



การศึกษากลไกการเคลื่อนตัวของทองในระดับอะตอม ในการเปลี่ยน  
โครงสร้างทางพื้นผิวของฟิล์มทองที่ผลิตจากทองคำเปลว

Mechanism of atomic transport on gold film fabricated by  
gold leaf

โดย

ภูมिरัตน์ นวรัตน์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายได้

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

## บทคัดย่อ

การผลิตฟิล์มทองคำด้วยทองคำเปลวโดยใช้วัสดุฐานเป็นแก้วและซิลิกอนเพื่อใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ไม่ประสบความสำเร็จเนื่องจากทองคำเปลวไม่สามารถยึดเกาะกับวัสดุฐานได้ดีพอ ดังนั้นการผลิตฟิล์มทองคำด้วยเครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยฟิล์มบางแบบสปีเตอร์ริงโดยการวางวัสดุฐานในพื้นที่ว่างของห้องตัวอย่างของเครื่องสปีเตอร์ริงเพื่อผลิตตัวอย่างฟิล์มจากไอทองคำเหลือใช้จากการเตรียมตัวอย่างอื่นของเครื่องสปีเตอร์ริง

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของการอบที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของตัวอย่างฟิล์มทองคำ ตัวอย่างฟิล์มทองคำของตัวอย่างฟิล์มถูกอบที่อุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$ - $700^{\circ}\text{C}$  ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพผ่านกระบวนการรวมกันเป็นหยดในสถานะของแข็ง (Solid State Dewetting) ของฟิล์มทองคำ ซึ่งสามารถสรุปได้จากผลการทดสอบตัวอย่างฟิล์มทองคำด้วยภาพถ่ายกล้องโทรทรรศน์เคลื่อนที่ ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) โดยกระบวนการรวมกันเป็นหยดจะเกิดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเกิดขึ้นในตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วมากกว่าฟิล์มทองคำบนซิลิกอน จากการทดสอบโครงสร้างทางผลึกของตัวอย่างฟิล์มทองคำด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าโครงสร้างทองคำ ชนิด Au(111) Au(200) และ Au(220) ในตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว และโครงสร้างทองคำ ชนิด Au(111) ในตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว เมื่อทำการอบ ตัวอย่างฟิล์มทองคำมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณและความเป็นความเป็นผลึกเชิงเดี่ยวโครงสร้างทองคำ Au(111) ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการอบจาก  $300^{\circ}\text{C}$ - $700^{\circ}\text{C}$  ในตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนพบลดลงของปริมาณและความเป็นความเป็นผลึกเชิงเดี่ยวโครงสร้างทองคำ Au(111) ที่อุณหภูมิการอบ  $300^{\circ}\text{C}$  และพบการเพิ่มขึ้นของปริมาณและความเป็นความเป็นผลึกเชิงเดี่ยวโครงสร้างทองคำ Au(111) ที่อุณหภูมิการอบ  $700^{\circ}\text{C}$

การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของทองคำในระดับอะตอม โดยกระบวนการรวมกันเป็นหยดที่สถานะของแข็งมีแนวโน้มเกิดจากการรับความร้อนจากการอบ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางผลึกมีแนวโน้มเกิดจากการตกผลึกของทองคำในระหว่างการเย็นตัวของตัวอย่างฟิล์มทองคำ และปัจจัยเพิ่มเติมที่อาจส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอะตอมทองคำ คือ อัตราการเย็นตัวของฟิล์มทองคำและวัสดุฐาน

**คำสำคัญ (TH)** การรวมกันเป็นหยดที่สถานะของแข็ง การอบร้อน ฟิล์มทอง ทองคำเปลว

# Abstract

The attempt to fabricate gold films on glass slide (Au/glass) and silicon wafer (Au/Si) with gold leaf was unsuccessful due to poor adhesion between the gold leaf and substrates. Alternatively, Au/glass and Au/Si films were fabricated by placing the substrate into the free space within sputtering chamber to collect the excess Au vapor during the typical sputtering process for other samples.

In this study, the physical changes were observed in both Au/glass and Au/Si film under the film annealing from 300<sup>o</sup>C-700<sup>o</sup>C. The visual inspection via cell phone camera, the micrograph via Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) revealed the morphological changes with respect to the annealing temperature in Au films due to solid state dewetting mechanism. The changes were more pronounced in Au/glass films than Au/Si films at the same annealing temperature. The X-ray diffraction measurement three phases of Au including Au(111), Au(200), and Au(220) in Au/glass films and one phase of Au(111) in Au/silicon films. The concentration and single crystallinity of Au(111) were increased with respect to annealing temperature in Au/glass film. For Au/Si films, the concentration and single crystallinity of Au(111) were decreased at 300<sup>o</sup>C and then were increased at 700<sup>o</sup>C, respectively.

The physical changes of Au films are likely due to the movement of Au atoms via solid state dewetting and recrystallization. The heat intake from annealing process is likely induced the dewetting process by increasing the kinetic energy of Au atoms. While the recrystallization process is likely occur during the cooling period of the samples. Finally, another factor that can affect the physical changes of Au films is the interface interaction between Au films and substrates.

**คำสำคัญ (EN)** solid state dewetting, annealing, gold film, gold leaf

# กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุน บุคลากร และสถานที่ในการทำงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ดี โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนวิจัยประจำปี 2564 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

คณะผู้วิจัย



# สารบัญ

บทคัดย่อ .....	ก
Abstract .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
บัญชีตาราง .....	ฉ
บัญชีรูปภาพ .....	ช
บทที่ 1 บทนำ .....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
การประมาณขนาดเฉลี่ยของ grain ด้วยสูตรของ Scherrer .....	4
กระบวนการ solid state dewetting.....	5
การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกและขนาดของเกรน เนื่องจากความร้อน (Tesler 2013)[3].....	6
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	7
การเตรียมฟิล์มทองจากทองคำเปลว .....	7
การเตรียมฟิล์มทองจากการเคลือบในสุญญากาศ sputtering.....	7
การอบฟิล์มทอง annealing ของฟิล์มทองจากทองคำเปลว.....	9

การอบฟิล์มทอง annealing ของฟิล์มทองจากเครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์รีંગ (Sputter Coater) .....	10
การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	10
การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) .....	11
การวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....	11
บทที่ 4 ผลการวิจัย .....	13
ผลการผลิตฟิล์มทองจากทองคำเปลว.....	13
ภาพถ่ายด้วยกล้องโทรทัศน์เคลื่อนที่ของตัวอย่างฟิล์มทองคำที่ผลิตด้วยเครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์รีંગ (Sputter Coater) .....	14
ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของของตัวอย่างฟิล์มทองคำที่ผลิตด้วยเครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์รีંગ (Sputter Coater) .....	16
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ....	18
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกของฟิล์มทองคำบนแก้วด้วยเทคนิค .....	20
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึก ของ ฟิล์มทองคำบนซิลิกอน .....	22
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	25
เอกสารอ้างอิง .....	27
ประวัตินักวิจัย .....	28

# บัญชีตาราง

ตาราง 1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว แสดงการลดลงของความเข้มข้นของทองคำเมื่ออุณหภูมิในการอบต่างๆ.....	18
ตาราง 2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกา แสดงการลดลงของความเข้มข้นของทองคำเมื่ออุณหภูมิในการอบต่างๆ.....	19
ตาราง 3 สรุปค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของยอดที่พบในผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว .....	21
ตาราง 4 สรุปค่าความกว้างเต็มสูงสุดครึ่งหนึ่งของยอดที่พบในผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว .....	21
ตาราง 5 สรุปค่าพื้นที่ใต้กราฟของยอดที่พบในผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว .....	21
ตาราง 6 สรุปค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของยอดของ Si(100) ที่พบในผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอน .....	22
ตาราง 7 สรุปค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของยอดที่พบในผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนโดยไม่รวมยอดของ Si(100) .....	23
ตาราง 8 สรุปค่าความกว้างเต็มสูงสุดครึ่งหนึ่งของยอดที่พบในผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนโดยไม่รวมยอดของ Si(100) .....	23
ตาราง 9 สรุปค่าพื้นที่ใต้กราฟของยอดที่พบในผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนโดยไม่รวมยอดของ Si(100) .....	24

# บัญชีรูปภาพ

รูป 1 เครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์ริง (Sputter Coater) จากบริษัท Cressington Scientific Instrument รุ่น Cressington 108auto.....	7
รูป 2 เตาอบ Carbolite ELF 11/14B Economy Chamber Furnace .....	9
รูป 3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) จากบริษัท Thermo Scientific รุ่น phenom pro G6.....	10
รูป 4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) จากบริษัท Bruker รุ่น D ADVANCE ECO .....	11
รูป 5 ภาพถ่ายตัวอย่างฟิล์มทองคำด้วยกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่ ยี่ห้อ Samsung Galaxy A50 ก) ฟิล์มทองบนแก้วไม่อบ ข) ฟิล์มทองบนแก้วอบที่ 700 <sup>0</sup> C ค) ฟิล์มทองบนแก้วอบที่ 300 <sup>0</sup> C ง) ฟิล์มทองบนซิลิกอนไม่อบ จ) ฟิล์มทองบนซิลิกอนอบที่ 700 <sup>0</sup> C ค) ฟิล์มทองบนซิลิกอนอบที่ 300 <sup>0</sup> C.....	15
รูป 6 ภาพถ่ายของตัวอย่างฟิล์มทองคำจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก) ฟิล์มทองบนแก้วไม่อบ ข) ฟิล์มทองบนแก้วอบที่ 300 <sup>0</sup> C ค) ฟิล์มทองบนแก้วอบที่ 700 <sup>0</sup> C ง) ฟิล์มทองบนซิลิกอนไม่อบ จ) ฟิล์มทองบนซิลิกอนอบที่ 300 <sup>0</sup> C ค) ฟิล์มทองบนซิลิกอนอบที่ 700 <sup>0</sup> C.....	16
รูป 7 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว .....	20
รูป 8 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอน .....	22



# บทที่ 1 บทนำ

## ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทองคำเป็นหนึ่งในโลหะมีค่า ที่อยู่คู่กับอารยธรรมของมนุษย์มานานและถูกประยุกต์ใช้ในหลากหลายรูปแบบ เช่น เครื่องประดับ หรือ ตัวกลางในการแลกเปลี่ยนสินค้า เป็นต้น เนื่องจากทองคำมีความเป็นมันวาวสวยงาม และยังมีคุณสมบัติทนไม่เกิดสนิมได้ง่าย นอกจากนี้ทองคำยังมีความเป็นพิษต่อมนุษย์ต่ำจนสามารถนำมาประกอบอาหารเพื่อความสวยงามได้เช่นกัน นอกจากนี้การใช้งานที่หลากหลายที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าทองคำยังมีความสำคัญใน อุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์ อีกด้วย อันเนื่องมาจาก คุณสมบัติทางกรนำไฟฟ้าที่ดี

เป็นที่ทราบกันดีว่า อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นหนึ่งในปัจจัยที่ทำให้การพัฒนาเทคโนโลยีและคุณภาพชีวิตของมนุษย์พัฒนาไปได้อย่างก้าวกระโดด เหตุผลสำคัญหนึ่งคือ ความพยายามในการพัฒนาศักยภาพทางด้านอิเล็กทรอนิกส์อย่างต่อเนื่องภายใต้กฎของมัวร์ (Moore's law) ซึ่งนำไปสู่ความพยายามในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งการพัฒนานี้กำลังมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันเริ่มมีขนาดเล็กลงมาจนวัสดุเหล่านี้เริ่มได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ควอนตัม (quantum effect) ส่งผลต่อความรู้ทางฟิสิกส์แบบดั้งเดิม (classical physics) ที่เป็นพื้นฐานของการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีควอนตัมในปัจจุบันของมนุษย์ยังมีไม่มากเพียงพอต่อการนำมาพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อการค้าเพื่อต่อยอดกับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันได้ ดังนั้นมีนักวิจัยมากมายที่พยายามทำการศึกษาค้นคว้าถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในรูปแบบใหม่มากขึ้น หนึ่งในหัวข้อวิจัยที่สำคัญ คือ การทำความเข้าใจพฤติกรรมของทองคำ เพราะทองคำนับว่าเป็นหนึ่งในวัสดุสำคัญที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ปัจจุบัน และมีแนวโน้มว่าจะยังคงเป็นส่วนสำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบใหม่ในอนาคตเช่นกัน

ความเข้าใจในพฤติกรรมของทองในระดับอะตอม จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการผลิตและคิดค้นนวัตกรรมใหม่ๆใน อุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรม แต่ปัญหาสำคัญที่ขลอการวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับทองคำ คือ ต้นทุนที่สูง เนื่องจากทองคำนับว่าเป็นวัสดุที่มีราคาสูงอยู่แล้ว นอกจากนั้นทองคำที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มักเป็น ทองคำที่มีความบริสุทธิ์สูงและจำเป็นต้องผ่านกระบวนการผลิตที่จำเพาะทำให้มีต้นทุนสูงขึ้นไปอีก เช่น ฟิล์มทองบาง ดังนั้นงานวิจัยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการลดต้นทุนการสร้าง ฟิล์มทองคำสำหรับงานวิจัย โดยการใช้ทองคำเปลว เนื่องจากประเทศไทยมีความเชี่ยวชาญในการผลิตทองคำเปลว ซึ่งอาจเป็นแนวทางในการพัฒนาแผ่นฟิล์มทองเพื่อการวิจัย จากทองคำเปลวจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของการผลิตในไทยด้วยองค์ความรู้ใหม่ได้ และท้ายที่สุด งานวิจัยต้องการจะทำการศึกษาทำความเข้าใจกลไกการเคลื่อนที่ของทองคำเปลว เพื่อเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่จะมีส่วนช่วยต่อการพัฒนาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

## วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษากลไกในการเคลื่อนตัวของ อะตอมของทองในทองคำเปลวระหว่างการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวด้วยความร้อนจากการอบ
- 2) ศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาแผ่นฟิล์มทองเพื่อการวิจัย จากทองคำเปลว

## ขอบเขตของการวิจัย

- 1) เข้าใจกลไกการเคลื่อนตัวของทอง(ในระดับอะตอม) ของทองคำเปลวระหว่างการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวด้วยความร้อนจากการอบ
- 2) ศึกษาความเป็นไปได้และเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาแผ่นฟิล์มทองเพื่อการวิจัย จากทองคำเปลว

## วิธีดำเนินการวิจัย

- 1) เตรียมตัวก่อนการทดลอง
  - a. ทบทวนวรรณกรรม
  - b. ออกแบบการทดลอง
- 2) ทำการผลิตตัวอย่างฟิล์มทองคำบนวัสดุฐานสองชนิด ได้แก่ แก้ว และ ซิลิกอน
  - a. ผลิตฟิล์มทองคำจากทองคำเปลว พบว่าคุณภาพของฟิล์มยังไม่เหมาะสมต่อการใช้ศึกษา กลไกการเคลื่อนที่ของทองคำในระดับอะตอม
  - b. เตรียมฟิล์มทองจากการเคลือบในสุญญากาศ sputtering
- 3) นำตัวอย่างฟิล์มทองคำไปอบ ที่อุณหภูมิต่างกัน ( $300^{\circ}\text{C}$  และ  $700^{\circ}\text{C}$ )
- 4) นำตัวอย่างฟิล์มทองคำที่อบที่อุณหภูมิต่างกันไปวิเคราะห์
  - a. ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscopy (SEM)
  - b. ทดสอบตัวอย่างด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)
  - c. ทดสอบตัวอย่างด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)
- 5) วิเคราะห์ผล
  - a. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของฟิล์มทองคำจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscopy (SEM)

- b. วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค จากการทดสอบด้วยEnergy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)
  - c. วิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)
  - d. สรุปผลการทดลอง
- 6) เผยแพร่ผลงาน
- a. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์
  - b. วางแผนในการเผยแพร่ผลงาน โดยการนำเสนอทางวิชาการ หรือ การบูรณาการการสอน วิชาที่เหมาะสมของสาขาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรมต่อไป

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) การเข้าใจกลไกพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของไอออนที่ทองคำจะเป็นการขยายองค์ความรู้พื้นฐานทางฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์
- 2) องค์ความรู้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงฟิล์มทองคำอาจนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในปัจจุบันที่อุตสาหกรรมและการวิจัยทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังพยายามก้าวข้ามขีดจำกัดของความไม่แน่นอนเนื่องมาจากผลกระทบทางควอนตัม(quantum effect)ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลง
- 3) สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปบูรณาการการสอนได้

## บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### การประมาณขนาดเฉลี่ยของ grain ด้วยสูตรของ Scherrer

สูตรของ Scherrer เป็นสมการที่ใช้ในการประมาณขนาดเฉลี่ยของผลึกที่สนใจ หรือ ขนาดของเกรน grain โดยที่สูตรของอยู่ในรูป

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

สมการที่ 1

เมื่อ  $D$  คือ ขนาดเฉลี่ยของผลึก หรือ ขนาดเฉลี่ยของเกรน

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์เรย์ที่ตกกระทบ

$\beta$  คือ ความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของ ยอด xrd ในหน่วย เรเดียน

$\theta$  คือ มุมของ Bragg และ

$K$  คือ ค่าคงที่

ในงานของ Scherrer เขาได้ให้ ค่า  $K = 2\left(\ln \frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 0.9394$  และต่อมาได้มีการศึกษาและพัฒนาสูตรของ Scherrer พบว่าค่าคงที่นี้แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยที่หลากหลายของตัวอย่าง เช่น รูปร่างของผลึก ค่าดัชนี (hkl) ของระนาบการสะท้อน เป็นต้น และ หนึ่งในการศึกษาเหล่านั้น Langford และ Wilson [1] ได้ประมาณว่า  $0.70 < K < 1.70$

## กระบวนการ solid state dewetting

เมื่อหยดของไหลลงบนพื้นผิว แล้วของไหลจะประพฤติตัวได้สองแบบ คือ หนึ่ง ทำให้พื้นผิวเปียก wetting หรือการที่ของไหลสามารถเข้าไปครอบคลุมผิวได้อย่างเสถียรหรือ เป็นวงกว้าง หรือ สอง การที่ของไหลทำให้พื้นผิวไม่เปียก dewetting โดยการรวมตัวกันเป็นหยด (droplet) dewetting เป็นกลไกการหดตัวของของไหล (fluid) จากการที่ของไหลครอบคลุมพื้นผิวที่ไม่เหมาะสมอย่างไม่เสถียร

สำหรับวัสดุประเภทฟิล์มบางส่วนมาก ไม่ว่าจะเป็นในสถานะ ของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซ มักจะอยู่ในสถานะกึ่งเสถียร (Metastable) หรือ ไม่เสถียร ดังนั้นเป็นที่คาดได้ว่าฟิล์มบางเหล่านี้จะต้องสลายตัวในที่สุด คำถามที่สำคัญคือ ฟิล์มเหล่านี้จะสลายตัวอย่างไร สำหรับฟิล์มทองคำบนซิลิกอน (Ernst และ คณะ)[2] ได้ เสนอว่า กระบวนการรวมตัวกันเป็นหยด (dewetting) คือ หนึ่งในกระบวนการที่ทำให้ฟิล์มทองคำสลายตัวจากฟิล์มต่อเนื่องได้ โดย กระบวนการรวมตัวกันเป็นหยด dewetting สามารถเกิดได้จากสองกลไกหลักๆ ได้แก่ การรวมตัวกันเป็นหยดจาก การเหนี่ยวนำ(induced dewetting) เหนี่ยวนำ หรือ การรวมตัวเป็นหยดแบบสันหลัง (spinodal dewetting)

การรวมตัวกันเป็นหยดจากเหนี่ยวนำ (induced dewetting) เป็นกระบวนการง่ายที่ชั้นของวัสดุประเภทฟิล์มถูกก่อตัวให้เกิดรู โดยรูเหล่านี้ อาจเกิดจากการกระทบทางกายภาพ หรือ ความไม่แน่นอนทางสถิติ จากนั้นวัสดุในฟิล์มบางจึงเริ่มหดตัวจากรูเหล่านี้ โดยเริ่มรวมกันที่ขอบของรูและผลักขอบออกไปทำให้รูขยายใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนสุดท้ายวัสดุเหล่านี้จากหลายๆรูจะมารวมกันเป็นหยดในที่สุด

การรวมตัวเป็นหยดแบบสันหลัง (spinodal dewetting) เป็นกระบวนการที่เกิดจาก ความผันผวนของความหนาของฟิล์ม ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของ รู และ หยด บนฟิล์มในวงกว้างอย่างพร้อมเพียงกัน โดยกลไกการรวมตัวเป็นหยดแบบสันหลัง มีสี่ขั้นตอนได้แก่ สถานะเริ่มต้นเป็นแผ่น สถานะที่หนึ่ง สถานะที่สอง และ สถานะเป็นหยด ในสถานะเริ่มต้น ฟิล์มมีการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันบนวัสดุฐานโดยไม่ถูกรบกวน ใน สถานะที่หนึ่ง แผ่นฟิล์มเริ่มได้รับความร้อนทำให้วัสดุฟิล์มเกิดการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) มากขึ้น ซึ่งนำไปสู่การกระจายตัวของสารในรูปแบบคลื่นในมิติของตำแหน่ง โดยในสถานะที่หนึ่ง รูปแบบคลื่นนี้จะมี ความเสถียรและจะหมดความเสถียรไปเมื่อเข้าสู่สถานะที่สอง ในสถานะการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนจะเกิดขึ้นอย่างเข้มข้นขึ้น ซึ่งนำไปสู่ส่วนที่บางของฟิล์มจากสถานะที่สอง เริ่มไปสัมผัสกับวัสดุฐานจนเกิดเป็นรูบนฟิล์ม ซึ่งรูเหล่านี้จะขยายขนาดด้วยกลไกแบบเดียวกับการรวมตัวเป็นหยดจากการเหนี่ยวนำ ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างกลไกทั้งสอง คือการเกิดรูในการรวมตัวเป็นหยดแบบสันหลังนี้ รูจะไม่ได้เกิดแบบชุ่มแต่เกิดแบบขึ้นอยู่การระจุก

ตัวของสารจากการเหนี่ยวนำความร้อน (heat-induced warping) เสริมด้วยศักย์ยังผลระหว่างผิวสัมผัส (effective interfacial potential)

### การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกและขนาดของเกรน เนื่องจากความร้อน[3]

ในการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการรวมกันเป็นหยดของฟิล์มทองคำบนแก้วอันเนื่องจากความร้อนของ Tesler และคณะพบว่าการรวมกันเป็นหยดของฟิล์มทองคำนอกจากจะเปลี่ยนรูปร่างของฟิล์มทองคำแล้วยังมีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างทางผลึกของทองคำด้วย ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าในตัวอย่างฟิล์มทองคำที่ไม่ผ่านการอบจะมีการพบทองคำในรูปแบบผลึกทั่วไปเหมือนกับ ตัวอย่างมาตรฐานทองคำ แต่เมื่อตัวอย่างฟิล์มทองคำผ่านการอบแล้วพบว่าการเพิ่มขึ้นของผลึกทองคำ (111) อย่างมีนัยสำคัญและส่งผลให้ปริมาณผลึกทองคำในรูปแบบอื่นลดลงไปด้วย



## บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

### การเตรียมฟิล์มทองจากทองคำเปลว

1. ทำความสะอาด แผ่นสไลด์แก้ว หรือ แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ ด้วย แอซิโตน เมทานอล และ น้ำดีไอ จากนั้น เป่าให้แห้งด้วยปืนลม เพื่อเป็นวัสดุฐานสำหรับเตรียมฟิล์มทอง
2. แปะทองคำเปลวที่บน ชิ้นงานฐานที่ทำความสะอาด โดยพยายามให้ทองคำเปลวบนชิ้นงานฐานเรียบที่สุด

### การเตรียมฟิล์มทองจากการเคลือบในสุญญากาศ sputtering



รูป 1 เครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์ริง (Sputter Coater) จากบริษัท Cressington Scientific Instrument รุ่น Cressington 108auto

1. ทำความสะอาด แผ่นสไลด์แก้ว หรือ แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ ด้วย แอกอฮอล์ เมทานอล และ น้ำดีไอ จากนั้น เป่าให้แห้งด้วยปืนลม เพื่อเป็นวัสดุฐานสำหรับเตรียมฟิล์มทอง
2. นำชิ้นงานฐานที่ทำความสะอาดใส่เข้าไปใน เครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์ริง (Sputter Coater) จากบริษัท Cressington Scientific Instrument รุ่น Cressington 108auto
3. ทั้งนี้การเคลือบทองคำบนวัสดุฐานเพื่อผลิตฟิล์มทองคำในงานวิจัยครั้งนี้ ทำโดยไม่มีกระบวนการควบคุมความหนาเพราะ เป็นการนำวัสดุฐานวางไว้ในห้องสุญญากาศบริเวณที่ว่างระหว่าง ที่มีการเตรียมตัวอย่างอื่นๆสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนซึ่งจำเป็นต้องมีการเคลือบทองคำ ซึ่งเป็นการนำทองคำซึ่งปกติจะถูกเคลือบพื้นที่ว่างในห้องสุญญากาศไปอย่างเสียเปล่ามาใช้ประโยชน์ในการผลิตฟิล์มทองคำสำหรับงานวิจัยนี้





## การอบฟิล์มทอง annealing ของฟิล์มทองจากทองคำเปลว



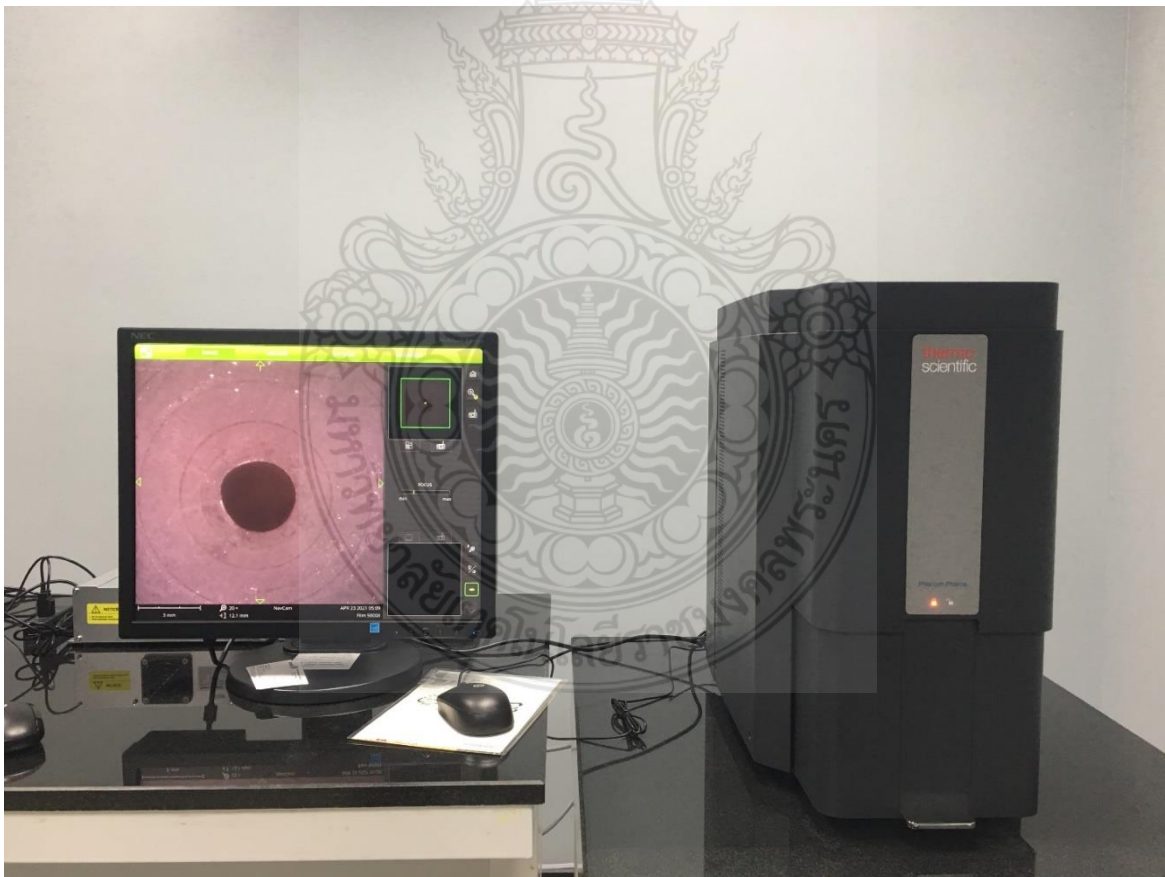
รูป 2 เตาอบ Carbolite ELF 11/14B Economy Chamber Furnace

- นำตัวอย่างฟิล์มทองคำเข้าไปอบใน เตาอบ *Carbolite ELF 11/14B Economy Chamber Furnace* โดยตั้งโปรแกรมในการอบดังนี้
  - อุณหภูมิเพิ่มจาก อุณหภูมิห้องไป 300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียส ต่อ ชั่วโมง
  - แช่ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ประมาณ 4 ชม.
- ทำซ้ำโดยเปลี่ยนจากอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็น 500 และ 700 องศาเซลเซียส

## การอบฟิล์มทอง annealing ของฟิล์มทองจากเครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยฟิล์มบางแบบ สปีตเตอร์ริง (Sputter Coater)

1. นำตัวอย่างฟิล์มทองคำเข้าไปอบใน เตาอบรุ่น โดยตั้งโปรแกรมในการอบดังนี้
  - a. อุณหภูมิเพิ่มจาก อุณหภูมิห้องไป 300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียส ต่อ ชั่วโมง
  - b. แช่วที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ประมาณ 4 ชม.
2. ทำซ้ำโดยเปลี่ยนจากอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็น 700 องศาเซลเซียส

## การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูป 3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) จากบริษัท Thermo Scientific รุ่น phenom pro G6

1. ทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ยี่ห้อ thermo scientific รุ่น phenom pro G6 ด้วย พลังงานอิเล็กตรอน 15kV และกำลังขยาย 10,000 เท่า

## การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

1. ใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ยี่ห้อ thermo scientific รุ่น phenom ด้วย พลังงานอิเล็กตรอน 15kV และกำลังขยาย 10,000 เท่า ในการวิเคราะห์ธาตุของตัวอย่าง ในโหมด map

## การวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



รูป 4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) จากบริษัท Bruker รุ่น D ADVANCE ECO

1. การทดสอบโครงสร้างทางผลึกของฟิล์มทองทำโดย ใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) จากบริษัท Bruker รุ่น D ADVANCE ECO
2. ทำการทดสอบตัวอย่างโดยการใช้ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว และฟิล์มทองคำบนซิลิกอนที่ ผ่านการอบที่อุณหภูมิต่าง โดยไม่ต้องมีการเตรียมตัวอย่างเพิ่มเติม



# บทที่ 4 ผลการวิจัย

## ผลการผลิตฟิล์มทองจากทองคำเปลว

จากความพยายามในการผลิตฟิล์มทองคำบนแก้ว และฟิล์มทองคำบนทองคำเปลวพบว่าปัญหาสำคัญ คือ การยึดติดของแผ่นทองคำเปลวบนวัสดุฐานทั้งสองประเภทไม่ว่าจะเป็น แผ่นแก้วหรือ แผ่นซิลิกอน มีน้อยมาก ทำให้ไม่สามารถผลิตตัวอย่างฟิล์มทองคำจากทองคำเปลวที่มีความเสถียรมากพอที่จะนำไปอบเพื่อการศึกษากลไกการเคลื่อนที่ของทองคำได้ตามที่ตั้งเป้าหมายได้ แนวทางในการแก้ไขปัญหานี้มีสองวิธี คือ หนึ่งการเลือกใช้สารประสานระหว่างทองคำและวัสดุฐาน เช่น การใช้ อีพอกซีเรซินเป็นต้น และ วิธีที่สอง คือ การเลือกใช้กระบวนการอื่นในการผลิตฟิล์มทองคำ เช่น การใช้เครื่องเคลือบสุญญากาศ (sputtering) เป็นต้น เพื่อตัดสินเลือกแนวทางที่เหมาะสมผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของแนวทางทั้งสองดังนี้

การใช้สารประสานระหว่างทองคำเปลวและวัสดุฐาน

ข้อดี

- 1) มีต้นทุนต่ำกว่า
- 2) ได้ฟิล์มทองคำที่ผลิตจากทองคำเปลว

ข้อเสีย

- 1) การใช้สารประสานจะเพิ่มความซับซ้อนให้กับระบบฟิล์มทองคำ
- 2) สารประสานที่เลือกใช้จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติที่สามารถอบตัวอย่างฟิล์มทองคำได้
- 3) การผลิตฟิล์มทองคำที่เรียบเป็นไปได้ยาก

การผลิตฟิล์มทองคำด้วยเครื่องเคลือบสุญญากาศ (sputter)

ข้อดี

- 1) ได้ตัวอย่างฟิล์มทองคำที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าทองคำเปลว
- 2) ได้ตัวอย่างฟิล์มทองคำที่มีความเรียบ
- 3) ได้ตัวอย่างฟิล์มทองคำที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าการเตรียมฟิล์มทองคำด้วยสารประสาน จึงมีความเหมาะสมต่อการศึกษากลไกการเคลื่อนที่ของทองคำมากกว่า

ข้อเสีย

- 1) ต้นทุนในการผลิตสูง
- 2) แม้ว่าจะได้ฟิล์มทองคำที่มีความบริสุทธิ์ดีกว่า แต่จะได้ตัวอย่างที่แตกต่างจากฟิล์มทองคำจากทองคำเปลวตามที่ได้เสนอหัวข้อไว้

จากวิเคราะห์ข้อดีและเสียของทั้งสองแนวทาง ผู้วิจัยเชื่อว่าแนวทางที่สองการผลิตฟิล์มทองคำโดยใช้เครื่องเคลือบผิวในสุญญากาศมีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากเป้าหมายหลักของการศึกษาครั้งนี้ คือ การศึกษากลไกการเคลื่อนตัวของทองในระดับอะตอม ในการเปลี่ยนโครงสร้างทางพื้นผิวของฟิล์มทองคำที่ผลิตจากทองคำเปลว แม้ว่าการที่ผู้วิจัยเลือกใช้ฟิล์มทองคำที่ผลิตจากเครื่องเคลือบผิวในสุญญากาศนั้นจะแตกต่างไปจากการตัวอย่างที่ผู้วิจัยตั้งใจไว้ แต่การใช้ตัวอย่างนี้ยังคงเป็นตัวอย่างฟิล์มทองคำที่เหมาะสมต่อการศึกษากลไกการเคลื่อนตัวของทองในระดับอะตอมมากกว่า การใช้ตัวอย่างฟิล์มทองคำจากทองคำเปลวโดยใช้สารประสานเนื่องจากมีความซับซ้อนที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของทองน้อยกว่า

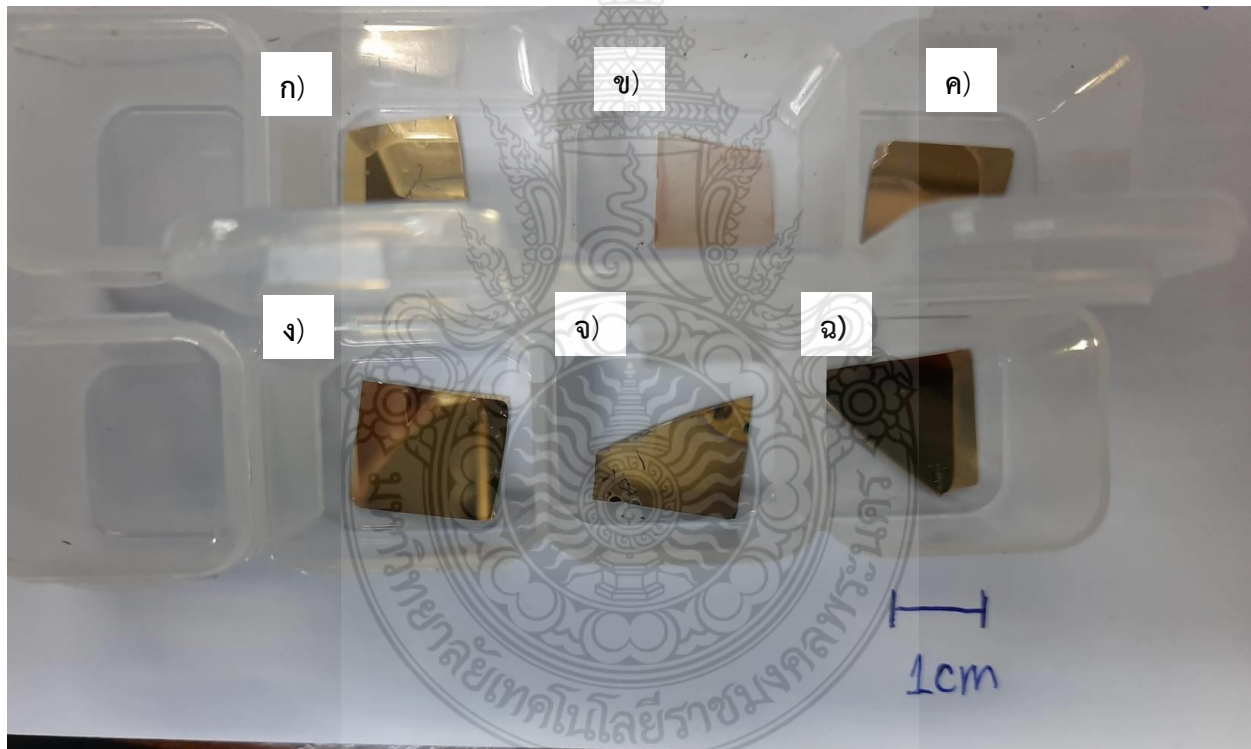
## ภาพถ่ายด้วยกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่ของตัวอย่างฟิล์มทองคำที่ผลิตด้วยเครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์ริง (Sputter Coater)

ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว: ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วควบคุม (รูปที่ 5 ก) หรือ ตัวอย่างที่ไม่ได้อบมีลักษณะความเป็นมันวาวมากที่สุดสะท้อนแสงได้ดี มีสีเหลืองทอง และตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วที่อบที่อุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$  (รูปที่ 5 ค) มีความมันวาวที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วที่อบที่อุณหภูมิ  $700^{\circ}\text{C}$  (รูปที่ 5 ข) มีลักษณะที่แตกต่างจากตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วตัวอย่างอื่นอย่างชัดเจน คือ มีลักษณะไม่มันวาวแต่มีความโปร่งแสงมีสีเหลืองทองเล็กน้อย จากผลของภาพถ่ายนี้ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการอบด้วยอุณหภูมิ  $700^{\circ}\text{C}$  สร้างการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพต่อฟิล์มทองคำบนแก้ว ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของฟิล์มทองคำบนแก้วที่อบที่อุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$  ยังไม่ปรากฏชัดเจนมากนักจากภาพถ่าย

ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอน: ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนควบคุม (รูปที่ 5 ง) หรือ ตัวอย่างที่ไม่ได้อบมีลักษณะความเป็นมันวาวมากที่สุดสะท้อนแสงได้ดี มีสีเหลืองทอง และตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนที่อบที่อุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$  (รูปที่ 5 ฉ) มีความมันวาวที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วที่อบที่อุณหภูมิ  $700^{\circ}\text{C}$  (รูปที่ 5 จ) มีลักษณะที่แตกต่างจากตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วตัวอย่างอื่น คือ มีลักษณะหมองและไม่สะท้อนแสงดีเท่ากับตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอน จากผลของภาพถ่ายนี้ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการอบด้วย

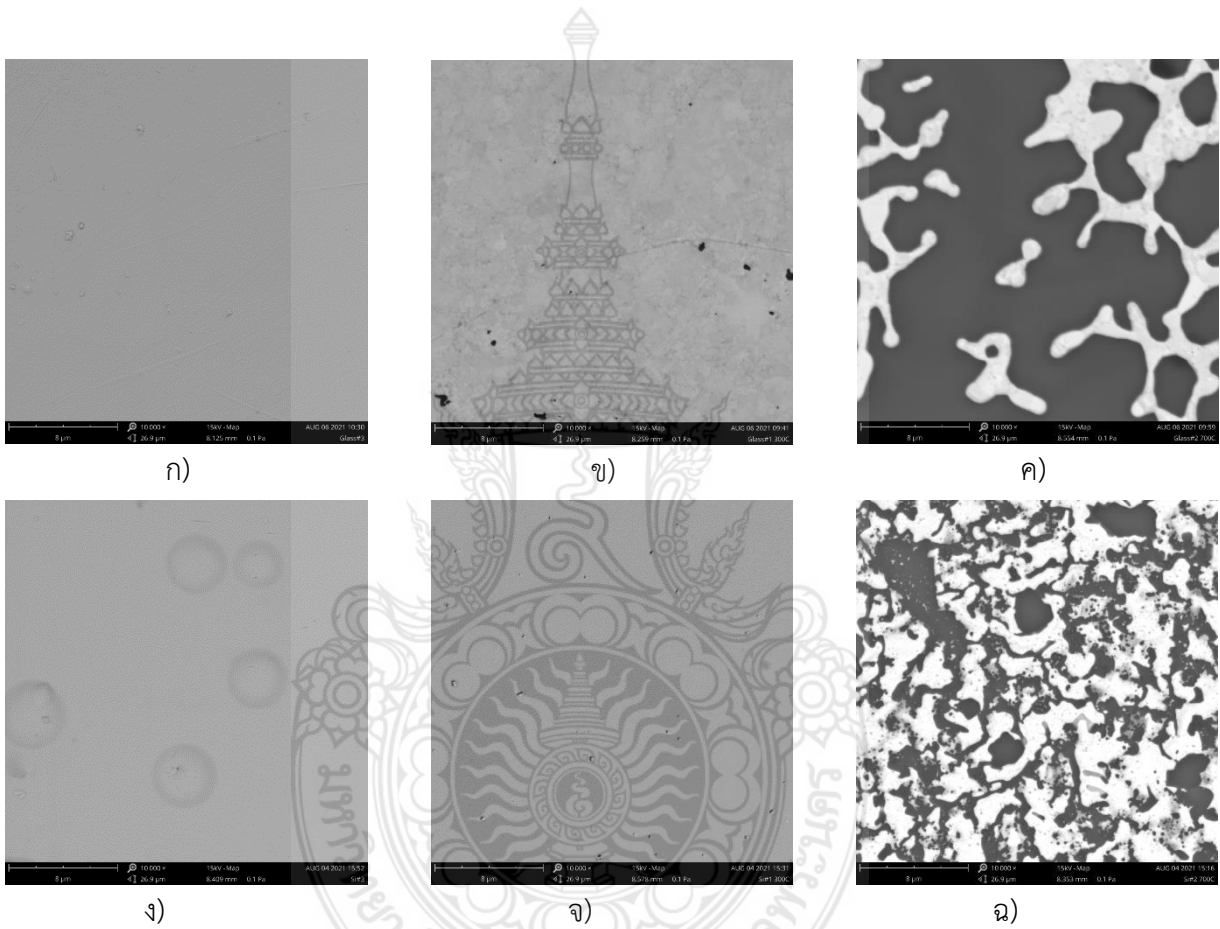
อุณหภูมิ 700°C สร้างการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพต่อฟิล์มทองคำบนแก้ว ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของฟิล์มทองคำบนแก้วที่อบที่อุณหภูมิ 300°C ยังไม่ปรากฏชัดเจนมากนักจากภาพถ่าย

เมื่อสังเกตตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วเปรียบเทียบกับตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอน พบว่าตัวอย่างทั้งสองชนิดมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้จากภาพถ่ายมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการอบสูงขึ้น กล่าวคือ ตัวอย่างที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 700°C ของทั้งฟิล์มทองคำบนแก้วและฟิล์มทองคำบนซิลิกอนมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สามารถสังเกตได้ชัดเจนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างในกลุ่มของตัวเอง ทั้งนี้ ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนที่อบด้วยอุณหภูมิ 700°C ไม่ปรากฏความชัดเจนเท่ากับการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้จากตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วที่อบด้วยอุณหภูมิ 700°C



รูป 5 ภาพถ่ายตัวอย่างฟิล์มทองคำด้วยกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่ ยี่ห้อ Samsung Galaxy A50 ก) ฟิล์มทองบนแก้วไม่อบ ข) ฟิล์มทองบนแก้วอบที่ 700°C ค) ฟิล์มทองบนแก้วอบที่ 300°C ง) ฟิล์มทองบนซิลิกอนไม่อบ จ) ฟิล์มทองบนซิลิกอนอบที่ 700°C ฉ) ฟิล์มทองบนซิลิกอนอบที่ 300°C

ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของของตัวอย่างฟิล์ม  
ทองคำที่ผลิตด้วยเครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์ริง (Sputter  
Coater)



รูป 6 ภาพถ่ายของตัวอย่างฟิล์มทองคำจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก) ฟิล์มทองบนแก้วไม่อบ ข) ฟิล์มทองบนแก้วอบที่ 300°C ค) ฟิล์มทองบนแก้วอบที่ 700°C ง) ฟิล์มทองบนซิลิกอนไม่อบ จ) ฟิล์มทองบนซิลิกอนอบที่ 300°C ฉ) ฟิล์มทองบนซิลิกอนอบที่ 700°C



ในฟิล์มทองคำบนแก้ว จากการสังเกตภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่า ฟิล์มทองคำบนแก้ว ตัวอย่างควบคุมหรือฟิล์มทองคำบนแก้วที่ไม่ได้ผ่านการอบ (รูปที่ 6 ก) มีความขรุขระน้อยที่สุด ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วที่อบที่อุณหภูมิ 300 °C (รูปที่ 6 ข) มีความขรุขระมากขึ้น และ ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วที่อบที่อุณหภูมิ 700 °C (รูปที่ 6 ค) มีความขรุขระมากที่สุด ในด้านการครอบคลุมพื้นผิวของฟิล์มทองคำ ครอบคลุมพื้นผิวของวัสดุฐานทั้งหมดในตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วควบคุม สำหรับตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วที่อบที่ 300 °C มีวัสดุพื้นฐานปริมาณเล็กน้อยปรากฏขึ้น และ ในตัวอย่างฟิล์มทองคำที่อบที่ 700 °C พบว่าวัสดุพื้นฐานโดยประมาณสามในสี่ปรากฏให้เห็น ซึ่งผลจากการสังเกตความเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของฟิล์มทองคำบนแก้วที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สนับสนุนผลจากการสังเกตจากภาพถ่ายจากกล้องโทรศัพท์เคลื่อนตามที่ควรจะเป็น แต่มีรายละเอียดมากกว่า กล่าวคือ ผลจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทำให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่การอบตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วที่อุณหภูมิ 300 °C ได้ โดยสามารถสรุปได้ว่า การอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพในระดับจุลภาคของฟิล์มทองคำบนแก้ว

ในฟิล์มทองคำบนซิลิกอน ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนควบคุมหรือฟิล์มทองคำบนซิลิกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบ (รูปที่ 6 ง) มีความขรุขระของผิวดำที่สุด ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนที่อบที่ 300 °C (รูปที่ 6 จ) มีความขรุขระมากขึ้น และ ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนที่อบที่ 700 °C (รูปที่ 6 ฉ) มีความขรุขระมากที่สุด ในตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนควบคุมและตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนที่อบที่ 300 °C มีทองคำครอบคลุมพื้นผิวทั้งหมด แต่พบว่า มีรูปร่างทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 3-5  $\mu\text{m}$  ปรากฏอยู่บนตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนควบคุม ซึ่งคณะผู้วิจัยเชื่อว่าวงกลมเหล่านี้อาจเป็นสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนตัวอย่าง เนื่องจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่า มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนที่ไม่ควรมีอยู่บนตัวอย่างไม่ ในตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนที่ผ่านการอบที่ 300 °C พบว่ามีเกาะรูปร่างไม่แน่นอนขนาดต่ำ  $\sim 0.5 \mu\text{m}$  จำนวนประมาณ 30 เกาะ กระจายตัวอยู่ทั่วพื้นผิว และในตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนที่ผ่านการอบที่ 700 °C พบว่ามีปรากฏของวัสดุพื้นฐานโดยประมาณหนึ่งในสี่ของพื้นผิวทั้งหมด ซึ่งผลจากการสังเกตความเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของฟิล์มทองคำบนซิลิกอนที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สนับสนุนผลจากการสังเกตจากภาพถ่ายจากกล้องโทรศัพท์เคลื่อนตามที่ควรจะเป็น แต่มีรายละเอียดมากกว่า กล่าวคือ ผลจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทำให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่การอบตัว

อย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนที่อุณหภูมิ 300 °C ได้ โดยสามารถสรุปได้ว่า การอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพในระดับจุลภาคของฟิล์มทองคำบนซิลิกอน

เมื่อเปรียบเทียบภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วและตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนด้วยกัน พบว่าตัวอย่างควบคุมของฟิล์มทองคำบนแก้วและฟิล์มทองคำบนซิลิกอนไม่มีความแตกต่างกันมากนักในลักษณะกายภาพทั่วไปของฟิล์มแต่ ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนปรากฏทรงกลมที่คาดว่ามาจากสารอินทรีย์ปนเปื้อน ที่การอบที่อุณหภูมิ 300 °C พบว่า ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วมีความขรุขระมากกว่าฟิล์มทองคำบนซิลิกอน ในทำนองเดียวกัน ที่การอบที่ อุณหภูมิ 700 °C พบว่า ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วมีความขรุขระมากกว่าฟิล์มทองคำบนซิลิกอน และ การปรากฏของวัสดุพื้นฐานของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว (วัสดุพื้นฐานสามในสี่ของพื้นผิวทั้งหมดของตัวอย่าง) มีมากกว่า ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอน (วัสดุพื้นฐานหนึ่งในสี่ของพื้นผิวทั้งหมดของตัวอย่าง) ซึ่งผลการเปรียบเทียบนี้สืบผลจากการสังเกตภาพถ่ายของตัวอย่างทั้งสองด้วยภาพถ่ายจากกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยสามารถสรุปได้ว่า การอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในระดับจุลภาคกับตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วและตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอน โดยการเปลี่ยนแปลงจะมีมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการอบสูงขึ้น และที่อุณหภูมิเดียวกันการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วจะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในระดับจุลภาคมากกว่าตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอน

## ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

ธาตุ	ความเข้มข้น เปอร์เซ็นต์อะตอม			ความเข้มข้น เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก		
	Au/Glass- Control	Au/Glass- 300	Au/Glass- 700	Au/Glass- Control	Au/Glass- 300	Au/Glass- 700
ตัวอย่าง						
ทองคำ	98.11	97.90	35.27	99.73	99.70	85.76
ซิลิกอน	1.89	2.10	9.67	0.27	0.30	3.36
ออกซิเจน	-	-	55.08	-	-	10.89

ตาราง 1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว แสดงการลดลงของความเข้มข้นของทองคำเมื่ออุณหภูมิในการอบต่างๆ

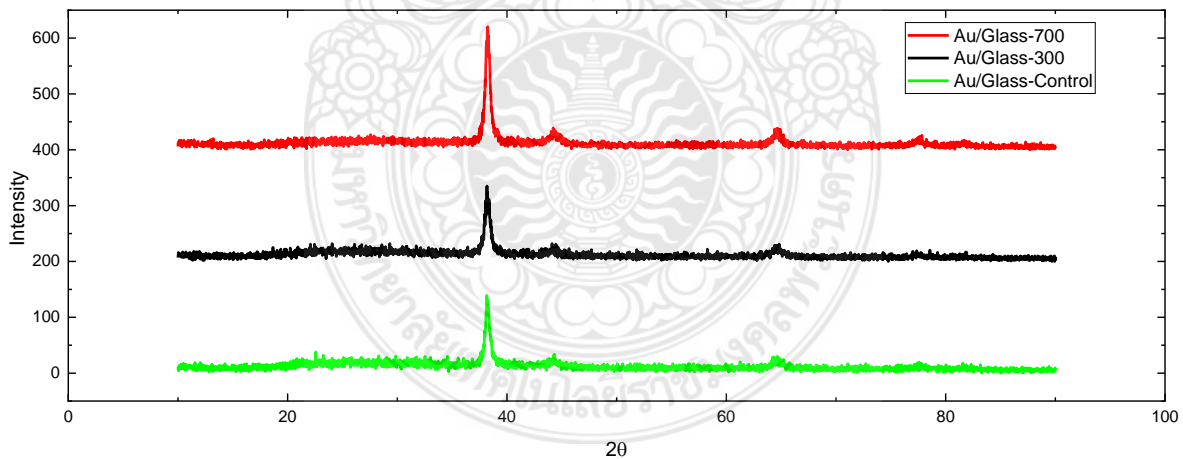
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุส่วนใหญ่เป็นทองคำตามที่คาดไว้ โดยความเข้มข้นของทองคำ มีค่ามากที่สุดสำหรับตัวอย่างควบคุม และ มีค่าน้อยที่สุดในตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 700 °C โดยมีค่าความเข้มข้น เป็น 98.11, 97.90, และ 35.27 หรือ 99.73, 99.70, และ 85.76 เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วควบคุม ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 300 °C และ 700 °C ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างทั้งสามมองค์ประกอบของธาตุซิลิกอนปรากฏอยู่ใน โดยความเข้มข้นของซิลิกอน น้อยที่สุดในตัวอย่างควบคุมของฟิล์มทองคำบนแก้ว และ ความเข้มข้นมากที่สุดในตัวอย่างที่ผ่านการอบที่ 700 °C โดยมีค่าความเข้มข้น เป็น 1.89, 2.10, และ 9.67 หรือ 0.27, 0.30, และ 3.36 เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก สำหรับ ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว ตัวอย่างควบคุม ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 300 °C และ 700 °C ตามลำดับ สังเกตได้ว่าความเข้มข้นของทองคำในตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีปริมาณลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของธาตุซิลิกอน เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลจากการสังเกตภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การปรากฏตัวของวัสดุฐาน(แก้ว) มีปริมาณมากขึ้นทำให้การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) สามารถตรวจพบทองคำได้ลดลง และตรวจพบซิลิกอนจากแก้วได้มากขึ้น

ธาตุ	ความเข้มข้น เปอร์เซ็นต์อะตอม			ความเข้มข้นตามน้ำหนัก		
	Au/Si-Control	Au/Si-300	Au/Si700	Au/Si-Control	Au/Si-300	Au/Si700
ตัวอย่าง	Au/Si-Control	Au/Si-300	Au/Si700	Au/Si-Control	Au/Si-300	Au/Si700
ทองคำ	94.28	93.79	74.32	99.37	99.06	95.97
ซิลิกอน	2.56	6.21	16.64	0.39	0.94	3.07
ออกซิเจน	-	-	9.13	-	-	0.96
คาร์บอน	2.73	-	-	0.18	-	-

ตาราง 2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกา แสดงการลดลงของความเข้มข้นของทองคำเมื่ออุณหภูมิในการอบต่างๆ

## ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกของฟิล์มทองคำบนแก้วด้วยเทคนิค

จากผลการทดสอบโครงสร้างทางผลึกด้วยรังสีเอ็กซ์ ในฟิล์มทองคำบนแก้ว พบทั้งสามตัวอย่างมีการแสดงตำแหน่งยอดที่ชัดเจน ที่มีมุม สองซีกตำแหน่งอยู่ที่ประมาณ  $38^\circ$ ,  $44^\circ$ , และ  $65^\circ$  สำหรับ ตัวอย่างควบคุม ตัวอย่างที่อบที่อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C}$  และ ตัวอย่างที่อบที่อุณหภูมิ  $700^\circ\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งตำแหน่งยอดเหล่านี้ ตรงกับ โครงสร้างผลึกของทองคำ (111), (200), และ (220) โดยที่ ทั้งสามตัวอย่างของฟิล์มทองคำบนแก้วพบที่ยอดตำแหน่งประมาณ  $38^\circ$  มีความกว้างเต็มสูงสุดครึ่งหนึ่งของยอดต่ำที่สุดและมีพื้นที่ใต้ยอดสูงสุด เมื่อเทียบกับระหว่างตำแหน่งยอดทั้งสาม เป็นหลักฐานว่าฟิล์มทองคำบนแก้วทั้งสามตัวอย่าง มีผลึกทองคำในโครงสร้าง (111) เป็นหลัก เนื่องจาก ความกว้างเต็มสูงสุดครึ่งหนึ่งบ่งบอกถึงความเป็นผลึกที่มีคุณภาพสูง(มีความใกล้เคียงการเป็นผลึกเดี่ยว) และ พื้นที่ใต้ยอดบ่งบอกปริมาณของโครงสร้างที่มีอยู่บนตัวอย่าง เมื่อสังเกตแนวโน้มตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการอบ พบว่าเมื่อทำการอบและเพิ่มอุณหภูมิในการอบแล้ว ทั้งความกว้างเต็มสูงสุดและพื้นที่ใต้ยอดที่ตำแหน่งประมาณ  $38^\circ$  มีการเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของการอบ ซึ่งหมายความว่า การเพิ่มอุณหภูมิการอบ ทำให้ปริมาณของโครงสร้างผลึกทองคำ (111) ในชั้นงานฟิล์มทองคำบนแก้วเพิ่มขึ้นและคุณภาพของผลึกลดลง(มีความเป็นพหุผลึกมากขึ้น)



รูป 7 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว

	Peak Center			
	Au/Glass-Control	Au/Glass-300	Au/Glass-700	
Peak 1	38.23±0.01	38.22±0.01	38.12±0.01	Au (111)[4][5]
Peak 2	44.19±0.06	44.25±0.06	44.14±0.05	Au (200)[5]
Peak 3	64.65±0.04	64.64±0.04	64.68±0.03	Au (220)[5]
Peak 4	-	-	-	

ตาราง 3 สรุปค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของยอดที่พบในผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว

	FWHM		
	Au/Glass-Control	Au/Glass-300	Au/Glass-700
Peak 1	0.59±0.01	0.64±0.01	0.71±0.01
Peak 2	1.12±0.13	1.05±0.13	1.16±0.13
Peak 3	1.22±0.09	1.30±0.09	0.96±0.07
Peak 4	-	-	-

ตาราง 4 สรุปค่าความกว้างเต็มสูงสุดครึ่งหนึ่งของยอดที่พบในผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว

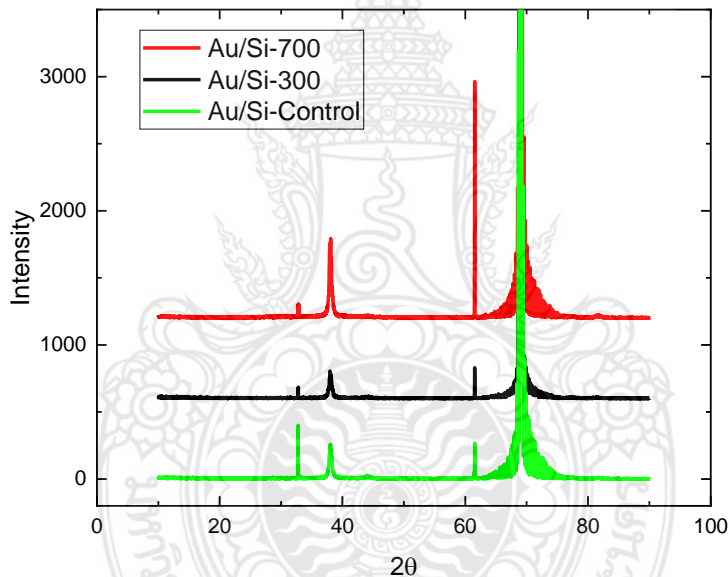
	Peak Area		
	Au/Glass-Control	Au/Glass-300	Au/Glass-700
Peak 1	64.64±0.25	67.33±0.75	160.10±1.52
Peak 2	9.86±1.05	8.55±0.98	12.59±1.19
Peak 3	16.44±1.11	18.19±1.12	21.29±1.31
Peak 4	-	-	-

ตาราง 5 สรุปค่าพื้นที่ใต้กราฟของยอดที่พบในผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้ว

	Peak Center			Assignment
	Peak Center	FWHM	Area	
Au/Si-Control	69.17±0.01	0.04±0.01	3522.36±32.34	Si(100) [6]
Au/Si-300	69.07±0.02	0.34±0.01	2909.13±36.58	Si(100) [6]
Au/Si-700	69.01±0.01	0.06±0.01	3919.20±38.80	Si(100) [6]

ตาราง 6 สรุปค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของยอดของ Si(100) ที่พบในผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอน

### ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึก ของ ฟิล์มทองคำบนซิลิกอน



รูป 8 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอน

ผลการทดสอบของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนทั้งสาม ปรากฏว่ามียอดที่ตำแหน่งประมาณ  $69^{\circ}$  อย่างชัดเจนซึ่งเป็นไปตามที่คาดเนื่องจากในชั้นกลุ่มนี้ วัสดุฐานคือ ซิลิกอน (100) (Chi 2016) ดังนั้นผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องให้ความสนใจเพิ่มเติมกับยอดที่ตำแหน่งนี้เป็นพิเศษ หากแต่ว่ายอดนี้นับว่ามีความเข้มมากเป็นพิเศษทำให้ยอดอื่นๆของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนปรากฏไม่ชัดเจน ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการตัดและขยายผลของการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มบนแก้วใหม่ดังรูปที่ 7 ซึ่งทำให้สามารถสังเกตเห็นยอดอีกสามตำแหน่งที่มุมสองซีต้าประมาณ  $33^{\circ}$ ,  $38^{\circ}$ , และ  $62^{\circ}$  ตามลำดับ ซึ่งยอดที่มุม  $38^{\circ}$  ตรงกับ โครงสร้างผลึกทองคำ (111) โดย

พบว่าพื้นที่ใต้กราฟของ ยอดที่มุม  $38^{\circ}$  มีค่าลดลง จากตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนควบคู่กัน เมื่อตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนถูกอบที่อุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$  และเมื่อทำการอบตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนที่อุณหภูมิ  $700^{\circ}\text{C}$  พบว่าพื้นที่ใต้กราฟของยอดมุมที่  $38^{\circ}$  กับมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ใต้กราฟกับอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความกว้างเต็มสูงสุดครึ่งหนึ่งของยอดมุมที่  $38^{\circ}$  โดยค่าความกว้างเต็มสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนควบคู่กัน เมื่อตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนถูกอบที่อุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$  และเมื่อทำการอบตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนที่อุณหภูมิ  $700^{\circ}\text{C}$  พบว่าค่าความกว้างเต็มสูงสุดมีค่าลดลง ซึ่งหมายความว่า ปริมาณความเข้มข้นของทองคำในโครงสร้างผลึก (111) ลดลงในตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนเมื่อผ่านการอบที่  $300^{\circ}\text{C}$  และเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการอบที่  $700^{\circ}\text{C}$  และคุณภาพผลึกหรือความเป็นผลึกเชิงเดี่ยวของทองคำ (111) ตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนเมื่อผ่านการอบที่  $300^{\circ}\text{C}$  และเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการอบที่  $700^{\circ}\text{C}$  ทั้งนี้มุมยอดที่  $33^{\circ}$  และ  $62^{\circ}$  ไม่อยู่ในขอบเขตการศึกษาของงานวิจัยนี้

	Peak Center			
	Au/Si-Control	Au/Si-300	Au/Si-700	Assignment
Peak 1	$32.79 \pm 0.01$	$32.86 \pm 0.01$	$32.85 \pm 0.01$	ไม่ทราบแน่ชัด
Peak 2	$38.04 \pm 0.01$	$38.17 \pm 0.01$	$38.03 \pm 0.01$	Au (111)
Peak 3	$61.55 \pm 0.01$	$61.66 \pm 0.24$	$61.54 \pm 0.01$	ไม่ทราบแน่ชัด

ตาราง 7 สรุปค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของยอดที่พบในผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนโดยไม่รวมยอดของ Si(100)

	FWHM		
	Au/Si-Control	Au/Si-300	Au/Si-700
Peak 1	$0.03 \pm 0.01$	-	$0.14 \pm 0.03$
Peak 2	$0.58 \pm 0.01$	$0.69 \pm 0.01$	$0.51 \pm 0.01$
Peak 3	$0.04 \pm 0.01$	$1.62 \pm 0.58$	$0.04 \pm 0.01$

ตาราง 8 สรุปค่าความกว้างเต็มสูงสุดครึ่งหนึ่งของยอดที่พบในผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนโดยไม่รวมยอดของ Si(100)

	Area		
	Au/Si-Control	Au/Si-300	Au/Si-700
Peak 1	12.59±0.20	-	7.26±1.38
Peak 2	131.00±0.90	104.02±1.55	284.27±2.64
Peak 3	11.11±0.02	7.62±2.43	73.46±0.71

ตาราง 9 สรุปค่าพื้นที่ใต้กราฟของยอดที่พบในผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอน โดยไม่รวมยอดของ Si(100)





## บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การผลิตตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วและตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนจากทองคำเปลวไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควรเนื่องจาก เนื่องจากทองคำเปลวไม่สามารถยึดติดวัสดุฐานได้มากพอที่จะนำตัวอย่างไปทำการทดสอบเพื่องานวิจัยครั้งนี้ ดังนั้นผู้วิจัยจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงวิธีในการผลิตฟิล์มทองคำ จากการวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียผู้วิจัยตัดสินใจใช้ การผลิตตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วและตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนด้วยเครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์ริง (Sputter Coater) โดยการใช้พื้นที่ว่างของช่องเก็บตัวอย่างเพื่อใช้ไอทองคำที่เหลือใช้จากการเตรียมตัวอย่างอื่นๆ ซึ่งทำให้สามารถผลิตตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วและตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนซึ่งสามารถนำไปทำการทดสอบต่อไปได้

ผลจากการสังเกตภาพถ่ายของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วและตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนพบว่า การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่ออุณหภูมิการอบเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงชัดเจนที่อุณหภูมิ  $700^{\circ}\text{C}$  เท่านั้นสำหรับตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วและตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอน ในขณะที่ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบช่องกราด แสดงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในระดับจุลภาคของตัวอย่างฟิล์มทองคำทั้งสองไปในแนวทางเดียวกันกับภาพถ่ายจากกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่แต่มีรายละเอียดมากกว่า โดยผลของภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็น การรวมตัวกันของฟิล์มทองคำทำให้วัสดุฐานปรากฏมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิการอบเพิ่มสูงขึ้น ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วและตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนยืนยันผลของภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งผลของภาพถ่ายจากกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่ ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ แสดงให้เห็นถึงกระบวนการรวมกันเป็นหยดในสถานะของแข็งของฟิล์มทองคำเมื่ออุณหภูมิการอบสูงขึ้นจาก  $300^{\circ}\text{C}$ - $700^{\circ}\text{C}$  โดยกระบวนการรวมกันเป็นหยดในสถานะของแข็งเกิดขึ้นในตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วมากกว่าตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอน เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบที่เท่ากัน

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วและตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนพบว่าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของฟิล์มทองคำ ในตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วพบว่า มีโครงสร้างทางผลึก สามโครงสร้างได้แก่ ทองคำโครงสร้าง (111) (200) และ (220) โดยโครงสร้างทองคำ (111) มีมากที่สุด เมื่อทำการอบตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วจากอุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$ - $700^{\circ}\text{C}$  พบว่า ความเข้มของและความเป็นผลึกเชิงเดี่ยวของ โครงสร้างทองคำ (111) เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ในตัวอย่างฟิล์มทองคำ

บนซิลิกอนพบว่า มีโครงสร้างทางผลึกของทองคำ (111) เพียงโครงสร้างเดียว เมื่อทำการอบตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วจากอุณหภูมิ 300<sup>o</sup>C-700<sup>o</sup>C พบว่าความเข้มของและความเป็นผลึกเชิงเดี่ยวของ โครงสร้างทองคำ (111) ลดลงที่อุณหภูมิ 300<sup>o</sup>C และ เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 700<sup>o</sup>C

จากการวิจัยครั้งนี้จึงสรุปได้ว่าการอบตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วและตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของฟิล์มทองคำผ่านกระบวนการร่วมกันเป็นหยดในสถานะของแข็ง และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางผลึกของทองคำได้อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของทองคำในระดับอะตอม โดยกลไกในการเคลื่อนที่มีแนวโน้มเกิดขึ้นดังนี้ การให้ความร้อนกระตุ้นให้ทองคำมีพลังงานมากขึ้นแล้วเกิดการเคลื่อนที่แบบซุ่มมากขึ้นแล้วประพุดตัวในสถานะหลอมเหลว (molten) เพื่อทำการลดพลังงานพื้นผิวของทองคำในตัวอย่างฟิล์มทองคำ ทองคำจึงเกิดการจับตัวกันผ่านกระบวนการรวมตัวเป็นหยดในสถานะของแข็ง พฤติกรรมเหล่านี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง แม้ว่าอุณหภูมิในงานวิจัยนี้จะน้อยกว่าจุดหลอมเหลวของทองคำก็ตาม ซึ่งการที่ฟิล์มทองคำสามารถประพุดตัวเหมือนหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวอาจเนื่องมาจาก ความหนาของฟิล์มทองคำที่มีค่าต่ำ สำหรับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางผลึกมีแนวโน้มจะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเย็นตัวของตัวอย่างฟิล์มหลังการอบ เพราะตัวอย่างฟิล์มทั้งหมดในการวิจัยนี้ถูกปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าในเตาอบ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการปลูกผลึก ดังนั้นกระบวนการนี้อาจส่งผลให้เกิดการปลูกผลึกที่มีมากที่สุดของทองคำบนตัวอย่างฟิล์มทองคำ ซึ่งได้แก่ทองคำในทโครงสร้าง (111) ให้เพิ่มมากขึ้นได้ ทั้งนี้ปัจจัยเพิ่มเติมที่อาจส่งผลต่อกลไกการเคลื่อนที่ของทองคำในตัวอย่างฟิล์มทองคำคือ อฏิกิริยาระหว่างฟิล์มทองคำและวัสดุฐานราก ซึ่งเห็นได้จากผลการทดลองที่แตกต่างกันของตัวอย่างฟิล์มทองคำบนแก้วและตัวอย่างฟิล์มทองคำบนซิลิกอน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. I. Langford and A. J. C. Wilson, "Scherrer after sixty years: A survey and some new results in the determination of crystallite size," *J. Appl. Crystallogr.*, vol. 11, no. 2, pp. 102–113, Apr. 1978, doi: 10.1107/S0021889878012844.
- [2] O. C. Ernst, D. Uebel, S. Kayser, F. Lange, T. Teubner, and T. Boeck, "Revealing all states of dewetting of a thin gold layer on a silicon surface by nanosecond laser conditioning," *Appl. Surf. Sci. Adv.*, vol. 3, no. December 2020, p. 100040, 2021, doi: 10.1016/j.apsadv.2020.100040.
- [3] A. B. Tesler, B. M. Maoz, Y. Feldman, A. Vaskevich, and I. Rubinstein, "Solid-state thermal dewetting of just-percolated gold films evaporated on glass: Development of the morphology and optical properties," *J. Phys. Chem. C*, vol. 117, no. 21, pp. 11337–11346, 2013, doi: 10.1021/jp400895z.
- [4] X. Zhang, X. H. Song, and D. L. Zhang, "Thickness dependence of grain size and surface roughness for dc magnetron sputtered Au films," *Chinese Phys. B*, vol. 19, no. 8, 2010, doi: 10.1088/1674-1056/19/8/086802.
- [5] S. S. Godipurge *et al.*, "A facile and green strategy for the synthesis of Au, Ag and Au–Ag alloy nanoparticles using aerial parts of *R. hypocrateriformis* extract and their biological evaluation," *Enzyme Microb. Technol.*, vol. 95, no. October 2017, pp. 174–184, 2016, doi: 10.1016/j.enzmictec.2016.08.006.
- [6] T. T. K. Chi, N. T. Le, B. T. T. Hien, D. Q. Trung, and N. Q. Liem, "Preparation of SERS Substrates for the Detection of Organic Molecules at Low Concentration," *Commun. Phys.*, vol. 26, no. 3, p. 261, 2017, doi: 10.15625/0868-3166/26/3/8053.

ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ



# ประวัตินักวิจัย

## หัวหน้าโครงการ

### 1. ชื่อ-นามสกุล

(ภาษาไทย) ภูมิรัตน์ นวรัตน์

(ภาษาอังกฤษ) Poomirat Nawarat

### 2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์สาขาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม

### 3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

(ศูนย์พระนครเหนือ) เลขที่ 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

หมายเลขโทรศัพท์ 098-8245755

ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail) [poomirat.n@rmutp.ac.th](mailto:poomirat.n@rmutp.ac.th)

### 4. ประวัติการศึกษา

Bachelor of Art in Physics and Computer Science: Middlebury College, Middlebury VT, USA

Master of Science in Physics: Rensselaer Polytechnic Institute, Troy NY, USA

Doctor of Philosophy in Physics: Rensselaer Polytechnic Institute, Troy NY, USA

### 5. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

-Scanning Electron Microscopy

-Atomic Force Microscopy

-Molecular Electronics

-Chemical Vapor Deposition

-Electron Beam lithography

-Thermal Evaporation Deposition

## 6. ประสบการณ์งานวิจัย

- P. Nawarat, K. Beach, V. Meunier, H. Terrones, G.-C. Wang, K. M. Lewis, “Voltage-Dependent Barrier Height of Electron Transport through Iron Porphyrin Molecular Junctions” *J. Phys. Chem. C*, vol. 125, pp. 7350–7357, Mar. 2021.
- B. Wang, P. Nawarat, K. M. Lewis, P. Patsalas, and D. Gall, “Tunable Infrared Plasmonic Properties of Epitaxial  $Ti_{1-x}Mg_xN(001)$  Layers” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 13, pp. 22738-22748, May 2021.
- J. Littlejohn , Z. Li, Z. Lu, X. Sun, P. Nawarat, Y. Wang, Y. Li, T. Wang, Y. Chen, L. Zhang, H. Li, K. Kisslinger, S. Shi, J. Shi, A. Raeliarijaona, W. Shi, H. Terrones, K. M. Lewis, M. Washington, T. M. Lu, and G.-C. Wang, “Large metallic vanadium disulfide ultrathin flakes for spintronic circuits and quantum computing devices,” *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 2, no. 6, pp. 3684–3694, Jun. 2019.
- P. Nawarat (Presenter), K. Beach, H. Terrones, G.-C. Wang, and K. M. Lewis, “Transition of Conduction Mechanism from Direct Tunneling to Fowler-Nordheim Tunneling in Iron Porphyrin (FeP) Molecular Junction”, Howard-Columbia Collaboration Meeting, Columbia University, New York City, NY, USA, May. 2019. (Poster presentation)
- P. Nawarat (Presenter), Z. Li, D. Frey, G.-C. Wang, and K. M. Lewis, “Characterization of the Metallic Property of Vanadium Disulfide ( $VS_2$ )”, American Vacuum Society Spring, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, Jun. 2017. (Poster presentation)
- P. Nawarat (Presenter), “15 Degrees Celsius in 15 Minutes: Optimal Temperature for Boost Laser”, Summer symposium, Middlebury College, Middlebury, VT, USA, Aug. 2013. (Poster presentation)