

การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ชนิดพีด้วยกระบวนการ
Liquid Iodination เพื่อประยุกต์เป็นเทอร์โมอิเล็กทริกโปร่งแสง

PREPARATION OF P-TYPE COPPER IODIDE THIN FILM
BY LIQUID IODINATION PROCESS FOR TRANSPARENT
THERMOELECTRIC APPLICATION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2561
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PREPARATION OF P-TYPE COPPER IODIDE THIN FILM
BY LIQUID IODINATION PROCESS FOR TRANSPARENT
THERMOELECTRIC APPLICATION**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและท้องถิ่นของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2018

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ชนิดที่ด้วยกระบวนการ Liquid Iodination เพื่อประยุกต์เป็นเทอร์โมอิเล็กทริกโปร่งแสง
Preparation of p-Type Copper Iodide Thin Film by Liquid Iodination Process for Transparent Thermoelectric Application

ชื่อนักศึกษา นางสาวศุภธินี โยชน์สุวรรณ รหัสนักศึกษา 58051150

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกุกการะเวก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.พิศาล สุขวิสูตร ประธานกรรมการ	พิศาล สุขวิสูตร
รศ.วิจิต ศิริโชติ กรรมการ	
ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกุกการะเวก กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	อาภาภรณ์ สกุกการะเวก

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในหน่วยงานนั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ชนิดพีด้วยกระบวนการ Liquid Iodination เพื่อประยุกต์เป็นเทอร์โมอิเล็กทริกโปร่งแสง
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศุทธิณี โยชน์สุวรรณ รหัสนักศึกษา 58051150
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก

บทคัดย่อ

คอปเปอร์ไอโอไดด์เฟส γ เป็นเทอร์โมอิเล็กทริกโปร่งแสงชนิด p ที่น่าสนใจเนื่องจากมีค่าพลังงานแถบช่องว่างสูง ประมาณ 3 eV และการเกิดช่องว่างของทองแดงภายในทำให้วัสดุนี้เป็น p -type ในงานวิจัยนี้ฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ถูกเตรียมด้วยวิธี iodination โดยใช้ชั้นคอปเปอร์ที่มีความบางแซในสารละลายไอโอดีน ชั้นคอปเปอร์ที่มีความหนา 100 นาโนเมตร ถูกเคลือบบนกระจกสไลด์ด้วยเทคนิค DC magnetron sputtering เวลาในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกัน ตั้งแต่ 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บ่งบอกว่าฟิล์มทั้งหมดเกิดผลึกขนาด 111 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ zine blends ไม่แสดงเฟสอื่นๆ เช่น Cu, CuO บนสเปกตรัม XRD การส่งผ่านของฟิล์มบางทั้งหมดมีความโปร่งใสสูงกว่า 70% ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์สูงสุด 2.76×10^{-6} W/(m \cdot K 2) ที่อุณหภูมิ 55°C ได้จากฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธี iodination เป็นเวลา 1 นาที

คำสำคัญ : คอปเปอร์ไอโอไดด์ เทอร์โมอิเล็กทริกโปร่งแสง ฟิล์มบาง ไอโอดีนชั้น

Title	Preparation of p-Type Copper Iodide Thin Film by Liquid Iodination Process for Transparent Thermoelectric Application
Student	Miss Suttinee Yodsuwan Student ID 58051150
Degree	Bachelor of Science
Department	Physics
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2018
Advisor	Asst.Prof. Dr. Apaporn Sakulkalavek

Abstract

γ -CuI is a promising candidate for the p-type transparent thermoelectric due to its high energy bandgap $E_g \approx 3$ eV and intrinsically p-type conducting from copper vacancies presented in this material. In this work, CuI thin films have been prepared by iodination method using Cu thin layer immersed in solution of iodine. The Cu layer with thickness of 100 nm was deposited on a glass substrate using DC magnetron sputtering technique. Iodination time was varied from 1, 2, 3, 4 and 5 minutes at room temperature. The X-ray diffraction analysis reveals that all the films are polycrystalline with the (111) preferred orientation of the zinc blends structure. No other phases, such as Cu and CuO were identified in the XRD spectra. The transmittance for all thin films exhibits high transparency of more than 70%. The maximum power factor of $2.76 \times 10^{-6} \text{ W/(m}\cdot\text{K}^2)$ at 55°C was achieved for the CuI film prepared at iodination time of 1 min.

Keywords : Copper Iodide, Transparent Thermoelectric, Thin Films, Iodination

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่านดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สุกุลกระเวก อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดและเสนอแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้โครงการพิเศษฉบับนี้ ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ราชศักดิ์ ศักตานุภาพ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูลสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดเวลาการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณณรงค์ศักดิ์ โพธิ์โสภา ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยครั้งนี้ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ขอโน้มรำลึกถึงพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้ความสนใจและสนับสนุนในการศึกษาจนสามารถทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศุทธิณี โยชน์สุวรรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สมบัติของคอปเปอร์ไอโอไดต์.....	4
2.2 สเปคโตรริง (Sputtering)	5
2.3 กระบวนการ Iodination.....	8
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.5 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction).....	10
2.6 Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM).....	13
2.6.1 หลักการทำงานของเครื่อง FE-SEM.....	14
2.6.2 Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDS)	15
2.7 UV-VIS Spectrophotometer.....	16
2.7.1 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer.....	16
2.7.2 หลักการทำงานของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer.....	17
2.8 เครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Seebeck Coefficient/Electric Resistance Measurement System, Zem-3)	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	22
3.1 ขั้นตอนการเตรียมกระจกสไลด์.....	22
3.2 ขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี Sputtering.....	24
3.3 ขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี Liquid lodination.....	28
3.4 ขั้นตอนการใช้เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer.....	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	32
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction ; XRD)	32
4.2 การวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวด้วยเทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)	35
4.3 การวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)	39
4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเทคนิค UV-VIS Spectrophotometer.....	40
4.5 การวิเคราะห์ด้วย Seebeck Coefficient/Electric Resistance Measurement System (Zem-3)	42
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	46
เอกสารอ้างอิง.....	47
ภาคผนวก.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	3
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าขนาดผลึกที่คำนวณได้จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ ฟิล์มคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาต่าง.....	33
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d) พารามิเตอร์ของโครงผลึก (a) และความเครียด (ϵ) ที่คำนวณได้จากข้อมูล XRD ของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI).....	34
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความหนาของฟิล์มคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI).....	37
ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) ที่ใช้เวลาในการจุ่ม 1-5 นาที.....	39
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าข้อมูลต่างๆที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ด้วยกระบวนการ Iodination.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกคอปเปอร์ไอโอไดต์	4
รูปที่ 2.2 กระบวนการเคลือบเคลือบฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์ริง.....	5
รูปที่ 2.3 กระบวนการ dc หรือ rf sputtering.....	6
รูปที่ 2.4 กระบวนการ dc magnetron sputtering.....	7
รูปที่ 2.5 กระบวนการ reactive sputtering.....	7
รูปที่ 2.6 แบบจำลองสำหรับกฎของแบร์ริ่งก์.....	10
รูปที่ 2.7 Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) รุ่น JSM-7001F.....	13
รูปที่ 2.8 เครื่อง EDS ของบริษัท Oxford รุ่น INCA PentaFETx3.....	15
รูปที่ 2.9 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer.....	16
รูปที่ 2.10 หลักการทำงานของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer แบบลำแสงคู่.....	18
รูปที่ 2.11 ไตอะแกรมหลักการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค.....	19
รูปที่ 2.12 การแบ่งแรงดันไฟฟ้า.....	20
รูปที่ 3.1 ทำความสะอาดกระจกด้วยน้ำยาล้างจาน.....	22
รูปที่ 3.2 (a) สารอะซิโตน (b) เครื่องอัลตราโซนิค.....	23
รูปที่ 3.3 (a) เครื่องบีบลม (b) เครื่องควบคุม.....	24
รูปที่ 3.4 การเปิดฝา Chamber ของห้องสุญญากาศ.....	25
รูปที่ 3.5 การดูดอากาศออกจากระบบ.....	25
รูปที่ 3.6 การทำให้ระบบเกิดความร้อน.....	26
รูปที่ 3.7 การใช้ High vacuum pump ในการช่วยดูดอากาศ.....	26
รูปที่ 3.8 การ pre-sputtering.....	27
รูปที่ 3.9 การเตรียมสารละลายไอโอดีน.....	38
รูปที่ 3.10 นำฟิล์มคอปเปอร์จุ่มในสารละลายไอโอดีน.....	28
รูปที่ 3.11 ล้างฟิล์มด้วยน้ำกลั่น.....	29
รูปที่ 3.12 ใส่ฟิล์มและกระจกสไลด์เพื่อทำการวัด.....	30
รูปที่ 3.13 แสดงสเปกตรัมของฟิล์มที่วัดได้จากเทคนิค UV-VIS Spectrophotometer.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4.1	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มคอปเปอร์ไอโอไดด์ (γ - CuI) โดยใช้เวลาในการจุ่มต่างกัน ที่เวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที.....	32
รูปที่ 4.2	แสดงภาพ FE-SEM ของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ (γ - CuI)	37
รูปที่ 4.3	แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการจุ่มกับความหนาของฟิล์ม.....	38
รูปที่ 4.4	แสดงองค์ประกอบธาตุภายในฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ที่วัดด้วยเทคนิค EDS.....	39
รูปที่ 4.5	แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ (γ - CuI) ที่ใช้เวลาในการจุ่ม 1-5 นาที.....	40
รูปที่ 4.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน (Photon energy) กับ $(\alpha h\nu)^2$ ของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ (γ - CuI) ที่ใช้เวลาในการจุ่ม 1-5 นาที.....	41
รูปที่ 4.7	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการจุ่มกับค่าการนำไฟฟ้าและค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์.....	43
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยากับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้ชีวิตในปัจจุบันของมนุษย์มีความต้องการใช้ไฟฟ้ามากขึ้น ทั้งในครัวเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม พลังงานไฟฟ้าที่นำไปใช้ส่วนใหญ่ได้มาจากพลังงานถ่านหินซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป จึงได้มีการแสวงหาพลังงานทางเลือกใหม่เพื่อเพิ่มกำลังในการผลิตพลังงานไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางที่สะอาดและมีอย่างไม่จำกัด จึงเป็นตัวเลือกที่ดีในการนำมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์และวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโปร่งแสง เซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีข้อจำกัดในการดูดกลืนแสงได้แค่ช่วงวิสิเบิล (Visible) แต่วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโปร่งแสงสามารถดูดกลืนแสงได้ทั้งในช่วงวิสิเบิลและช่วงยูวี (UV) ซึ่งประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับค่า ZT (Thermoelectric figure of merit) เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ (T) สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient, S) สภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity, σ) และสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity, K) ของสารดังนี้

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{K} \quad (1.1)$$

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีสารกึ่งตัวนำชนิด n (n -type) และสารกึ่งตัวนำชนิด p (p -type) จากงานวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสนใจกับการพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด n (n -type) เนื่องจากมีค่า ZT ที่สูงและมีความโปร่งแสงมาก ทำให้ขาดการพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด p (p -type) คอปเปอร์ไอโอไดต์ (CuI) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p (p -type) ที่มีประสิทธิภาพเทอร์โมอิเล็กทริกสูง มีความโปร่งแสง มีโครงสร้าง 3 เฟส โดยเฟส γ มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง สามารถนำไปใช้กับแหล่งความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ และไอโอดีนยังเป็นธาตุหนักซึ่งช่วยลดค่าการนำความร้อนของวัสดุ ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดี และประกอบด้วยธาตุที่ไม่เป็นพิษจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้ได้มีความสนใจในการสังเคราะห์ฟิล์มบางชนิด p คอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) ที่เตรียมด้วยวิธี Liquid Iodination เป็นวิธีที่ใหม่ เตรียมง่าย ต้นทุนต่ำ ซึ่งผลที่คาดว่าจะได้รับจะสร้างองค์ความรู้ใหม่เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มบางชนิดที่คอปเปอร์ไอโอไดด์เฟส แกรมมา (γ -CuI) เพื่อประยุกต์เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโปร่งแสง
- 2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาในกระบวนการ Liquid lodination ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติเชิงแสงและสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก ของฟิล์มบางชนิดที่คอปเปอร์ไอโอไดด์ (γ -CuI)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมฟิล์มทองแดง (Cu) ด้วยวิธี DC Magnetron Sputtering ที่เวลาเคลือบ 4 นาที
- 2) เตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์เฟสแกรมมา (γ -CuI) โดยนำฟิล์มทองแดง ไปเคลือบด้วยวิธี Liquid lodination เป็นเวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที
- 3) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD (X-ray Diffraction)
- 4) วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)
- 5) วิเคราะห์สมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ (γ -CuI) ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer
- 6) วิเคราะห์สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของฟิล์มด้วยเครื่อง Seebeck Coefficient/Electric Resistance Measurement System (Zem-3)
- 7) วิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางชนิดที่คอปเปอร์ไอโอไดด์ (γ -CuI) เพื่อประยุกต์เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโปร่งแสงและนำไฟฟ้าได้
- 2) สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากการหาเงื่อนไขตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติเชิงแสง สมบัติการนำไฟฟ้า และประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริก มาอธิบายเชิงวิทยาศาสตร์ได้อย่างมีเหตุผล
- 3) สร้างองค์ความรู้ใหม่เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) ที่เตรียมด้วยวิธี Liquid Iodination
- ขั้นตอนที่ 2 ทดลองเคลือบฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม
- ขั้นตอนที่ 3 ทำการเคลือบฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) ด้วยเงื่อนไขที่กำหนด
- ขั้นตอนที่ 4 นำฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติ
- ขั้นตอนที่ 5 สรุปผลของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI)
- ขั้นตอนที่ 6 เขียนเล่มรายงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา (2561-2562)								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย
ขั้นตอนที่ 1									
ขั้นตอนที่ 2									
ขั้นตอนที่ 3									
ขั้นตอนที่ 4									
ขั้นตอนที่ 5									
ขั้นตอนที่ 6									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

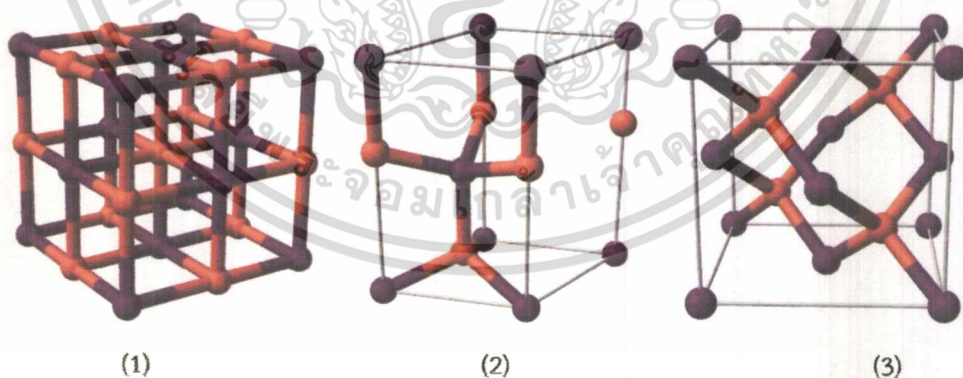
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยจะแบ่งเนื้อหาออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกจะเป็นคุณสมบัติของฟิล์มคอปเปอร์ไอโอไดด์ (CuI) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ส่วนที่สองจะเป็นทฤษฎีและหลักการของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 สมบัติของคอปเปอร์ไอโอไดด์ (CuI)

คอปเปอร์ไอโอไดด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การมีธาตุหนักอย่างไอโอดีนทำให้มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ คอปเปอร์ไอโอไดด์มีการนำไฟฟ้าชนิด p (p-type) และมีค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (E_g) เท่ากับ 3.1 eV โครงสร้างทางเคมีของผลึกคอปเปอร์ไอโอไดด์มี 3 เฟส ได้แก่ α , β และ γ ซึ่งทั้ง 3 เฟสต่างกันที่เสถียรภาพทางความร้อน โดยเฟส α -CuI เสถียรที่อุณหภูมิมากกว่า 673 K มีโครงสร้างทางเคมีแบบ rock salt structure เฟส β -CuI เสถียรที่อุณหภูมิตั้งแต่ 643 - 673 K มีโครงสร้างทางเคมีแบบ wurtzite structure และเฟส γ -CuI จะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 643 K หรือที่อุณหภูมิต้อง มีโครงสร้างทางเคมีเป็นแบบ zinc blende structure[1]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกคอปเปอร์ไอโอไดด์

(1) rock salt structure

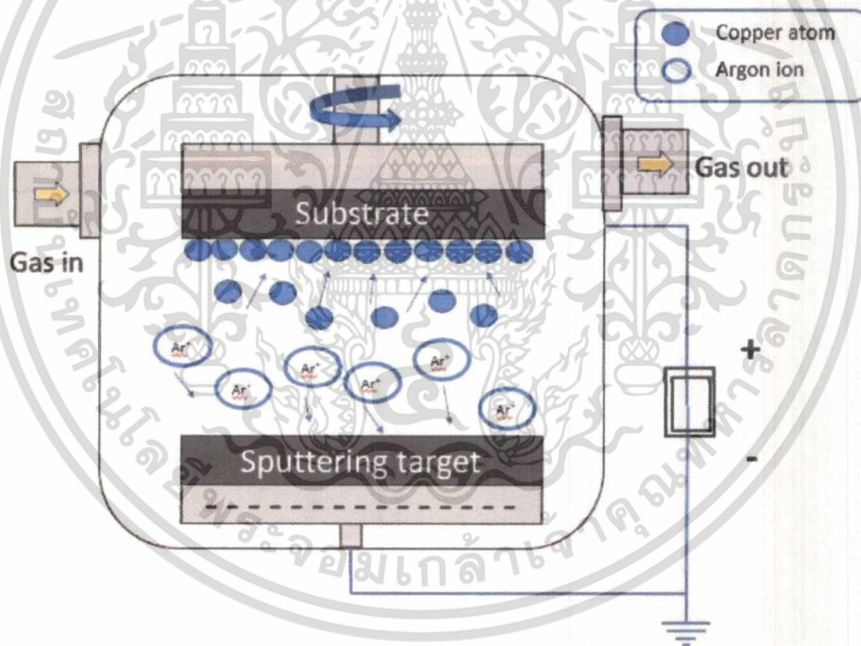
(2) wurtzite structure

(3) zinc blende structure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สปีดเตอริง (Sputtering)

การสปีดเตอริง เป็นกระบวนการเคลือบฟิล์มบางโดยการให้อนุภาคพลังงานสูงไปชนกับเป้าของสารตั้งต้น (target) ทำให้อนุภาคของสารตั้งต้นถูกปลดปล่อยแล้วเกิดการฟุ้งกระจายในสภาพอะตอมเดี่ยวตกลงบนผิววัสดุรองรับ (substrate) แสดงในรูปที่ 2.2 การสปีดเตอริงต้องประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 3 อย่าง ได้แก่ (1) เป้าของสารตั้งต้น (2) อนุภาคพลังงานสูง และ (3) การผลิตอนุภาคพลังงานสูงอย่างต่อเนื่อง การเคลือบสารด้วยวิธีสปีดเตอริงสามารถทำได้ภายใต้สภาวะสุญญากาศและอาศัยการดิสชาร์จไฟฟ้าทำให้ก๊าซเฉื่อยเกิดการแตกตัวเป็นไอออน สนามไฟฟ้าจะเร่งให้ไอออนบวกของก๊าซเฉื่อยมีพลังงานสูงขึ้นภายใต้ความต่างศักย์ 400-10,000 โวลต์ เข้าชนกับเป้าของสารตั้งต้นซึ่งต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า อนุภาคของสารตั้งต้นจะหลุดออกมาเนื่องจากการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมกับอนุภาคพลังงานสูงที่ฟุ้งชนเหล่านั้นแล้วตกบนพื้นผิวของวัสดุรองรับอย่างหนาแน่นทำให้การยึดเกาะมีความคงทนสูงไม่หลุดออกไปได้ง่าย

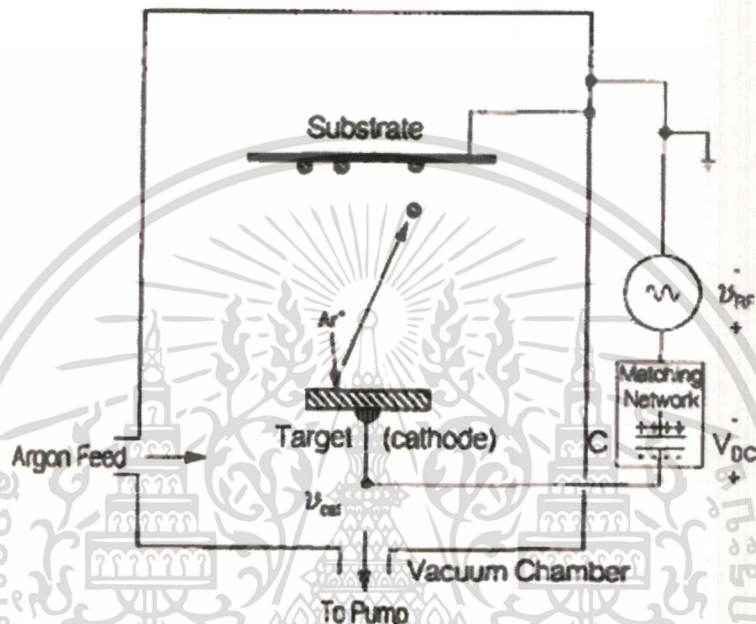


รูปที่ 2.2 กระบวนการเคลือบเคลือบฟิล์มบางแบบสปีดเตอริง

เทคนิคสปีดเตอริงสามารถใช้ในการเคลือบวัสดุที่เป็นโลหะหรือโลหะก็ได้ อีกทั้งใช้อุณหภูมิในการเคลือบไม่สูงมากและฟิล์มที่เคลือบได้มีความสม่ำเสมอบนวัสดุรองรับถือเป็นข้อดีของการเคลือบฟิล์มบางแบบสปีดเตอริง[2] ในปัจจุบันการเคลือบแบบสปีดเตอริงสามารถแบ่งออกได้หลายวิธีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

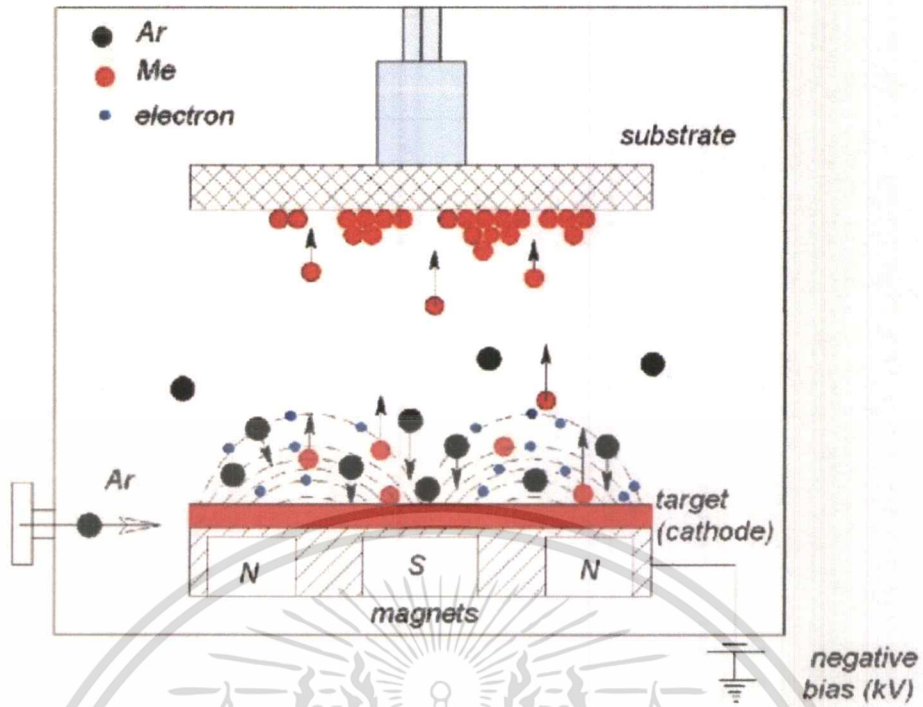
1.อาร์เอฟและดีซีสปีดเตอริง (RF and DC Sputtering) เป็นวิธีสปีดเตอริงแบบเบื้องต้น โดยทั่วไปแล้วจะเกิดการชนกันอย่างแรงของไอออนในเป้าที่มีพลังงานสูงมากซึ่งไอออนเหล่านี้เกิดจาก gas plasma ในสถานะความถี่แบบ rf และ dc กระบวนการ dc sputtering สามารถใช้กับเป้าที่เป็นทั้งตัวนำไฟฟ้าและฉนวนไฟฟ้าได้แต่กระบวนการ rf sputtering ส่วนใหญ่จะใช้เป้าที่เป็นฉนวนเพื่อให้ อิเล็กตรอนและประจุบวกสามารถชนกันบนผิวของเป้าได้



รูปที่ 2.3 กระบวนการ dc หรือ rf sputtering[3]

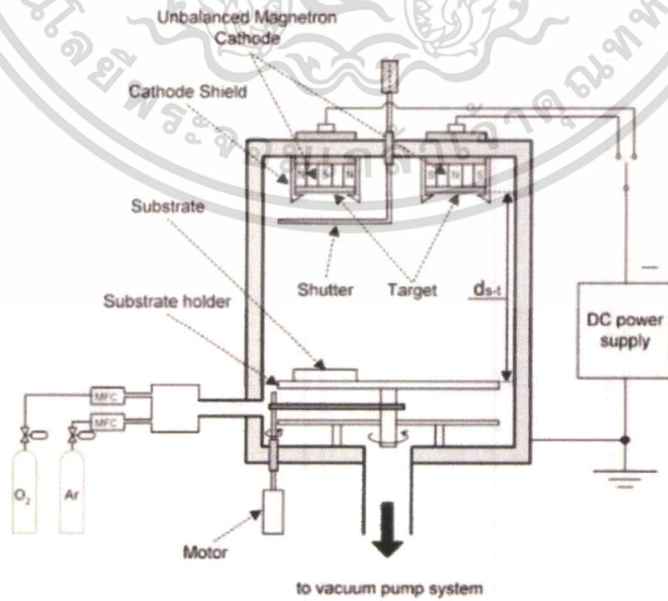
2.แมกนีตรอนสปีดเตอริง (Magnetron Sputtering) เป็นวิธีการสร้างสนามแม่เหล็กบนหน้าเป้าสปีดเตอริงเพื่อเพิ่มเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ทำให้การไถ่รวาดิสวาร์จและอัตราการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของแก๊สสปีดเตอริงเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 กระบวนการ dc magnetron sputtering

3.รีแอคทีฟสเปตเตอริง (Reactive Sputtering) เป็นวิธีการเพิ่มแก๊สไวกรียา เช่นออกซิเจนหรือไนโตรเจนเข้าไปในระบบ เพื่อสามารถสร้างฟิล์มบางสารประกอบตระกูลออกไซด์และไนไตรด์ได้[4]



รูปที่ 2.5 กระบวนการ reactive sputtering[5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอัปเดตอยู่เสมอ ขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กระบวนการ Iodination

เป็นกระบวนการทดแทนหรือเพิ่มอะตอมของไอโอดีนในปฏิกิริยาเคมี เช่น การเติมหรือแทนที่หมู่ฟังก์ชันหรืออะตอมไฮโดรเจนในโครงสร้างสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยไอโอดีน [6] การเติมไอโอดีนเข้าที่ตำแหน่งพันธะคู่ของกรดไขมัน เป็นต้น โดยกระบวนการ Iodination สามารถแบ่งออกเป็น 3. กระบวนการดังนี้ 1. Solid Iodination เป็นกระบวนการที่ใช้ไอโอดีนที่มีสถานะเป็นของแข็งในการทำปฏิกิริยา 2. Vapor Iodination ใช้ไอโอดีนที่มีสถานะเป็นไอในการทำปฏิกิริยา 3. Liquid Iodination เป็นกระบวนการที่ใช้สารละลายไอโอดีนในการทำปฏิกิริยา

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยต่างๆที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่นำมาศึกษามีหลากหลายงานวิจัย ทั้งในเรื่องของฟิล์มคอปเปอร์ไอโอไดด์และกระบวนการ Liquid Iodination ดังนี้

C. Yang, D. Souchay, M. Knei, M. Bogner, H.M. Wei, M. Lorenz, O. Oeckler, G. Benstetter, Y.Q. Fu & M. Grundmann¹ ได้ทำการพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี โพร่งแสงและยืดหยุ่นได้ โดยเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์บนวัสดุ PET พบว่าฟิล์มมีการนำความร้อนที่ต่ำ เกิดจากการรวมกันของธาตุหนักไอโอดีนและการแพร่กระจายของโฟนอนที่แข็งแกร่ง ทำให้มีค่าประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก เท่ากับ 0.21 ที่ 300K มีค่าสูงเมื่อเทียบกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโพร่งใสประเภทพี ตัวอื่นๆ มีความโพร่งใสและมีการส่งผ่านสูงถึง 60-85% ในช่วงสเปกตรัมที่มองเห็นได้ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกได้หลายอย่าง เช่น อุปกรณ์สำหรับสวมใส่ที่ใช้ความร้อนจากร่างกายมนุษย์ หน้าต่างเทอร์โมอิเล็กทริกและการทำความเย็นบนชิป เป็นต้น

Naoomi Yamada, Ryuichiro Ino, and Yoshihiko Ninomiya ได้เตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ชนิดพี เฟสแกรมมา ด้วยวิธี Solid Iodination เพื่อพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี โดยเกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างฟิล์มบาง Cu_3N กับไอโอดีนที่มีสถานะเป็นของแข็งที่ $25^{\circ}C$ พบว่าฟิล์มมีความโพร่งใสสูง มีค่าการส่งผ่านมากกว่า 75% ในย่านตามมองเห็น เป็นวิธีที่ดีกว่าการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ด้วยวิธี Vapor Iodination ซึ่งฟิล์มที่ได้มีความไม่สม่ำเสมอ และมีความโพร่งแสงน้อยกว่า การศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าฟิล์มบางคอปเปอร์ สามารถนำไปประดิษฐ์บนพื้นผิวพลาสติกที่มีความทนทานต่อความร้อนต่ำซึ่งอาจช่วยเพิ่มความก้าวหน้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โพร่งใสที่มีความยืดหยุ่น เป็นต้น

ในส่วน of โครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางโพร่งแสงนำไฟฟ้าคอปเปอร์ไอโอไดด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (Y-CuI) ชนิดพีด้วยกระบวนการ Liquid Iodination เนื่องจากวิธี Vapor Iodination ฟิล์มที่ได้มีไม่สม่ำเสมอ และมีความโพร่งแสงน้อยกว่า การศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าฟิล์มบางคอปเปอร์ สามารถนำไป

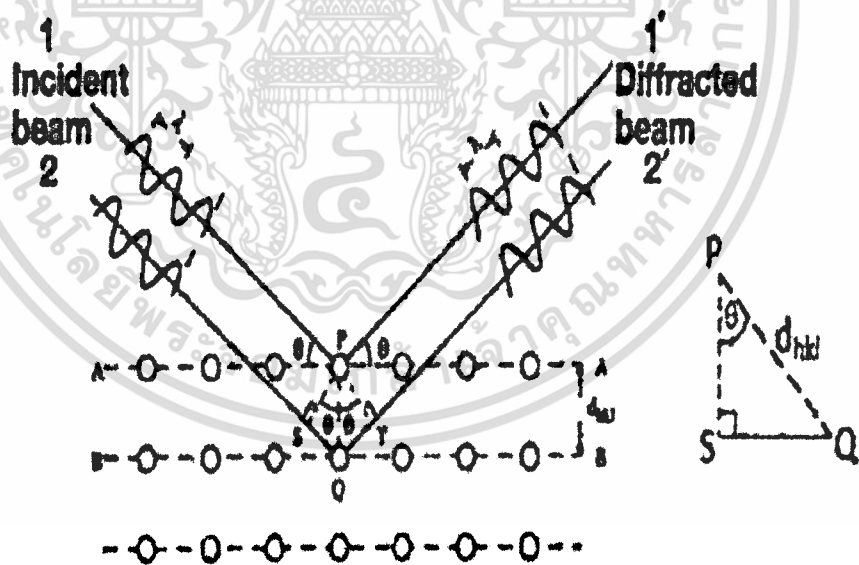
ความโปร่งใสน้อยและฟิล์มมีพื้นผิวที่ขรุขระ ส่วนวิธี Solid lodination ไอโอดีนที่เป็นของแข็ง เป็นอันตรายต่อผู้วิจัยรวมทั้งสิ่งแวดล้อม และยังมีต้นทุนสูง ทำให้เกิดโครงการพิเศษนี้ขึ้นและได้นำหลักการและเครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ มาใช้ในศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติการส่องผ่านแสง และสมบัติทางไฟฟ้า เทคนิคที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ เทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction), เทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) เทคนิค UV-VIS Spectrophotometer และเทคนิค Seebeck Coefficient/Electric Resistance Measurement System (ZEM-3) ซึ่งมีหลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction)

X-ray Diffraction (XRD) เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึกและความสมบูรณ์ของผลึกของสารตัวอย่าง เป็นต้น โดยอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาที่ค่ามุมต่าง ๆ ซึ่งมุมที่แตกต่างกันออกไปจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึกของสารตัวอย่าง X-ray Diffraction เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึกและความสมบูรณ์ของผลึกของสารตัวอย่าง เป็นต้น โดยอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาที่ค่ามุมต่าง ๆ ซึ่งมุมที่แตกต่างกันออกไปจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึกของสารตัวอย่าง ในปี ค.ศ.1912 W.H Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เราสามารถมองผลึกว่าประกอบด้วยชั้น หรือระนาบของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ ถ้าคลื่นที่สะท้อนออกไปจะมีความเข้มสูง หากผลต่างทางเดิน (path difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงกันมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ[8]



รูปที่ 2.6 แบบจำลองสำหรับกฎของแบร็กก์

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าระยะทางที่คลื่นทั้ง 2 ขบวนเดินทางไปตกกระทบระนาบ A และ B แล้ว

สะท้อนออกมามีความแตกต่างระหว่างระยะเดินทางเท่ากับ $SQ + QT$ โดยที่ระยะ SQ และ QT มีค่าเท่ากัน สามารถหาระยะของ SQ ได้จากความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติของสามเหลี่ยม PSQ ซึ่งจะได้ค่าไม่ต่างกันสักนิดๆ ทั้งสน อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้

เท่ากับ $d_{hkl}\sin\theta$ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างระยะเดินทางของคลื่นทั้ง 2 ขบวนจึงมีค่าเท่ากับ $2d_{hkl}\sin\theta$ ทำให้ได้สมการที่ใช้อธิบายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยโครงสร้างผลึก เรียกว่า "Bragg 's Law"

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2-1)$$

โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

n คือ ลำดับของการสะท้อน

d คือ ระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก

θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อน

สมการที่ 2-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึก

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2+k^2+l^2}{a^2} \quad (2-2)$$

โดยที่ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

h, k, l คือ ดัชนีมิลเลอร์

a คือ ค่าคงที่แลตทิซ

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะแสดงในรูปของกราฟที่บันทึกระหว่างค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่วัดได้ (intensity) กับมุมที่ทำกรวัด (2θ) โดยข้อมูลจากกราฟเช่นตำแหน่งและรูปร่าง สามารถนำมาวิเคราะห์หาข้อมูลอื่น ๆ ได้เช่น ระยะห่างระหว่างระนาบของโครงสร้างผลึก พารามิเตอร์ของโครงผลึก และขนาดของผลึก เป็นต้น จากสมการ Scherrer สามารถคำนวณขนาดของผลึกได้ดังนี้

$$D = \frac{K\lambda}{B\cos\theta} \quad (2-3)$$

โดยที่ D คือ ขนาดของผลึก

K คือ ค่าคงที่ Debye-Scherrer เท่ากับ 0.9

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ เท่ากับ 0.15406 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
B คือ ความกว้างที่สูงครึ่งหนึ่งของพีคหลัก (FWHM)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์กับระนาบ

นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ยังสามารถนำมาใช้ในการหาค่าความเครียดของฟิล์มบางโดยใช้สมการในการคำนวณดังนี้

$$\varepsilon = \frac{(a-a_0)}{a_0} \times 100\% \quad (2-4)$$

โดย ε คือ ความเครียดของฟิล์ม

a คือ ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกของฟิล์ม

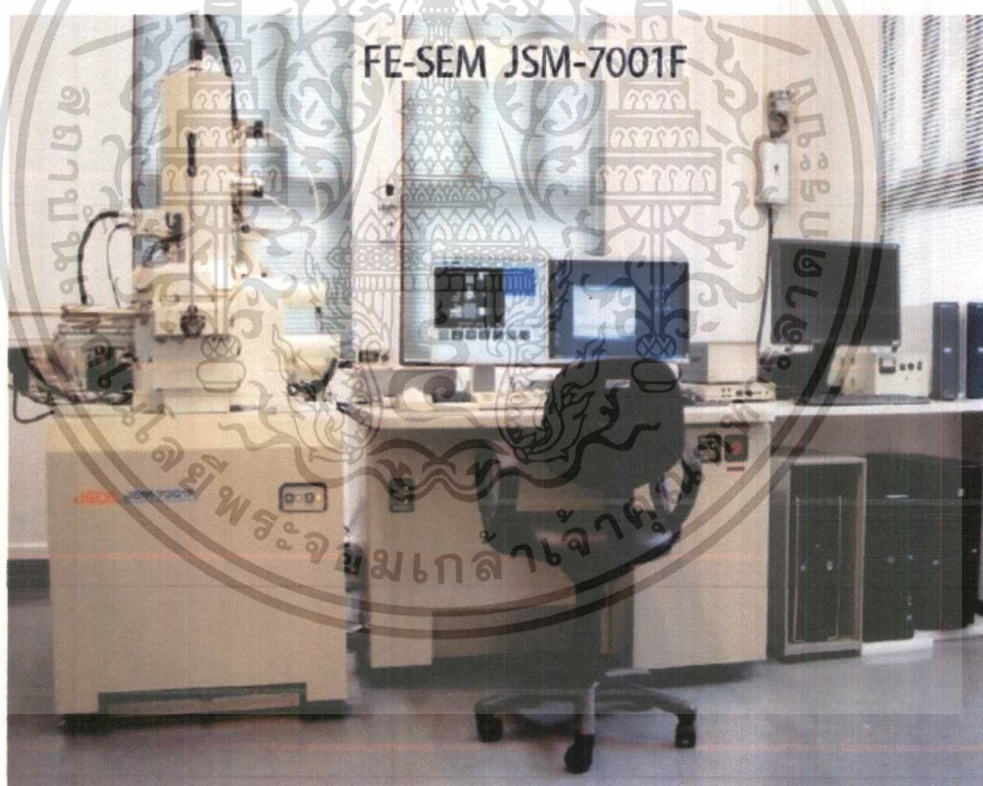
a_0 คือ ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกของฟิล์มที่ไม่มี ความเครียด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)

Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง ชนิดฟิลด์อิมิสชัน เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึง 2,000,000 เท่า ทำให้สามารถตรวจวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว ขนาด รูปร่างของอนุภาค และลักษณะการกระจายของเฟสในโครงสร้างระดับจุลภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้ง FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือหัววัดอื่น ๆ เพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป เช่น อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer ; EDS) เพื่อศึกษาชนิด ปริมาณและการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุ อุปกรณ์วิเคราะห์การเรียงตัวของผลึกโดยใช้สัญญาณจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Electron Backscatter Diffraction ; EBSD) และชุดอุปกรณ์ควบคุมลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้เขียนลวดลายขนาดเล็กลงบนชิ้นงาน (Electron Beam Lithography) เป็นต้น



รูปที่ 2.7 Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) รุ่น JSM-7001F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 หลักการทำงานของเครื่อง FE-SEM

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนชนิด Field Emission Electron Gun ทำงานโดยการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าแรงสูงไหลผ่าน filament เป็นพิเศษและขั้วแอโนด (anode) มี 2 ขั้วเรียงตัวซ้อนกันทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้ระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนซึ่งสามารถปรับขนาดของลำอิเล็กตรอนได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดควรปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลักจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวของชิ้นงาน ลำอิเล็กตรอนที่ถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

สัญญาณภาพที่ได้จาก FESEM รุ่น JSM-7001F แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของภาพที่ได้ จากหัววัดที่ต่างกัน ได้แก่ 1. Secondary Electron Image (SEI) 2. Backscattered Electron Image (BEI) และ 3. Transmission Electron Image (TEI)

1. Secondary Electron Image (SEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Secondary Electron Detector (SED) ที่รับเอาพลังงานจาก secondary electron ที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของชิ้นงาน เมื่อถูกลำอิเล็กตรอนชนมาประมวลผล ภาพที่ได้แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน (Morphology) ศักย์เร่งอิเล็กตรอนปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 0.5-30 kV ตามประเภทของชิ้นงาน สามารถเพิ่มกำลังขยายได้สูงถึงประมาณ 1,000,000 เท่า ภายใต้สภาวะการใช้งานที่เหมาะสม โดยทั่วไปการใช้งานปกติมักจะได้กำลังขยายถึงประมาณ 300,000 เท่า และยังสามารถเลือกโหมดป้องกันการสะสมของประจุบนชิ้นงานโดยใช้ความต่างศักย์ไปยังชิ้นงานเพื่อไล่ประจุสะสม

2. Backscattered Electron Image (BEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Backscattered Electron Detector (BED) ที่รับเอาพลังงานจาก Backscattered Electron ที่สะท้อนจากพื้นผิวของชิ้นงานมาประมวลผล โดยสัญญาณที่ได้ในแต่ละบริเวณจะแปรตามเลขอะตอม (atomic number, Z) ในเนื้อสารบริเวณนั้นๆ ภาพที่ได้จึงมีความสว่าง เข้มหรืออ่อนตามเลขอะตอมของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของเนื้อสาร (atomic contrast) BEI จึงสามารถแสดงภาพที่แยกแยะความแตกต่างของแต่ละบริเวณที่มีธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันได้ หัววัด BED เป็นแบบ retractable สั่งการให้เลื่อนเข้าไปยังตำแหน่งเหนือชิ้นงานในระหว่างใช้งานและเลื่อนออกเมื่อไม่ได้ใช้งานได้เพื่อความปลอดภัยของหัววัด

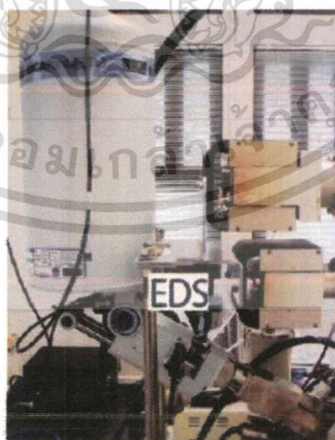
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Transmission Electron Image (TEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Transmission Electron Detector (TED) อาศัยหลักการของ Transmission Electron Microscope (TEM) ประยุกต์มาติดตั้งในระบบของ FESEM โดย TED จะอยู่ในตำแหน่งใต้ชิ้นงานเพื่อรับพลังงานจาก transmission electron ที่ทะลุผ่านชิ้นงาน ศักย์เร่งอิเล็กตรอนที่ตั้งไว้สำหรับระบบนี้เป็นค่าสูงสุดคือ 30 kV และชิ้นงานจะต้องเตรียมด้วยเครื่องมือเฉพาะเพื่อให้ชิ้นงานมีขนาดบางเพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านไปยัง TED ได้ ภาพที่ได้จะแสดงถึงรูปร่างโครงสร้างภายในของชิ้นงาน สามารถเพิ่มกำลังขยายได้ถึงประมาณ 300,000 เท่า

นอกจาก FESEM รุ่น JSM-7001F จะสามารถใช้เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่ให้ภาพตามหัววัดทั้งสามชนิด (SEI, BEI และ TEI) ที่ติดตั้งมาพร้อมกับเครื่องแล้ว เครื่องนี้ยังได้ติดตั้งชุดอุปกรณ์พิเศษเพิ่มเติมดังนี้

2.6.2 Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDS)

ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานที่ใช้หลักการเร่งให้อิเล็กตรอนมีพลังงานที่เหมาะสมและพุ่งเข้าชนชิ้นงานซึ่งประกอบด้วยอะตอมของธาตุที่อยู่ในสถานะพื้นเพื่อให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานวงในหลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนวงนอกจะคายพลังงานออกมาบางส่วนและเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานเข้าไปแทนที่อิเล็กตรอนวงในที่หลุดออกไป พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปรังสีเอกซ์และมีค่าเฉพาะตามธาตุนั้นๆ เมื่อวัดค่าพลังงานรังสีเอกซ์ด้วย EDS สามารถวิเคราะห์ได้ว่าชิ้นงานนี้ประกอบด้วยธาตุชนิดใดบ้าง



รูปที่ 2.8 เครื่อง EDS ของบริษัท Oxford รุ่น INCA PentaFETx3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 UV-VIS Spectrophotometer

เทคนิค UV-VIS Spectrophotometer เป็นเทคนิคที่ใช้คุณสมบัติการดูดกลืนแสงหรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลของสารเคมี มาใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ส่วนใหญ่ได้แก่สารอินทรีย์ (organic compound) สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) และสารอนินทรีย์ (inorganic compound) เมื่อแสงที่อยู่ในช่วงยูวี-วิสิเบิลถูกฉายผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสารตัวอย่าง สารนั้นจะดูดกลืนแสงเฉพาะบางช่วงพลังงานที่ถูกดูดกลืนไปนั้นจะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) ที่มีพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านทะลุออกมาเปรียบเทียบกับแสงที่ทะลุผ่านออกมาเมื่อไม่มีสารตัวอย่าง ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืน ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในการระบุชนิดของสารและปริมาณของสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้[9]



รูปที่ 2.9 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

2.7.1 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

1. ต้นกำเนิดแสง (Light Source) จะต้องมีการแผ่รังสีในช่วงที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา ต้นกำเนิดแสงในช่วง Ultra Violet นิยมใช้หลอดไฮโดรเจน หรือหลอดควิเทอเรียม ให้แสงที่มีความยาวคลื่น 185-375 นาโนเมตรและแหล่งกำเนิดแสงในช่วง Visible Light นิยมใช้หลอดทั้งสแตน หรือหลอดควอร์ตซ์-ฮาโลเจน ที่ให้ความยาวคลื่นในช่วง 320-2,500 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงพหุโครเมติกที่ออกมาจากต้นกำเนิดเป็นแสงโมโนโครเมติก (monochromatic light) ซึ่งเป็นแถบแสงแคบ ๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว มักจะใช้ฟิลเตอร์ ปริซึม หรือเกรตติง เป็นต้น

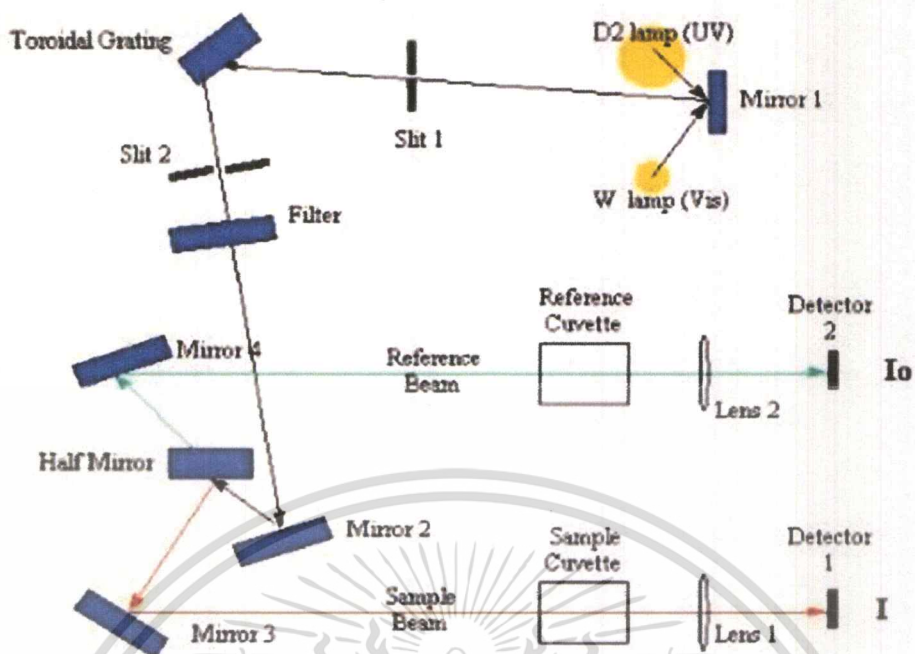
3. ส่วนที่วางสารตัวอย่างเพื่อวัด เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (sample cell) หรือบางครั้งเรียกว่า คิวเวทท์ (cuvettes) มีหลายรูปแบบ โดยทั่วไปเป็นเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกาและควอตซ์ ใช้ได้ทั้งในช่วง Ultra Violet และ Visible Light แต่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดาจะใช้ได้เฉพาะช่วง Visible Light เพราะเนื้อแก้วธรรมดาดูดกลืนแสงในช่วง Ultra Violet ได้

4. เครื่องวัดแสง (Radiation Detector) เครื่องวัดแสงที่ติดตั้งควรมีสภาพไวสูง สามารถวัดแสงที่ตกกระทบได้ทั้งหมด มีสัญญาณรบกวนน้อย การตอบสนองต่อแสงขึ้นอยู่กับความถี่หรือความยาวคลื่นของแสง เครื่องวัดแสงที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายแบบ ได้แก่ โฟโตโวลตาอิกเซลล์ หรือ แบรริเออร์-เลเยอร์เซลล์ (photovoltaic or barrier-layer cell) หลอดรับแสง หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด เป็นต้น

2.7.2 หลักการทำงานของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิดคือหลอดคิวเทอเรียม (D_2) และหลอดทังสเตน (W) ไปตกกระทบบนที่ mirror 1 ลำแสงจะผ่านไปยัง slit และไปตกกระทบบนที่ diffraction grating ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้ถูกออกแบบมาให้สามารถหมุนได้เพื่อเลือกความยาวคลื่นแสงที่เฉพาะเจาะจง หลังจากนั้น monochromatic light จะผ่านไปยัง slit และผ่าน filter ซึ่งทำหน้าที่กรองแสงที่รบกวนออกจากรัน ลำแสงจะตกกระทบบน mirror 2 ก่อนที่จะสะท้อนและแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วย half mirror โดยครึ่งหนึ่งของลำแสงจะสะท้อนผ่านไปยัง reference cuvette และอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนผ่านไปยัง sample cuvette แสงที่ไม่ถูกดูดกลืนจะถูกรวมด้วย lens แล้วเข้า detector เพื่อบันทึกค่าความยาวคลื่นและวิเคราะห์ผลต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 หลักการทำงานของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer แบบลำแสงคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 Seebeck Coefficient/Electric Resistance Measurement System

(Zem-3)

เครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าหรือเครื่อง Zem-3 เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์ Seebeck และค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้พร้อมกัน มีการควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยมีหลักการในการวัดคือ ให้ความร้อนที่ด้านล่างของตัวอย่างทำให้เกิดการไล่ระดับของอุณหภูมิ จากนั้นนำเทอร์โมคัปเปิลวัดความต่างศักย์ที่ปลายทั้งสองข้างซึ่งมีอุณหภูมิต่างกันไม่มาก เทอร์โมคัปเปิลจะวัดค่าผลต่างของอุณหภูมิออกมาเป็นผลต่างความต่างศักย์ สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคได้จากสมการ

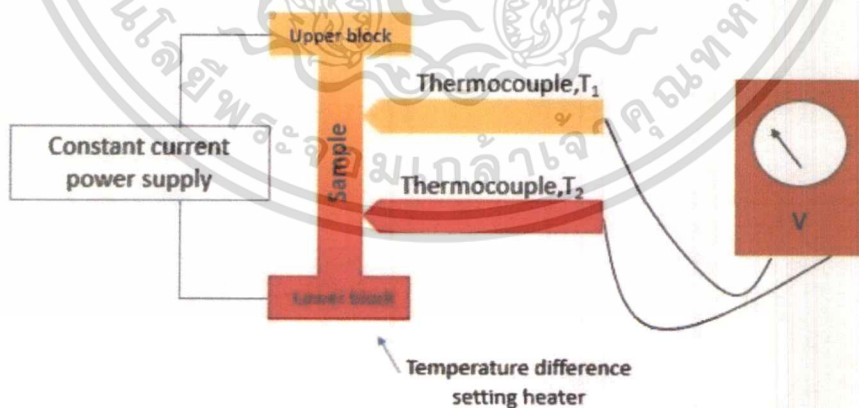
$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.5)$$

โดย S คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค

ΔV คือ ผลต่างของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ถ้ามีค่าเป็นบวกสารกึ่งตัวนำชนิดนั้นจะเป็น p-type แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าเป็นลบสารกึ่งตัวนำจะเป็นชนิด n-type



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมหลักการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานทางไฟฟ้า (Electric Resistance) หาได้โดยกำหนดตัวต้านทานอ้างอิง (R_{ref}) ขึ้นมา จากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ให้กับวงจรเพื่อหาค่าความต้านทาน (R_{sample}) ของชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้กฎการแบ่งแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.12 การแบ่งแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.10 เมื่อจ่ายกระแสให้กับตัวต้านทาน กระแสที่ไหลเข้าจะมีค่าเท่ากัน

$$I_{sample} = I_{ref} \quad (2.6)$$

และจากสมการ $V=IR$

$$\frac{V_{sample}}{R_{sample}} = \frac{V_{ref}}{R_{ref}} \quad (2.7)$$

ดังนั้น ความต้านทานของชิ้นงานตัวอย่าง

$$R_{sample} = \frac{V_{sample} \times R_{ref}}{V_{ref}} \quad (2.8)$$

หาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ได้จาก

$$\rho = \frac{R \times A}{l} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ρ คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้า

A คือ พื้นที่หน้าตัด

l คือ ความยาวของชิ้นงาน

และสามารถหาค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ได้จากสมการ

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.10)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

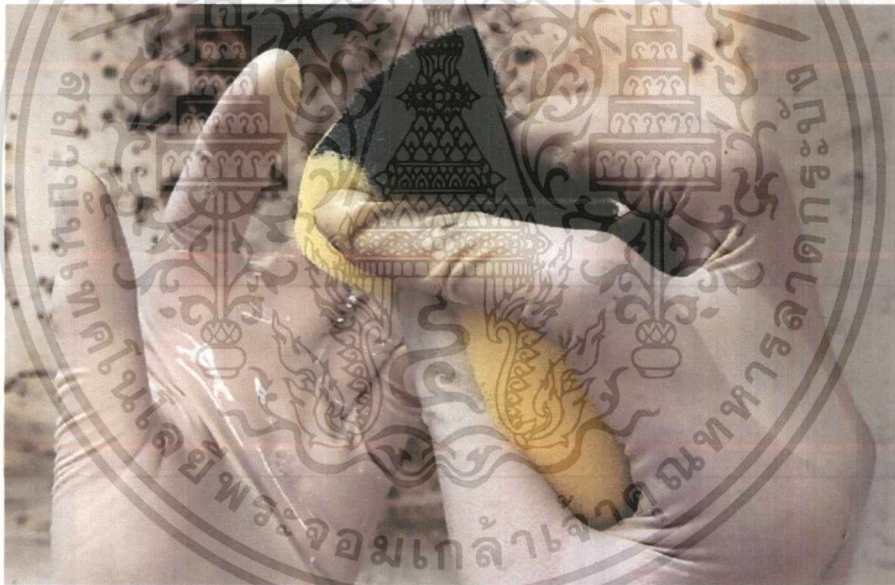
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนในการเตรียมกระจกสไลด์ ขั้นตอนการใช้เครื่อง Sputtering ในการเคลือบฟิล์มบางคอปเปอร์ และขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอดีนด้วยวิธี Liquid Iodination ดังนี้

3.1 ขั้นตอนการเตรียมกระจกสไลด์

1. ในการเคลือบฟิล์มบาง ก่อนการเคลือบเราต้องทำการเตรียมกระจกสไลด์ก่อนนำไปเคลือบ โดยนำกระจกไปขัดด้วยน้ำยาล้างจานแล้วล้างให้สะอาด จากนั้นล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง



รูปที่ 3.1 ทำความสะอาดกระจกด้วยน้ำยาล้างจาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำกระจกที่ทำความสะอาดจากข้อ 1 ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร จากนั้นเทสารอะซิโตนใส่ในบีกเกอร์ให้ท่วมกระจกสไลด์ แล้วนำบีกเกอร์ไปวางไว้ในเครื่องอัลตราโซนิกเปิดให้เครื่องทำงานเป็นเวลา 15 นาที เพื่อล้างคราบไขมันที่ติดอยู่บนผิวหน้าของกระจก



(a)

(b)

รูปที่ 3.2 (a) สารอะซิโตน

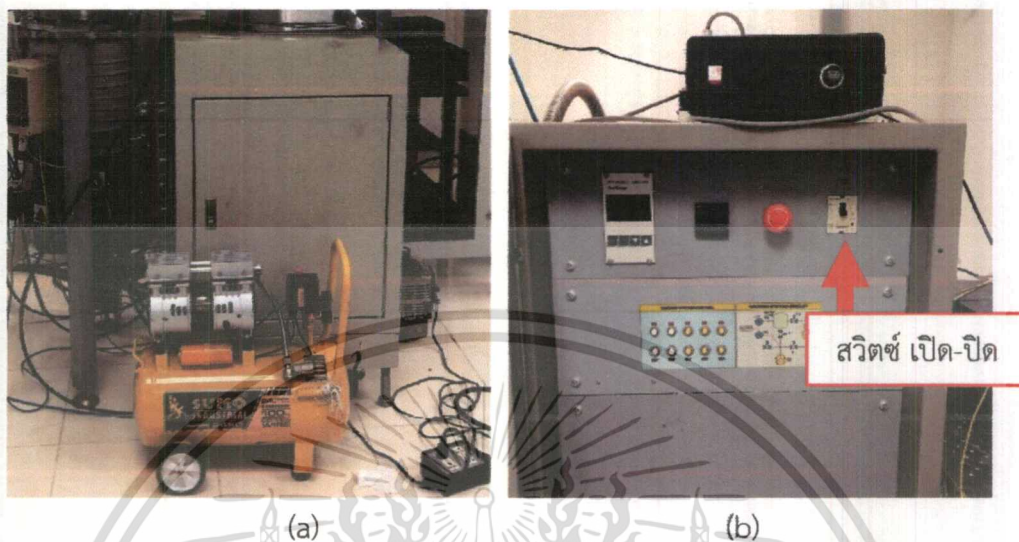
(b) เครื่องอัลตราโซนิก

3. เมื่อเครื่องอัลตราโซนิกทำงานเสร็จแล้ว นำกระจกสไลด์ออกมาเป่าลมให้แห้งด้วยแก๊สลม และนำไปเก็บไว้ในภาชนะปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี Sputtering

1. เปิดปั๊มลมและเปิดเครื่องควบคุม



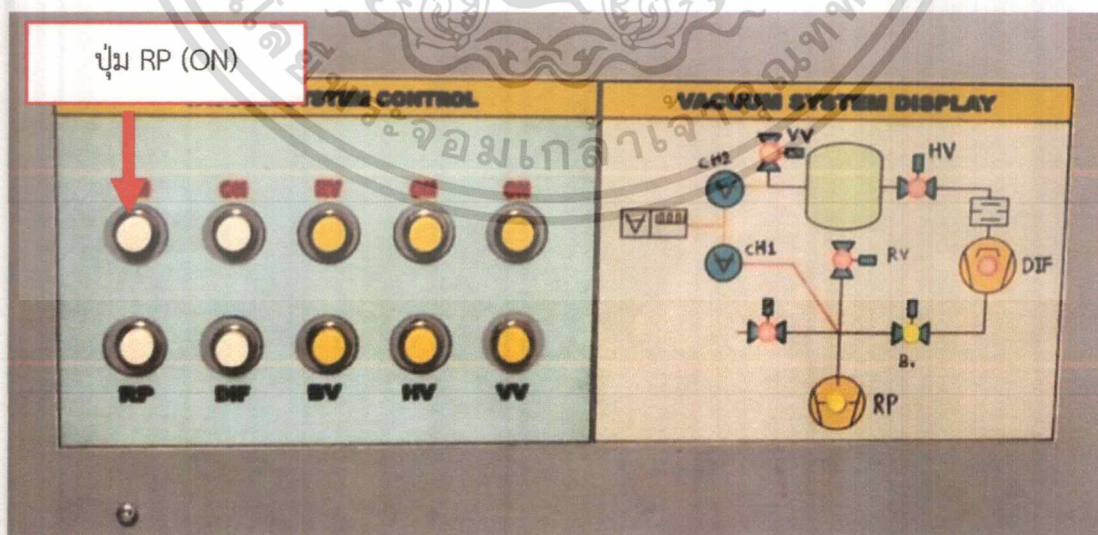
(a)

(b)

รูปที่ 3.3 (a) เครื่องปั๊มลม

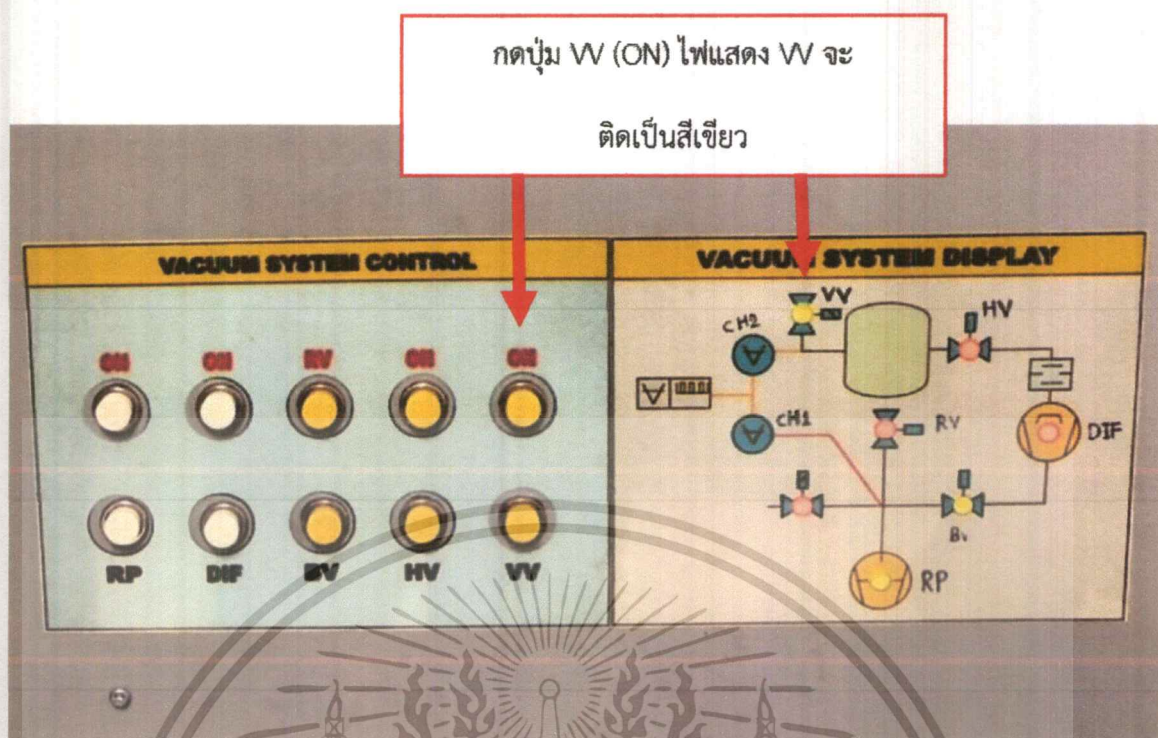
(b) เครื่องควบคุม

2. เปิดฝา Chamber โดยการกดปุ่ม RP (ON) ไฟแสดง RP และ BV จะติดเป็นสีเขียว จากนั้นหมุนตัวล็อกฝา Chamber ออก แล้วกดปุ่ม WV (ON) ไฟแสดง WV จะติดเป็นสีเขียว รอสักครู่ ฝา Chamber จะเปิดออกเอง



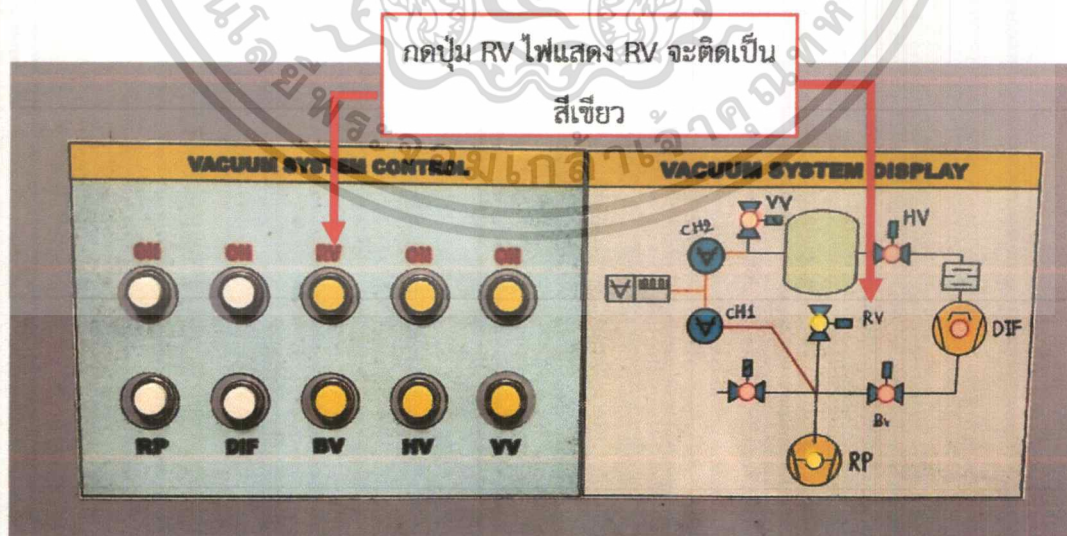
ปั๊ม RP (ON)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การเปิดฝา Chamber ของห้องสุญญากาศ

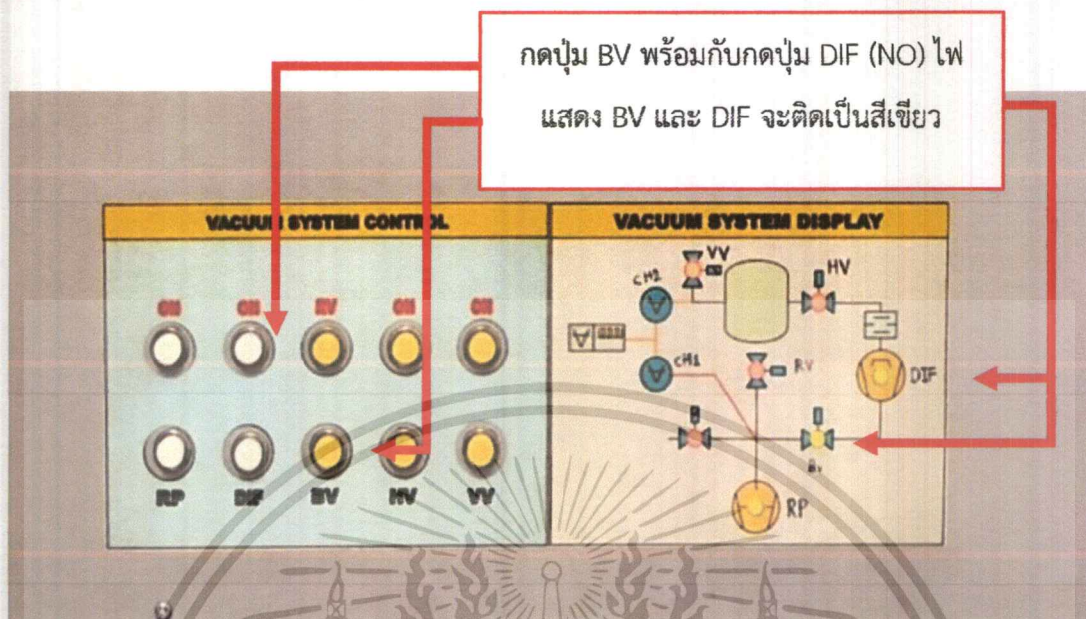
3. เปิดฝา Chamber แล้วนำกระจกสไลด์ที่เราเตรียมไว้ใส่บนแทนวางกระจก เป้าที่เราใช้เป็นเป้า Cu โดยระยะห่างระหว่างเป้ากับพื้นผิวรองรับมีระยะเท่ากับ 50 มิลลิเมตร หรือ 5 เซนติเมตร
4. ปิดฝา Chamber แล้วกด RP เพื่อทำการดูดอากาศภายใน Chamber ออก ใช้เวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นกด RV เพื่อช่วยดูดอากาศให้ภายในระบบเป็นสุญญากาศ



รูปที่ 3.5 การดูดอากาศออกจากระบบ

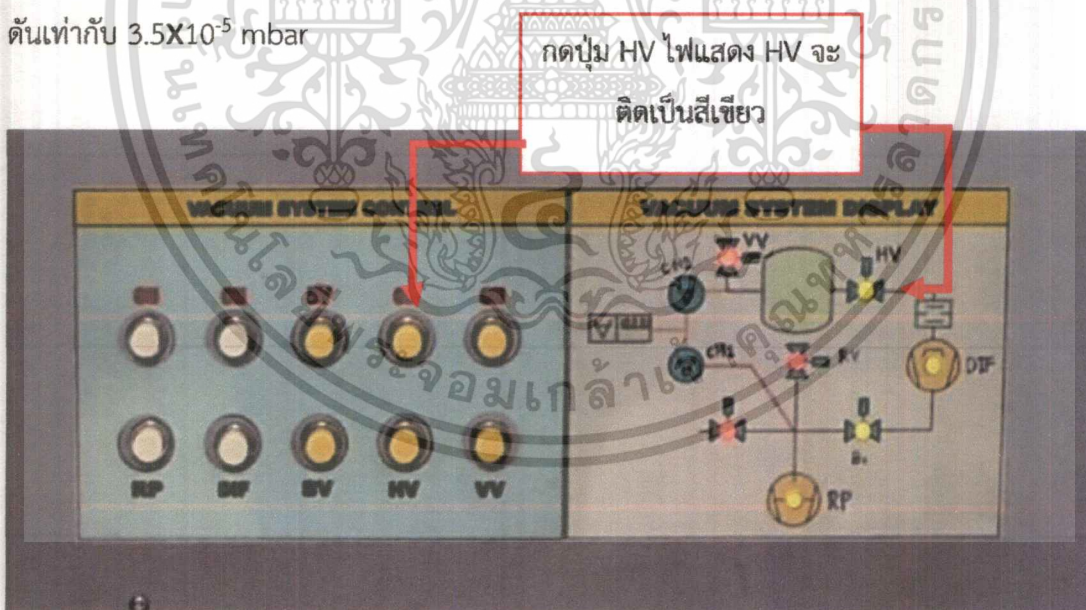
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กดปุ่มสลักมาที่ BV พร้อมกับกดปุ่ม DIF (ON) เพื่อให้ตัวปั๊มเกิดความร้อน ทำให้ดูตุดอากาศดีขึ้น จากนั้นเปิดระบบ Cooling เพื่อช่วยไม่ให้ระบบภายใน Chamber ร้อนเกินไป



รูปที่ 3.6 การทำให้ระบบเกิดความร้อน

6. กดปุ่ม HV (ON) เมื่อตัวปั๊มมีความร้อนเพิ่มขึ้น เพื่อทำให้ความดันต่ำลงจนภายในมีความดันเท่ากับ 3.5×10^{-5} mbar



รูปที่ 3.7 การใช้ High vacuum pump ในการช่วยดูตุดอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เมื่อความดันระบบเท่ากับ 3.5×10^{-5} mbar เราจะทำการ pre-sputtering โดยการเปิด วาล์วแก๊สอาร์กอน (Ar) จากนั้นใส่แก๊สอาร์กอน เพื่อทำความสะอาดพื้นผิวรองรับ โดยให้ power 120 W ที่ความดัน 6.8×10^{-3} mbar เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำการปิดแก๊สอาร์กอนและปิด power



รูปที่ 3.8 การ pre-sputtering

8. ความดันหลังการ pre-sputtering จะลดลงจนถึง 3.0×10^{-5} mbar แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้า 1.6 V ให้แท่นวางกระจกเพื่อให้แท่นหมุน เริ่มทำการ sputtering โดยใส่แก๊สอาร์กอนและจ่าย power 120 W จากนั้นหมุนชุดเตอร์ตามเข็มนาฬิกา พร้อมทำการจับเวลา 4 นาที พอครบเวลาทำการหมุนชุดเตอร์ปิดแล้วกดปิด power และปิดวาล์วแก๊ส

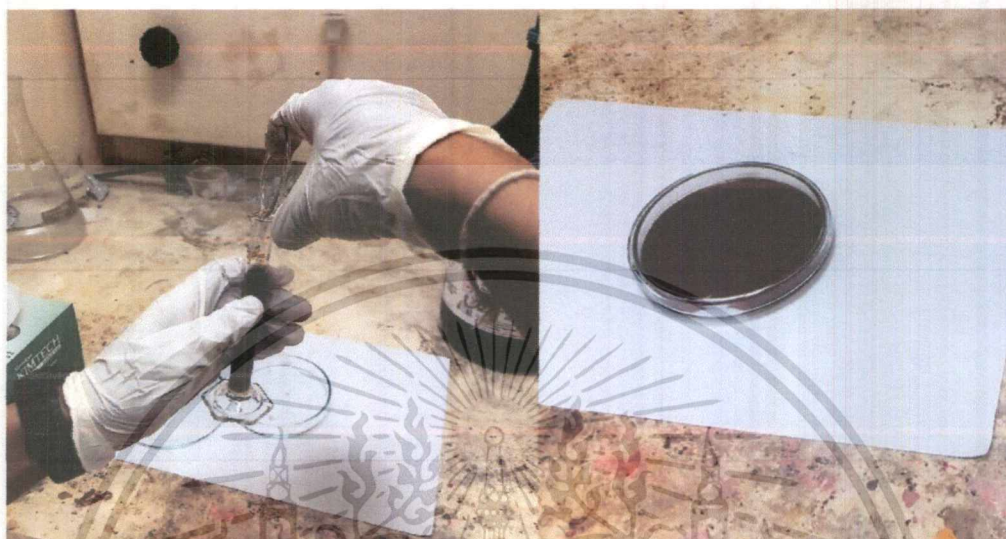
9. เมื่อทำการ sputtering เสร็จแล้วให้กดปุ่ม DIF (OFF) แล้วรอประมาณ 30 นาที ให้อุณหภูมิ heater เย็นลง จากนั้นกดปุ่ม HV (OFF) และปิดระบบ cooling

10. คลายตัวล็อกประตูและกดปุ่ม VV เพื่อทำการเปิดฝา chamber ออกแล้วนำ Sample ใส่ภาชนะปิดที่เตรียมไว้ เมื่อนำ Sample ออกมาแล้วทำการปิดฝา chamber และหมุนตัวล็อกเข้าที่เดิม กดปุ่ม RV และ RP (OFF) แล้วปิดสวิทช์เครื่องควบคุมเป็นการสิ้นสุดการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี Liquid Iodination

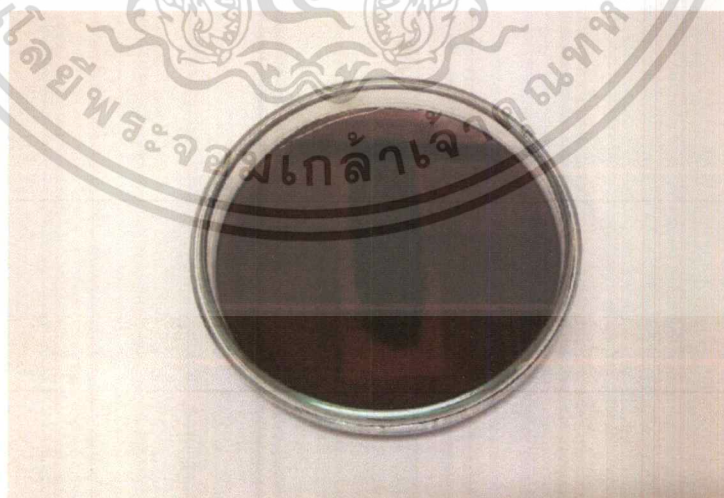
1. เตรียมสารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 1 % ปริมาณ 20 ml ด้วยกระบอกตวง ใส่ในจานเพาะเชื้อที่เตรียมไว้



(a) (b)

รูปที่ 3.9 การเตรียมสารละลายไอโอดีน

2. นำฟิล์มคอปเปอร์ที่ได้จากกระบวนการ Sputtering จุ่มในจานเพาะเชื้อที่มีสารละลายไอโอดีนแล้วปิดฝาไม่ให้อากาศเข้า พร้อมกับจับเวลาตอนเริ่มจุ่มเป็นเวลา 1 นาที



รูปที่ 3.10 นำฟิล์มคอปเปอร์จุ่มในสารละลายไอโอดีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อครบ 1 นาที นำฟิล์มบางขึ้นมาล้างด้วยน้ำกลั่นให้สาละลายไอโอดีนหมดออกจากหน้าฟิล์ม แล้วนำไปวางไว้ให้ฟิล์มแห้ง จากนั้นเก็บใส่ภาชนะบรรจุให้เรียบร้อย



รูปที่ 3.11 ล้างฟิล์มด้วยน้ำกลั่น

4. ทำการเคลือบฟิล์มตามข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนเวลาในการจุ่มสารละลายไอโอดีนเป็น 2, 3, 4 และ 5 นาที

หลังจากเตรียมฟิล์มเสร็จแล้วนำฟิล์มไปวิเคราะห์ผลดังนี้

- วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD)
- วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope)
- วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)
- วิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอดด์ (CuI) ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer
- วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วย เครื่อง Seebeck Coefficient/Electric Resistance Measurement System (Zem-3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการใช้เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

1. กดสวิทช์เปิดเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer รุ่น Perkins Elmer, LAMBDA 365 ที่เชื่อมต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ เปิดหน้าต่างโปรแกรมของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ขึ้นมา จากนั้นทำการเชื่อมต่อเครื่องมือกับคอมพิวเตอร์

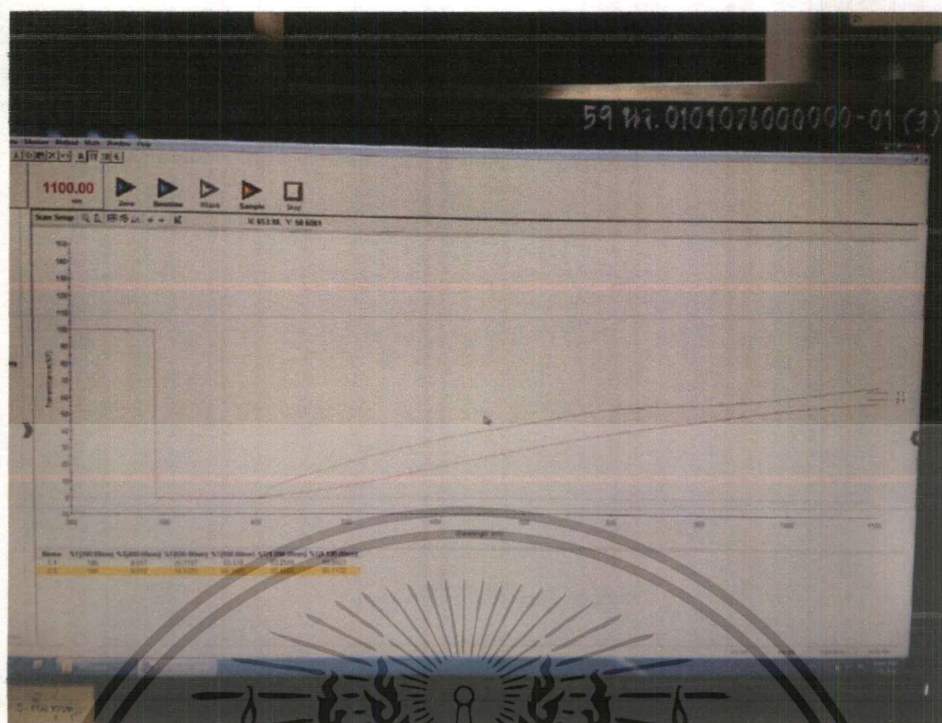
2. ตั้งค่าช่วงของความยาวคลื่นที่เราต้องการจะวัด (200-1100 นาโนเมตร) และตั้งค่าฟังก์ชันที่ต้องการวัดคือ วัดค่าการส่องผ่านแสง (transmittance) จากนั้นเปิดฝาเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ใส่กระจกสไลด์ทั้งสองช่องเพื่อทำเบตไลน์ก่อน (baseline) จากนั้นปิดฝาเครื่อง



รูปที่ 3.12 ใส่ฟิล์มและกระจกสไลด์เพื่อทำการวัด

3. กดปุ่ม start ในโปรแกรมเพื่อทำการวัดสเปกตรัมของฟิล์ม
4. จากนั้นเอากระจกสไลด์ออก ให้เหลือกระจกสไลด์ไว้แค่ฝั่งอ้างอิง แล้วนำชิ้นงานที่ต้องการวัดมาใส่แทนและปิดฝา ทำการกดปุ่ม start
5. นำผลที่ได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงสเปกตรัมของฟิล์มที่วัดได้จากเทคนิค UV-VIS Spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

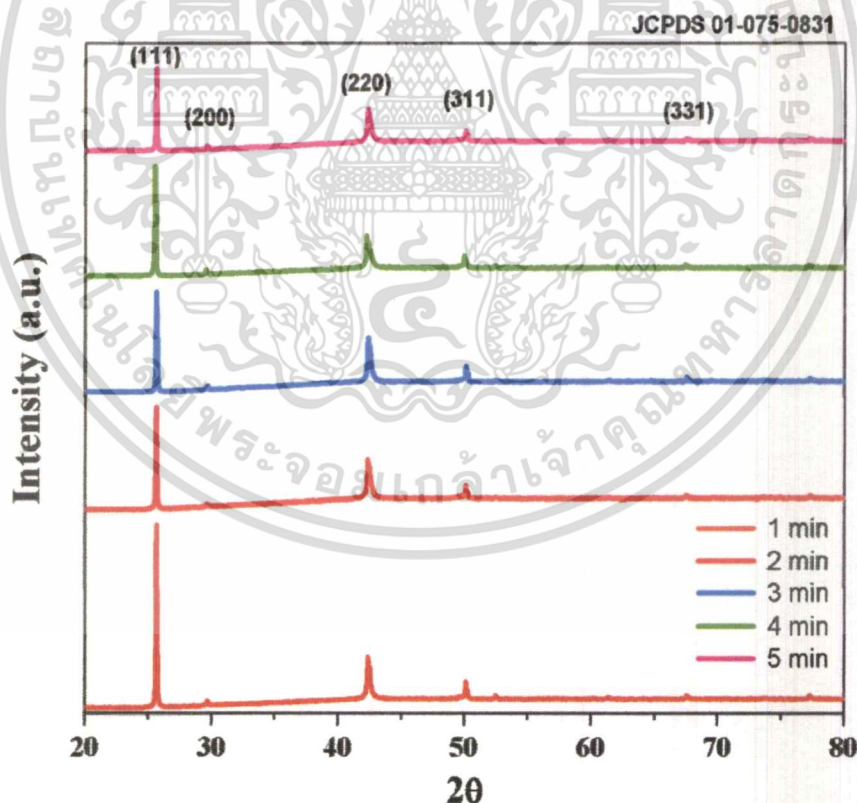
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

เมื่อทำการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ และนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ได้ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction ; XRD)

ผลการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) ที่เคลือบด้วยกระบวนการ Liquid Iodination โดยใช้เวลาในการจุ่มต่างกัน ที่เวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) โดยใช้เวลาใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการจุ่มต่างกัน ที่เวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที ที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 แสดงค่าการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มที่วัดด้วยเทคนิค XRD พบว่าฟิล์มที่ใช้เวลาในการจุ่ม 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที เกิดระนาบที่โดดเด่นคือระนาบ (111), (200), (220), (311) และ (331) เมื่อเปรียบเทียบกับระนาบเหล่านี้กับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS 01-075-0831 พบว่ามีความสอดคล้องกับระนาบของคอปเปอร์ไอโอไดด์เฟส γ (γ -CuI) โดยที่คอปเปอร์ไอโอไดด์ (γ -CuI) มีโครงสร้างผลึกแบบ zinc-blend

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าขนาดผลึกที่คำนวณได้จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มคอปเปอร์ไอโอไดด์ (γ -CuI) โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน

Time (min)	2 theta (2θ)	D (nm)
1	25.65927	66.98
2	25.60982	66.34
3	25.63684	67.31
4	25.49731	64.49
5	25.58281	64.49

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าขนาดของผลึกที่คำนวณได้จากข้อมูล XRD ของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ (γ -CuI) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2-3) พบว่าขนาดของผลึกมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่ส่งผลต่อขนาดของผลึกทำให้สามารถสังเคราะห์ฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึกใกล้เคียงกันได้ การหาระยะห่างระหว่างระนาบและพารามิเตอร์ของโครงผลึกคำนวณได้จากสมการ (2-1) และ (2-2) ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2 โดยค่าระยะห่างระหว่างระนาบที่คำนวณได้มีค่าประมาณ 3.47 อังสตรอมและค่าพารามิเตอร์โครงผลึกมีค่าประมาณ 6.0204 อังสตรอม ซึ่งใกล้เคียงกับค่า

มาตรฐานที่มีค่าเท่ากับ 6.063 อังสตรอม นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าความเครียด (strain) ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

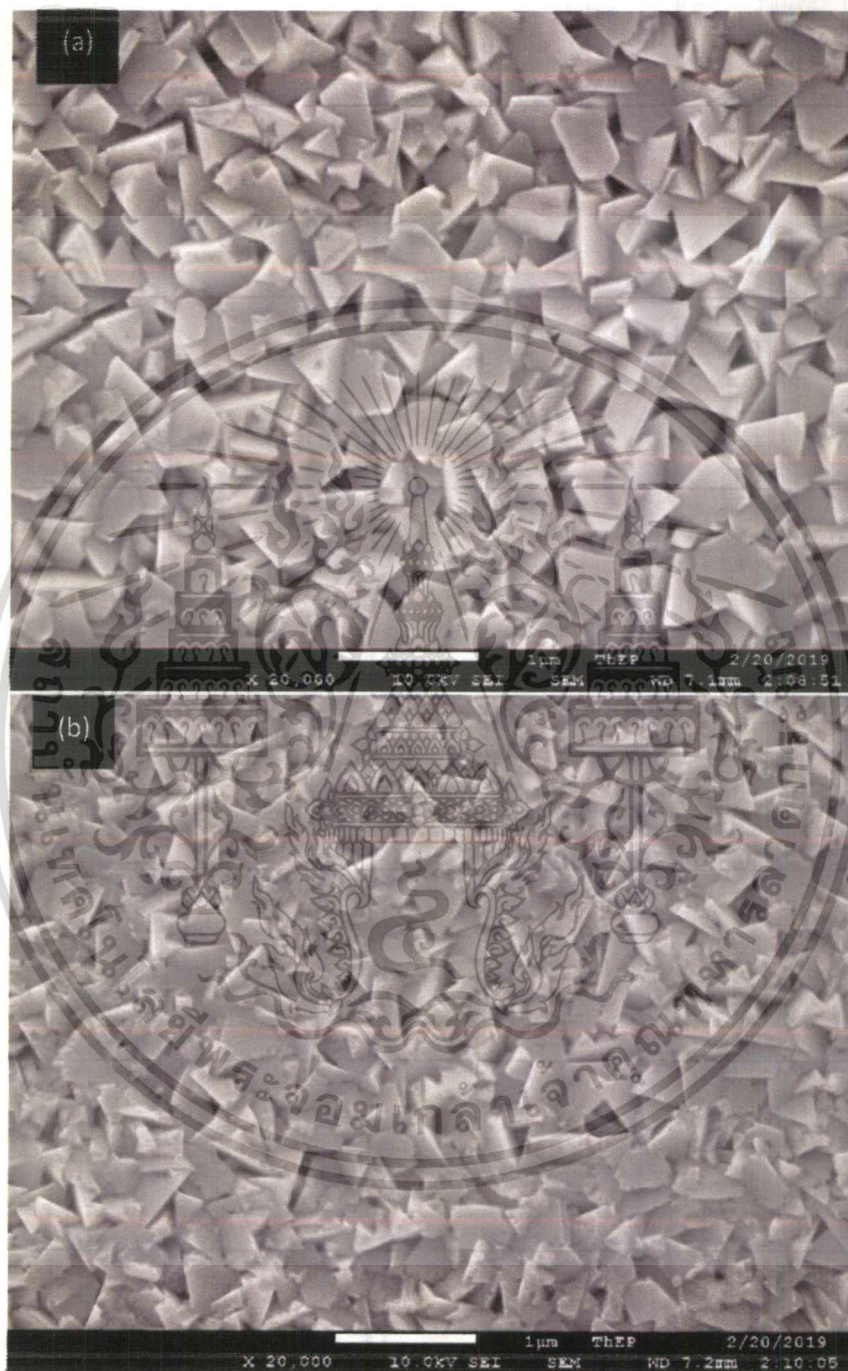
ได้จากสมการ (2-4) พบว่าค่าความเครียดที่คำนวณได้มีค่าติดลบ เนื่องจากเป็นความเครียดแบบกด (compressive strain) ค่าคงที่แลตทิจจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับพหุผลึก

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d) พารามิเตอร์ของโครงผลึก (a) และความเครียด (ϵ) ที่คำนวณได้จากข้อมูล XRD ของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI)

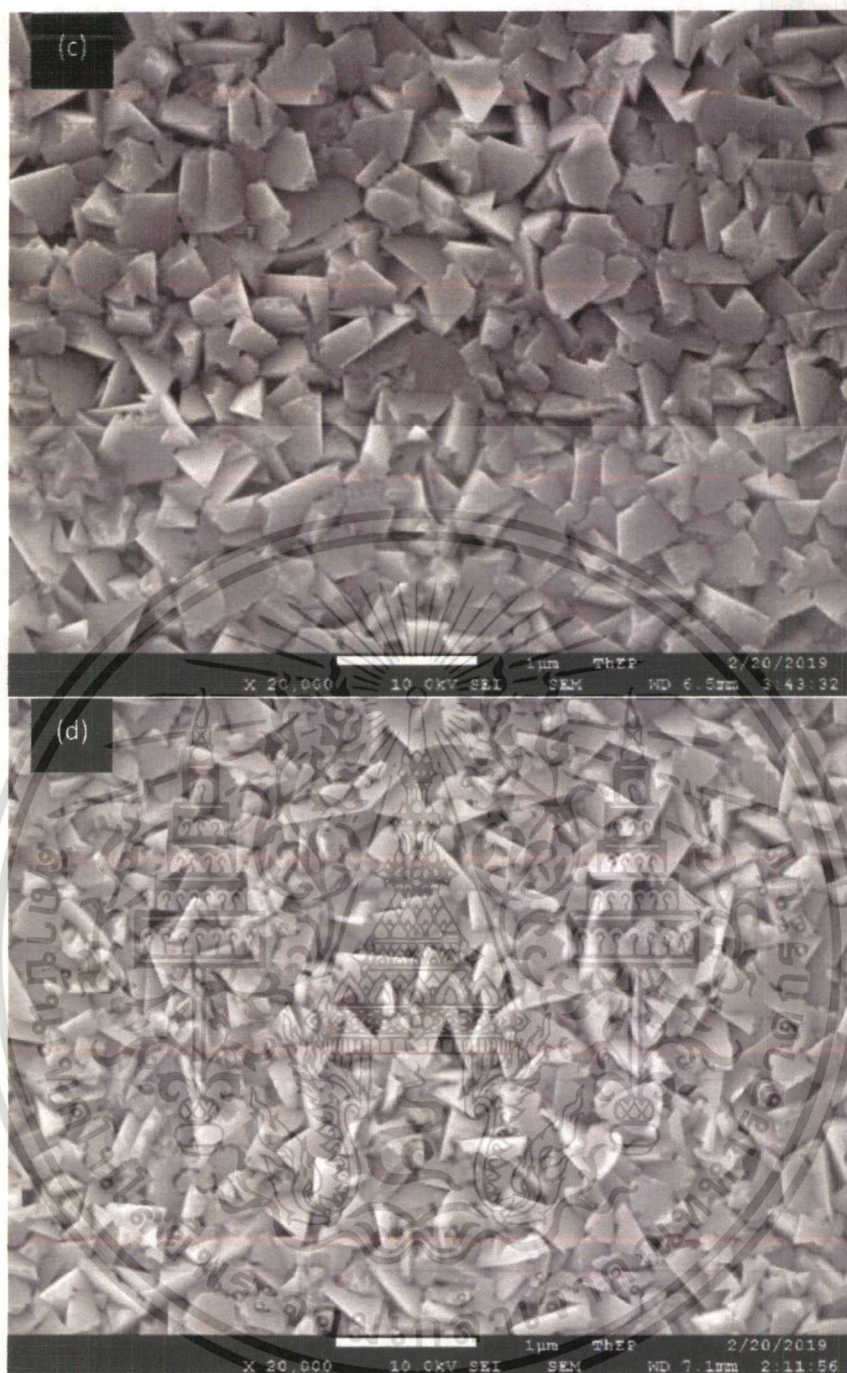
Reaction Time (min)	d_{111} (Å)	a (Å)	ϵ (%)
1	3.4676	6.0061	- 0.94
2	3.4742	6.0175	- 0.75
3	3.4706	6.0113	- 0.85
4	3.4893	6.0436	- 0.32
5	3.4778	6.0237	- 0.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวด้วยเทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงภาพ FE-SEM ของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ (Y-CuI)

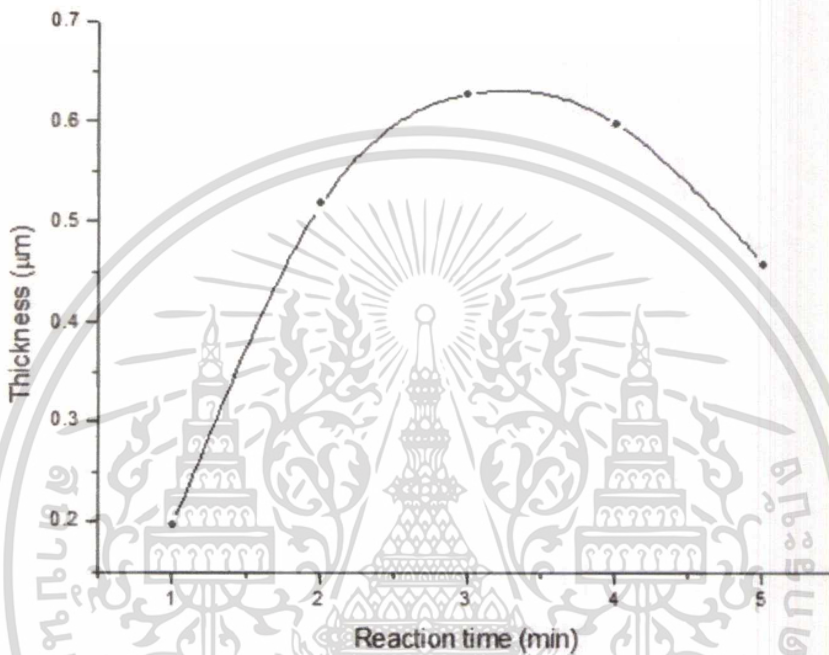
จากรูปที่ 4.2 (a), (b), (c), (d) และ (e) แสดงภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มคอปเปอร์ไอโอไดด์ (Y-CuI) ที่ใช้เวลาในการจุ่ม 1, 2, 3, 4 และ 5 นาทีตามลำดับ ด้วยเทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscope จากภาพถ่ายเป็นเกรนของฟิล์มคอปเปอร์ไอโอไดด์ (Y-CuI) ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความหนาของฟิล์มคอปเปอร์ไอโอไดด์ (Y-CuI)

Reaction Time (min)	Thickness (nm)
1	0.20
2	0.52
3	0.63
4	0.60
5	0.46

จากตารางที่ 4.3 เมื่อวิเคราะห์ความหนาพบว่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม ฟิล์มที่ใช้เวลาในการจุ่ม 1 2 และ 3 นาที มีค่าความหนาเท่ากับ

0.20, 0.52, 0.63 ไมโครเมตรตามลำดับ เนื่องจากอะตอมของไอโอดีนเกิดการเคลื่อนที่เข้าไปแทนที่ในช่องว่างระหว่างอะตอมของทองแดงทำให้เกิดการฟอร์มตัวของคอปเปอร์ไอโอดด์ ส่งผลให้ฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้เวลาในการจุ่ม ที่เวลาจุ่ม 4 และ 5 นาที ฟิล์มมีความหนา 0.60 และ 0.46 ไมโครเมตร สาเหตุที่ฟิล์มมีความหนาลดลงเกิดจากอะตอมของไอโอดีนไปยับยั้งการฟอร์มตัวของโครงสร้างคอปเปอร์ไอโอดด์ (γ -CuI) ฟิล์มจึงมีความหนาลง



รูปที่ 4.3 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการจุ่มกับความหนาของฟิล์ม

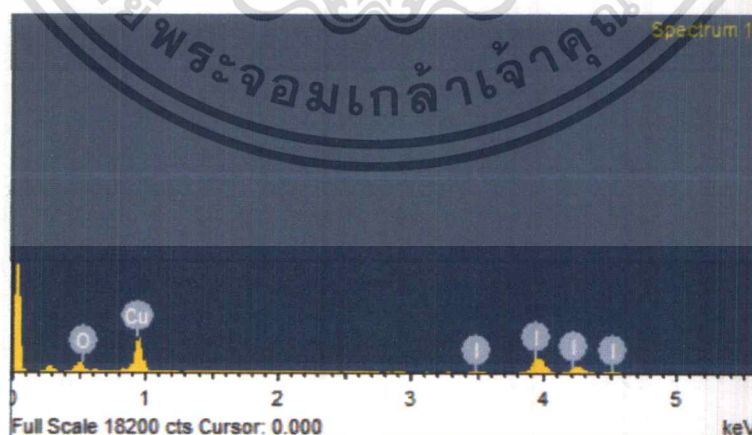
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเทคนิค EDS พบว่าฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) ที่เตรียมด้วยกระบวนการ Liquid Iodination โดยใช้เวลาในการจุ่มต่างกัน ประกอบด้วยธาตุคอปเปอร์ (Cu) และธาตุไอโอดีน (I) อยู่ในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งยืนยันการสร้างฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) ตามตารางที่ 4.4 (เนื่องจากธาตุออกซิเจนที่วัดได้มีเปอร์เซ็นต์น้อยมากจึงไม่นำมาคิด)

ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) ที่ใช้เวลาในการจุ่ม 1-5 นาที

เวลาที่ใช้ในการจุ่ม (นาที)	Atomic %	
	Cu (%)	I (%)
1	49.47	50.53
2	51.25	48.75
3	51.14	48.86
4	52.16	47.84
5	51.18	48.82

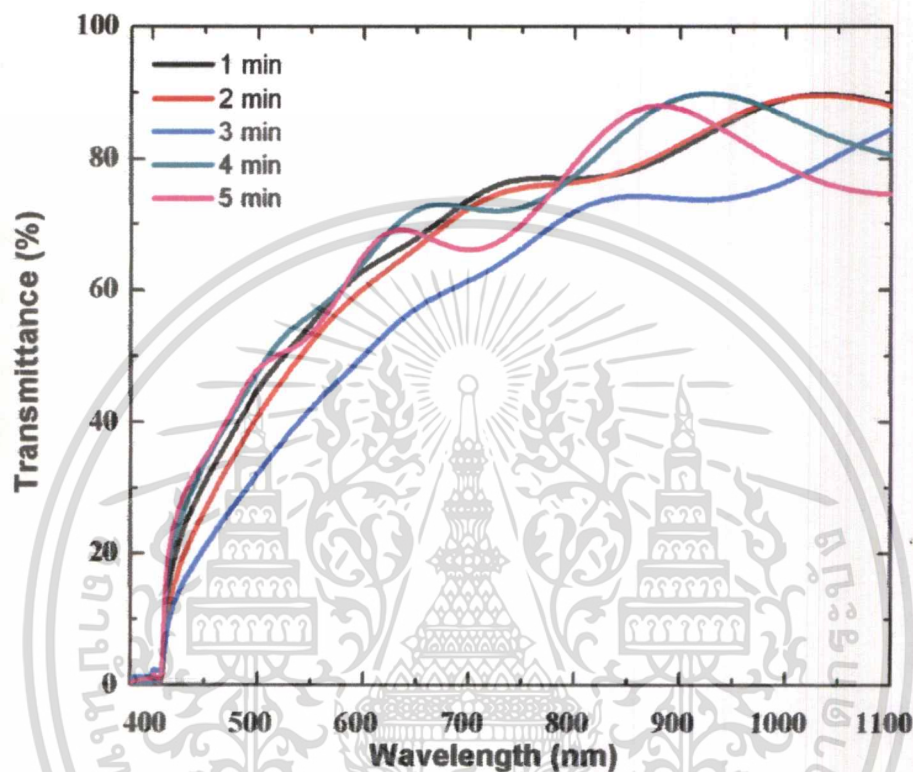


รูปที่ 4.4 แสดงองค์ประกอบธาตุภายในฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ที่วัดด้วยเทคนิค EDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเทคนิค UV-VIS Spectrophotometer

ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) ที่ใช้เวลาในการจุ่ม 1-5 นาทีแสดงดังรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) ที่ใช้เวลาในการจุ่ม 1-5 นาที

จากรูปที่ 4.5 แสดงค่าการทะลุผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่นของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) พบว่าฟิล์มที่ใช้เวลาในการจุ่ม 1-5 นาที มีความโปร่งใสสูงในช่วงความยาวคลื่น 400 – 1100 นาโนเมตร มีค่าการส่งผ่านของแสงมากกว่า 70 % โดยฟิล์มที่ใช้เวลาในการจุ่ม 3 นาที เนื่องจากฟิล์มมีความหนามากที่สุด ทำให้มีค่าการส่งผ่านของแสงต่ำที่สุด จากข้อมูลข้างต้นนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (α) และค่าพลังงานแถบช่องว่าง (optical band gap) ได้

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (α) คำนวณได้จากความสัมพันธ์เบียร์แลมเบิร์ต[26] ตามสมการ (4.1)

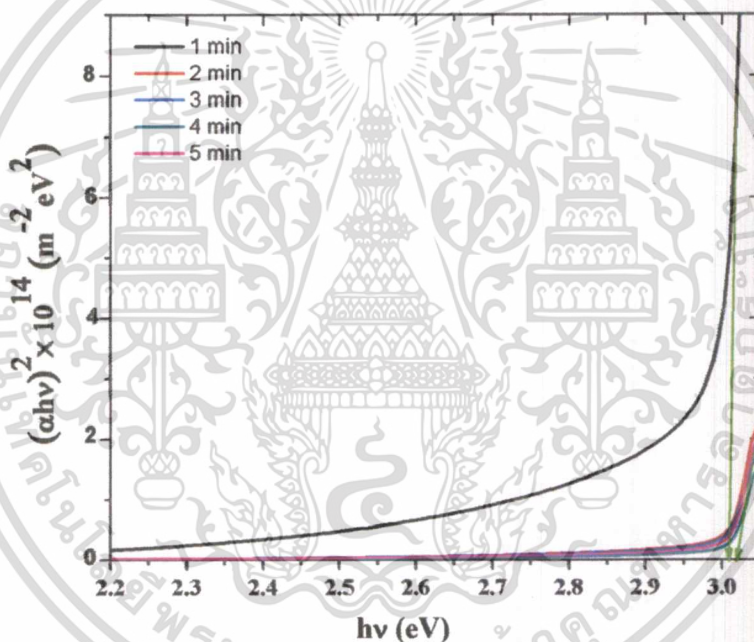
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ $\alpha = \frac{1}{t} \ln \left[\frac{1}{T} \right]$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์(4.1)ราคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย T คือค่าการส่งผ่านแสง และ t คือค่าความหนาของฟิล์ม ค่าพลังงานแถบช่องว่าง (optical band gap) คำนวณได้จากสมการ[10]

$$(\alpha hv)^2 = A(hv - E_g) \quad (4.2)$$

โดย hv คือ พลังงานงานโฟตอน, A คือ ค่าคงที่ และ E_g คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงานแสง[11]

ทำการพล็อตกราฟระหว่างค่า $(\alpha hv)^2$ กับค่าพลังงานโฟตอนจะได้ดังรูปที่ 4.6 เมื่อลากเส้นตรงจากกราฟให้ตัดแกน x พบว่าฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ (γ -CuI) ที่ใช้เวลาในการจุ่ม 1 - 5 นาที มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.01 eV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน (Photon energy) กับ $(\alpha hv)^2$ ของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ (γ -CuI) ที่ใช้เวลาในการจุ่ม 1-5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วย Seebeck Coefficient/Electric Resistance Measurement System (Zem-3)

การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มคอปเปอร์ไอโอไดต์ (Y-CuI) ที่เตรียมด้วยกระบวนการ Liquid lodination ด้วยเทคนิค ZEM-3 พบว่าฟิล์มที่ใช้เวลาในการจุ่ม 1 2 และ 3 นาที มีค่าการนำไฟฟ้าและค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor) ลดลง แต่เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการจุ่มเป็น 4 และ 5 นาทีส่งผลให้ฟิล์มบางมีค่าสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นรวมถึงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ด้วยดังรูปที่ 4.7 การหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) สามารถคำนวณหาได้จากสมการ[12]

$$\rho = \left(\frac{V}{I}\right) \frac{wt}{l} \quad (4.3)$$

เมื่อ V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า

t คือ ความหนาของฟิล์ม

w คือ ความกว้างอิเล็กโทรด

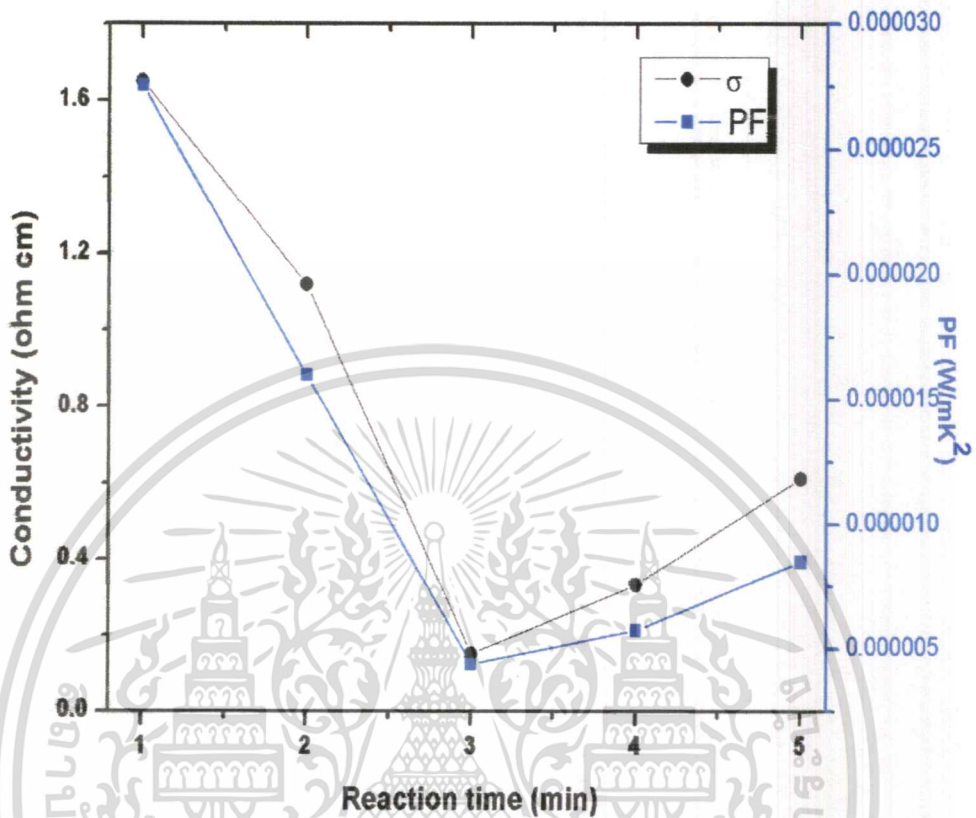
l คือ ความยาวระหว่างขั้วไฟฟ้า

จากสมการ (4.3) เมื่อกำหนดให้ตัวแปรทุกตัวเป็นค่าคงที่ยกเว้นค่าความหนาของฟิล์ม จะพบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าแปรผันตรงกับความหนาของฟิล์ม เมื่อคำนวณหาสภาพนำไฟฟ้า (σ) จากสมการ (2.10) ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าแปรผกผันกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าความหนาของฟิล์ม เมื่อฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น สภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลง แต่เมื่อความหนาของฟิล์มลดลง ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าสภาพนำไฟฟ้ายังมีผลต่อค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor, PF) ด้วย เนื่องจากค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์คำนวณได้จากค่าสภาพนำไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

$$PF = S^2 \sigma \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามสมการ (4.4) เมื่อสภาพนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า PF มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการจุ่มกับค่าการนำไฟฟ้า และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์

ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของฟิล์ม (S_f) สามารถคำนวณได้จากสมการ[13]

$$S_f = S_b \left[1 - \frac{3\lambda_b}{8t} (1 - p) \frac{U}{1+U} \right] \quad (4.5)$$

เมื่อ S_b คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของฟิล์มโพลีคริสตัลไลน์ที่มีความหนาไม่สิ้นสุด

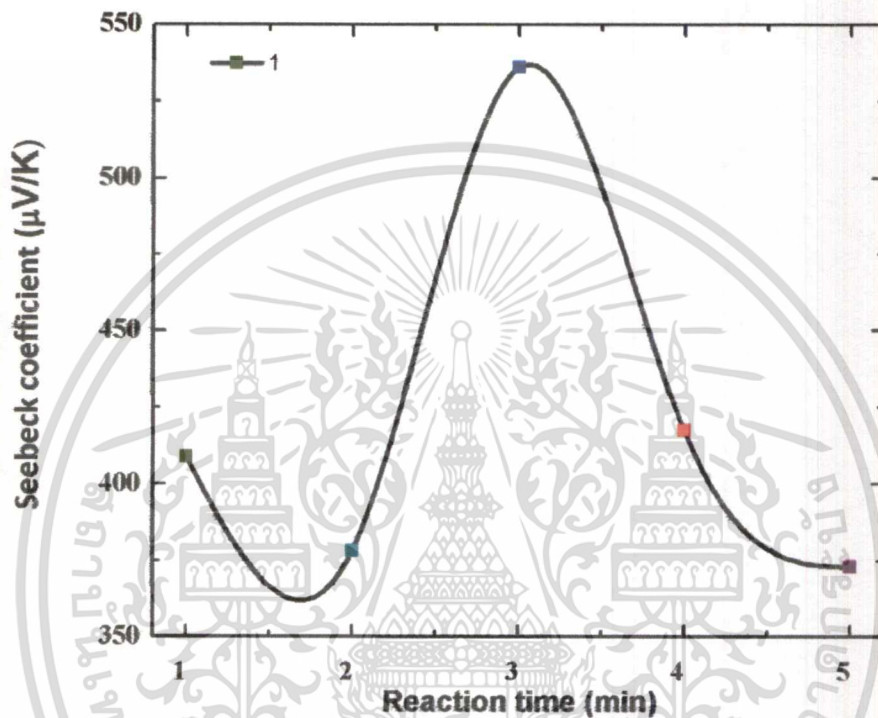
λ_b คือ mean free path

U คือ เลขชี้กำลังของเทอมพลังงานของค่า mean free path สมมุติ

จากสมการ (4.5) เมื่อให้ตัวแปรอื่นเป็นค่าคงที่ยกเว้นค่าความหนาของฟิล์ม เมื่อค่าความหนา

ของฟิล์มเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมการเทอมหลังที่อยู่ในวงเล็บมีค่าน้อยลง ค่าในวงเล็บจึงมีค่ามากขึ้น ค่า
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการใช้ งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 สัมประสิทธิ์ซีเบคของฟิล์มจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ผลวิเคราะห์ที่ได้จากข้อมูล ZEM-3 ดังรูปที่ 4.8 พบว่า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าแปรผันตรงกับความหนาของฟิล์มสอดคล้องกับสมการ (4.5) ฟิล์มที่ใช้เวลาในการจุ่ม 3 นาทีมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมากที่สุดและเป็นฟิล์มที่มีความหนามากที่สุดด้วยค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจากรูปที่ 4.8 ทั้งหมดเป็นค่าบวกแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ (γ -CuI) ที่เคลือบด้วยกระบวนการ Liquid Iodination เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด p



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยากับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลในตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นค่าความแตกต่างของฟิล์มที่เตรียมด้วยกระบวนการ Iodination ทั้ง 3 วิธี เป็นฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 200-300 nm

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าข้อมูลต่างๆที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดด์ด้วยกระบวนการ Iodination

Method	Thickness (nm)	σ (S/cm)	S ($\mu\text{V/K}$)	PF (W/mK^2)	Ref
Solid	200	31.25	200	1.25×10^{-4}	[7]
Vapor	302	7.4	158.1	1.9×10^{-5}	[7]
Liquid	206	1.62	408.81	2.76×10^{-5}	This work

พบว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธี Liquid Iodination มีค่าสภาพนำไฟฟ้าต่ำ (σ) ที่สุด แต่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (S) สูงกว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธี Solid และ Vapor Iodination และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่คำนวณได้จากสมการ (4.4) พบว่าวิธี Solid Iodination มีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์มากที่สุด ส่วนฟิล์มที่เตรียมวิธี Liquid Iodination มีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำกว่าวิธี Solid Iodination แต่สูงกว่าวิธี Vapor Iodination ฟิล์มที่มีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์มากๆ บ่งบอกถึงการเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

ฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) ชนิดพีในโครงงานนี้ถูกเตรียมด้วยกระบวนการ Liquid Iodination ด้วยเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยา จากการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกให้ระนาบของคอปเปอร์ไอโอไดต์เฟสแกรมน่า มีโครงสร้างผลึกแบบ zinc-blend เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไม่ส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างของผลึก ทำให้ฟิล์มมีการฟอร์มตัวของโครงสร้างผลึกที่ใกล้เคียงกัน การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจะเห็นว่าเกรนของคอปเปอร์ไอโอไดต์มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม เวลาที่ใช้ในการจุ่ม 1 2 และ 3 นาที ฟิล์มจะมีความหนาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้เวลาในการจุ่ม 4 และ 5 นาที อะตอมของไอโอดีนจะไปยับยั้งการฟอร์มตัวของคอปเปอร์ไอโอไดต์ทำให้ฟิล์มมีความหนาลดลงและผลจากเทคนิค EDS ช่วยยืนยันการเกิดฟิล์มคอปเปอร์ไอโอไดต์ (γ -CuI) ฟิล์มมีความโปร่งใสสูงในช่วงความยาวคลื่น 400 – 1100 nm มีค่าการส่งผ่านของฟิล์มมากกว่า 70 % และมีค่าพลังงานแถบช่องว่างประมาณ 3.02 eV สภาพนำไฟฟ้าและค่าพาเวอรัฟแฟคเตอร์มีค่าแปรผกผันกับความหนาของฟิล์ม โดยฟิล์มที่ใช้เวลาในการจุ่ม 1 นาที มีค่าสภาพนำไฟฟ้าและค่าพาเวอรัฟแฟคเตอร์มากที่สุด ซึ่งเป็นลักษณะที่ดีในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าเป็นบวกบ่งบอกว่าการนำไฟฟ้าชนิด p และค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคยังมีค่าสอดคล้องกับค่าความหนาของฟิล์มด้วย เมื่อเปรียบเทียบวิธี Liquid Iodination กับวิธี Solid และ Vapor Iodination พบว่ามีค่าสภาพนำไฟฟ้าต่ำที่สุด แต่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคสูงที่สุด อีกทั้งยังมีค่าพาเวอรัฟแฟคเตอร์อยู่ตรงกลางระหว่างวิธี Solid Iodination และวิธี Vapor Iodination

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรเพิ่มประสิทธิภาพของค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์ไอโอไดต์ให้มากขึ้น เพื่อให้กระบวนการ Liquid Iodination เป็นที่สนใจในการสังเคราะห์ฟิล์มบางมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- C.R. Pichard, C.R. Tellier, A.J. Tossier, 1980. "Thermoelectric-power of thin polycrystalline metal-films in an effective mean free-path model." *Journal of Physics F-Metal Physics*. 10(1) 2009–2014
- C. Yang, D. Souchay, M. Knei, M. Bogner, H.M. Wei, M. Lorenz, O. Oeckler, G. Benstetter, Y.Q. Fu & M. Grundmann. 2017. "Transparent Flexible Thermoelectric Material Based on Non-toxic Earth-abundant P-type Copper Iodide Thin Flm." *Nature Communications*. 8(16076) : 3-5.
- H. Wei, D. Ding, X. Yan, J. Guo, L. Shao, H. Chen, L. Sun, H.A. Colorado, S. Wei, Z. Guo, Tungsten trioxide/zinc tungstate bilayers: electrochromic behaviors, energy storage and electron transfer, *Electrochim. Acta* 132 (2014) 58–66.
- Naomi Yamada, Ryuichiro Ino, and Yoshihiko Ninomiya. 2016. "Truly Transparent p-Type γ -CuI Thin Films with High Hole Mobility." *ACS Publications*. 10(1021) : 4971-4979.
- P. Pungboon Pansila. 2012. Preparation of Pure Anatase TiO₂ Thin Films by DC Sputtering Technique: Study on the Effect of Oxygen Partial Pressure. [Online]. Available : <https://www.researchgate.net>.
- V. P. S. Perera and K. Tennakone, "Recombination processes in dye-sensitized solid-state solar cells with CuI as the hole collector," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 79, pp. 249-255, 2003.
- ฉิภาพร ศรีสมบุรณ์. 2560. "การศึกษาสมบัติของชั้นฟิล์มป้องกันโปร่งใสอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีพัลส์ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงบนเครื่องประดับเคลือบทองชมพู." ปรริญญาวิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ปมทอง มาลากุล ณ อยุธยา และคณะ. 2554. "ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี กระบวนการผลิตคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ และการใช้งาน." *สารานุกรมเปิดโลกปิโตรเคมี*. เล่มที่ 1 : 173-175
- แม่น อมรสิทธิ์ และคณะ. 2554. *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ*. ครั้งที่พิมพ์ 2. กรุงเทพฯ : ชวนพิมพ์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

วิลาสินี วุฒิธรสกล. 2541. “การเคลือบฟิล์มบางแบบสปีดเทอริง.” *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*. 41(10) : 75-76.

ศุภฤกษ์ เห็นประเสริฐแท้. 2555. “ทำไมต้องมีเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.” *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*. 55(66) : 14-17.

อรุณี หลักคำ, วิทวัช วงศ์พิศาล และสินธุ จันทพันธ์. 2557. “กระบวนการสร้างฟิล์มบางด้วยไอเคมีและไอทางกายภาพภายใต้สภาวะสุญญากาศ.” *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*. 57(74) : 38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้