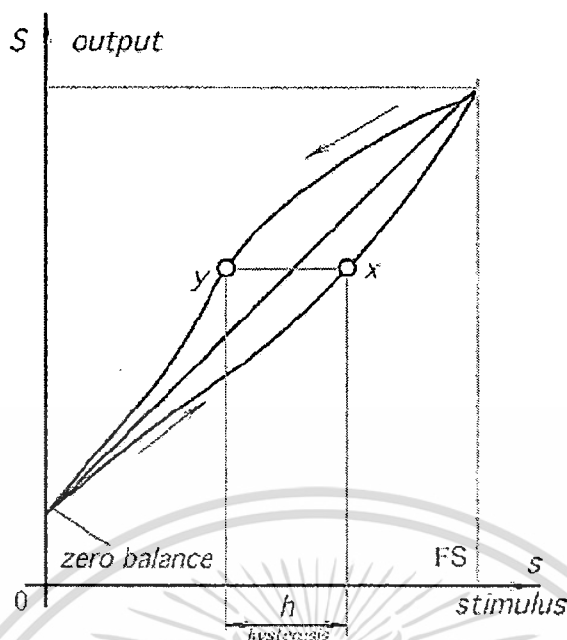
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 ผลตอบสนองทางเวลาขาลง (ดูซับความขึ้น) ของเซนเซอร์วัดความขึ้น[30]

2.4.2.7 การตอบสนองต่อความถี่ (Frequency Response) อินพุตที่ให้กับเซนเซอร์อาจมีค่าคงตัว หรือเปลี่ยนแปลงขึ้นลง จำนวนวัฏจักรของการเปลี่ยนแปลงค่าขึ้นลงในหนึ่งหน่วยเวลาเรียกว่าความถี่ เซนเซอร์แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการตอบสนองต่อความถี่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความถี่ธรรมชาติของเซนเซอร์ เซนเซอร์ที่มีความถี่ธรรมชาติสูงสามารถประยุกต์ใช้งานได้ทั้งการระสาด และการะพลวัด โดยทั่วไปเซนเซอร์ควรมีความถี่ธรรมชาติสูงกว่าความถี่ของสัญญาณอินพุตอย่างน้อย 2 เท่า ต้องไม่ใช่เซนเซอร์วัดสัญญาณอินพุตที่มีความถี่เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของเซนเซอร์เพราะจะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ ค่าที่ได้มีความผิดพลาดมาก และอาจทำให้เซนเซอร์เสียหาย

2.4.2.8 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) คือ ผลต่างสูงสุดของค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดจากค่าที่แท้จริงระหว่างการอ่านขาขึ้นกับการอ่านขาลงที่จุดๆเดียวกัน ดังรูปที่ 2.38 โดยจากรูป h แทนด้วย ค่าของฮิสเทอรีซิส ที่เกิดขึ้นกับเซนเซอร์



รูปที่ 2.38 ฮิสเทรีซิส(Hysteresis) ที่เกิดขึ้นกับเซนเซอร์[34]

2.4.2.9 ความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability or Reproducibility) หรือความเที่ยง (Precision) ความสามารถในการทำซ้ำคือจำนวนครั้งของการวัดได้ค่าเดิมภายใต้เงื่อนไขที่จำกัดเป็นการวัดความสามารถของเซนเซอร์เพื่อให้การแสดงผลหรือการตอบสนองเหมือนเดิมหรือเท่าเดิมสำหรับการวัดซ้ำๆ ที่ค่าเดิมของปริมาณเดิมที่ถูกวัดความสามารถในการทำซ้ำอาจจะให้ค่าเป็นบวกลบเปอร์เซ็นต์สูงสุดของการอ่านหรือภายใต้สภาวะจำกัดของแต่ละการอ่าน

2.4.2.10 ความเสถียร (Stability) ความเสถียรเป็นการวัดความเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุต จากเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขการป้อนอินพุตด้วยค่าคงตัวเป็นระยะเวลานาน ๆ

2.4.2.11 ความเชื่อมั่น (Reliability) คือความสามารถของเซนเซอร์ที่จะสามารถทำงานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด สำหรับคาบเวลาที่กำหนด หรือจำนวนครั้งของการทำงานที่กำหนด ขณะที่ยังคงอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของเซนเซอร์

2.4.2.12 อายุการใช้งาน (Operating life) ประโยชน์ของอายุการใช้งานของเซนเซอร์ คือเป็นเครื่องแสดงว่าระยะเวลาการใช้งานของเซนเซอร์ที่คาดว่าจะสามารถทำงานได้ภายใต้ข้อกำหนด อายุการใช้งานจะแสดงในรูปของเวลาหรือจำนวนครั้งของการทำงานหรือจำนวนวัฏจักรที่เซนเซอร์ควรจะทนทานอยู่ได้

2.4.2.13 ความไวคู่ (Dual Sensitivity) ตามปกติเซนเซอร์จะถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการวัดปริมาณอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียวเท่านั้น เช่น วัดความดัน หรือวัดแรง อย่างไรก็ตามเซนเซอร์อาจมีความไวต่อปริมาณอื่นด้วย เช่น อุณหภูมิ หรือความเร่ง ถ้านำตัวรับรู้ไปวัดปริมาณบางอย่างในกระบวนการที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เช่น ความดัน ก็สามารถเกิดความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อรู้เห็นได้เห็นใบโฆษณาในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นได้จากความไวคู่ คือ เซนเซอร์วัดปริมาณสองปริมาณในเวลาเดียวกัน

2.4.3 งานวิจัยการประยุกต์ใช้งานของเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น[30]

Seiyama (1983) สร้างเซนเซอร์วัดความชื้น โดยใช้วัสดุเซรามิก แบ่งออกเป็นแบบเซรามิกซ์ และแบบสารกึ่งตัวนำซึ่งใช้หลักการวัดค่าความต้านทานของที่เปลี่ยนไปของเซรามิก เมื่อได้รับความชื้น เซนเซอร์มีผลตอบสนองทางเวลา 15 วินาที มีความไว 36 ppm/%RH มีค่าความต้านทานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 25 MΩ Shimizu (1988) สร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบดิจิทัล ใช้หลักการวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ เซนเซอร์วัดความชื้นมีความไว 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 มีโครงสร้างอิเล็กโทรดแบบซี่หวี (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 ใช้หลักการของตัวเก็บประจุ โครงสร้างของเซนเซอร์มีลักษณะเป็นแท่งไดอิเล็กทริกของพอลิอิมิด วางเรียงกันจำนวนมาก เพื่อเพิ่มความไวและมีตัวให้ความร้อนเพื่อให้เซนเซอร์วัดความชื้นคายความชื้นเร็ว ผลที่ได้ พบว่า เซนเซอร์วัดความชื้นนี้มีความไว 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 เวลาในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

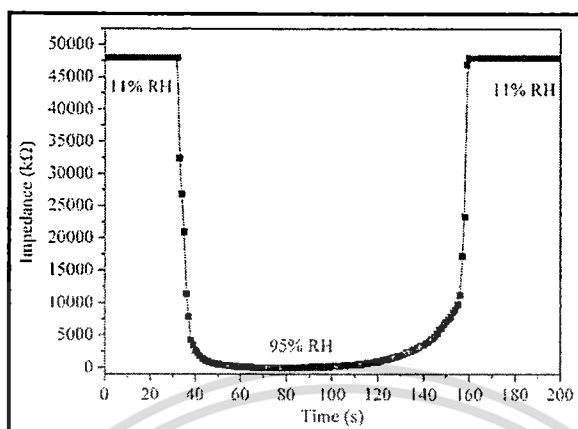
คายความชื้น 11 วินาที เซนเซอร์วัดความชื้นมีความไว 3,166 ppm/%RH และมีค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 12 pF Das (2003) พัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้น โดยใช้การวัดการเลื่อนเฟสของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ซึ่งจะป้อนสัญญาณเข้าสู่ตัวตรวจวัดความชื้นแบบซิลิกอนพอร์น และมีการชดเชยผลตอบสนองให้เป็นเชิงเส้นซึ่งผลตอบสนองทางเวลาของเซนเซอร์วัดความชื้นเท่ากับ 10 วินาที โดยวัดสัญญาณออกมาในรูปแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 3 mV เซนเซอร์วัดความชื้นมีความไว 333,333 ppm/%RH

Kann (2004) พัฒนาตัวเซนเซอร์วัดความชื้นโดยใช้ฟิล์มของซิลิกอนพอร์นเป็นวัสดุไวความชื้น 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 ซึ่งวางบนขั้วไฟฟ้าสองขั้วผลตอบสนองทางเวลามีค่า 2 วินาที แต่มีข้อเสีย คือ เซนเซอร์วัดความชื้นมีผลตอบสนองต่อความชื้นสัมพัทธ์ 42% ขึ้นไป จึงไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการวัดความชื้นต่ำ และผลตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นยังไม่เป็นเชิงเส้น Steele (2006) พัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นความเร็วสูงแบบตัวเก็บประจุ โดยใช้ฟิล์มบางของออลูมิเนียมออกไซด์เป็นวัสดุไวความชื้น ซึ่งให้ผลตอบสนองทางเวลาเพียง 42 มิลลิวินาที โดยมีค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 55 pF และมีความไว 36,363 ppm/%RH แต่มีข้อเสีย คือ ผลตอบสนองที่ได้ไม่เป็นเชิงเส้น Keththanom (2006) พัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นแบบเทคโนโลยีวงจรรวมโดยใช้การสปีดเตอริงพอลิไมด์เคลือบขั้วอิเล็กโทรดบนฐานรองซิลิกอน พบว่าเซนเซอร์วัดความชื้นมีผลตอบสนองที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 2.18 pF เซนเซอร์วัดความชื้นมีความไว 3,810 ppm/%RH เซนเซอร์มีเวลาในการดูดซึมความชื้น 1.3 วินาที มีเวลาในการคายความชื้น 247.1 วินาที

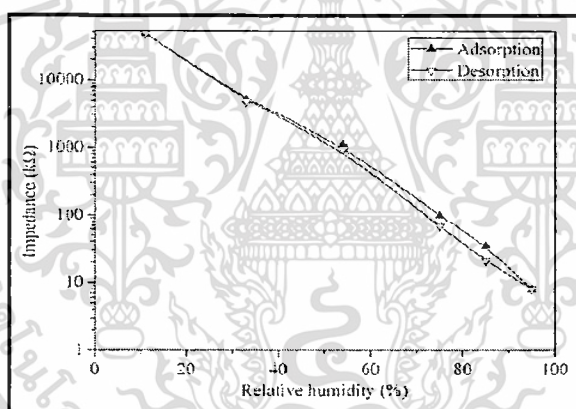
ปัจจุบันยังมีงานวิจัยที่ได้ที่ประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์วัดความชื้นอย่างต่อเนื่อง ในปี 2010 Hui-Juan Chen และคณะ[35] ได้ทำการสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบความจุไฟฟ้าโดยปลูกฟิล์มอะมอร์ฟัสคาร์บอนลงบนฐานรองรับซิลิกอนด้วยวิธี DC magnetron sputtering พบว่าเซนเซอร์มีการตอบสนองความชื้นตั้งแต่ 11-93%RH และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 33- 95%RH มีเวลาในการดูดความชื้น 3 นาที และเวลาในการคายความชื้นเท่ากับ 4 นาที ซึ่งพบว่างานวิจัยนี้ใช้เวลาในการตอบสนองนานมาก ในปีเดียวกัน Yong Zhang และคณะ[36] ได้ทำการศึกษาสมบัติการตรวจวัดความชื้นจากเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นจากฟิล์ม $\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{TiO}_3$ ลงบนขั้วอินเดร็ดิจิต ด้วยวิธีการ Spin-coat พบว่าเซนเซอร์มีการตอบสนองความชื้นตั้งแต่ 11-93%RH โดยมีเวลาในการดูดความชื้น 12 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อรู้เนื้อหาแล้วให้รีบแจ้งคืนเอกสารฉบับนี้ ไม่ควรนำเอกสารไปเผยแพร่ในที่สาธารณะ หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

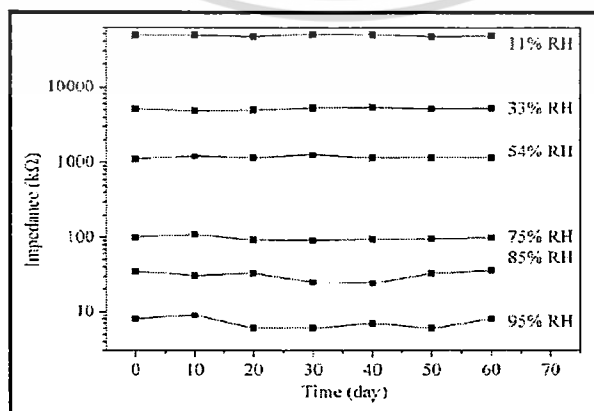
และเวลาในการคายความชื้นเท่ากับ 25 วินาที ที่ความถี่ 100 Hz และมีค่าฮีสเทอรีซิสเท่ากับ 3%RH แสดงในรูปที่ 2.39 – 2.41



รูปที่ 2.39 เวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์ทั้งช่วงเวลาในการดูดซับความชื้น และเวลาในการคายความชื้น



รูปที่ 2.40 ฮีสเทอรีซิส (Hysteresis) ที่เกิดขึ้นกับเซนเซอร์ความชื้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 2.41 เติบโตภาพของเซนเซอร์ความชื้นที่วัดเป็นเวลา 70 วัน ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

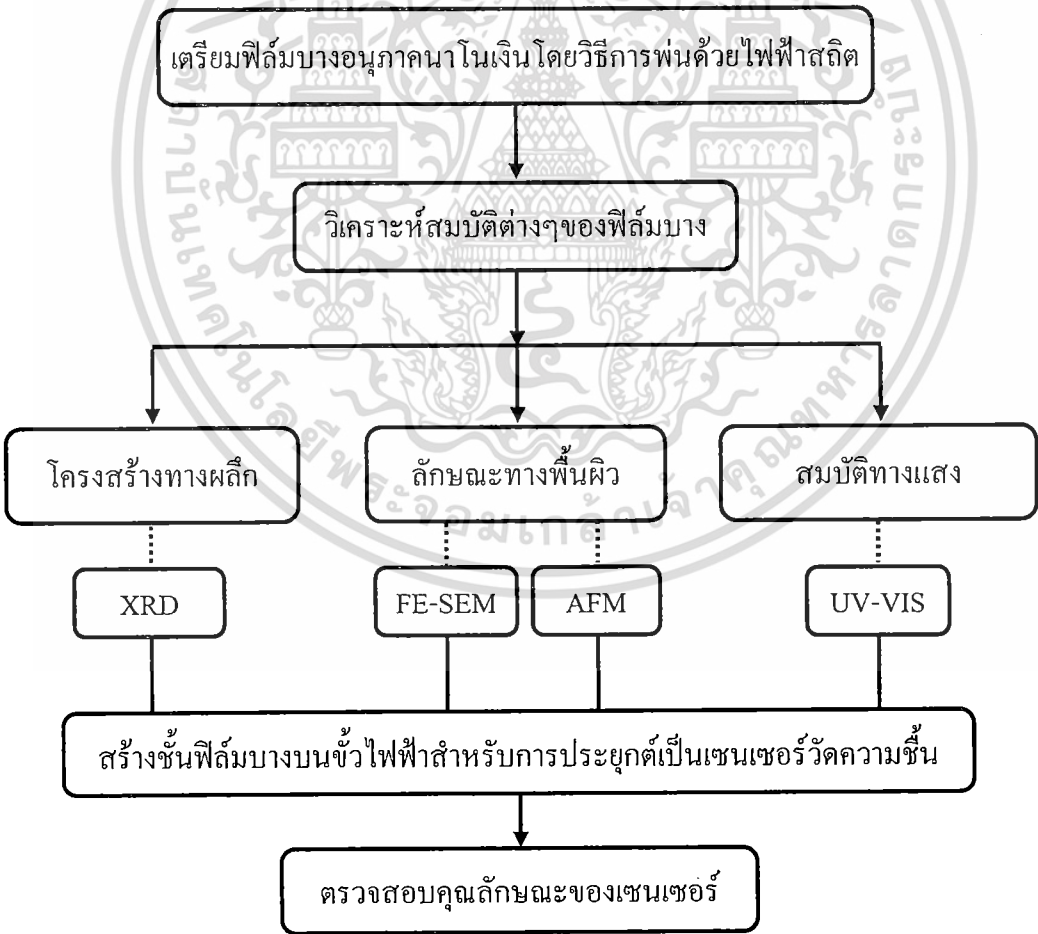
ตารางที่ 2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นประเภทฟิล์มบาง[30]

ปี	ผู้ประพันธ์	หลักการ	วัสดุ	ความหนาฟิล์ม (μm)	เวลาในการตอบสนอง (s)
1983	Hijikawa, et al.	ความต้านทาน	พอลิเมอร์	10	100
1985	Tsuchitani, et al.	ความต้านทาน	ไอออนนิก-โคพอลิเมอร์	10	120
1985	Jadhav, et al.	ความต้านทาน	AlOx	120 nm	20
1988	Shimizu, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	1	15
1992	Sadaoka, et al	แสง	พอลิเมอร์	5	60
1993	Bolzhauser, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	10	30
1995	Roman, et al.	ความจุไฟฟ้า	PMMA	5-10	60-120
1996	Shibata, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	1.3	15
2000	Kang, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	2	1
2001	Qui, et al.	แรงดันไฟฟ้า	พอลิอิมิด	3.8	20
2001	Laville, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	0.65	1
2002	Laville, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด,BCB	0.65	0.4
2003	Tetelin, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด,BCB	1.6	0.4
2004	Kalkan, et al.	กระแสไฟฟ้า	ซิลิคอนนาโนเฟส	0.04-0.2	<0.2
2005	Kim, et al.	ความต้านทาน	คอปเปอร์-ไททานด	30-40	90
2008	Park, et al.	อิมพีแดนซ์	โพลีอิลีกโทรไลต์ - ซิลเวอร์	-	120
2010	Chen, et al.	ความจุไฟฟ้า	อะมอร์ฟัสคาร์บอน	-	180
2010	Zhang, et al.	อิมพีแดนซ์	Bi _{0.3} K _{0.5} TiO ₃	-	12

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

หลังจากได้ทำการศึกษาถึงสมบัติของอนุภาคนาโนเงิน และหลักการของวิธีการพ่นละอองฝอยด้วยไฟฟ้าสถิตแล้วในเบื้องต้น บทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน และศึกษาผลของเงื่อนไขที่มีต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินซึ่งได้แก่ โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว และสมบัติทางแสง ด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งในขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางจะได้ทำการสร้างเงื่อนไขต่อไป และเมื่อตรวจสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง จะนำเงื่อนไขที่เหมาะสมของการเตรียมฟิล์มบางสร้างเป็นชั้นฟิล์มบางบนขั้วไฟฟ้าเพื่อประยุกต์เป็นเซนเซอร์ความชื้นและจะทำการตรวจสอบคุณลักษณะของเซนเซอร์ต่อไปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยอธิบายได้ตามรูปที่ 3.1

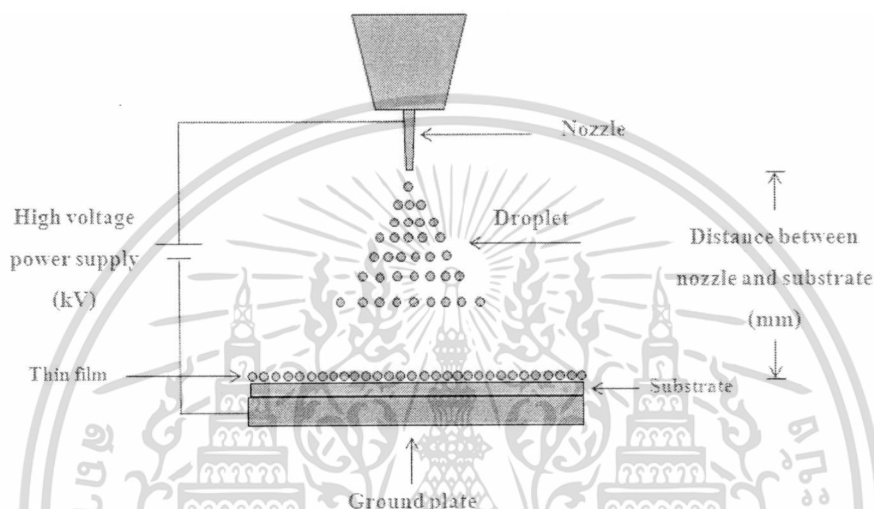


รูปที่ 3.1 ไคอะแกรมแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อประยุกต์ใช้งานในการเตรียมฟิล์มบางและสำหรับการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดยจากการศึกษาจากทฤษฎีเบื้องต้นพบว่า ระบบการเตรียมฟิล์มดังกล่าวมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง หลอด capillary หรือ หัวเข็มแผ่นกราวด์เพลท (ground plate) ระบบตรวจดูการพ่น (Spray monitor) และห้องสำหรับการพ่น (Chamber) โดยไดอะแกรมของระบบดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 3.2



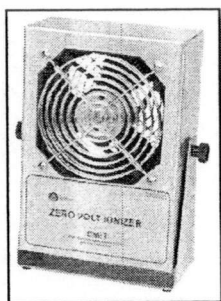
รูปที่ 3.2 ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

3.1.1 องค์ประกอบของการเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

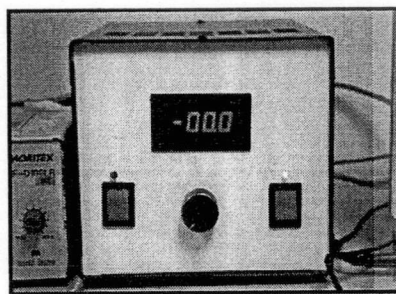
องค์ประกอบของระบบประกอบด้วย

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

ในงานวิจัยนี้ ใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงชนิดคงที่ (8 กิโลโวลต์) และปรับค่าได้ (1-11 กิโลโวลต์) ดังแสดงในรูปที่ 3.3(ก) และ (ข)



(ก)



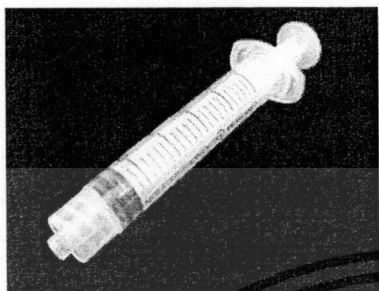
(ข)

รูปที่ 3.3 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง (ก) ชนิดคงที่ (ข) ชนิดปรับค่าได้

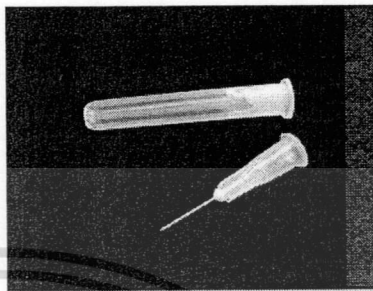
เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 หลอดบรรจุสารและหัวเข็ม (Syringe and nozzle)

หลอดบรรจุสารในการทดลองใช้ขนาดบรรจุ 3 ml และหัวเข็มสำหรับการพ่นละอองฝอยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.300 mm



(ก)



(ข)

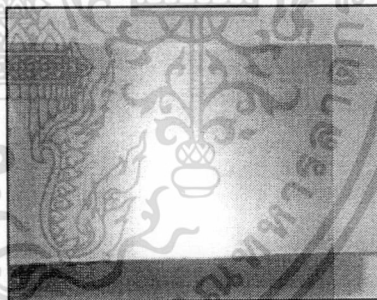
รูปที่ 3.4 (ก) หลอดบรรจุสาร (ข) หัวเข็มสำหรับการพ่น

3.1.1.3 แผ่นกรวดแร่ฟเลท (Ground plate)

ในการทดลองใช้แผ่นโลหะนำไฟฟ้าได้แก่ แผ่นอะลูมิเนียม และแผ่นทองแดง



(ก)



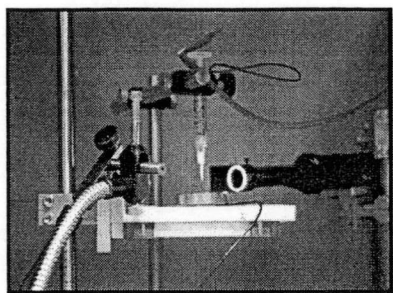
(ข)

รูปที่ 3.5 แผ่นโลหะนำไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง(ก)แผ่นอะลูมิเนียม (ข) แผ่นทองแดง

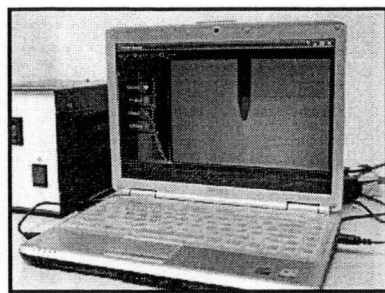
3.1.1.4 ระบบตรวจดูการพ่น (Spray monitor)

ระบบดังกล่าวใช้สำหรับการตรวจดูค่าและละอองฝอยในการพ่น ประกอบด้วย กล้องและเลนส์กำลังขยายขนาดสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

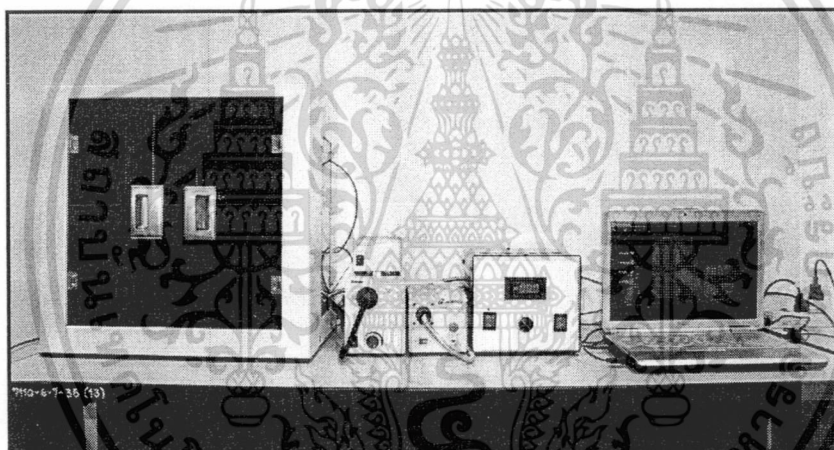


(ข)

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 สำหรับฐานรองรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นกระจกสไลด์ของบริษัท W. Germay รุ่น SUPEORIOUR ขนาด 76x26 มิลลิเมตร โดยใช้กระบวนการล้างที่เรียกว่า Alcohol process ซึ่งการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจะมีขั้นตอนการทำความสะอาด ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (1) นำกระจกไปล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
- (2) ล้างกระจกด้วยน้ำไร้ประจุในเครื่องอัลตราโซนิก (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 การเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง

ในการทดลองจะทำการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยใช้ไฟฟ้าศักย์สูง 10 กิโลโวลต์ โดยจะทำการสร้างเงื่อนไขในการทดลอง 4 เงื่อนไข โดยเงื่อนไขแรกจะทำการหาศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอย ส่วนเงื่อนไขที่สองจะทำการดูการกระจายตัวของสารเมื่อปรับศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างต่างๆ เงื่อนไขที่สามจะทำการปรับระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับ เพื่อหาระยะที่ได้ฟิล์มบางที่มีความสมบูรณ์มากที่สุด โดยมีความเรียบสม่ำเสมอ (uniform) และเป็นระเบียบ (homogeneous) มากที่สุด โดยในเงื่อนไขนี้จะทำการใช้ศักย์ไฟฟ้าเป็น 8 และ 10 กิโลโวลต์ ส่วนเงื่อนไขสุดท้ายจะทำการเตรียมฟิล์มบางที่ระยะห่างที่เหมาะสมและทำการปรับเวลาในการเตรียมต่างๆ กัน ซึ่งเงื่อนไขทั้งหมด มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 เงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยและละอองฝอยแบบสมบูรณ์ (Taylor cone)

นำอนุภาคนาโนเงิน (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

เงื่อนไขต่างๆของการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน โดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงแบบปรับค่าได้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

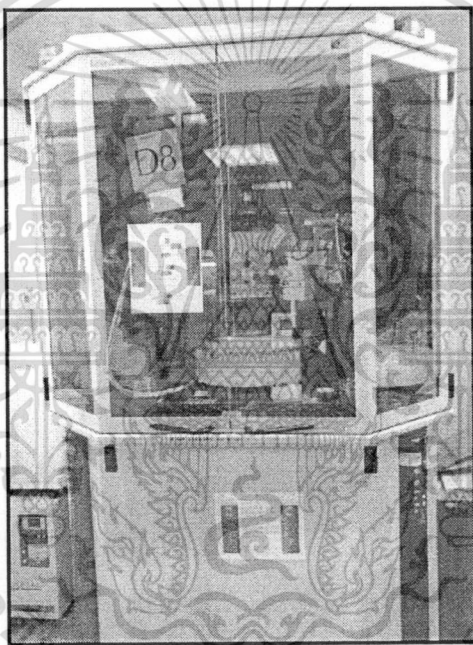
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน โดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงแบบปรับค่าได้

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 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน

3.4.1 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์อาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมของการเลี้ยวเบนเรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน ซึ่งธาตุและสารประกอบแต่ละชนิดจะมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนเฉพาะตัว ในการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะใช้เครื่อง 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

3.4.2 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



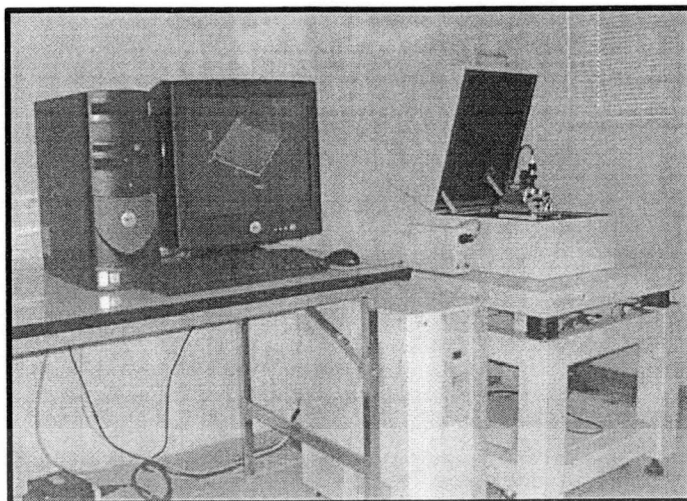
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเปล่งกราดชนิด Field Emission (FE-SEM) , Hitachi รุ่น S4700

3.4.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

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

หลังจากทำการตรวจสอบพื้นผิวของฟิล์มบางที่ได้จะทำการวิเคราะห์ค่าความขรุขระในแต่ละเงื่อนไขของฟิล์มบาง

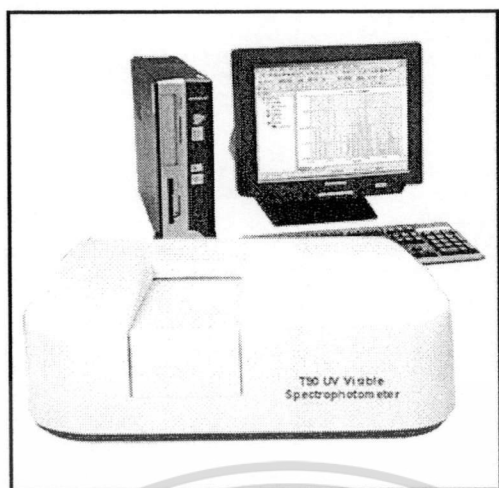
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอม(AFM), Seiko SPA-400

3.4.4 การตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

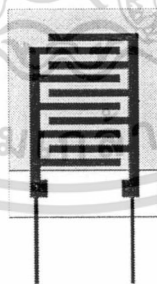
UV-VIS Spectrophotometer เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารโดยใช้หลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตามองเห็น นั่นก็คือช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 นาโนเมตร(nm) ของสารเคมีต่างๆ ได้แก่ สารอินทรีย์ (organic compound) สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) หรือสารอนินทรีย์ (inorganic compound) โดยนำสารตัวอย่างใส่ในที่ได้ตัวอย่าง (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+

3.5 การประดิษฐ์เซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดความชื้น

จากการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางที่ได้ในช่วงต้น จะเลือกใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมสร้างเป็นชั้นฟิล์มบางสำหรับการตอบสนองต่อความชื้นบนขั้วไฟฟ้า โดยเงื่อนไขที่เหมาะสม คือ ระยะห่างระหว่างหัวเข็มและฐานรองรับ 40 มิลลิเมตร สักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ 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

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

เงื่อนไขต่างๆของการเตรียมฟิล์มอนุภาคนาโนเงินบนขั้วไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 3.2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มอนุภาคนาโนเงินบนขั้วไฟฟ้า

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

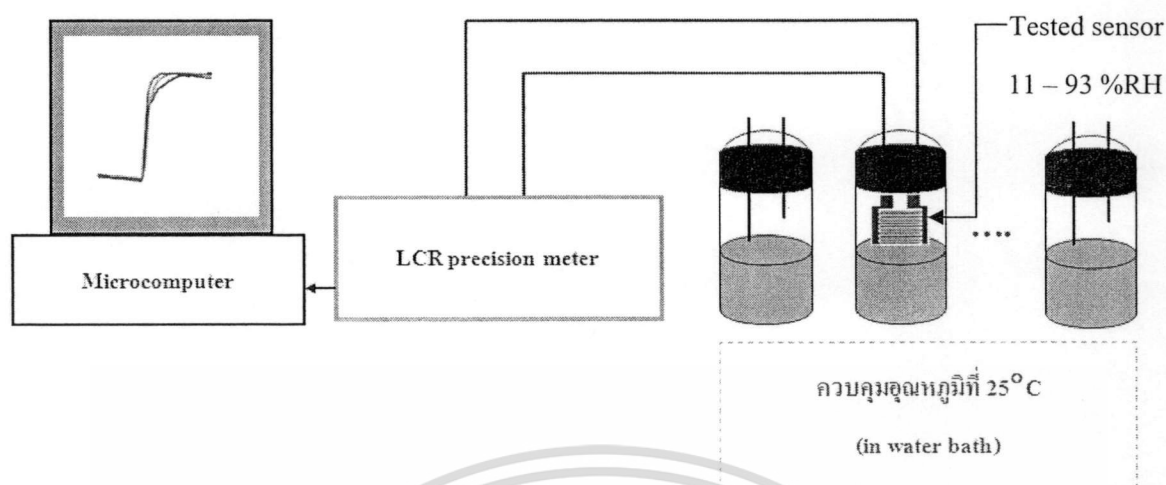
3.6 การตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้น

3.6.1 การตรวจสอบสมบัติพื้นผิวและความหนาของฟิล์มอนุภาคนาโนเงินที่เคลือบเป็นชั้นเซนเซอร์ความชื้น

ในการทดลองจะทำการเตรียมฟิล์มลงบนกระจกเพื่อตรวจสอบสมบัติพื้นผิวและความหนาของฟิล์มอนุภาคนาโนเงินที่เคลือบเป็นชั้นเซนเซอร์ความชื้น โดยในการทดลองจะทำการระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับกระจกเป็น 40 มิลลิเมตร และปรับเวลาในการเตรียมฟิล์มเป็นเวลา 1 นาที, 5 นาที, 10 นาที และ 10 นาที 2 ครั้ง

3.6.2 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) โค้ดแอมระบบวัดแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ระบบการวัดการตอบสนองต่อความชื้น

3.6.2.1 การวัดค่าการตอบสนองต่อความชื้น

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

3.6.2.2 การวัดเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้น (Response and Recovery time)

ทำการการวัดเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้น ซึ่งในการทดลองจะใช้ความชื้นสัมพัทธ์ที่น้อยสุด (11.30%,RH) กับความชื้นสัมพัทธ์ที่มากที่สุด (93.58%) โดยทำการวัดความชื้นสลับกันระหว่างความชื้นต่ำและความชื้นสูงโดยในขณะที่เปลี่ยนจากความชื้นต่ำไปยังความชื้นสูงจะทำให้ได้ค่าเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับความชื้น(Response time) และจากความชื้นสูงไปยังความชื้นต่ำจะทำให้ได้ค่าเวลาในการตอบสนองต่อการคายความชื้น(Recovery time) ซึ่งในการตรวจสอบจะใช้เวลาการวัดทั้งหมดเป็น 1000 วินาที โดยจะสลับกันทุก 250 วินาที และเก็บค่าความสัมพันธ์ของเวลาและความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance)

3.6.2.3 การวัดสภาพความไวในการตอบสนอง (Sensitivity)

สภาพความไวในการตอบสนอง(Sensitivity) พิจารณาได้จากความต้านทานเชิงซ้อนที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดและความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 การตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้น

การตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้นทำได้โดยการวัดการดูดซับความชื้น โดยเริ่มจากความชื้นต่ำไปยังความชื้นสูง(11.30%, 23.11%, 32.78%, 52.89%, 75.29%, 84.34% และ 93.58% ตามลำดับ) จากนั้นย้อนกลับเป็นกระบวนการคายความชื้นจากความชื้นสูงกลับ ไปสู่ความชื้นต่ำ (93.58%, 84.34%, 75.29%, 52.89%, 32.78%, 23.11% และ 11.30%, ตามลำดับ) โดยในการทดลองนี้จะนำเซนเซอร์วัดความชื้นตามกระบวนการข้างต้นเป็นเวลาดำเน่งละ 1000 วินาที และทำการเก็บบันทึกข้อมูลค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ที่เวลา 500 วินาที

3.6.4 การตรวจสอบเสถียรภาพของเซนเซอร์

ทำการบันทึกค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่างๆทุกๆ 5 วัน เป็นระยะเวลา 40 วัน เพื่อศึกษาถึงเสถียรภาพของเซนเซอร์

3.6.5 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี

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

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการดำเนินงานวิจัยของการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินและการวิเคราะห์สมบัติฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน ซึ่งการทดลองสามารถเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินด้วยแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้า 8 และ 10 กิโลโวลต์

และในส่วนของการนำอนุภาคนาโนเงินไปประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น ซึ่งทั้งกระบวนการเตรียมฟิล์มบางและการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินด้วยแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้าศักย์สูง

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

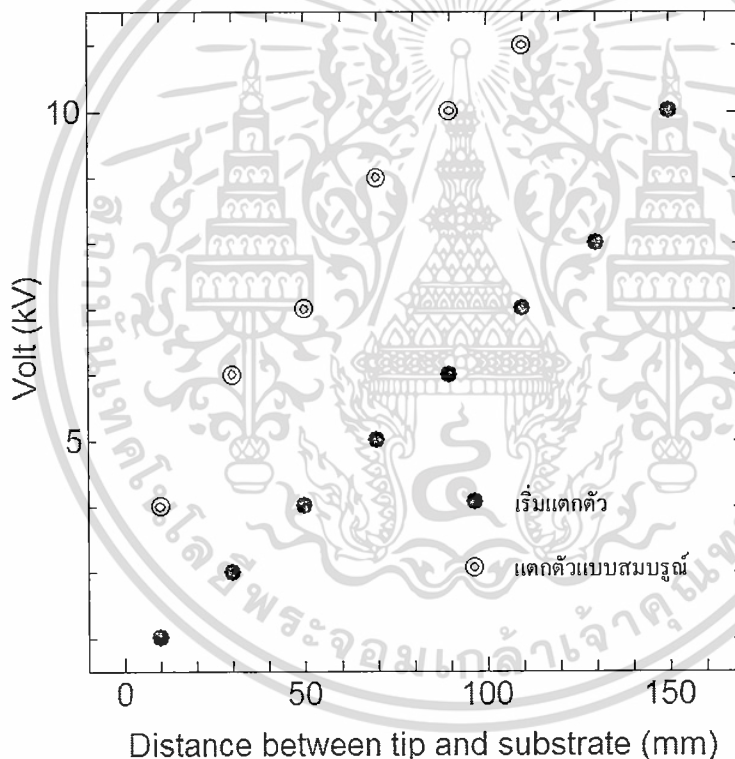
การนำอนุภาคนาโนเงินประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น

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

4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง

4.1.1 ผลของศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยและละอองฝอยแบบสมบรูณ์

ในการทดลองจะทำการพ่นอนุภาคนาโนเงินลงบนแผ่นกระดาษ ที่ระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับเป็น 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130 และ 150 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยการปรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงจนกระทั่งสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเงินดังกล่าวแตกตัวเป็นละอองฝอยและทำการบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้สารเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยและละอองฝอยแบบสมบรูณ์ที่ระยะต่างๆ ซึ่งผลการวิเคราะห์เป็นดังรูปที่ 4.1



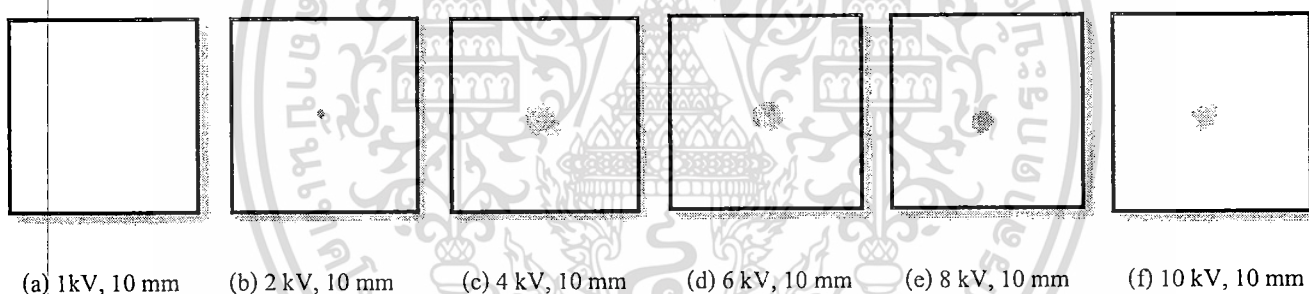
รูปที่ 4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มแตกตัวเป็นละอองฝอยและแตกตัวเป็นละอองฝอยแบบสมบรูณ์ที่ระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้สารแตกตัวและแตกตัวเป็นละอองฝอยแบบสมบรูณ์ก็จะมีค่ามากขึ้น โดยการแตกตัวสมบรูณ์(Cone jet) จะมีลักษณะ คือ มีรูปร่างเป็นโคน(cone) ที่ปลายแหลม และมีลำของเหลว(jet) ต่อจากโคน และปลายของ jet จะเกิดเป็นละอองฝอยเนื่องจากไฟฟ้า(Electrospray) โดยลักษณะของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละอองฝอยที่เกิดจาก cone jet mode นี้ มีการกระจายตัวของละอองที่สม่ำเสมอ เป็นการแตกตัวที่สมบูรณ์ ในส่วนของการแตกตัวไม่สมบูรณ์จะเป็นลักษณะของ Spindle หรือ Intermittent cone-jet ซึ่งจะมีลักษณะของการแตกตัวที่มีหยดน้ำเล็กๆ ผสมออกมากับหยดละอองฝอย โดยบันทึกการทดลองได้จากการตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเงินที่เคลือบบนพื้นผิวของฐานรองรับ(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



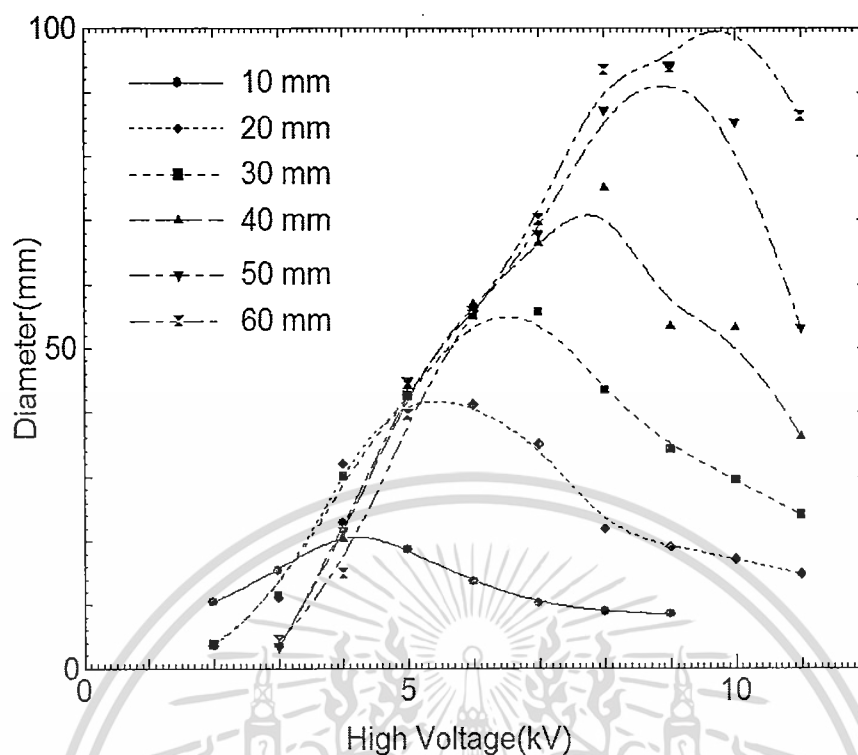
รูปที่ 4.2 ภาพลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเงินที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มและฐานรองรับเท่ากับ 10 mm และปรับแรงดันไฟฟ้าเป็น 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 กิโลโวลต์

จากการกระจายตัวดังกล่าวจะทำการเก็บข้อมูลการกระจายตัวโดยทดลองพ่นที่ระยะตั้งแต่ 10 – 150 มิลลิเมตร ข้อมูลดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระยะในการพ่นตั้งแต่ 10 – 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
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 จะพบว่าลักษณะการกระจายตัวของวงสเปร์ย์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยดูจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงสเปร์ย์ แต่เมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงสเปร์ย์มีค่าลดน้อยลง เนื่องมาจากที่ระยะห่างจุดนั้น มีค่าสนามไฟฟ้าที่สูงมากทำให้สามารถบังคับลำสเปร์ย์ของสารให้บีบลง จนทำให้ขนาดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงสเปร์ย์ลดลง

จากผลของการกระจายตัวที่ระยะต่างๆ เพื่อแสดงให้เห็นความสมมาตรเนื่องจากการพ่นดังกล่าว โดยทำการหาอัตราส่วนระหว่างแนวตั้งฉากกับแนวราบของเส้นผ่านศูนย์กลางวงสเปร์ย์ดังตารางที่ 4.2

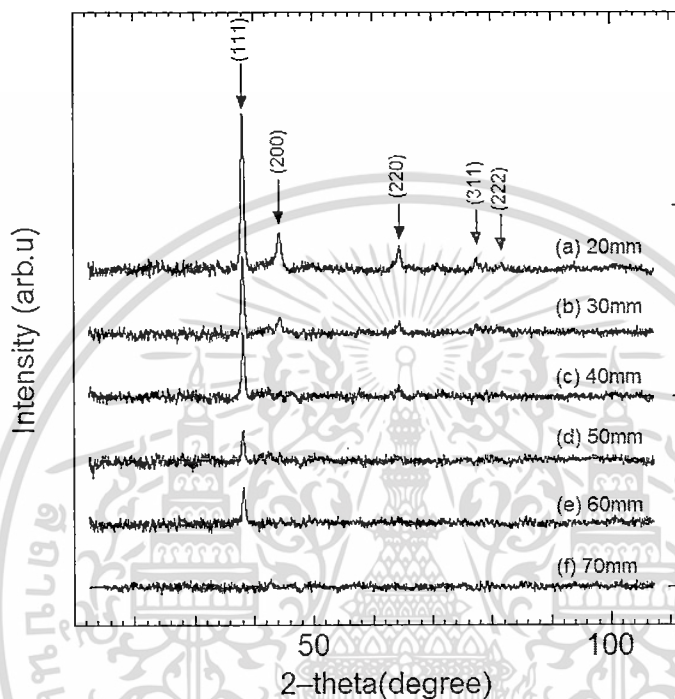
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนระหว่างแนวตั้งฉากกับแนวนอนของเส้นผ่านศูนย์กลางวงสเปร์ย์ที่ระยะในการพ่นตั้งแต่ 10 – 150 มิลลิเมตร โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1-11 กิโลโวลต์

ระยะห่าง (mm)	อัตราส่วนระหว่างแนวตั้งฉากกับแนวนอนของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 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

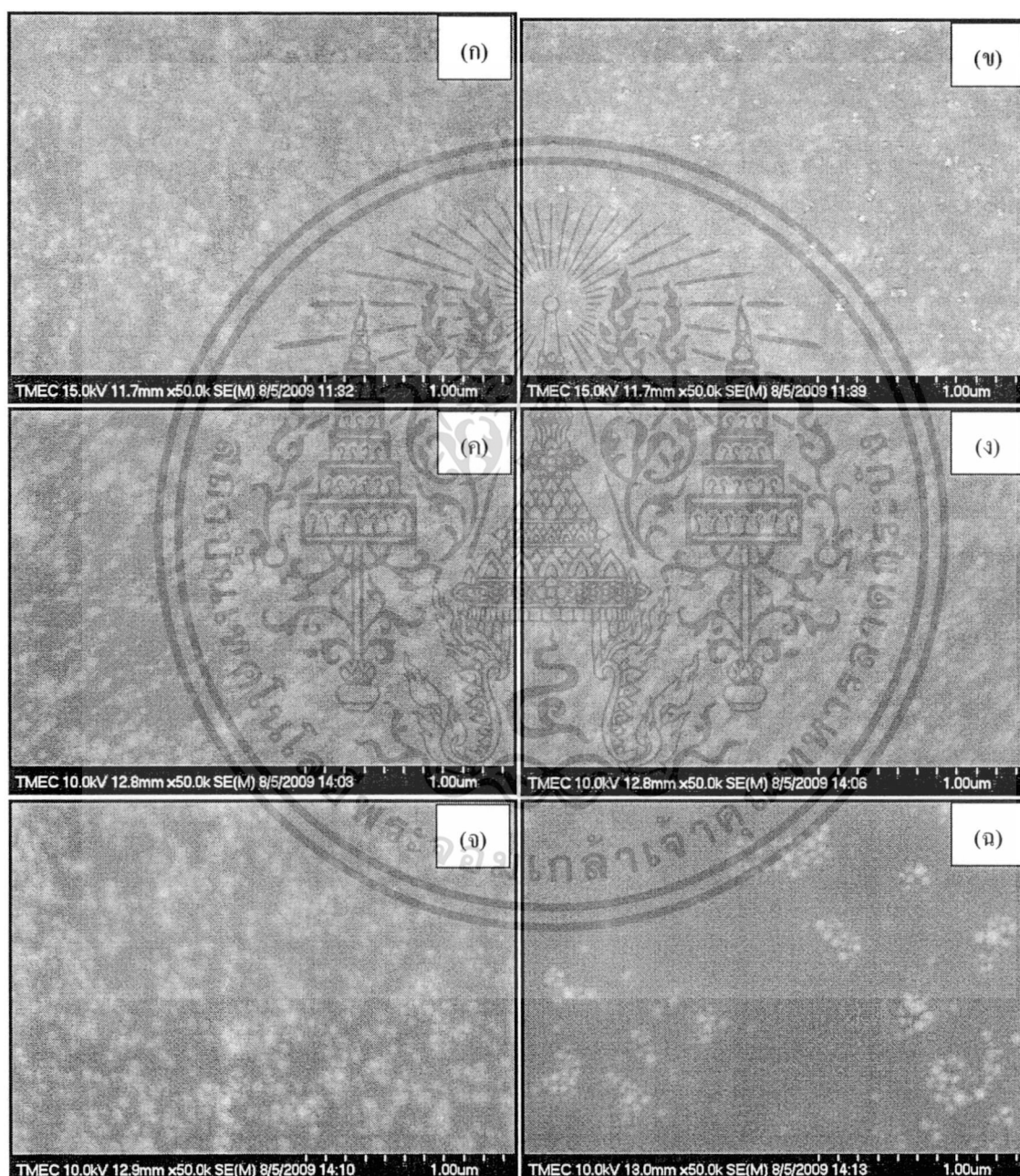


รูปที่ 4.4 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะต่างกัน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

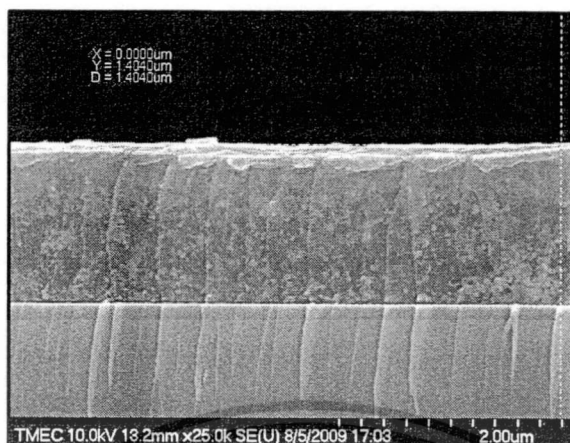
ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เตรียมโดยการปรับระยะทางระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเป็น 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มจากเครื่อง FE-SEM โดยระยะในการเตรียมฟิล์มต่างกัน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

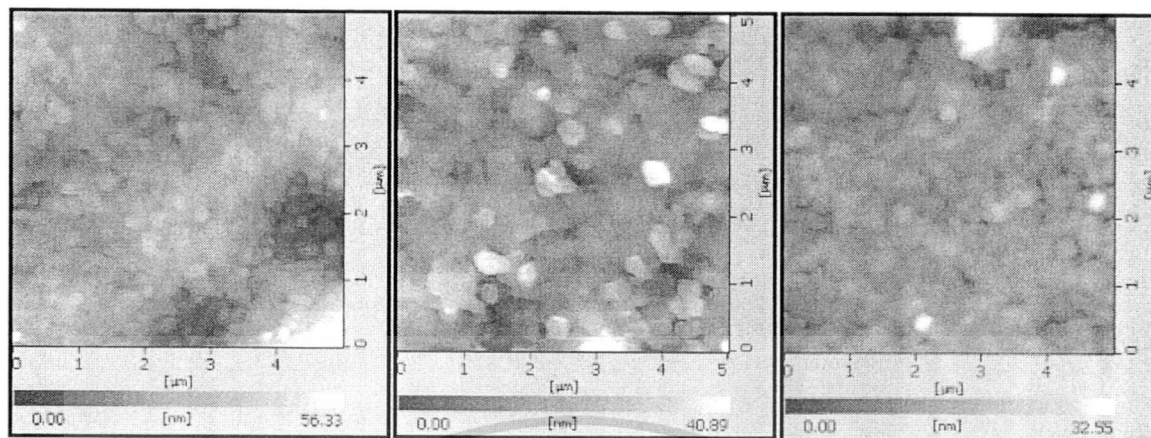


รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมฟิล์ม 20 มิลลิเมตร มีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 1.40 ไมครอน

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

ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เตรียมโดยการปรับระยะทางระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเป็น 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.7

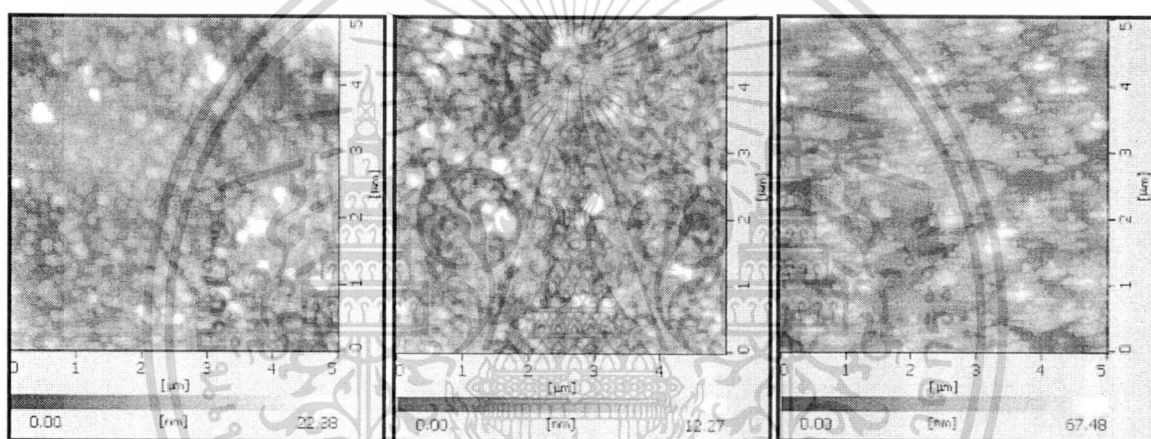
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 20 มิลลิเมตร

(ข) 30 มิลลิเมตร

(ค) 40 มิลลิเมตร



(ง) 50 มิลลิเมตร

(จ) 60 มิลลิเมตร

(ฉ) 70 มิลลิเมตร

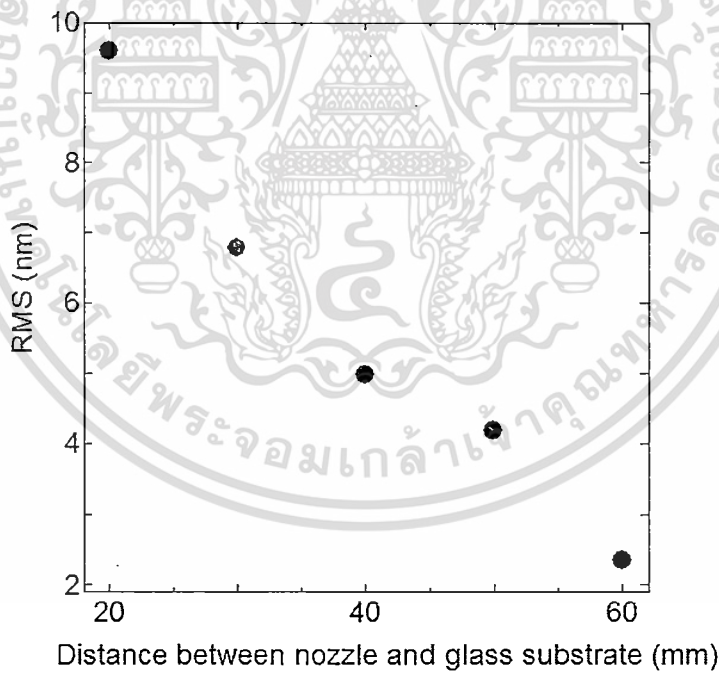
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจากจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม โดยที่ระยะห่างการเตรียมฟิล์มต่างๆ

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 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกินไป ทำให้แรงไฟฟ้าสถิตที่จะบังคับให้สารสเปรย์ลงมามีค่าลดลง ทำให้สารกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งในการทดลองฟิล์มที่ระยะห่างเท่ากับ 70 มิลลิเมตร จะไม่นำมาทำวิเคราะห์หาค่าความขรุขระ(RMF) และสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของฟิล์มที่ระยะต่างๆ กับ ค่าความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์ม

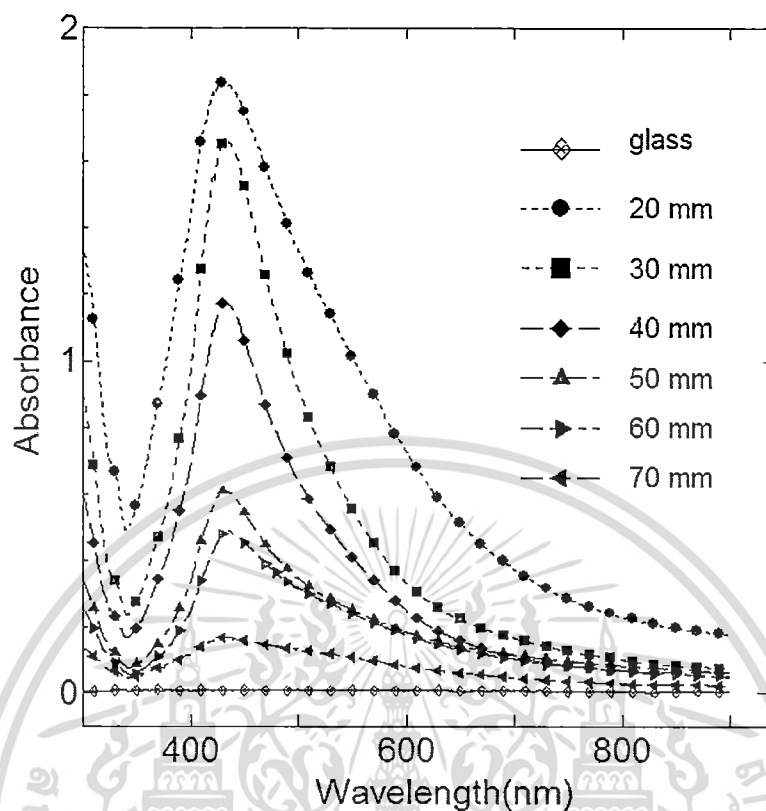
ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับ (มิลลิเมตร)	ค่าความขรุขระของพื้นผิว(นาโนเมตร)
20.00	9.59
30.00	6.78
40.00	4.97
50.00	4.18
60.00	2.35



รูปที่ 4.8 ค่าของความขรุขระของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน

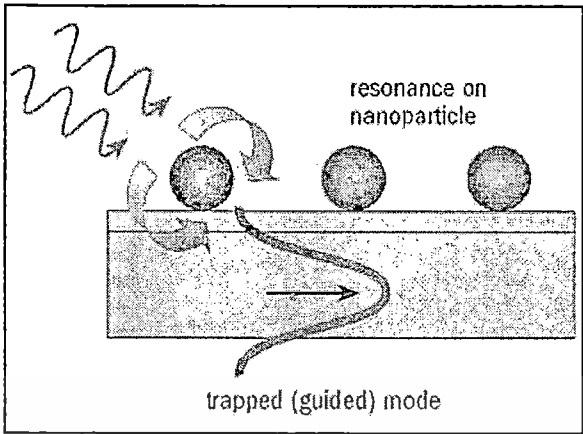
ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยการปรับระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเป็น 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงด้วยระบบยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรสโกปี ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.9

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



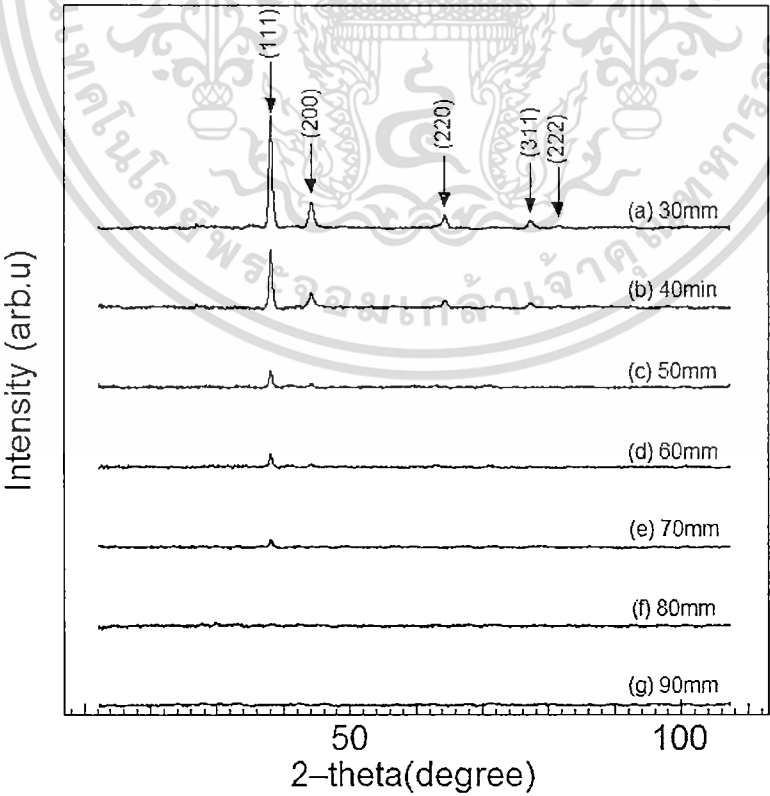
รูปที่ 4.9 กราฟดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน

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



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

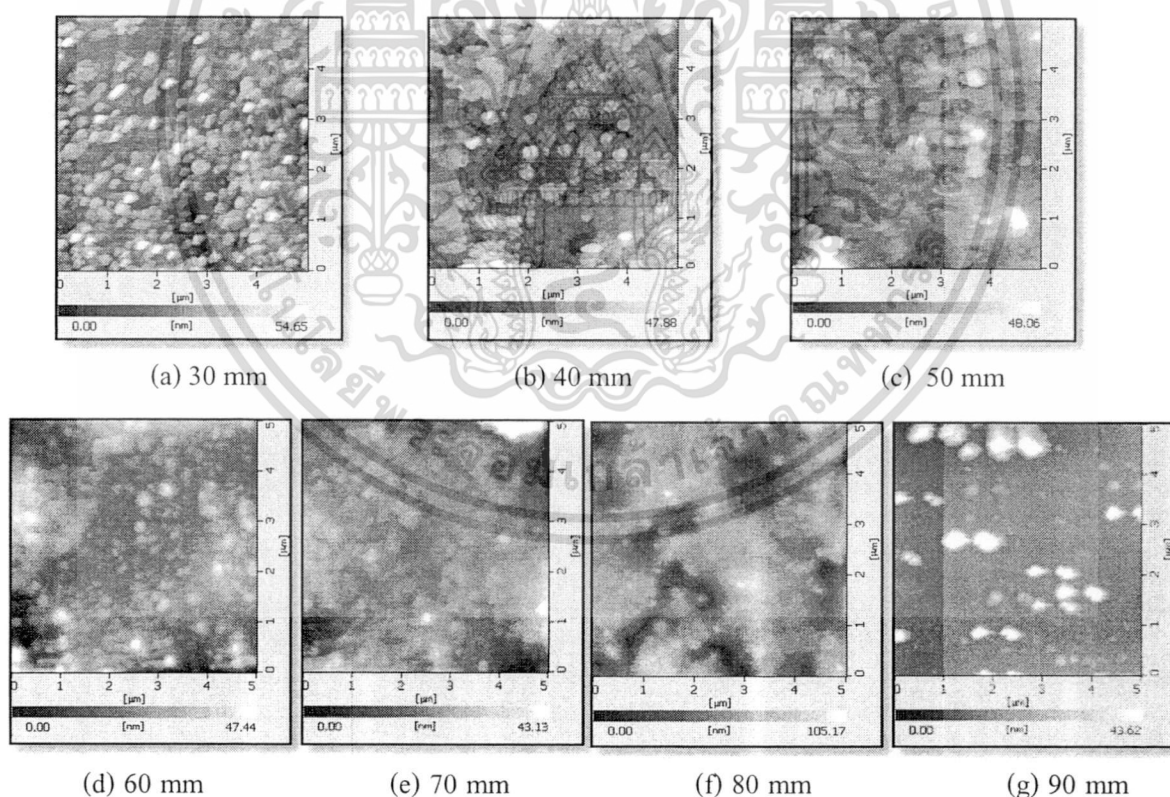
ในส่วนที่สองจะเป็นผลของการวิเคราะห์ฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง 10 กิโลโวลต์ โดยทำการปรับระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเป็น 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อศึกษาถึงสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่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



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.11 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะต่างกัน ยืนยันด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยมียอดการเลี้ยวเบนที่มุม 38.2, 44.3, 64.4 และ 77.4 องศาตามลำดับ ซึ่งตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนที่ (111), (200), (220) และ (311) ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ พบว่าเป็นระนาบการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนเงินที่มีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (Cubic structure) และ จากกราฟจะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับทำให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 4.11(a) ระยะห่างเท่ากับ 30 มิลลิเมตร มีความเข้มของฟลักมากที่สุด 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

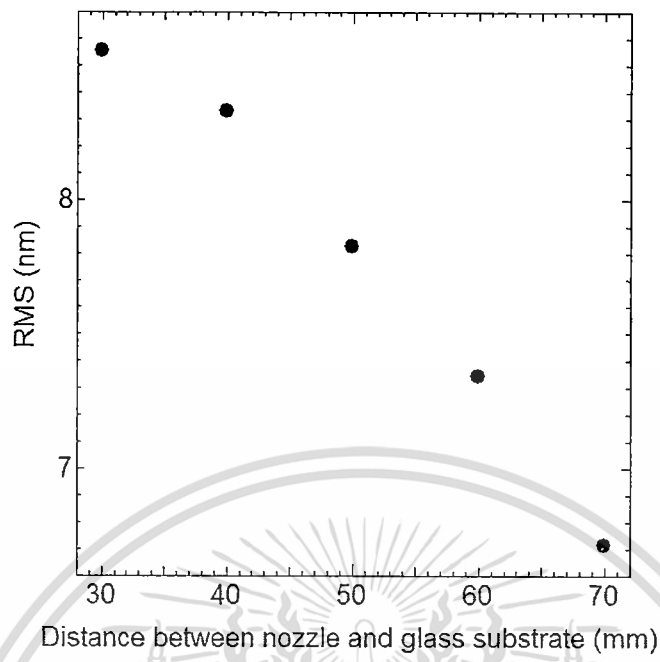


รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม โดยมีระยะการเตรียมฟิล์มฟิล์มต่างๆ กัน (a)-(g) แสดงภาพถ่ายด้านบนพื้นผิว (top view)

จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมดังรูปที่ 4.12 พบว่าฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ โดยรูปที่ 4.12(a,h) ที่ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับเท่ากับ 30 มิลลิเมตร จะมีความขรุขระของพื้นผิวมากที่สุด เนื่องจากมีการทับถมของเนื้อสารเป็นจำนวนมาก 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)

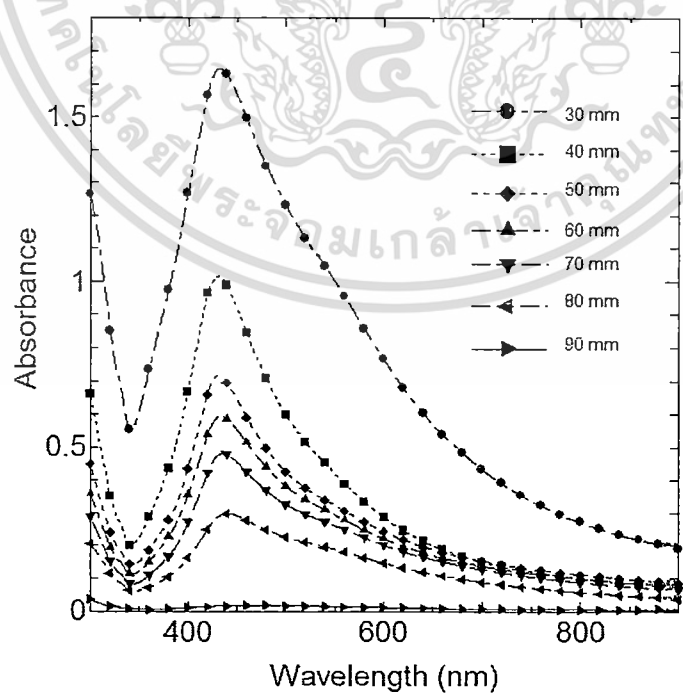
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของฟิล์มที่ระยะต่างๆ กับ ค่าความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์ม

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 4.14



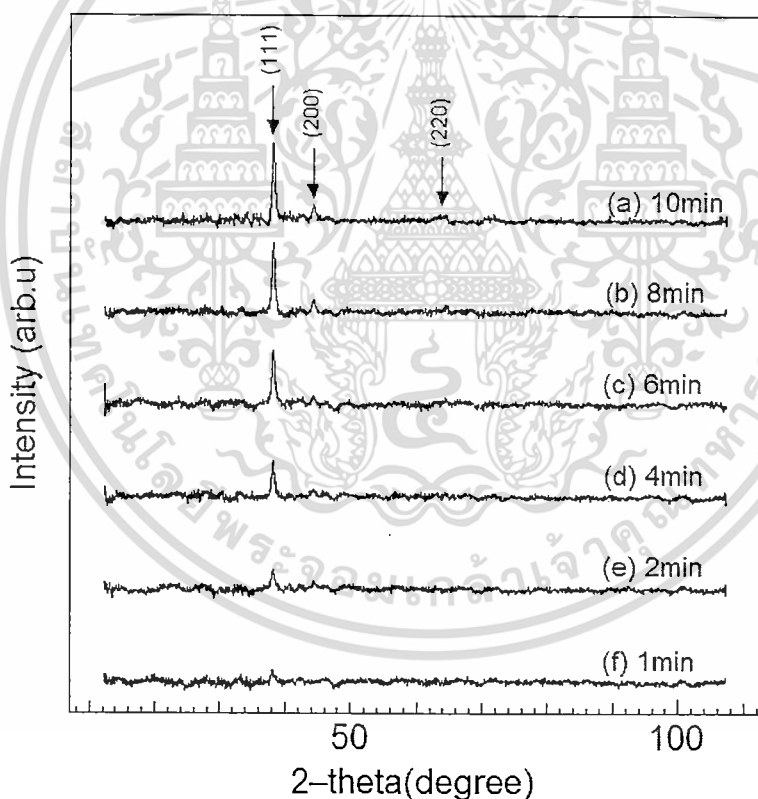
รูปที่ 4.14 กราฟฟลูคกิ้นของแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของเวลาต่อสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.15

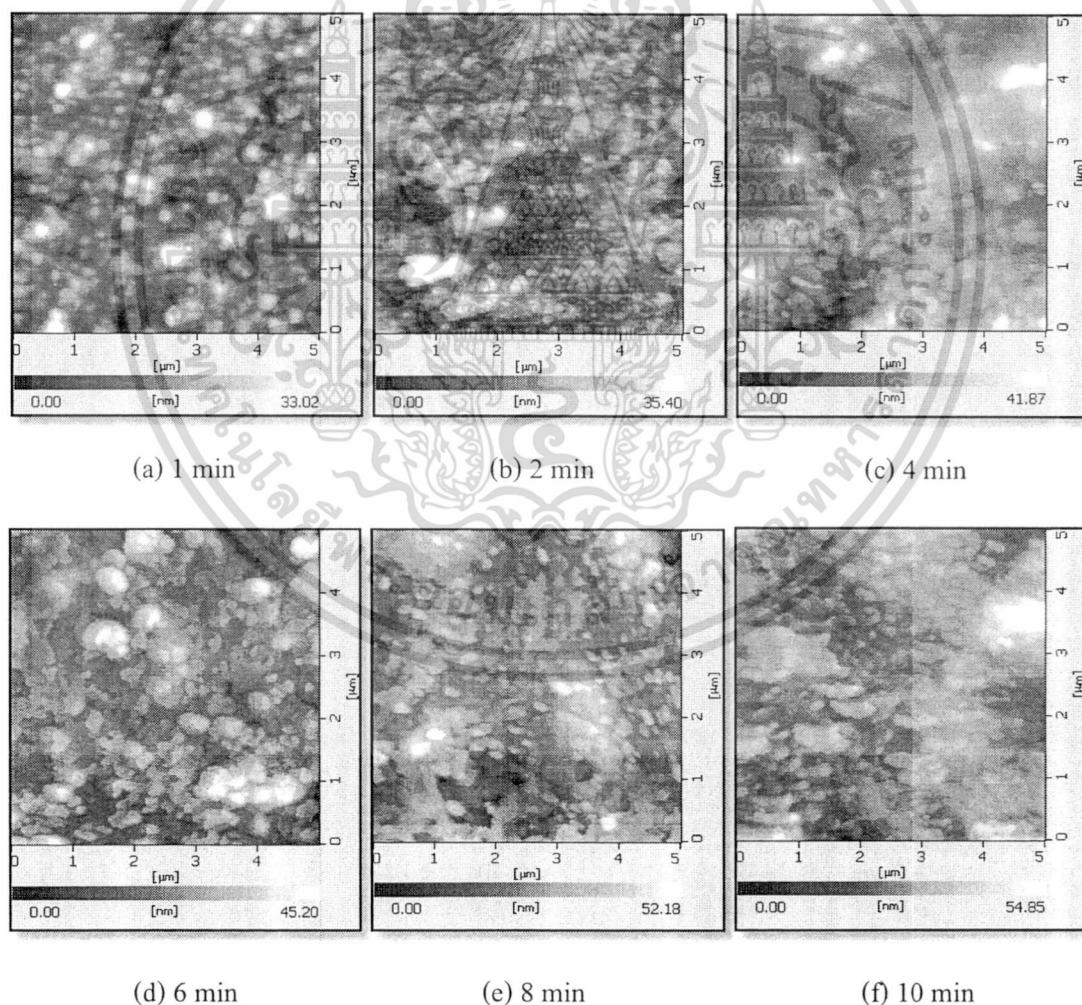


รูปที่ 4.15 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.15 พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยมียอดการเลี้ยวเบนที่มุม 38.2, 44.3, 64.4 และ 77.4 องศา ตามลำดับ ซึ่งตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนที่ (111), (200), (220) และ (311) ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าเป็นระนาบการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนเงินที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (Cubic structure) และจากกราฟจะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินมากขึ้น จะทำให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้น ซึ่งจากรูปเส้นกราฟ 4.15(a) ใช้เวลาในการเตรียมฟิล์มบางเท่ากับ 10 นาที และกราฟมีความเข้มของพีคมากที่สุด นั่นคือมีความเป็นผลึกมากที่สุด เนื่องมาจากเมื่อใช้เวลาในการพ่นสารนานมาก ก็จะทำให้สารมาทับถมที่ฐานรองรับเป็นจำนวนมาก การกระจายตัวของผลึกจะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เมื่อวัดการเลี้ยวเบนของผลึก ฟิล์มจะมีความเป็นผลึกมากที่สุด จากนั้นเมื่อทำการลดเวลาในการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินน้อยลง ความเป็นผลึกของฟิล์มจะลดลง ตามลำดับ

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



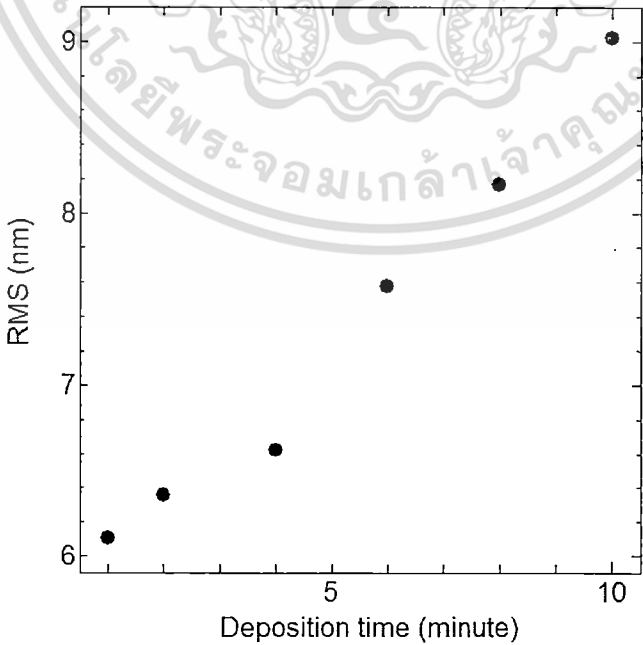
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจากจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม โดยเวลาในการเตรียมฟิล์มต่างๆ กัน (a)-(f) แสดงภาพถ่ายด้านบนพื้นผิว (top view)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มต่างๆ กับ ค่าความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์ม

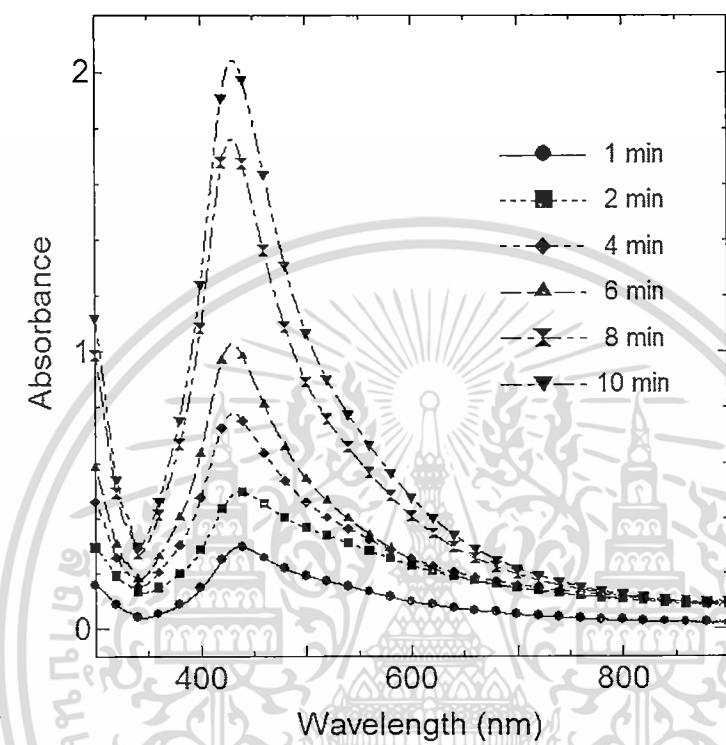
เวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม(นาที)	ค่าความขรุขระของพื้นผิว(นาโนเมตร)
1.00	6.10
2.00	6.35
4.00	6.62
6.00	7.57
8.00	8.16
10.00	9.02



รูปที่ 4.17 ค่าของความขรุขระของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่โดยเวลาในการเตรียมฟิล์มต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เตรียมการปรับเวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์มเป็นเป็น 1,2,4,6,8 และ 10 นาที ตามลำดับ จะได้ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่เวลาในการเตรียมต่างๆ กัน

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

จากผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปเงื่อนไขที่ดีที่สุด ในการเลือกนำไปใช้ในการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ความชื้น ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระยะในการพ่นตั้งแต่ 10 – 150 มิลลิเมตรโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 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

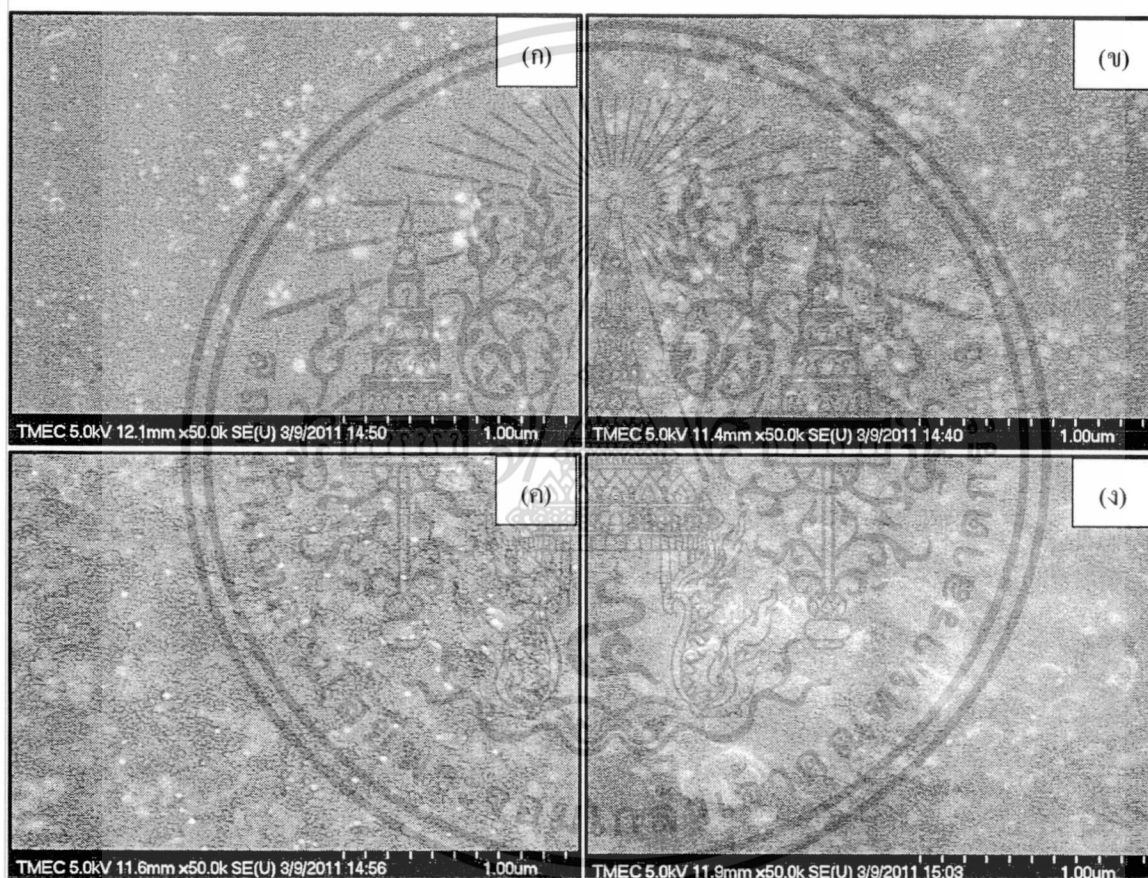
จากข้อมูลในตารางตัวแปรที่นำมาพิจารณาคือเงื่อนไขที่ระยะ 40 – 60 มิลลิเมตร (เนื่องจากที่ระยะห่าง 70 มิลลิเมตรขึ้นไปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟิล์ม > 130 มิลลิเมตร) ในเบื้องต้นพบว่าที่ระยะห่าง 40 มิลลิเมตร ลักษณะของเส้นผ่านศูนย์กลางของวงสเปร์ยมีขนาดเหมาะสมและสามารถครอบคลุมพื้นที่ของหน้ากาก (mask) ที่ปกคลุมขั้วอินเตอร์ดิจิทพอดี้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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้น

4.2.1 ผลการตรวจสอบสมบัติพื้นผิวและความหนาของฟิล์มอนุภาคนาโนเงินที่เคลือบเป็นชั้นเซนเซอร์ความชื้น

ในการทดลองทำการพ่นอนุภาคนาโนเงินลงบนกระจกเพื่อทำการตรวจสอบสมบัติพื้นผิวและความหนาของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินซึ่งผลการทดลองทั้งหมดเป็นดังต่อไปนี้

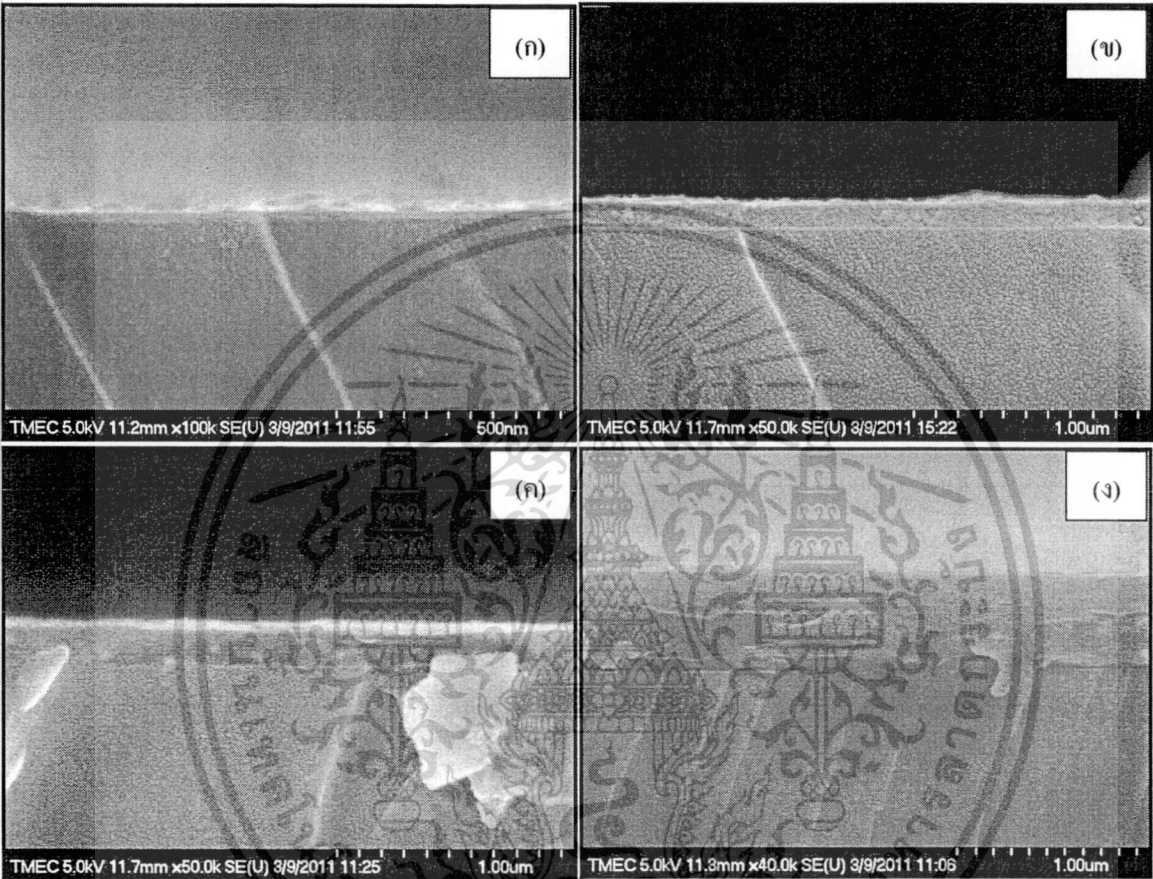


รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มอนุภาคนาโนเงินจากเครื่อง FE-SEM ที่ระยะห่างเท่ากับ 40

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

จากรูปที่ 4.19 พบว่ารูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด โดยรูปที่ 4.19(ก) ที่เวลาการเตรียมฟิล์ม 1 นาที สภาพพื้นผิวจะค่อนข้างเรียบและบาง และเมื่อทำการพ่นฟิล์มให้เวลานานขึ้นเป็น 5 นาที ดังรูป 4.19(ข) ฟิล์มจะมีความหนามากขึ้นและเริ่มมีความเป็นรูพรุน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการทับถมของอนุภาคนาโนเงินในขณะที่เมื่อเพิ่มเวลาในการปลูกฟิล์มเป็น 10 นาที ดังรูป 4.19(ค) พบว่าเนื้อฟิล์มจะจับเริ่มจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และเมื่อใช้เวลาในการเตรียมฟิล์ม เป็นเวลา 10 นาที 2 ครั้ง ดังรูป 4.19(ง) พบว่าฟิล์มจะมีความหนามากที่สุด และจะจับตัวกันเป็นกลุ่ม ก้อนใหญ่ มีความขรุขระของพื้นผิวมาก



รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินที่ระยะในการเตรียมฟิล์ม 40 มิลลิเมตร มีความหนาของชั้นฟิล์มเป็นเป็นดังตารางที่ 4.6

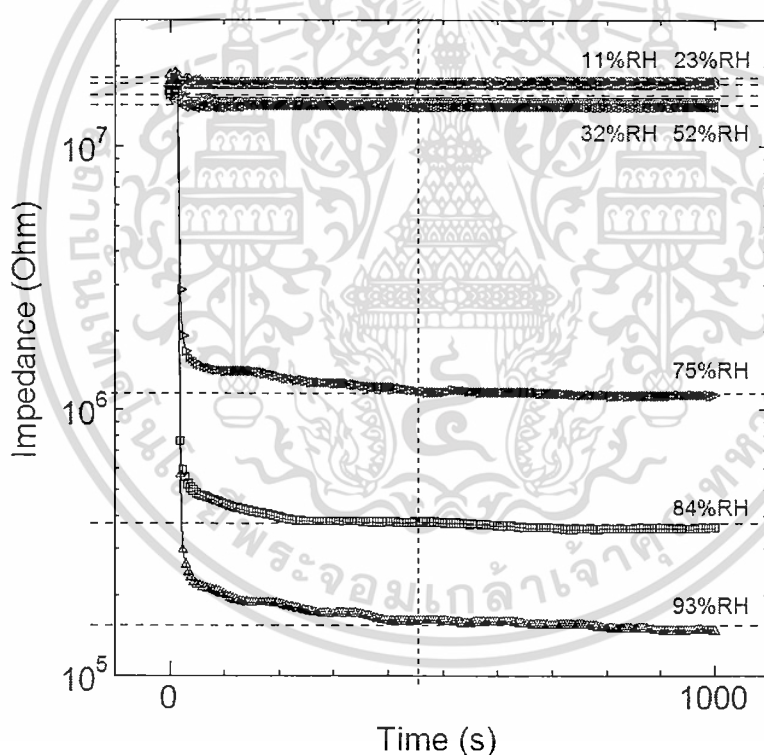
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มต่างๆ กับ ค่าความหนาของชั้นฟิล์มอนุภาคนาโนเงิน

เวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม (นาที)		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

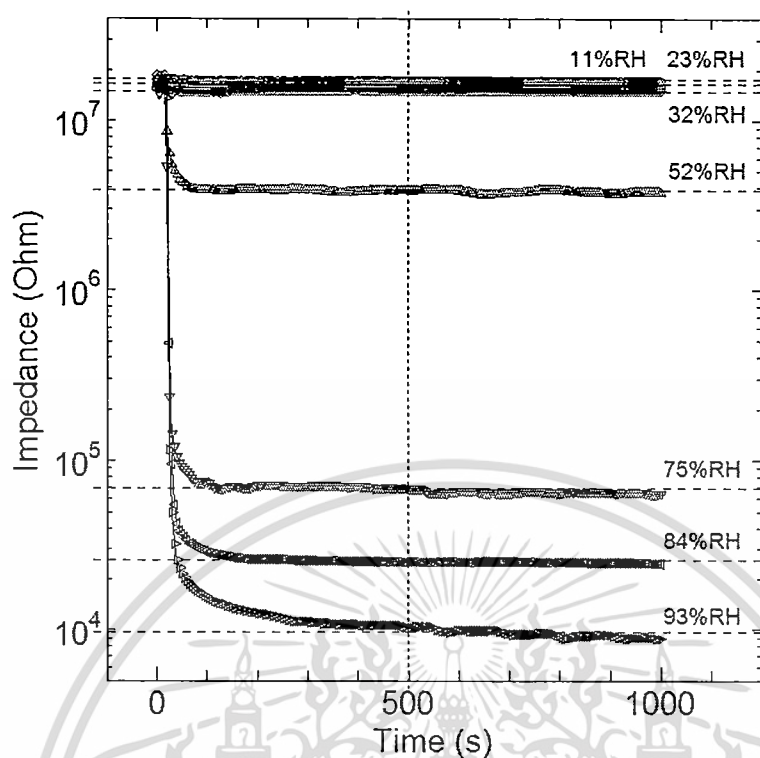
4.2.2 ผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อความชื้น

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 และจากนั้นก็ให้นำเซนเซอร์ไปจุ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ โดยจะทำการวัดเป็นเวลา 1000 วินาที และเก็บค่าความสัมพันธ์ของเวลาและความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ซึ่งผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อเซนเซอร์ความชื้นเป็นดังต่อไปนี้

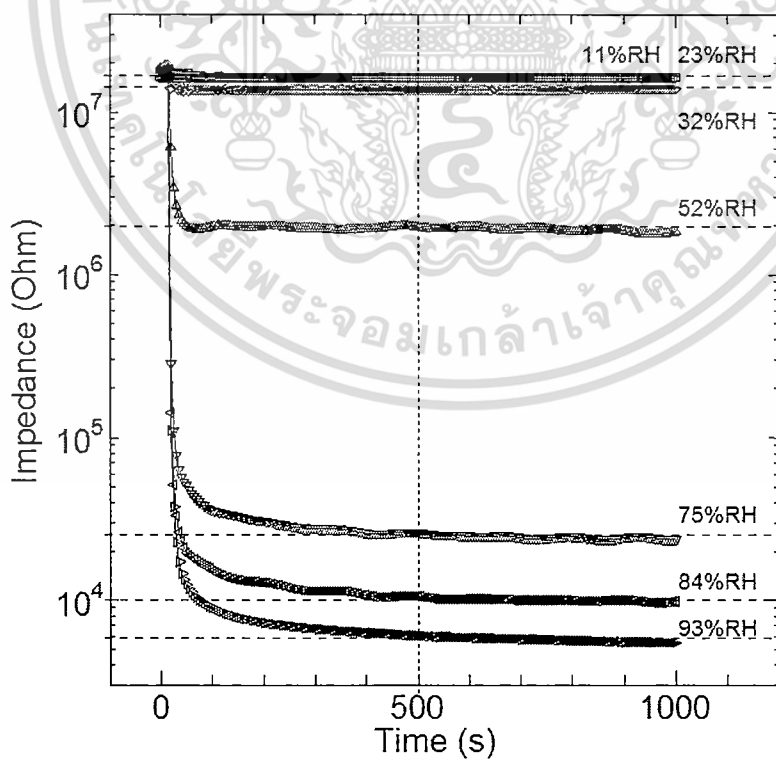
4.2.2.1 ผลการวัดค่าการตอบสนองต่อความชื้น



รูปที่ 4.21 การตอบสนองของเซนเซอร์ความชื้นที่ใช้เวลาพันสารเคลือบฟิล์ม 1 นาที

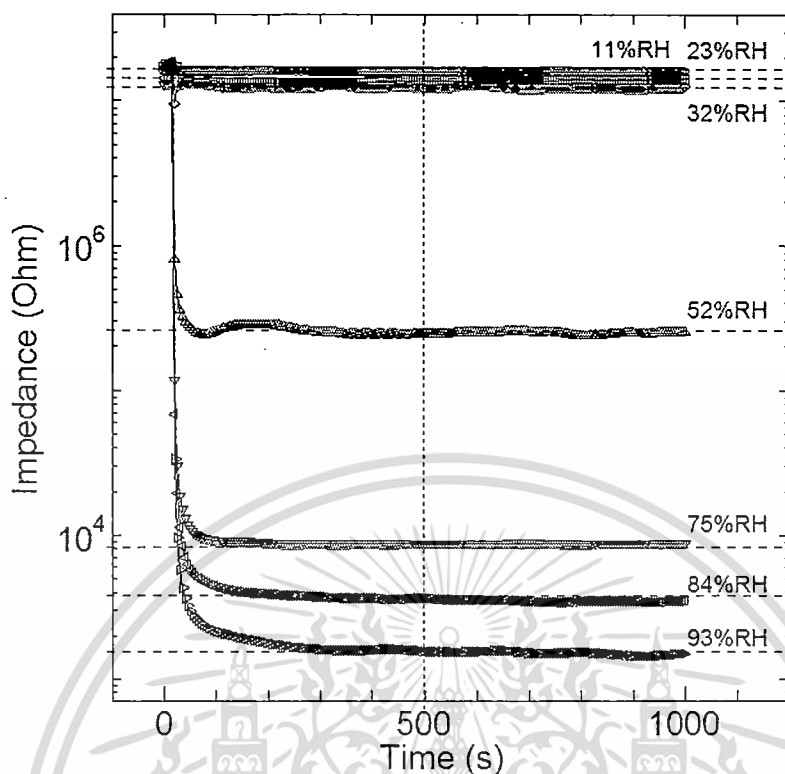


รูปที่ 4.22 การตอบสนองของเซนเซอร์ความชื้นที่ใช้เวลาพันสารเคลือบฟิล์ม 5 นาที



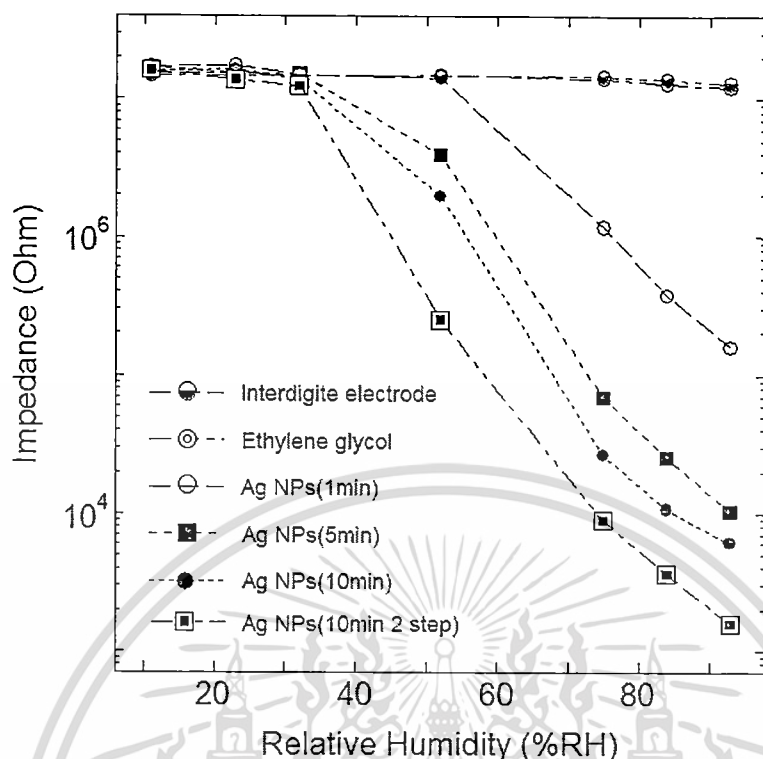
รูปที่ 4.23 การตอบสนองของเซนเซอร์ความชื้นที่ใช้เวลาพันสารเคลือบฟิล์ม 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 การตอบสนองของเซนเซอร์ความชื้นที่ใช้เวลาพ่นสารเคลือบฟิล์ม 10 นาที 2 ครั้ง

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



รูปที่ 4.25 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาเตรียมฟิล์มต่างกัน

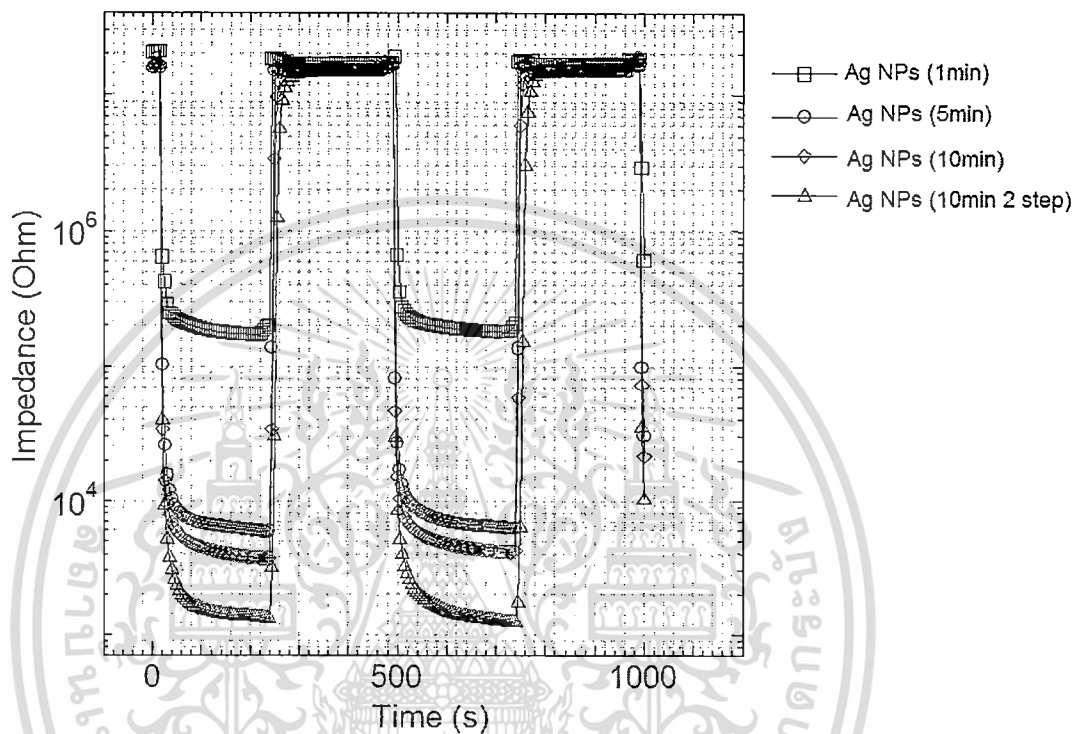
จากรูปที่ 4.25 เมื่อทำการตรวจการตอบสนองต่อเซนเซอร์วัดความชื้นใช้เวลาพ่นสารเคลือบฟิล์มเป็นเวลาต่างๆ พร้อมทั้งการตอบสนองต่อความชื้นของเอทีลิน ไกลคคอล และขั้วไฟฟ้า (Interdigitate) พบว่าเซนเซอร์มีการตอบสนองต่อความชื้นในช่วง 11%RH - 93%RH มีช่วงการตอบสนองที่ดี และมีระยะความต่างที่กว้าง (3 order of magnitude $\sim 10^3$) และจากกราฟพบว่า เมื่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้น จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณไอน้ำมากขึ้นทำให้ไอน้ำเกิดการเกาะตัวที่เซนเซอร์มากขึ้น โดยโมเลกุลของน้ำที่มีโครงสร้างแบบ H_2O จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน มาจับตัวกับอนุภาคนาโนเงิน (Ag) ต่อกันเป็นโครงข่ายตามลักษณะความชื้นที่มากขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซนเซอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น และนำไฟฟ้าได้ดี [37] นอกจากนี้ จะเห็นว่าการตอบสนองต่อความชื้นของเอทีลิน ไกลคคอล และขั้วไฟฟ้า (Interdigitate) มีค่า น้อยมาก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการตอบสนองของเอทีลิน ไกลคคอล และขั้วไฟฟ้าโดยตรงอย่างเดียว ไม่มีผลต่อการตอบสนองความชื้นของเซนเซอร์ที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนเงิน

4.2.2.2 ผลการวัดเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้น

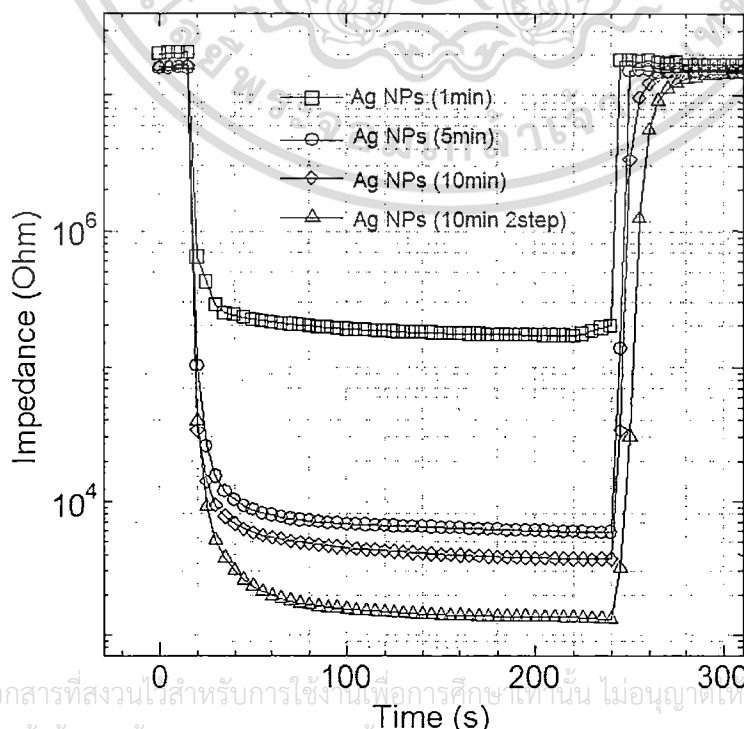
ในการทดลองจะใช้เซนเซอร์ที่ทำการพ่นเคลือบฟิล์มบางที่เงื่อนไขของระยะเวลาที่แตกต่างกันคือ 1, 5, 10 และ 20 นาที ตามลำดับ มาทำการวัดเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้น โดยในการทดลองจะทำการใช้ความชื้นสัมพัทธ์ที่น้อยสุด (11%RH) กับความชื้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมพัทธ์ที่มากที่สุด (93%RH) มาทำการตรวจสอบการตอบสนองเซนเซอร์แต่ละตัว โดยจะใช้เวลาการวัดทั้งหมดเป็น 1000 วินาที และในระหว่างการทดลองจะทำการเปลี่ยนขดความชื้นสลับกันทุก 250 วินาที และเก็บค่าความสัมพัทธ์ของเวลาและความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ซึ่งผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.26 – 4.27



รูปที่ 4.26 การตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นของเซนเซอร์



รูปที่ 4.27 การตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นของเซนเซอร์ในช่วงเวลา 300 วินาที

จากรูปที่ 4.26 – 4.27 พบว่าเซนเซอร์ทุกเงื่อนไขของเวลาเมื่อมีการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นที่ดี และจากรูปสามารถหาเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับและการคายความชื้นของเซนเซอร์แต่ละตัวได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 คุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้น

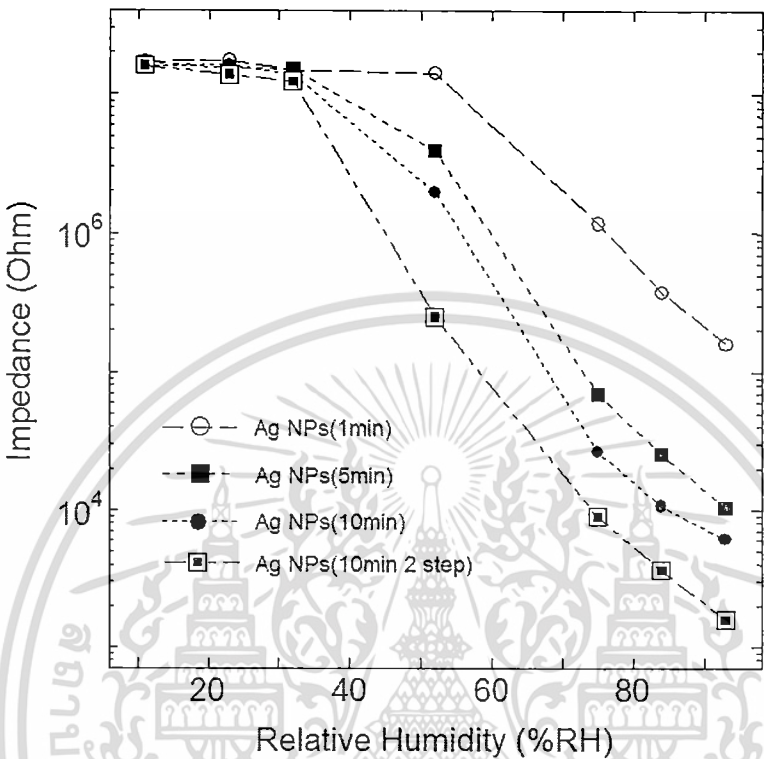
เซนเซอร์	เวลาในการดูดซับความชื้น(วินาที)	เวลาในการคายความชื้น(วินาที)
Ag NPs (1min)	4.00	2.00
Ag NPs (5min)	4.00	2.00
Ag NPs (10min)	4.00	15.00
Ag NPs (10min 2step)	4.00	34.00

จากตารางที่ 4.7 จะพบว่า เซนเซอร์ AgNPs ที่เวลาในการเตรียมฟิล์มเท่ากับ 1 นาที และ 5 นาที จะมีเวลาในการคายความชื้นที่ 2 วินาที โดยจะเห็นว่าเวลาในการคายความชื้นที่เงื่อนไขทั้งสองนี้ จะน้อยกว่าเวลาในการดูดซับความชื้น ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการในการทดลองขณะทำการวัด ใช้วิธีการสลับค่าความชื้นมาตรฐานระหว่างความชื้นที่ 11%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

4.2.2.3 ผลการวัดสภาพความไวในการตอบสนอง

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

ความสัมพันธ์ของเวลาและความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) แล้วคำนวณหาความไวในการตอบสนองต่อความชื้นได้จากรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ใช้เวลาพ่นสารเคลือบฟิล์มเป็นเวลาค้างๆ

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)	8.25x10 ⁵	2.46x10 ⁵	2.17x10 ⁵
Ag NPs (5min)	7.02x10 ⁵	2.48x10 ⁵	1.84x10 ⁵
Ag NPs (10min)	7.30x10 ⁵	2.30x10 ⁵	1.92x10 ⁵
Ag NPs (10min 2 step)	7.24x10 ⁵	2.03x10 ⁵	1.90x10 ⁵

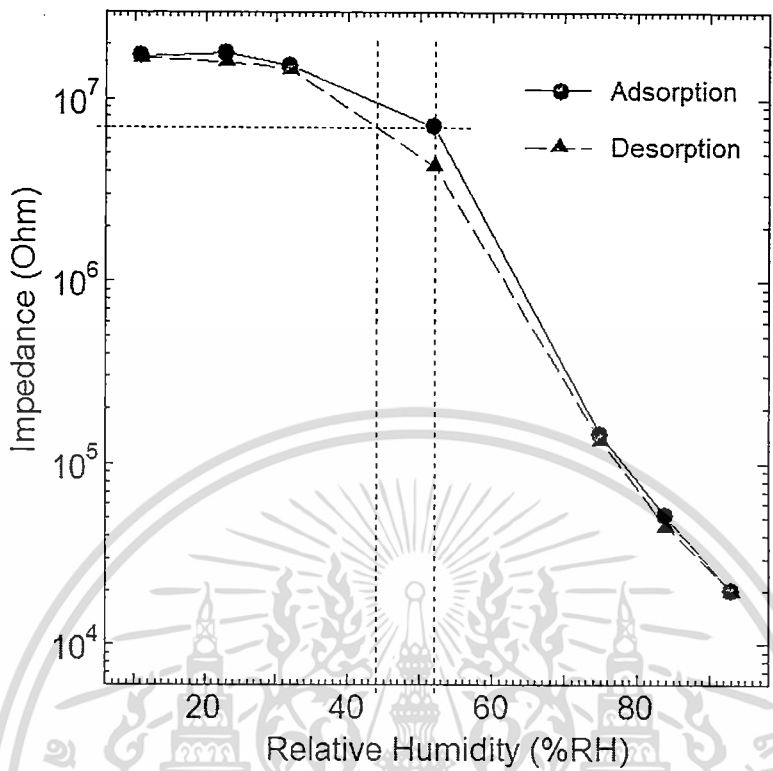
ตารางที่ 4.9 สภาพความไวของเซนเซอร์วัดความชื้น

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 ครั้ง จะมีค่าการตอบสนองต่อความชื้นในช่วง 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 พบว่าเซนเซอร์ที่ เวลาในการเตรียมเท่ากับ 5 นาที มีค่าสูงกว่า ซึ่งสามารถสรุปในเบื้องต้นได้ว่า เซนเซอร์ดังกล่าวเป็นเซนเซอร์ที่ดีที่สุดในการนำมาใช้งาน จากนั้นนำเซนเซอร์ดังกล่าวทำการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์ด้านอื่นๆ ต่อไป

4.2.3 ผลการตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้น

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

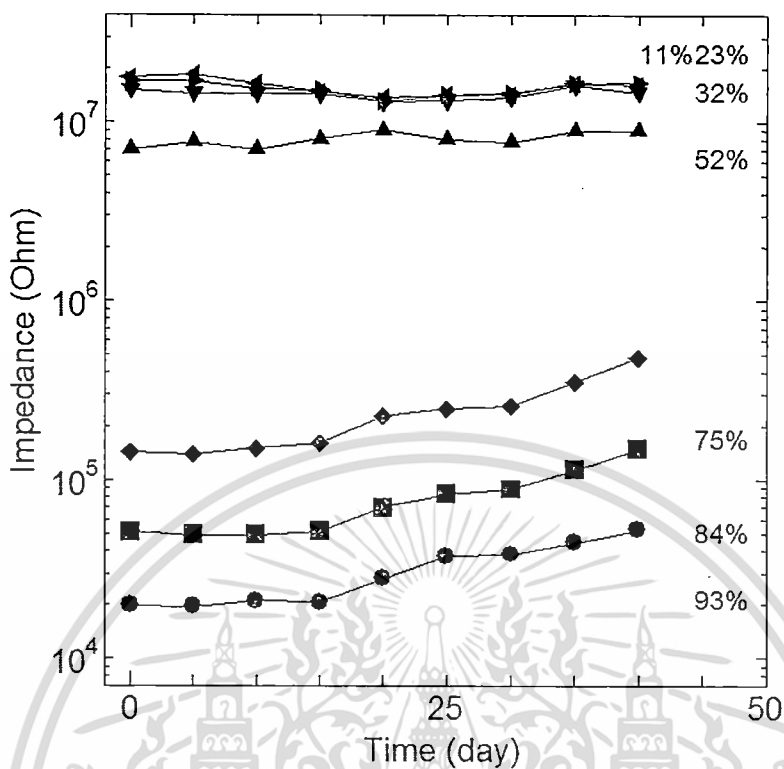


รูปที่ 4.29 การตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้น

จากรูปที่ 4.29 พบว่า การตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของการดูดซับและคายความชื้นของ เซนเซอร์ จะเกิดอิทธิพลที่มากที่สุดเท่ากับ 8%RH

4.2.4 ผลการตรวจสอบเสถียรภาพของเซนเซอร์

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



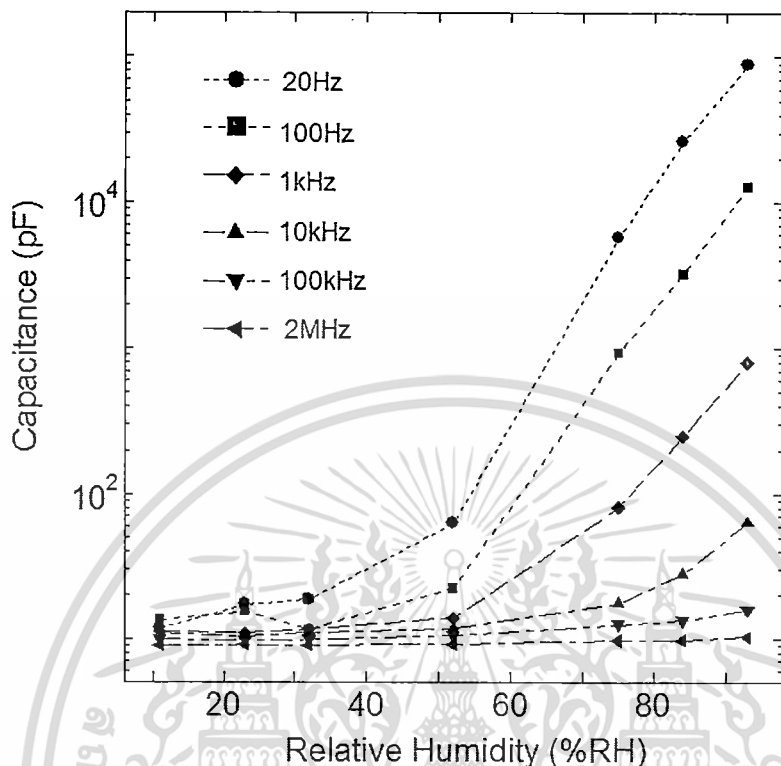
รูปที่ 4.30 การตรวจสอบเสถียรภาพของเซนเซอร์เมื่อเวลาผ่านไป 40 วัน

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]

4.2.5 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี

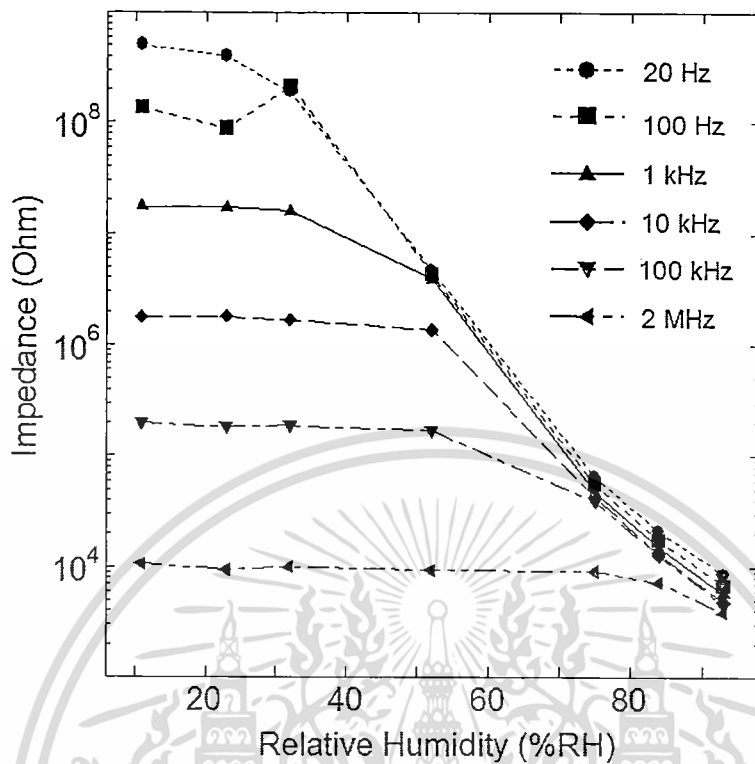
ในการทดลองจะทำการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่ความถี่ 20 Hz, 100 Hz, 1 kHz 10 kHz, 100 kHz และ 2 MHz ตามลำดับ และจะทำการศึกษาถึงวงจรสมมูล (equivalent circuit หรือ model) ของเซนเซอร์ โดยจะทำการวัดที่ความถี่สัมพัทธ์ค่าต่างๆและเก็บค่าความต้านทานเชิงซ้อน(Impedance) กับมุมในรูปเรเดียน (radian) และนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานเชิงซ้อนจินตภาพ กับความต้านทานเชิงซ้อน

จริง (-Zim & Zre) มาทำการเขียนกราฟหาแบบทางวงจรไฟฟ้าของเซนเซอร์นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ในกรณีความถี่แตกต่างกัน

สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางความจุไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 4.31 โดยที่เมื่อความชื้นเพิ่มสูงขึ้นความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีความชื้นต่ำ อธิบายได้โดยการที่ไอน้ำที่แทรกอยู่ในชั้นฟิล์มประพุดิตัวเปรียบได้กับการที่มีการเพิ่มของค่าไดอิเล็กตริก(การเพิ่มขึ้นของปริมาณไอน้ำ) ซึ่งโมเลกุลของน้ำถือว่าเป็นโมเลกุลที่มีอิเล็กตริกไดโพลโมเมนต์(electric dipole moment) แบบถาวร (หรือเป็นโมเลกุลที่มีขั้วทางไฟฟ้า, polar) และเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจะพยายามจัดเรียงตัวกันให้อยู่ในแนวของสนามไฟฟ้างั้นนั้นเมื่อมีการจัดเรียงตัวกันจะทำให้มีการประพุดิตัวเป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งเมื่อมีปริมาณไอน้ำมากขึ้นความจุไฟฟ้างกล่าวว่าย่อมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และผลของความถี่ในกรณีความถี่สูงค่าความจุไฟฟ้างกล่าวเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับกรณีของความถี่ต่ำนั้นหมายถึง ความถี่ที่สูงมากมีผลทำให้การจัดเรียงตัวของโมเลกุลน้ำดังกล่าวไม่สามารถจัดเรียงตัวได้ดีถึงแม้ว่าจะมีปริมาณของไอน้ำมากก็ตาม[35]



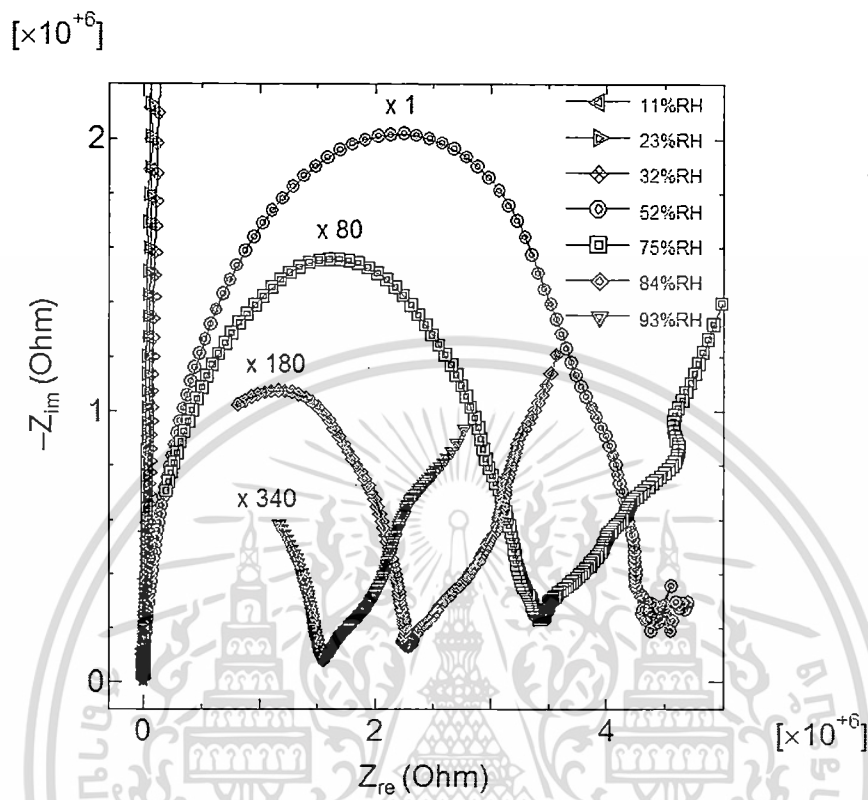
รูปที่ 4.32 ความต้านทานเชิงซ้อนที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ในกรณีความถี่แตกต่างกัน

สำหรับผลของความถี่ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจากรูปที่ 4.32 พบว่าที่ความถี่ต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ความถี่สูง อันเนื่องมาจากผลของโพลาไรเซชันของโมเลกุลของน้ำ โดยสามารถอธิบายได้จากกรณีของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าข้างต้น โดยผลจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าและความต้านทานเชิงซ้อนจากรูปที่ 4.31 และ 4.32 สามารถสรุปได้ว่า ปรากฏการณ์ไดอิเล็กตริก (Dielectric Phenomenon) จะเกิดขึ้นน้อยมากหรือไม่ปรากฏขึ้นเลยในกรณีที่สนามไฟฟ้ามีความถี่สูงๆ[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 ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ได้ถึงรูปแบบทางวงจรไฟฟ้าของเซนเซอร์ได้ จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่าความต้านทานเชิงซ้อนเกิดได้จากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานส่วนจริง $R(f)$ และส่วนจินตภาพ $jX(f)$ ซึ่งหมายถึงค่าของความต้านทาน(Resistance)

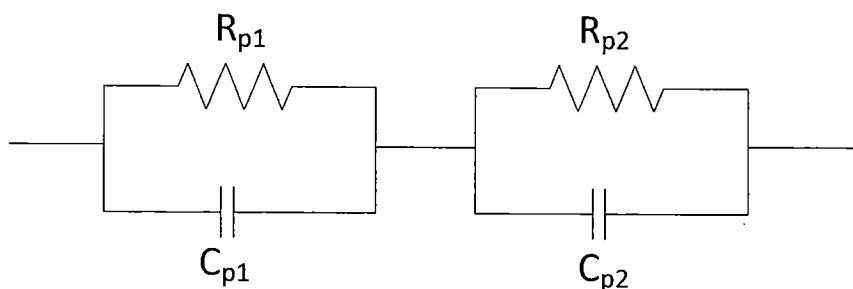
และค่าของความจุไฟฟ้า(Capacitance) แสดงได้ดังสมการ 4.1 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z(f) = R(f) + jX(f) \tag{4.1}$$



รูปที่ 4.33 การวิเคราะห์คุณลักษณะวงจรด้วยวิธีคอมเพล็กซ์อิมพีแดนซ์ (Complex Impedance)

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



รูปที่ 4.34 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซนเซอร์ความชื้น

ในเบื้องต้นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า อธิบายได้จาก วงจรขนานระหว่างค่าความต้านทาน R_{p1} (Resistance) และค่าความจุไฟฟ้า C_{p1} (Capacitance) ที่เกิดจากบริเวณรอยต่อของชั้นฟิล์มอนุภาคนาโนเงินกับขั้วไฟฟ้า(Electrode contact) ต่ออยู่กับวงจรขนานระหว่างค่าความต้านทาน R_{p2} และค่าความจุไฟฟ้า C_{p2} ซึ่งแสดงถึงบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคนาโนเงิน(Intergranular contact) ดังแสดงในสมการที่ 4.2-4.5

$$Z_{RP1//CP1} = \left(\frac{R_{p1}}{1 + \omega^2 C_{p1}^2 R_{p1}^2} - j \frac{\omega C_{p1} R_{p1}}{1 + \omega^2 C_{p1}^2 R_{p1}^2} \right) \quad (4.2)$$

$$Z_{RP2//CP2} = \left(\frac{R_{p2}}{1 + \omega^2 C_{p2}^2 R_{p2}^2} - j \frac{\omega C_{p2} R_{p2}}{1 + \omega^2 C_{p2}^2 R_{p2}^2} \right) \quad (4.3)$$

$$Z_{Total} = Z_{RP1//CP1} + Z_{RP2//CP2} \quad (4.4)$$

$$= \left(\frac{R_{p1}}{1 + \omega^2 C_{p1}^2 R_{p1}^2} - j \frac{\omega C_{p1} R_{p1}}{1 + \omega^2 C_{p1}^2 R_{p1}^2} \right) + \left(\frac{R_{p2}}{1 + \omega^2 C_{p2}^2 R_{p2}^2} - j \frac{\omega C_{p2} R_{p2}}{1 + \omega^2 C_{p2}^2 R_{p2}^2} \right) \quad (4.5)$$

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินสามารถเตรียมได้โดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต โดยผลของการปรับศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยและละอองฝอยแบบสมบรูณ์ พบว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้สารแตกตัวและแตกตัวเป็นละอองฝอยแบบสมบรูณ์ก็จะมีค่ามากขึ้น และเมื่อทำการวิเคราะห์เงื่อนไขการกระจายตัวของสารเมื่อปรับศักย์ไฟฟ้า พบว่าเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของวงสเปรย์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงสเปรย์มีค่าลดน้อยลง เนื่องจากที่ระยะห่างจุดนั้น มีค่าสนามไฟฟ้าที่สูงมากจนทำให้สามารถบังคับลำสเปรย์ของสารให้บีบลง จนทำให้ขนาดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงสเปรย์ลดลงและเมื่อทำการวิเคราะห์เงื่อนไขระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับ และเงื่อนไขของเวลาในการเตรียมฟิล์มบางพบว่า ฟิล์มบางที่เตรียมได้จากอนุภาคนาโนเงินมีสมบัติทางโครงสร้างเป็นแบบ face-center cubic และมีระนาบการเลี้ยวเบนอยู่ที่ระนาบ (111), (200), (311) และ (222) ตามลำดับ และเมื่อทำการตรวจสอบสมบัติทางพื้นผิวของฟิล์ม พบว่า พื้นผิวของฟิล์มบางมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอเมื่อทำการตรวจสอบสมบัติทางด้านแสงของฟิล์มบาง พบว่าฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินมีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 436 nm เป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance)

การประดิษฐ์เซนเซอร์วัดความชื้นนั้นสามารถเตรียมได้จากเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มที่ระยะเวลา 1, 5, 10 และ 10 นาที 2 ครั้ง โดยความหนาของชั้นฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงิน เท่ากับ 21.33 ± 1.15 , 109.67 ± 6.11 , 188.00 ± 8.48 และ 549.00 ± 28.93 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยที่ระยะเวลาเตรียมฟิล์มเท่ากับ 10 นาที 2 ครั้ง มีความหนาของฟิล์มมากกว่าปกติจากฟิล์มที่ระยะเวลาอื่นๆ เกิดจากมีฝุ่นละออง หรือสารปนเปื้อนในอากาศตกลงมาทับถมที่บนชั้นฟิล์มระหว่างพักจากการพ่นฟิล์มขึ้นแรก และเมื่อทำการวิเคราะห์การตอบสนองต่อการวัดความชื้น พบว่า เซนเซอร์มีการตอบสนองต่อความชื้นในช่วง 11%RH - 93%RH มีช่วงการตอบสนองที่ดี และมีระยะความต่างที่กว้าง (3 order of magnitude $\sim 10^3$) โดยเมื่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้น จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณไอน้ำมากขึ้นทำให้ไอน้ำเกิดการเกาะตัวที่เซนเซอร์มากขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของเซนเซอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น และเมื่อทำการวิเคราะห์เวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับ และคายความชื้น พบว่า เซนเซอร์มีการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นที่ดี โดยมีเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับเป็น 4 วินาที ในทุกเซนเซอร์ และเวลาในการคายความชื้นของเซนเซอร์แต่ละตัวได้เป็น 2, 2, 15 และ 34 วินาที สภาพความไวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตอบสนองต่อความชื้นเท่ากับ 2.17×10^5 , 1.84×10^5 , 1.92×10^5 และ $1.90 \times 10^5 \text{ Ohm}/\%RH$ เมื่อวัดช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 11-93 %RH ของทุกเซนเซอร์ ตามลำดับ สำหรับการตรวจสอบลักษณะอิทธิพลของอุณหภูมิในการดูดซับและคายความชื้นของฟิล์มในเงื่อนไขของเวลาเท่ากับ 5 นาที พบว่ามีค่าอิทธิพลของอุณหภูมิที่ต่ำสุดเท่ากับ 8%RH และจากการตรวจสอบเสถียรภาพของเซนเซอร์พบว่าเสถียรภาพของเซนเซอร์ โดยเมื่อเวลาผ่านไป 40 วัน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนในระดับหนึ่ง ซึ่งเกิดมาจากอุปกรณ์เซนเซอร์เมื่อใช้งานไปสักระยะ จะมีสิ่งสกปรกจำพวกฝุ่นละอองที่มีอยู่ในอากาศมาเกาะที่บริเวณชั้นฟิล์มบางของเซนเซอร์ ทำให้เวลาวัดครั้งต่อไปเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น แนวทางการแก้ไขต่อไปอาจมีการใช้อุปกรณ์ห่อหุ้มโดยการใช้ตาข่ายสแตนเลสขนาดเล็กมากๆ (sieve mesh > 200 mesh) มาหุ้มหรือคลุมอุปกรณ์เซนเซอร์ดังกล่าว

สำหรับการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีพบว่า เมื่อความชื้นเพิ่มสูงขึ้นความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีความชื้นต่ำ ซึ่งเกิดจากไอน้ำที่แทรกอยู่ในชั้นฟิล์มประพจน์ตัวเปรียบได้กับการที่มีการเพิ่มของค่าไดโพลีอิเล็กทริก(การเพิ่มขึ้นของปริมาณไอน้ำ) ซึ่งโมเลกุลของน้ำถือว่าเป็นโมเลกุลที่มีอิเล็กทริกไดโพลโมเมนต์(electric dipole moment) แบบถาวร (หรือเป็นโมเลกุลที่มีขั้วทางไฟฟ้า, polar) และเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจะพยายามจัดเรียงตัวกันให้อยู่ในแนวของสนามไฟฟ้างั้นนั้นเมื่อมีการจัดเรียงตัวกันจะทำให้มีการประพจน์ตัวเป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งเมื่อมีปริมาณไอน้ำมากขึ้นความจุไฟฟ้าดังกล่าวย่อมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และผลของความถี่ในกรณีความถี่สูงค่าความจุไฟฟ้าดังกล่าวเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับกรณีของความถี่ต่ำนั่นหมายถึง ความถี่ที่สูงมากมีผลทำให้การจัดเรียงตัวของโมเลกุลน้ำดังกล่าวไม่สามารถจัดเรียงตัวได้ดีถึงแม้ว่าจะมีปริมาณของไอน้ำมากก็ตาม ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ในกรณีความถี่แตกต่างกัน พบว่าที่ความถี่ต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ความถี่สูง อันเนื่องมาจากผลของโพลาไรเซชันของโมเลกุลของน้ำ

สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะวงจรด้วยวิธีคอมเพล็กซ์อิมพีแดนซ์(Complex Impedance) พบว่า สามารถวิเคราะห์ได้ถึงรูปแบบทางวงจรไฟฟ้าของเซนเซอร์ได้ จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่าความต้านทานเชิงซ้อนเกิดได้จากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานส่วนจริง $R(f)$ และส่วนจินตภาพ $jX(f)$ ซึ่งหมายถึงค่าของความต้านทาน(Resistance) และค่าของความจุไฟฟ้า(Capacitance) และจาก Nyquist plot ทำให้ทราบถึงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซนเซอร์ความชื้นอนุภาคนาโนเงิน ซึ่งประกอบด้วย วงจรขนานระหว่างตัวต้านทาน R_{p1} และตัวเก็บประจุ C_{p1} ที่เกิดจากบริเวณรอยต่อของชั้นฟิล์มอนุภาคนาโนเงินกับขั้วไฟฟ้า(Electrode contact) ต่ออยู่กับและวงจรขนานระหว่างตัวต้านทาน R_{p2} และตัวเก็บประจุ C_{p2} ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงถึงบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคนาโนเงิน (Intergranular contact)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 SnO_2 - SiO_2 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] ทศยาภรณ์ ทิววงศ์. "การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำไฮบริดแบบหลายชั้นสารอินทรีย์คอปเปอร์ฟทาโลไซยาไนน์และสารอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์โดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน" 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 ขำคม. "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] จิตพงษ์ 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.

ผลงานวิจัยที่ได้รับตีพิมพ์

ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำเสนอผลงาน การประชุมวิชาการและซึ่งได้รับการตีพิมพ์ในระดับนานาชาติ โดยแยกเป็น

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ระดับนานาชาติ

1. Y. Boonnuk, A. Chanhom, B. Tunhoo, T. Thiawong and J. Nukeaw, "**Surface Morphology and Optical Property of Silver Nanoparticle Thin Film Prepared by Electrostatic Spray Deposition**", Advanced Materials Research, Vols. 93-94, 2010, pp. 149-152.

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติ

1. Y. Boonnuk, A. Chanhom, B. Tunhoo, T. Thiawong and J. Nukeaw, "**Deposition of Indium Tin Oxide Nanoparticle by the Ink-Jet Printing Technology**", Siam Physics Congress (SPC) 2009 Cha-am Phetchburi, Thailand.
2. Y. Boonnuk, A. Chanhom, P. Keeratithivakorn, S. Vanitparinyakul, S. Khantham, K. Onlaor, B. Tunhoo, T. Thiawong and J. Nukeaw, "**Surface Modification of Natural Rubber with ZnO nanoparticles**", Siam Physics Congress (SPC) 2009 Cha-am Phetchburi, Thailand.
3. Y. Boonnuk, A. Chanhom, B. Tunhoo, T. Thiawong and J. Nukeaw, "**Surface Morphology and Optical Property of Silver Nanoparticle Thin Film Prepared by Electrostatic Spray Deposition**", International Conference on Functionalized and Sensing Materials (FuSeM 2009) Bangkok, Thailand.

ประวัติผู้เขียน

นายยุวัฒน์ บุญหนัก เกิดเมื่อวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา จากโรงเรียนบางกะปิ ปีการศึกษา 2546 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2551



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้