



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การเคลือบฟิล์มบางอลูมินาด้วยเทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริง
เพื่อปรับปรุงคุณภาพอัญมณีเนื้ออ่อน

A study of alumina thin film coating by Magnetron Sputtering
on semi-precious stones

ผศ.ดร.สายสมร นิยมสรวนุญ

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 256108A1080036
สัญญาเลขที่ 186/2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การเคลือบฟิล์มบางอลูมินาด้วยเทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริง
เพื่อปรับปรุงคุณภาพอัญมณีเนื้ออ่อน

A study of alumina thin film coating by Magnetron Sputtering
on semi-precious stones

ผศ.ดร.สายสมร นิยมสรวนุ
คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

ตุลาคม 2560

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 186/2561

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับจัดเป็นสินค้าที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก และยังเป็นสินค้าที่ทำรายได้ให้กับประเทศไทยเป็นอันดับต้นๆ ซึ่งจัดเป็นสินค้าส่งออกที่สร้างมูลค่าให้กับเศรษฐกิจของประเทศที่สำคัญอันดับ 1 ใน 10 ของสินค้าส่งออก ปัจจุบันพลอยเนื้ออ่อนเป็นพลอยที่ตลาดให้ความนิยมเป็นอย่างมาก แต่มักเกิดปัญหาในขณะทำการฝังซึ่งอาจเกิดรอยขีดบนผิวพลอย

กระบวนการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาบนผิวอัญมณีเนื้ออ่อน ด้วยเทคนิค อาร์เอฟ แมกนีตรอน สเปตเตอริง โดยการควบคุมเงื่อนไขในการเคลือบ ด้วยความดันก่อนสเปตเตอริง $P_B = 6.0 \times 10^{-4}$ Pa ความดันของอาร์กอน $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1}$ Pa อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน $Ar = 15$ sccm ที่กำลังไฟ 50 วัตต์ สามารถเพิ่มความแข็งและความต้านทานการขีดของพลอยเนื้ออ่อนได้

จากการศึกษาการเคลือบฟิล์มบางบนควอตซ์และอะพาไทต์ ด้วยเวลาที่ใช้ในการเคลือบ คือ 30 นาที 180 นาที และ 300 นาที ตามลำดับ พบว่าที่เวลาเคลือบที่นานขึ้นจะสามารถทำให้พลอยต้านทานรอยขีดได้เพิ่มขึ้น เมื่อตรวจสอบความหนาและพื้นผิวของฟิล์มด้วยเครื่อง FE-SEM พบว่าเวลาการเคลือบที่มากขึ้นจะทำให้ความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น และการตรวจสอบปริมาณของธาตุ ด้วยเครื่อง XRF พบว่าเวลาที่มากขึ้นจะทำให้ปริมาณธาตุของอลูมินาเพิ่มมากขึ้น แต่การตรวจสอบการวัดสีด้วยเครื่อง ยูวีวิสิเบิลสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (UV – Vis NIR spectrophotometer) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงสีเล็กน้อย โดยไม่พบการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า

การศึกษากการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาบนผิวพลอยเพอริโดตและอความารีน โดยการเปลี่ยนแปลง อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน เวลาที่ใช้ในการเคลือบ และการให้ความร้อน ที่จะทำให้ฟิล์มบางอลูมินา มีความโปร่งแสงสูง มีการยึดเกาะบนผิวพลอยที่ดี มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและทนต่อรอยขีดข่วน เมื่อนำไปทดสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มด้วยเครื่องยูวี วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ พบว่าจะได้ค่าการส่งผ่านแสงสูง ศึกษาปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ พบว่ามีธาตุอลูมิเนียมออกไซด์ และ ศึกษาโครงสร้างฟิล์มด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์พบพีคของอลูมินาที่ตำแหน่งมุม 45.79 องศา ซึ่งยืนยันได้ว่ามีฟิล์มบางอลูมินามีโครงสร้างผลึก โดยเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์รีเฟล็กซ์ทีวี่ดี พบว่าความหนาฟิล์มลดลงตามการเติมแก๊สออกซิเจน จากการทดสอบการการขีดขีดของฟิล์มด้วยเครื่องสแครชเทสเตอร์โดยใช้แรงสูงสุด 20 นิวตัน พบว่าพลอยที่มีการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาสามารถทนรอยขีดได้เพิ่มขึ้น โดยแรงที่ทำให้ฟิล์มอลูมินาบนผิวพลอยเพอริโดตและอความารีนหลุดลอกโดยสมบูรณ์อยู่ที่ประมาณ 6 และ 7 นิวตัน

โครงการนี้ได้ทำการผลิตเครื่องประดับจากควอตซ์ที่เคลือบฟิล์มบาง ด้วยเทคนิคอาร์เอฟ แมกนีตรอน สเปตเตอริง เครื่องประดับประกอบด้วยแหวน และจี้ ซึ่งสามารถนำมาสวมใส่ได้จริง

ABSTRACT

Gems and jewelry industry is one of the top 10 industries that makes a great income to our country. The semi-precious gemstones are a very popular gemstone in the market. However, they have a drawback on scratch resistance. This project focused on coating the semi-precious gemstone with alumina thin film with RF Magnetron Sputtering technique to provide a high translucence thin film that increase hardness and scratch resistance.

The study on coating quartz and apatite by varying coating time from 30 minutes, to 180 and 300 minutes. Increasing coating time enhanced higher hardness for the coated gemstones by scratching test with the harder gemstones on the quartz and apatite surfaces. Results from UV - Vis spectrophotometer showed color changes slightly. However, with naked eyes, there was no change. Checking the thickness and surface of the film with the FE-SEM showed that the higher the coating time, the greater the thickness of the film. The XRF measurement showed that the higher the deposition time, the higher the amount of aluminium oxide.

The study on coating peridot and aquamarine by varying oxygen/argon ratio, deposition time and heating temperature. The result from UV/Visible spectrophotometer show that the film was high transmission. Study of elemental composition by X-ray fluorescent indicated that the film was aluminum oxide. XRD measurement showed Al_2O_3 at 2-theta of 45.79 degree, with indicating the Al_2O_3 film on the surface. Film thickness measurement was done by X-ray reflectivity and showed that The film thickness decreased with the presence of oxygen gas. With scratch tester using of 20 N maximum force, the gemstone coated with Al_2O_3 thin film gained an improve on scratch resistance. However, the resistance varied with different gemstone substrate. The coated peridot could withstand less force in comparing with the coated aquamarine.

In this project, the quartz coated with alumina for 180 minutes by RF Magnetic Sputtering was beautifully decorated on a ring and a pendant.

สารบัญ

(Table of Contents)

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	iii
บทคัดย่อ	vi
Abstract	vii
สารบัญ	viii
สารบัญตาราง	x
สารบัญรูป	xi
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	2
1.5 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	2
1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	2
1.7 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	3
	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของอลูมินา (Al ₂ O ₃)	4
2.2 การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ	6
2.3 การสputtering	7
2.4 RF magnetron sputtering	9
2.5 อัญมณีเนื้ออ่อน (semi-precious gemstones)	10
2.5 สีและระบบการวัดสี	16
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ	
3.1 วัสดุ สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือ	21
3.2 กรรมวิธีในการวิจัย	30

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล การวิจัยชุดที่ 1	28
4.1 การวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยเครื่องมือพื้นฐาน	28
4.2 การวิเคราะห์สีด้วยเครื่อง UV – Vis NIR spectrophotometer	40
4.3 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)	45
4.4 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)	46
4.5 การวิเคราะห์การชุบซีต	49
บทที่ 5 ผลการวิจัยและอภิปรายผล การวิจัยชุดที่ 2	50
5.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือพื้นฐาน	50
5.2 การตรวจสอบปริมาณธาตุองค์ประกอบของฟิล์มอลูมินา	51
5.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอลูมินา	53
5.4 การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางอลูมินา	57
5.5 การตรวจสอบความหนาของผิวฟิล์มบางอลูมินา	59
5.6 การทดสอบความต้านทานการชุบซีตของฟิล์มบางอลูมินา	60
5.7 การทดสอบการวัดสีของชิ้นงานเคลือบฟิล์มบางที่ผ่านการให้ความร้อน	67
บทที่ 6 สรุปผลการดำเนินงาน	
6.1 สรุปผลการวิจัย	70
6.2 ข้อเสนอแนะ	71
6.2 ผลผลิต (Output)	72
บทสรุปทางการเงิน	73
บรรณานุกรม (Bibliography)	74
ประวัตินักวิจัยและคณะ	78

สารบัญตาราง (List of Tables)

ตารางที่		หน้า
1.1	แผนการดำเนินงาน	3
2.1	ลักษณะสมบัติอลูมิเนียมออกไซด์	5
2.2	การจำแนกชนิดของอัญมณีตามระดับความแข็ง	11
2.3	คุณสมบัติทั่วไปของพลอยเพอริดอต	12
2.4	คุณสมบัติทั่วไปของพลอยอความารีน	14
2.5	คุณสมบัติทั่วไปของควอตซ์	15
2.6	คุณสมบัติทั่วไปของอะพาไทต์	16
3.1	เงื่อนไขในการเคลือบโดยการเปลี่ยนแปลงเวลา	33
3.2	เงื่อนไขในการเคลือบ ชุดการวิจัยที่ 2	34
3.3	เงื่อนไขในการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อน	36
4.1	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือพื้นฐานของควอตซ์	39
4.2	ผลการวิเคราะห์เครื่องมือพื้นฐานของอะพาไทต์	39
4.3	ค่า $L^* a^* b^*$ และค่า ΔE ของตัวอย่างพลอยควอตซ์และอะพาไทต์	40
4.4	ค่า ΔE ในหน่วยมาตรฐานนานาชาติของการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า	40
4.5	ปริมาณธาตุของควอตซ์หลังเคลือบฟิล์มบาง	45
4.6	ปริมาณธาตุของอะพาไทต์หลังเคลือบฟิล์มบาง	45
4.7	ความหนาของฟิล์มตามเวลาที่ใช้เคลือบจากการคำนวณตามสมการ	48
4.8	ผลการทดสอบการดูดซึบที่ผิวควอตซ์และอะพาไทต์	49
4.9	ผลการทดสอบการดูดซึบที่ผิวกระจกสไลด์	49
5.1	ผลการวิเคราะห์อัญมณีด้วยเครื่องมือพื้นฐานก่อนและหลังการทดลอง	51
5.2	ปริมาณธาตุที่วัดได้จากวัสดุรองเคลือบสแตนเลสที่ผ่านการเคลือบเวลา 300 นาทีที่ปริมาณออกซิเจนต่างๆ	51
5.3	ปริมาณธาตุที่วัดได้จากวัสดุรองเคลือบสแตนเลสที่เติมแก๊ส O ₂ 6% ที่เวลาต่างๆ	52
5.4	ความหนาของฟิล์มบางอลูมินาที่เติมแก๊สออกซิเจนปริมาณต่างๆ ที่เวลา 300 นาที	59
5.5	ความหนาของฟิล์มบางอลูมินาที่เติมแก๊สออกซิเจน 6% ที่เวลา 300 และ 600 นาที	61
5.6	ค่า $L^* a^* b^*$ และค่า ΔE ของพลอยเพอริดอตและอความารีน	68
5.7	ค่า ΔE ในหน่วยมาตรฐานนานาชาติของการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า	68

สารบัญรูป (List of Illustrations)

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะโครงสร้างของแอลฟา – อลูมิเนียมออกไซด์ (α - Al_2O_3)	4
2.2	ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง	7
2.3	การเกิดขึ้นฟิล์มของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการ Sputtering	8
2.4	ภาพจำลองกระบวนการเคลือบด้วยเทคนิค แมกนีตรอน สปีดเตอริง (Magnetron Sputtering) ที่มีการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบ (Target)	9
2.5	ห้องเคลือบฟิล์มบางอลูมินา	10
2.6	ผลึกแร่โอลิวีน	12
2.7	ผลึกแร่ควอตซ์	13
2.8	ผลึกของควอตซ์ (Quartz)	15
2.9	ผลึกอะพาไทต์ (Apatite)	16
2.10	การบรรยายสีในระบบ CIE Lab มองในระยะ 2 เมตร	18
2.11	การบรรยายสีพื้นในระบบ CIE Lab ในภาพ 3 มิติ	18
3.1	วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	21
3.2	สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	22
3.3	อุปกรณ์การเตรียมวัสดุรองเคลือบ	23
3.4	อุปกรณ์สำหรับล้างกระจกสไลด์และแผ่นอลูมิเนียม	24
3.5	อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการชุบซีด	24
3.6	สารเคมีสำหรับล้างกระจกสไลด์และแผ่นอลูมิเนียม	25
3.7	เครื่องมือพื้นฐาน	25
3.8	เครื่อง FM500 PID Plasma implantation and Deposition System (Non-Thermal plasma)	26
3.9	เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)	27
3.10	เครื่อง Wavelength dispersive X-Ray Fluorescence (WDXRF)	27
3.11	เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	28
3.12	เครื่อง Scanning Electron Microscope (FESEM)	29
3.13	เครื่อง Scratch tester	29
3.14	เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	30
3.15	ขั้นตอนการเตรียมกระจกสไลด์	32
3.16	สีของกระจกสไลด์ที่เงื่อนไข RF Power 30 , 40, 50, 60 และ 70 วัตต์	33

รูปที่	หน้า	
3.17	ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองแต่ละชุด	35
3.18	พลอยที่ใช้ในการทดสอบชุดซีดควอตซ์และอะพาไทต์	37
4.1	กราฟการเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของควอตซ์ (รูปสี่เหลี่ยม) และอะพาไทต์ (รูปสามเหลี่ยม) ก่อนและหลังเคลือบฟิล์มบาง เวลา 30 นาที	41
4.2	กราฟการเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของควอตซ์ (รูปสี่เหลี่ยม) และอะพาไทต์ (รูปสามเหลี่ยม) ก่อนและหลังเคลือบฟิล์มบาง เวลา 180 นาที	41
4.3	กราฟการเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของควอตซ์ (รูปสี่เหลี่ยม) และอะพาไทต์ (รูปสามเหลี่ยม) ก่อนและหลังเคลือบฟิล์มบาง เวลา 300 นาที	42
4.4	กราฟ L^* ของควอตซ์และอะพาไทต์ ก่อนและหลังเคลือบฟิล์มบางทั้ง 3 เงื่อนไข	43
4.5	กราฟค่า ΔE ของควอตซ์หลังเคลือบที่เวลา 30 นาที, 180 นาที และ 300 นาที	44
4.6	กราฟค่า ΔE ของอะพาไทต์หลังเคลือบที่เวลา 30 นาที, 180 นาที และ 300 นาที	44
4.7	ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมินาบนซิลิกอน เวลา 30 นาที กำลังขยาย 75000 เท่า	46
4.8	ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมินาบนซิลิกอน เวลา 180 นาทีกำลังขยาย 75000 เท่า	46
4.9	ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมินาบนซิลิกอน เวลา 300 นาทีกำลังขยาย 75000 เท่า	47
4.10	ภาพตัดขวางฟิล์มที่ เวลา 300 นาทีกำลังขยาย 75000 เท่า	48
5.1	ปริมาณ Al_2O_3 ที่เปลี่ยนแปลงในการเติมออกซิเจนปริมาณต่างๆ	52
5.2	ปริมาณ Al_2O_3 ที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาต่างๆ เติม O_2 6%	53
5.3	กราฟแสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางอลูมินาที่ใช้แก๊สออกซิเจนปริมาณต่างๆ โดยใช้เวลาในการเคลือบ 300 นาที	53
5.4	กราฟแสดงค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางอลูมินาบนกระจกสไลด์ ที่เวลา 300 และ 600 นาที ปริมาณแก๊สออกซิเจน 6%	54
5.5	กราฟแสดงค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มอลูมินาบนผิวพลอย (ก) อความารีน และ (ข) เพอริดอต โดยใช้เวลา 300 นาที ปริมาณ $O_2=6\%$	55
5.6	กราฟแสดงค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มอลูมินาบนผิวพลอย (ก) อความารีน และ (ข) เพอริดอต โดยใช้เวลา 600 นาที ปริมาณ $O_2=6\%$	56
5.7	ผลการตรวจ XRD ของฟิล์มอลูมินาบนแผ่นซิลิกอนที่เวลา 300 นาที Al_2O_3 reference from ICDD card No. 00-002-1421 (45.79 2-theta)	57
5.8	ผลการตรวจ XRD ของฟิล์มอลูมินาบนแผ่นซิลิกอนโดยให้ความความร้อน เวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส	58
5.9	ความหนาของฟิล์มเมื่อเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน จากการวัดด้วยเทคนิค XRR โดยใช้โปรแกรมคำนวณ	60
5.10	ภาคตัดขวางของฟิล์มบางอลูมินาที่ได้จากกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า โดยใช้เวลาในการเคลือบ 300 นาที ปริมาณแก๊ส $O_2=6\%$	60

รูปที่	หน้า
5.11 รอยห้วกจากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซีดของชั้นเคลือบบน กระจกสไลด์ เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณแก๊สออกซิเจน	61
5.12 รอยห้วกจากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซีดของชั้น เคลือบบนกระจกสไลด์ ปริมาณ O ₂ 6%	62
5.13 รอยลากจากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซีดของชั้นเคลือบบนพลอย อความารีน	63
5.14 รอยลากจากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซีดของชั้นเคลือบบนพลอย เพอริดอต	64
5.15 รอยลากจากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซีดของชั้นเคลือบบนพลอย อความารีนที่ให้ความร้อน (ก) 50 (ข) 100 และ(ค) 150 องศาเซลเซียส	65
5.16 รอยลากจากการทดสอบความต้านทานต่อการชุบซีดของชั้นเคลือบบนพลอย เพอริดอตที่ให้ความร้อน (ก) 50 (ข) 100 และ(ค) 150 องศาเซลเซียส	66
5.17 กราฟเปรียบเทียบค่า a* และ b* ของพลอยเพอริดอต ก่อนเคลือบและหลังการ เคลือบแล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 100 องศาเซลเซียส โดยเงื่อนไขการ เติม O ₂ 6% เวลาเคลือบ 300 นาที	68
5.18 กราฟเปรียบเทียบค่า a* และ b* ของพลอยอความารีน ก่อนเคลือบและหลังการ เคลือบแล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส โดยเงื่อนไข การเติม O ₂ 6% เวลาเคลือบ 300 นาที	69
6.1 แหวนและจีที่ทำด้วยควอตซ์ที่ผ่านการเคลือบที่เสร็จสมบูรณ์	71

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ประเทศไทยจัดเป็นแหล่งผลิตสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก จากแหล่งข้อมูลด้านการส่งออกของกรมศุลกากร อัญมณีและเครื่องประดับจัดเป็นสินค้าส่งออกที่สร้างมูลค่าให้กับเศรษฐกิจของประเทศที่สำคัญอันดับ 1 ใน 10 ของสินค้าส่งออก ซึ่งเป็นการสร้างมูลค่าให้กับประเทศไทยหลายพันล้านบาทต่อปี การพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับจึงมีส่วนสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศอีกทางหนึ่ง

อัญมณีในท้องตลาดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ อัญมณีเนื้อแข็ง (precious stones) และอัญมณีเนื้ออ่อน (semi-precious stones) ซึ่งมีความแตกต่างที่ค่าความแข็งของเนื้ออัญมณี โดยอัญมณีเนื้อแข็งจะมีค่าความแข็งระดับ 9 ตามโมห์สเกล ได้แก่ คอรัันดัม ซึ่งมีสีต่างๆ มากมาย เช่น ทับทิม ไพลิน บุชรากัม เป็นต้น ส่วนอัญมณีเนื้ออ่อนจะมีความแข็งในระดับที่ต่ำกว่า ได้แก่ โทแพซ ควอตซ์ และ เบอริล เป็นต้น

โดยทั่วไปในการทำเครื่องประดับ อัญมณีเนื้อแข็งจะได้รับความนิยมมากกว่าและมีราคาที่สูง เนื่องจากความทนทานในการใช้งาน ไม่เกิดรอยขีดข่วน หรือสีกร่อนได้ง่าย จึงคงความสวยงามได้ยาวนาน อย่างไรก็ตาม อัญมณีเนื้ออ่อนมีสีสรรที่หลากหลาย และมีลักษณะเฉพาะที่สวยงามมากมาย จึงได้รับความนิยมเช่นกัน โดยส่วนใหญ่อัญมณีเนื้ออ่อนมีราคาต่ำกว่าเนื่องด้วยข้อด้อยในเรื่องความต้านทานต่อการขีดข่วน อย่างไรก็ตาม หากอุตสาหกรรมเครื่องประดับสามารถสร้างความนิยมของการสวมใส่เครื่องประดับที่ประกอบด้วยอัญมณีเนื้ออ่อนให้สูงมากขึ้น จะสามารถเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้แก่อัญมณีเนื้ออ่อนได้เป็นอย่างมาก

ดังนั้นโครงการวิจัย เรื่อง “การเคลือบฟิล์มบางอลูมินาด้วยเทคนิค แมกนีตรอน สปีดเตอริง เพื่อปรับปรุงคุณภาพอัญมณีเนื้ออ่อน” จึงมีความประสงค์ที่จะปรับปรุงคุณภาพอัญมณีเนื้ออ่อน เช่น การเพิ่มความทนทานต่อการขีดข่วนบนผิวหน้าของอัญมณีเนื้ออ่อนโดยการสร้างสารเคลือบใสที่มีความแข็งมากกว่า มีความทนทานต่อการขีดข่วนที่สูงกว่ามาเคลือบปกคลุมที่ผิวหน้าของอัญมณีเนื้ออ่อน โดยสารเคลือบใสจะถูกสร้างขึ้นอย่างบางๆ บนผิวหน้าของอัญมณี เพื่อช่วยให้อัญมณีเนื้ออ่อนคงความใสแวววาวได้นานขึ้น เป็นการส่งเสริมอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับให้สามารถขยายความนิยมในการสวมใส่เครื่องประดับของอัญมณีเนื้ออ่อน เพื่อสร้างความเข้มแข็งให้กับเศรษฐกิจของประเทศในอีกทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อศึกษาการเคลือบฟิล์มบางของอลูมิเนียมออกไซด์บนอัญมณีเนื้ออ่อนเพื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิค แมกนีตรอน สปีดเตอริง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางอลูมินา ด้วยเทคนิค Magnetron Sputtering
2. ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางบนอัญมณีเนื้ออ่อนสีใส อย่างน้อย 10 ชนิด

3. ตรวจสอบความเป็นผลึกของฟิล์มบาง ด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer (XRD)
4. ตรวจสอบการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR ก่อนและหลังการเคลือบฟิล์มบางอลูมินา ด้วยเครื่องมือ UV-Vis-NIR Spectrophotometer
5. ตรวจสอบความทนทานต่อการขีดข่วนของฟิล์มบาง ด้วย scratch tester หรือ Vicker's hardness tester
6. เผยแพร่ความรู้ นำความรู้ที่ได้จากงานวิจัยเผยแพร่แก่นิสิตและนักวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. สามารถปรับปรุงคุณภาพอัญมณีเนื้ออ่อนเพื่อให้ได้รับความนิยมจากผู้สวมใส่อัญมณีมากขึ้น
2. เป็นการส่งเสริมอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับซึ่งเป็นหนึ่งในสินค้าประเภทที่มีการส่งออกมากที่สุด 10 อันดับของประเทศไทย
3. ความรู้ที่ได้จากการวิจัยจะเป็นประโยชน์โดยตรงต่อผู้ผลิตเครื่องประดับในอุตสาหกรรมขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ และนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์
4. เผยแพร่ในวารสารทางวิชาการทั้งภายในและภายนอกประเทศ
5. เป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานในการเรียนการสอนของนิสิต และเป็นองค์ความรู้ในการวิจัย

1.5 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

การสร้างฟิล์มบางอลูมินาที่มีองค์ประกอบทางเคมี คือ Al_2O_3 (อลูมิเนียมออกไซด์) เช่นเดียวกับอัญมณีเนื้อแข็ง คือ คอร์รันดัม (corundum) ซึ่งมีความแข็งที่ระดับ 9 ตามโมห์สเกล และมีลักษณะใสไม่มีสี (หากไม่มีธาตุอื่นเจือปน) โดยสร้างให้ฟิล์มบางมีความแข็งในระดับที่สูงกว่าความแข็งของอัญมณีเนื้ออ่อนเพื่อให้สามารถปกป้องผิวของอัญมณีเนื้ออ่อนจากการขีดข่วนได้ นอกจากนี้หากมีการเติมสารเจือปน ฟิล์มบางใสจะสามารถมีสี และสามารถเพิ่มสีให้กับอัญมณีที่ไม่มีสี หรือ มีสีที่ไม่พึงประสงค์ได้ โดยดำเนินการสร้างฟิล์มบาง โดยวิธี Magnetron Sputtering ด้วยเทคนิคที่เหมาะสมกับการเคลือบฟิล์มบางบนวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า

1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

1. ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลจากเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมอัญมณีเนื้ออ่อนเพื่อการตรวจสอบและการเคลือบผิว
3. ตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นของอัญมณีเนื้ออ่อน
4. ตรวจสอบการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR ของอัญมณีก่อนการเคลือบฟิล์มบางอลูมินา ด้วยเครื่องมือ UV-Vis-NIR Spectrophotometer
5. ดำเนินการเคลือบผิวฟิล์มบางอลูมินา ด้วยเทคนิค Magnetron Sputtering
6. ตรวจสอบความเป็นผลึกของฟิล์มบางอลูมินา ด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer (XRD)
7. ตรวจสอบความทนทานต่อการขีดข่วนของฟิล์มบาง ด้วยเทคนิค scratch tester หรือ Vicker's hardness tester, SEM

8. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
9. เขียนบทความวิชาการและบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยในวารสารงานวิจัยและงานวิชาการ

1.7. แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

แผนการดำเนินการวิจัยเริ่มต้นทำการวิจัยวันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2560 ถึงวันที่ 31 สิงหาคม พ.ศ. 2562 แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

	กิจกรรม	2560			2561						2562		
		ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค. ก.พ.	มี.ค. เม.ย.	พ.ค. มิ.ย.	ก.ค. ส.ค.	ก.ย. ต.ค.	พ.ย. ธ.ค.	ม.ค. มี.ค.	เม.ย. มิ.ย.	ก.ค. ส.ค.
1.	ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลจากเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง	←→											
2.	จัดเตรียมอัญมณีเนื้ออ่อนเพื่อการตรวจสอบและการเคลือบผิว		←→										
3.	ตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นของอัญมณีเนื้ออ่อน			←→									
4.	ตรวจวัดการดูดกลืนคลื่นแสงของอัญมณีก่อนการเคลือบฟิล์มบาง ด้วย UV-Vis-NIR Spectrophotometer			←→									
5.	ดำเนินการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิค Magnetron sputtering			←→									
6.	ตรวจวัดการดูดกลืนคลื่นแสงของอัญมณีเคลือบฟิล์มบางหลังการเคลือบฯ ด้วย UV-Vis-NIR Spectrophotometer				←→								
7.	ตรวจสอบความเป็นผลึกของฟิล์มบาง ด้วย X-ray Diffractometer (XRD), SEM				←→								
8.	การปรับเงื่อนไขในการเคลือบเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ					←→							
9.	ตรวจสอบความทนทานต่อการขีดถูของอัญมณีที่เคลือบฟิล์มบาง ด้วยเทคนิค scratch tester					←→							
10.	วิเคราะห์ สรุปผล และนำเสนอผลงาน								←→				
11.	เผยแพร่ความรู้										←→		

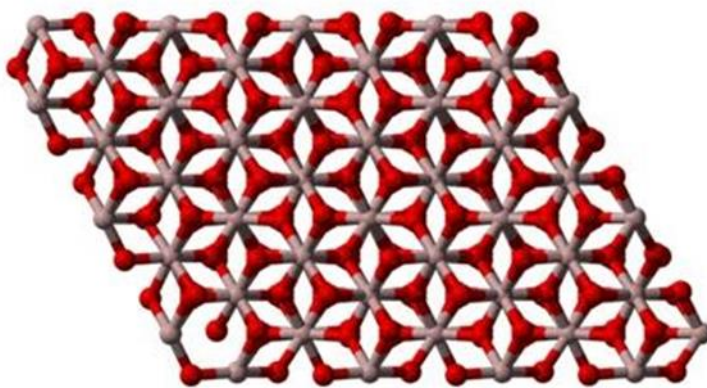
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของอลูมินา (Al_2O_3)

อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum dioxide, Alumina : Al_2O_3) อลูมิเนียมเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่มีมากมายในเปลือกโลก โดยทั่วไปแล้วอลูมิเนียมที่พบบนเปลือกโลกจะอยู่ในรูปของ aluminum silicate จัดเป็นแร่ธาตุที่พบในรูปของ Corundum (Al_2O_3) Diaspore ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) Gibbsite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และ Bauxite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โดยปกติจะมีสีขาวหรือใสไม่มีสี แต่หากมีธาตุเจือปนเพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดสีสวยงามจนจัดเป็นอัญมณีที่มีค่า เช่น ทับทิม (Ruby) ไพลิน (Sapphire) บุชราคัม (Yellow Sapphire) เป็นรูปแบบของ Corundum ที่มีมลทิน ในขณะที่ Corundum ที่ไม่มีมลทินจะไม่มีสี

ในการผลิตโลหะอลูมิเนียมมาใช้งานมักจะผลิตเริ่มต้นจากผลึกของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) หรือ อลูมินาซึ่งส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 98 จะผลิตมาจาก bauxite ซึ่งเป็นหินที่มี hydrous alumina (aluminum hydroxides and oxyhydroxides) เป็นส่วนประกอบร่วมกับแร่ธาตุอื่นๆ เช่น iron oxide, silica oxide, titanium dioxide และแร่อื่นๆ หิน bauxite จะมี hydrous alumina เป็นส่วนประกอบถึงร้อยละ 50-80 และมีร้อยละของอลูมินาอยู่ระหว่างร้อยละ 30-60 โดยส่วนประกอบของหิน bauxite จะขึ้นอยู่กับสถานที่ขุดพบ คุณสมบัติของอลูมิเนียมออกไซด์แสดงดังตารางที่ 2.1

อลูมิเนียมได้ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยไม่นานมานี้การผลิตอลูมินาที่มีขนาดอนุภาคนาโนขึ้น ซึ่งวัสดุชนิดใหม่นี้มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติในการต่อต้านรอยขีดข่วนได้ดี เป็นอย่างดี จึงนิยมนำมาใช้งานในหลายอุตสาหกรรม เช่น สารต้านการเป็นรอยขีดข่วน ฉนวน และตัวเร่งปฏิกิริยา และได้นำอนุภาคนาโนอลูมินามาใช้ในการเป็นสารเคลือบพื้นผิวต้านแรงขีดข่วนได้เป็นอย่างดี ลักษณะโครงสร้างของแอลฟา แสดงดังรูปที่ 2.1



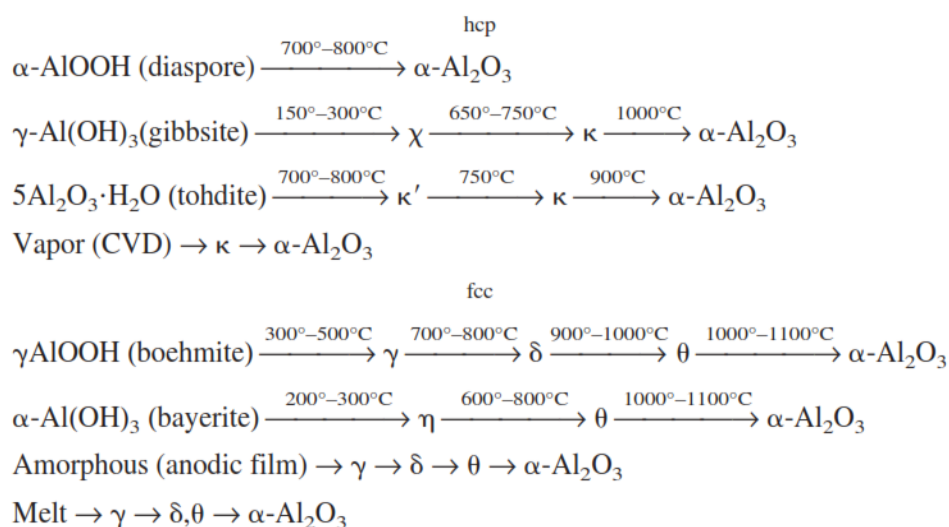
รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของแอลฟา – อลูมิเนียมออกไซด์ ($\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$)
(อลูมิเนียมออกไซด์, 2012)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติของอลูมิเนียมออกไซด์

ชื่อ	Aluminum dioxide, alumina
CAS number	1344-28-1
สูตรโมเลกุล	Al ₂ O ₃
น้ำหนักโมเลกุล	101.96 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	3.5-3.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	2072 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	2977 องศาเซลเซียส
ลักษณะทั่วไป	ผงสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายน้ำ

อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) จัดเป็นวัสดุที่มีความสำคัญเนื่องจากสมบัติที่สำคัญหลายประการ เช่น มีความแข็งและจุดหลอมเหลวสูง ทนทานต่อกาขีดข่วนและสารเคมี และมีความโปร่งใส เป็นต้น จะพบในเฟส อัลฟา แกมมา และเบต้า โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในเฟสของอัลฟาอะลูมินา และแกมมาอะลูมินา ในอุณหภูมิที่ไม่เกิน 500°C อะลูมินา จะอยู่ในรูปแกมมา หากนำไปเผาให้อุณหภูมิสูงถึง 1,150-1,200°C จะเปลี่ยนอยู่ในรูปของอัลฟาแต่เบต้า และสามารถคงอยู่ในรูปแบบอื่นๆ ได้ เช่น γ และ η phases (โครงสร้าง cubic) θ phase (โครงสร้าง monoclinic) χ phase (โครงสร้าง hexagonal) κ phase (โครงสร้าง orthorhombic) และ δ phase (โครงสร้าง tetragonal หรือ orthorhombic) โดยอลูมินาแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างเฉพาะและมีสมบัติที่แตกต่างกัน กระบวนการทั่วไปที่ใช้ในการเตรียมเฟสต่างๆ ของอลูมินาสรุปได้ดังกระบวนการที่แสดงในตารางที่ 9.2 โดยในแต่ละขั้นตอนจะพบเฟสที่มีสภาวะกึ่งเสถียรมากมายและผลลัพธ์ของแต่ละกระบวนการจะได้เป็น α -Al₂O₃ ซึ่งเป็นเฟสที่มีความเสถียรสูงสุดซึ่งคือโครงสร้างของคอร์รันดัม [Levin, 1998]

กระบวนการทั่วไปในการเตรียมอลูมินา และลำดับขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงเฟส [Levin, 1998]



ฟิล์มบางของสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) โดยทั่วไปมีสมบัติที่มีการต่อต้านการกัดกร่อนได้ดี มีความหนาแน่นต่ำ อัตราความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง มีความเหนียวที่ต้านการ

แตกหักสูง มีน้ำหนักเบา มีความสามารถในการสะท้อนแสง และทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี อันได้แก่ ความร้อน สารเคมี ความชื้น ที่อาจทำให้วัสดุที่ต้องการเคลือบเสื่อมคุณภาพได้ ดังนั้นจึงมีการนำฟิล์มบางของสารอะลูมิเนียมออกไซด์มาใช้ในงานด้านต่างๆ อาทิเช่น นำไปเคลือบเพื่อป้องกันเนื้อของวัสดุเคลือบเพื่อลดการสะท้อนของแสงของเลนส์และนอกจากนี้ผลึกของสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นสารที่มีค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ค่อนข้างสูง ทำให้สามารถนำมาใช้ในงานด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างดี ฟิล์มบาง (Al_2O_3) มีประโยชน์ที่หลากหลายและแตกต่างกันไป เช่น โยแก้วนำแสง วงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กและยังมีการนำเงินมาเคลือบผิวชิ้นงานเพื่อกันความหมองของเงินอีกด้วย (Klumsomboon, 2012)

2.2 การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ

การเคลือบในสุญญากาศ (Vacuum Deposition) คือ การเรียงตัวโดยการตกเคลือบของสารในลักษณะอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (Substrate) จนเกิดเป็นชั้นฟิล์มที่บางในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร จึงอาจกล่าวได้ว่า “ฟิล์มบาง (Thin film) คือ ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบางๆ” การระบุว่าฟิล์มใดเป็นฟิล์มบาง นั้นอาจพิจารณาได้จากลักษณะการใช้งานว่าใช้สมบัติด้านใดของฟิล์ม กล่าวคือ ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงพื้นผิว (Surface Properties) เรียกว่า “ฟิล์มบาง” แต่ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงปริมาตร (Bulk Properties) จะเรียกว่า “ฟิล์มหนา” จะเห็นว่าฟิล์มชนิดเดียวกันนั้นอาจเป็นทั้งฟิล์มบางและฟิล์มหนาก็ได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับที่ต้องการซึ่งสามารถทำได้ทั้งกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยพื้นฐานแล้วกระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การสร้างสารเคลือบ (Source) โดยทั่วไปแล้วสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของ ของแข็ง ของเหลว ไอหรือแก๊สก็ได้ แต่สารเคลือบขณะทำการเคลือบนั้นจำเป็นต้องอยู่ในรูปของสารระเหยเท่านั้น ซึ่งวิธีการที่ทำให้สารเคลือบกลายเป็นสารระเหยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การให้ความร้อนหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เป็นต้น

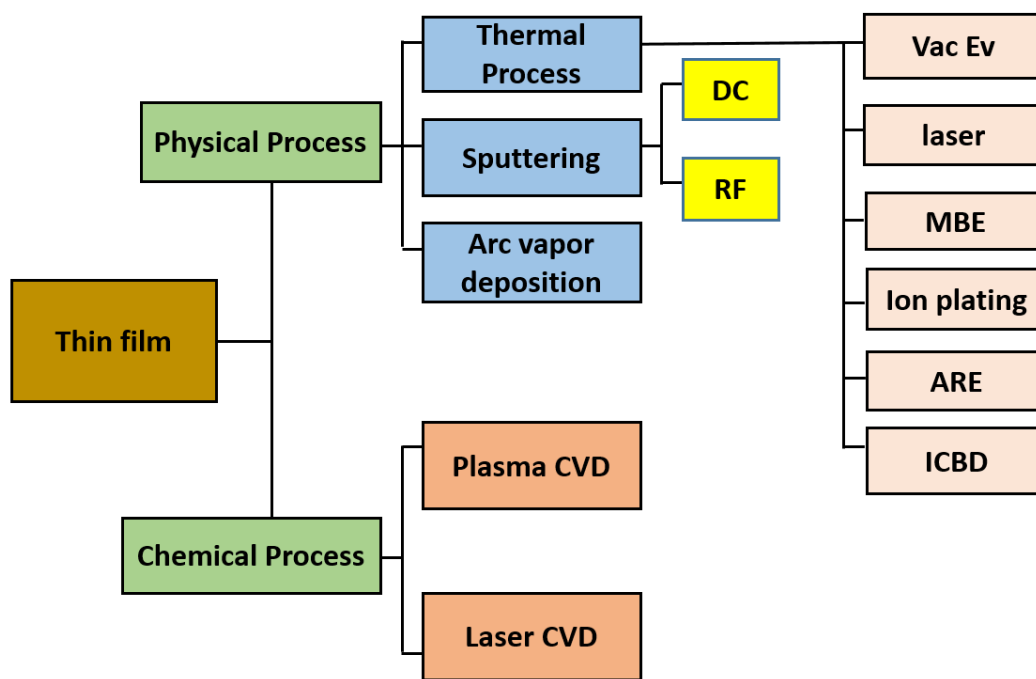
2. การเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ (Transport) ในภาวะสุญญากาศไอระเหยของสารเคลือบอาจจะมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจเคลื่อนที่ไปในลักษณะของไหล ซึ่งจะช่วยให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นภายในภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ไอระเหยอาจเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะของพลาสมาก็ได้

3. การสะสมพอกพูน (Deposition) เป็นขั้นตอนการพอกพูนของสารเคลือบและโตขึ้นจนกลายเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ ขั้นตอนนี้จะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการเคลือบ

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ แสดงดังรูปที่ 2.2

1. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี (chemical vapor deposition process: CVD) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ (New species) ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น วิธี Plasma CVD และ วิธี Laser CVD เป็นต้น

2. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (physical vapor deposition process: PVD) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร (Evaporation) และวิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นต้น



รูปที่ 2.2 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง
(วีทีซัน, 2560)

2.3. การสปัตเตอริง

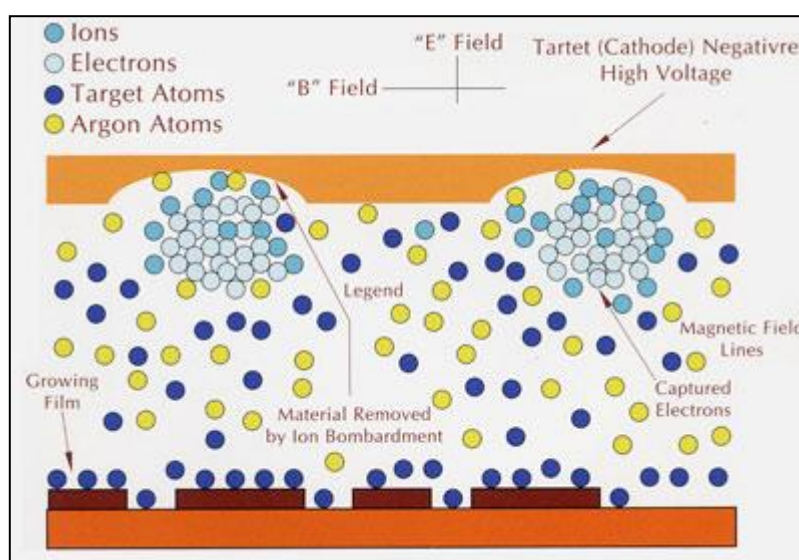
การสปัตเตอริง (Sputtering) คือกระบวนการปลดปล่อยอนุภาคของเป้าสารเคลือบเมื่อถูกชนด้วยอนุภาคพลังงานสูงทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของสารเคลือบในสภาพอะตอมเดี่ยวบนชิ้นงานการสปัตเตอริงจะเกิดได้ต้องประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 3 อย่าง ได้แก่

1. เป้าสารเคลือบ ทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงบนแผ่นรองรับ
2. อนุภาคพลังงานสูง ซึ่งจะวิ่งชนเป้าสารเคลือบแล้วทำให้อะตอมเป้าสารเคลือบหลุดออกมา ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้เป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอนหรืออะตอมของธาตุต่างๆ
3. การผลิตอนุภาคพลังงานสูง ในระบบสปัตเตอริงจะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มบางตามต้องการ

การเคลือบผิวด้วยเทคนิค แมกนีตรอน สปัตเตอริง เป็นเทคนิคการเคลือบผิวประเภทการเคลือบผิวฟิล์มบางด้วยเชิงกายภาพของสารเคลือบในสถานะไอ (physical vapor deposition) ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้โดยทั่วไป และได้รับการพัฒนาเพื่อใช้เคลือบฟิล์มบางชนิดต่างๆ เช่น ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ [กรรณิการ์ วรณทวิ, 2555] ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ [ร.อ.พัฒนา เทพชโลธร,

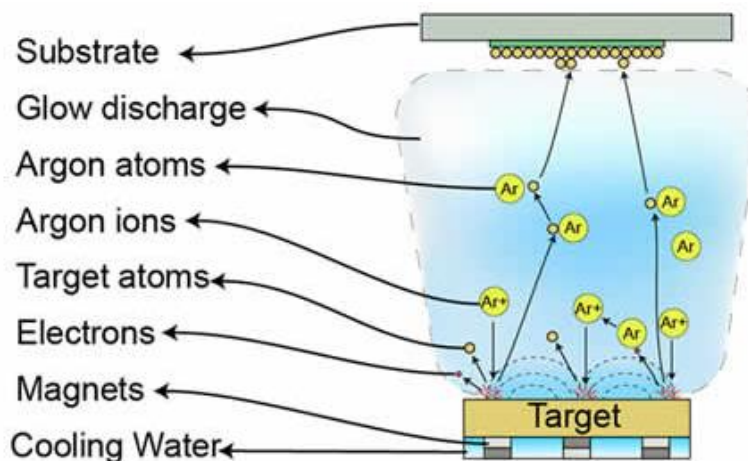
2548] फिल्मบางไททาเนียมไดออกไซด์[จินดาวรรณ สิงห์คต, 2552] และฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ [ศุภเดช สุจินพรัหม, 2557] เป็นต้น

กระบวนการสปัตเตอริงคือ การเคลื่อนสารในสุญญากาศที่มีหลักการสร้างไอสารเคลื่อนจากการชนของอนุภาคพลังงานสูง เมื่อระดมยิง ผิวของวัสดุด้วยอนุภาคพลังงานสูงจะเกิดการสีกกร่อน และมีอนุภาคของวัสดุนั้นหลุดออกมา ปรากฏการณ์ที่อนุภาคผิวหน้าวัสดุหลุดออกมานี้เรียกว่า “สปัตเตอ์ (Sputter)” ซึ่งอนุภาคพลังงานสูงที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลื่อนจะมีการถ่ายโมเมนตัม และพลังงานจากการชนสู่เป้าสารเคลื่อนพลังงานและโมเมนตัมดังกล่าวจะมีผลทำให้อะตอมสารที่อยู่ ที่ผิวเป้าสารเคลื่อนหลุดออกแล้วเคลื่อนที่ด้วยพลังงานและโมเมนตัมที่ได้รับวิ่งเข้าตกเคลื่อนบนผิว วัสดุรองรับ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเกิดขึ้นฟิล์มของสารเคลื่อนที่ได้จากกระบวนการ Sputtering [Sputtering Sources [Online], 2010]

ระบบเคลื่อนแบบ แมกนีตรอน สปัตเตอริง(D.C Magnetron Sputtering) เป็นการเคลื่อน ผิววัสดุด้วยวิธีสปัตเตอริงประเภทหนึ่งที่มีอนุภาคพลังงานสูงถูกผลิตขึ้นจากกระบวนการโกลว์ดีสชาร์จ (Glow discharge) คือการให้พลังงานเข้าไปเร่งให้อนุภาคของก๊าซเฉื่อยแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งใน กระบวนการนี้พลังงานที่ใช้เร่งอนุภาคของก๊าซเฉื่อยคือพลังงานไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยทำการ จ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางกับผิวหน้าเป้าสารเคลื่อนและมีทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง ซึ่งช่วยเพิ่มทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น ทำให้การไอออนไนซ์ อะตอมแก๊สเฉื่อยมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.4



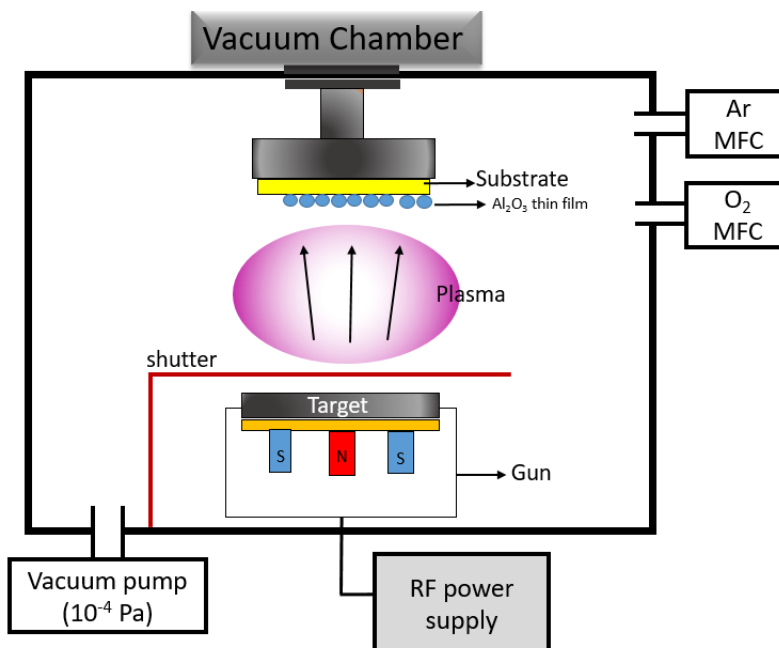
รูปที่ 2.4 ภาพจำลองกระบวนการเคลือบด้วยเทคนิค แมกนีตรอน สปีดเตอริง (Magnetron Sputtering) ที่มีการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบ (Target) [Magnetron Sputtering Technology [Online], 2014]

กระบวนการสปีดเตอริงเริ่มต้นจากการติดตั้งเป้ายิงสารเคลือบไว้ในหัวเคลือบที่อยู่ในภาวะสุญญากาศที่ต่อกับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์สูง เรียกหัวเคลือบนี้ว่าแคโทด จากนั้นนำวัสดุรองรับที่ต้องการเคลือบใส่ไว้ในภาวะสุญญากาศ ปิดภาชนะแล้วใช้ปั๊มสุญญากาศสูบล้างอากาศออกเพื่อสร้างภาวะสุญญากาศที่เหมาะสม แล้วมีการเติมก๊าซเฉื่อยที่มีมวลโมเลกุลสูง ในที่นี้ใช้ก๊าซอาร์กอน เข้าไปในภาชนะให้มีระดับความดันค่าหนึ่งที่เหมาะสม จากนั้นจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์สูงให้ไฟฟ้าขั้วลบหรือแคโทด ไอออนของก๊าซอาร์กอนจะวิ่งเข้าชนเป้ายิงสารเคลือบ และเกิดการถ่ายทอดโมเมนตัมและพลังงานให้กับเป้าจนมีอะตอมสารเคลือบหลุดออกมาเป็นไอและตกเคลือบวัสดุรองรับด้วยโมเมนตัมและพลังงานที่ได้รับหลังจากการชน [สุรสิงห์ ไชยคุณ, 2549]

2.4 RF magnetron sputtering

ระบบปลูกฟิล์มบางแบบ RF sputtering ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ววางขนานกัน ได้แก่ target (cathode) และ substrate เช่นเดียวกับแบบ DC sputtering แต่ใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นความถี่คลื่นวิทยุกำลังสูง (แอมพลิฟายด์ในช่วงระหว่าง 0.5 – 1 kV, ความถี่มากกว่า 0.1 MHz) ปกตินิยมใช้ความถี่ 13.56 MHz การใช้สนามไฟฟ้าความถี่สูงทำให้เพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิกับอะตอมของก๊าซเพื่อแตกตัวเป็นพลาสมาให้สูงขึ้น ดังนั้นระบบปลูกฟิล์มบางแบบ RF sputtering จึงสามารถทำงานได้ ที่ความดันต่ำกว่ากรณีของ DC sputtering มาก กล่าวคือสามารถทำงานได้ที่ความดันระดับ 1 mtorr การส่งคลื่นวิทยุความถี่สูงเข้าสู่ระบบ RF sputtering จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ปรับอิมพีแดนซ์ (impedance-matching network) สัญญาณความถี่คลื่นวิทยุจะต่อผ่านระบบปรับอิมพีแดนซ์เข้าสู่ target ซึ่งโดยทั่วไปจะมีพื้นที่ขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับ substrate และผนังห้องสุญญากาศที่ต่อเป็นกราวด์ความไม่เท่ากันของพื้นที่ของ ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะเหนี่ยวนำให้เกิดศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นลบ (negative dc bias) ขึ้นที่ target ด้วยขนาด

เท่ากับแอมพลิจูดของโวลเตจของ RF power supply ศักย์ไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการ สเป็คเตอริงขึ้นที่ target ถึงแม้ target จะเป็นฉนวนไฟฟ้าก็ตาม แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ห้องเคลือบฟิล์มบางอลูมินา
(วีทีซีน, 2560)

เงื่อนไขในกระบวนการเคลือบวัสดุด้วยกระบวนการสเป็คเตอริงมีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์ม เช่นการเกาะติด สี และความโปร่งแสงของฟิล์ม P. Zeman และ คณะ (2002) ได้ทำการทดลองหาอิทธิพลของเงื่อนไขในกระบวนการสเป็คเตอริงที่มีต่อคุณสมบัติฟิล์มบาง พบว่า

1. เวลาที่เคลือบ สัมพันธ์กับปริมาณของสารที่ตกเคลือบบนชิ้นงาน เวลาการเคลือบที่มากขึ้นจะทำให้ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น ถ้าฟิล์มหนามากเกินไปจะทำให้ความสามารถในการยึดเกาะพื้นผิวชิ้นงานของฟิล์มลดลง ฟิล์มอาจหลุดลอกง่ายขึ้น
2. อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและออกซิเจน ถ้าเร็วเกินไปจะทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาเกินไป แม้ใช้เวลาในการเคลือบน้อยก็ตาม
3. ระยะห่างของชิ้นงานกับเป้าหมายสารเคลือบ สัมพันธ์กับปริมาณของสารที่ตกเคลือบบนชิ้นงานถ้าระยะห่างไกลเกินไปจะทำให้ได้ฟิล์มที่หนาแม้ว่าจะใช้เวลาเคลือบน้อย แต่ถ้าระยะห่างมากเกินไปจะทำให้ได้ปริมาณของสารที่ตกเคลือบบนชิ้นงานน้อยลงแม้ว่าจะใช้เวลามากขึ้น

2.5 อัญมณีเนื้ออ่อน (semi-precious gemstones)

อัญมณีเนื้ออ่อน คือกลุ่มอัญมณีที่มีความแข็ง (Hardness) น้อยกว่าระดับ 9 ในหน่วยของโมห์สเกล (Moh's scale) ส่วนอัญมณีที่มีความแข็งตั้งแต่ ระดับ 9 ขึ้นไป ในหน่วยของโมห์สเกลจัดเป็น อัญมณีเนื้อแข็ง ได้แก่ เพชร และคอร์ันดัม (เช่น ทับทิม ไพลิน หรือ บุชราคัม เป็นต้น) อัญมณี

เนื้อแข็งเป็นกลุ่มอัญมณีที่มีมูลค่าด้านการตลาด และได้รับความนิยมสูงเนื่องจากความสวยงามตามลักษณะทางอัญมณีและสมบัติด้านความแข็ง ทำให้อัญมณีคงความสวยงามได้ยาวนาน อย่างไรก็ตาม อัญมณีเนื้ออ่อนหลายชนิดมีมูลค่าทางการตลาดสูงมากเนื่องมาจากความสวยงาม และความหายาก การจำแนกอัญมณีตามระดับความแข็งในโมห์สเกล แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจำแนกชนิดของอัญมณีตามระดับความแข็ง

Minerals Name	Chemical Formula	Hardness (Mohs scale)
Diamond	C	10
Corundum (Ruby, Sapphire)	Al ₂ O ₃	9
Chrysoberyl	BeAl ₂ O ₄	8.5
Topaz	Al ₂ (SiO ₄)(F,OH) ₃	8
Spinel	MgAl ₂ O ₄	7.5 - 8
Beryl (Emerald, aquamarine)	Be ₃ Al ₂ Si ₆ O ₁₈	7.5 - 8
Zircon	ZrSiO ₄	7.5
Tourmaline	(Ca,K,Na) (Al,Fe,Li,Mg,Mn) ₃ (Al,Cr,Fe,V) ₆ (BO ₃) ₃ (Si,Al,B) ₆ O ₁₈ (OH,F) ₄	7 - 7.5
Garnet	(Ca, Mg, Fe, Mn) ₃ (Al, Fe, Cr) ₂ (SiO ₄) ₃	6.5 - 7.5
Quartz (Citrine, amethyst)	SiO ₂	7
Nephrite	Ca ₂ (Mg,Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	6.5
Peridot	(Mg, Fe) ₂ SiO ₄	6.5
Opal	SiO ₂ (amorphous)	5.5 - 6.5
Turquoise	CuAl ₆ (PO ₄) ₄ (OH) ₈ .4H ₂ O	5 - 6
Lapis Lazuli (Lazurite)	(Na,Ca) ₈ (AlSiO ₄) ₆ (S,SO ₄ ,Cl) ₁₋₂	5 - 5.5
obsidian	SiO ₂ (amorphous)	5
Malachite	Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂	3.5 - 4
Pearl	CaCO ₃	3
Amber	Organic compound	2.5

2.5.1 เพอริidot (Peridot)

เพอริidot เป็นภาษาฝรั่งเศส หมายถึง แร่โอลิวีน แสดงดังรูปที่ 2.4 มีสีเขียวมะกอก หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ครีโซไลต์ บ้างก็เรียกว่ามรกตราตรี โดยมากพบในหินอัคนีสีเข้ม เช่น เพอริไทต์ และบะซอลต์เพอริidotเป็นพลอยที่มีสีเขียวเท่านั้น สีของเพอริidotมีทั้งสีเขียวอมเหลือง สีเขียวใส สีเขียวอมเทา สีเขียวอมน้ำตาลแต่สีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือสีเขียวใสบริสุทธิ์ หรือติดสีอื่นน้อย

ที่สุดเพอริดอตมักถูกเข้าใจผิดว่าเป็นมรกตในกลุ่มของพลอยเบอร์ิลอยู่เสมอ เนื่องจากสีที่ดูคล้ายกัน เพอริดอตส่วนมากมักมีเนื้อใสสามารถมองเห็นรอยตำหนิได้ง่าย ซึ่งมลทินเฉพาะตัวของเพอริดอต มีลักษณะเป็นรอยแตกภายในเนื้อคล้ายใยบัว เรียกว่า มลทินรอยแตกคล้ายใยบัว หรือ Lilly Pad และมักพบมลทินแร่โครไมต์ในจุดศูนย์กลางของรอยแตกอีกด้วย คุณสมบัติทั่วไปของพลอยเพอริดอต แสดงดังตารางที่ 2.3

แหล่งพลอยเพอริดอตที่มีชื่อเสียงแหล่งหนึ่ง ได้แก่ พม่า ซึ่งมีคุณภาพหลากหลายระดับ แต่เฉพาะเพอริดอตที่มาจากเมืองโมกอกนั้นจะมีคุณภาพที่แตกต่างออกไป แหล่งของพลอยเพอริดอตอีกแหล่งหนึ่ง คือ ที่ San Carlos Apache Indian ในรัฐอริโซนา สหรัฐอเมริกา แหล่งสำคัญที่พบเพอริดอตคือ ที่เกาะเซนต์จอห์นในทะเลแดง ซึ่งถือว่ามีเพอริดอตคุณภาพดีที่สุด หรือที่เรียกว่า มรกตยามเย็น (evening emerald) ส่วนใหญ่เมื่อพบพลอยคอร์นดัมในแหล่งใดก็มักจะพบพลอยเพอริดอต เพทาย และสปิเนลด้วย สำหรับในประเทศไทยสามารถพบเพอริดอต ได้ที่ แพร่ กาญจนบุรี จันทบุรี และตราด

การดูแลรักษา เนื่องจากเพอริดอตมีความแข็งค่อนข้างต่ำ ควรแยกเก็บในกล่องที่มีผ้าหุ้มหรือใส่ถุงผ้า ไม่ควรเก็บรวมไว้กับเครื่องประดับอัญมณีชนิดอื่น ไม่ควรให้โดนกรด เช่น ซัลฟูริก และไฮโดรคลอริกเนื่องจากเพอริดอตมีปฏิกิริยาต่อกรด จะทำให้เกิดความเสียหายได้ ไม่ควรสวมใส่เครื่องประดับเพอริดอตทำกิจกรรมที่มีแรงกระแทก เช่น ออกกำลังกาย ทำงานบ้านต่างๆ เนื่องจากแรงกระแทกอาจทำให้เกิดรอยร้าวได้



รูปที่ 2.6 พลิกแร่โอลีวิน
(ทรัพย์ากรแร่, 2016)

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทั่วไปของพลอยเพอริดอต

	เพอริดอต
องค์ประกอบทางเคมี	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
ระบบผลึก	ออร์โทรอมบิก

ความแข็ง	6.5-7
ค่าดัชนีหักเห	1.654-1.690
ความถ่วงจำเพาะ	3.34
สี	สีเขียว
ความวาว	คล้ายแก้ว
รอยแตก	แบบก้นหอย

2.5.2 อความารีน (Aquamarine)

อความารีน (Aquamarine) มาจากภาษาลาติน ว่า "aquamarine" แปลเป็นภาษาอังกฤษ ว่า "water of the sea" หรือ หยาดน้ำแห่งท้องทะเล เป็นพลอยในตระกูล Beryl (เบริล) แสดงรูปร่างที่ 2.5 พบเกิดในหินเพกมาไทต์ (Pegmatite) และในหินแกรนิต (Granite) อความารีน มีความแข็ง 7.5-8 มีส่วนประกอบทางเคมี แสดงตารางที่ 2.3 อันได้แก่ เบอริลเลียม อะลูมิเนียม และ ซิลิกเกต เนื้อของอความารีนมักจะสะอาดและกระจ่างใสกว่ามรกตมาก อความารีน เป็นพลอยที่มีสีเขียวแกมน้ำเงิน จนถึงน้ำเงินแกมเขียว สีฟ้า สีฟ้าน้ำทะเล สีฟ้า นั้นเรียกว่า Brazillian Aquamarine เนื่องจากมีเฉดสีฟ้าหลายเฉดไม่ว่าจะเป็น สีฟ้าจาง สีฟ้าอมเขียว และสีฟ้าเข้ม หรือที่เรียกกันว่า Santa Maria หายากกว่าสีอื่นๆจึงมีราคาสูง และกลายเป็นที่ต้องการมากที่สุดในปัจจุบัน หรือแม้แต่สีฟ้าจางอ่อนๆ แต่ด้วยไฟที่ระยิบระยับมากกว่า Blue Topaz ทำให้อความารีนเป็นหนึ่งในพลอยสีฟ้าที่เป็นที่นิยม

แหล่งที่พบอความารีนเป็นจำนวนมากนั้นอยู่ในเขตพื้นที่แถบประเทศ อเมริกา เม็กซิโก อินเดีย ไอร์แลนด์ ซิมบับเว ไนจีเรีย ยูเครน บราซิล มาดากัสการ์ แชมเบีย โมซัมบิก และ ปากีสถาน

การดูแลรักษา เนื่องจากอความารีนนับเป็นพลอยเนื้ออ่อน เวลาสวมใส่ต้องระวังการขีดขูดขีดของของแข็งที่อาจทำให้เป็นรอยได้ ควรเก็บให้ห่างจากแสงสว่าง เพราะแสงแดดจ้ามากๆอาจจะทำให้ซีดได้ และการล้างควรล้างด้วยน้ำสบู่อ่อนๆ และใช้แปรงอ่อนๆ ขัดเบาๆ ล้างด้วยน้ำอุ่น เช็ดแล้วปล่อยให้แห้งตามธรรมชาติ



รูปที่ 2.7 ผลึกแร่ อความารีน
(GIT, 2018)

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทั่วไปของพลอยอความารีน

	อความารีน
องค์ประกอบทางเคมี	$\text{Be}_2\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$
ระบบผลึก	เฮกซะโกนาล
ความแข็ง	7.5-8
ค่าดรรชนีหักเห	1.560-1.600
ความถ่วงจำเพาะ	2.72
สี	สีฟ้า, ฟ้าอมเขียว
ความวาว	คล้ายแก้ว
รอยแตก	แบบกั้นหอย

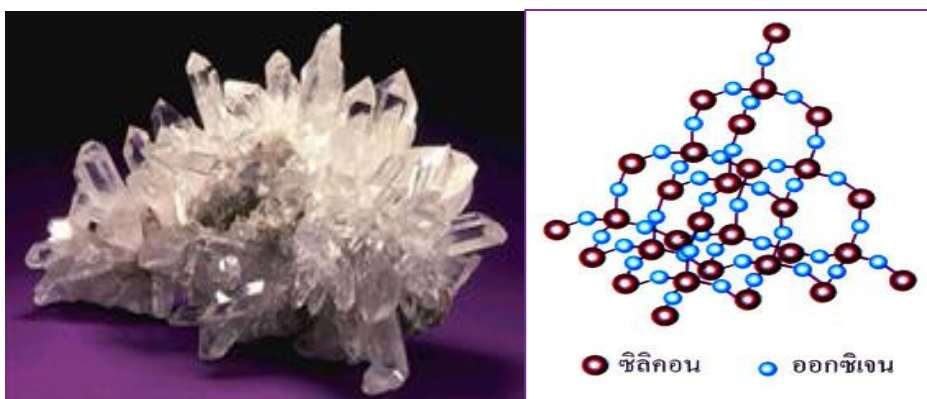
2.5.3 ควอตซ์ (Quartz)

ควอตซ์ หรือมีชื่อว่า "แร่เขียวหนุมาน" เป็นแร่ที่พบมากที่สุดในโลกเป็นอันดับที่สอง รองจาก เฟลด์สปาร์ ลักษณะทั่วไป สีมืดทั้งโปร่งใส จนถึงทึบแสง มีมากมายแทบจะทุกสี เช่น ขาวขุ่น ชมพู ม่วง และสีควีนไฟ เป็นต้น ควอตซ์มีค่าความแข็งที่ 7 ตามสเกลของโมส์ (Moh's scale) มีลักษณะเป็นรูปผลึกหกเหลี่ยม เป็นแท่งสั้นๆ โคนส่วนมากหว่าท่ายจะมีรูปทรงเป็นปิรามิด แต่สามารถพบที่มีปลายตัดได้ แสดงดังรูปที่ 2.1 ผลึกของควอตซ์ (Quartz) และคุณสมบัติทั่วไป ดังตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของควอตซ์

การกำเนิด แร่ควอตซ์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของหินอัคนี ชนิดที่มีซิลิกาหลายๆ เช่น หินแกรนิต และไรโอไลต์ (Rhyolite) เป็นต้น โดยทั่วไปจะพบแร่ควอตซ์เกิดอยู่ร่วมกับเฟลด์สปาร์ และมัสโคไวต์ (Muscovite) เป็นสายแร่

แหล่งที่พบในประเทศไทย ได้แก่ พวกผลึกใส พบที่ อ. เกิน จ. ลำปาง น่าน อุตรดิตถ์ นครสวรรค์ ระนอง พังงา ภูเก็ต นครศรีธรรมราช เป็นต้น สีม่วงพบที่ลำปาง ตาก นครนายก สีชมพู พบที่ จ. จันทบุรี ราชบุรี ระนอง พังงา ภูเก็ต

ประโยชน์ แร่ควอตซ์ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในลักษณะต่างๆ เช่น ควอตซ์สีม่วง ควอตซ์สีชมพู ควอตซ์สีควีนไฟ ใช้เป็นรัตนชาติ และหินประดับ แร่ควอตซ์ที่อยู่ในรูปของทราย ถูกนำมาใช้ผสม ทำคอนกรีต ทำครก เป็นต้น (patchra, 2560)



รูปที่ 2.8 ผลึกของควอตซ์ (Quartz)
(patchra, 2560)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทั่วไปของควอตซ์

คุณสมบัติทั่วไปของควอตซ์	
องค์ประกอบทางเคมี	SiO ₂
ความแข็ง	7
ความถ่วงจำเพาะ	2.59-2.63
ค่าดัชนีหักเห (R.I.)	1.552-1.554
ระบบผลึก	Hexagonal
ความวาว	แบบแก้ว
รอยแตก	คล้ายกันหอย

2.5.4 อะพาไทต์ (Apatite)

อะพาไทต์ เป็นแร่ที่อยู่ในกลุ่มฟอสเฟต ลักษณะทั่วไป สีจะมีทั้งเนื้อโปร่งใส ไปจนถึงโปร่งแสง เช่น สีใส เขียว น้ำเงิน ม่วง และสีน้ำตาล เป็นต้น มีค่าความแข็งที่ 5 ตามโมห์สเกล (Moh's scale) ใช้มีดพับชุดจะเป็นรอย มีลักษณะเป็นรูปผลึกหกเหลี่ยม เป็นแท่งสั้นๆเช่นเดียวกับแร่ควอตซ์ โดยส่วนมากหัวท้ายจะมีรูปทรงเป็นปิรามิด ดังรูปที่ 2.2 ผลึกอะพาไทต์ (Apatite) และคุณสมบัติทั่วไป ดังตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของอะพาไทต์

แหล่งที่พบในประเทศไทย พบได้ทั่วไปในแหล่งแร่ดีบุก โดยเฉพาะที่เกิดจากสายเพกมาไทต์ เช่นที่อำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี อำเภอบ้านนิงสตาร์ จังหวัดยะลา และที่อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี เป็นต้น

ประโยชน์ อะพาไทต์ใช้ประโยชน์ในการทำปุ๋ยอย่างกว้างขวาง ชนิดผลึกโปร่งใส สีสวยงาม ใช้เป็นแร่รัตนชาติ แม้จะอ่อนไปหน่อยแต่ก็นิยมใช้กันไม่น้อย (dmr, 2560)



รูปที่ 2.9 ผลึกอะพาไทต์ (Apatite)
(dmr, 2560)

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทั่วไปของอะพาไทต์

คุณสมบัติทั่วไปของอะพาไทต์	
องค์ประกอบทางเคมี	$(Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH))$
ความแข็ง	5
ความถ่วงจำเพาะ	3.18
ค่าดัชนีหักเห (R.I.)	1.634-1.638
ระบบผลึก	Hexagonal
ความวาว	แบบแก้ว
รอยแตก	คล้ายกันหอย

2.6 สีและระบบการวัดสี

การมองเห็นสีของมนุษย์เกิดจากแสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุนั้นมากระทบตาเรา ดังนั้น การมองเห็นสีจึงมีปัจจัยสำคัญ 3 ประการคือ

1. แหล่งกำเนิดแสง แหล่งกำเนิดแสงสำหรับการมองเห็นมีอยู่ 2 แหล่งคือแหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติและ แหล่งกำเนิดแสงที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยแหล่งกำเนิดแสง ตามธรรมชาติได้แก่ ดวงอาทิตย์ ซึ่งให้แสงขาว มายังพื้นโลกและสามารถแยกเป็นแถบสีต่างๆกันได้ 7 สี มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 380-780 นาโนเมตร สำหรับแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์เป็น แหล่งกำเนิดแสงที่มนุษย์สร้างขึ้น เพื่อใช้ในจุดประสงค์ต่างๆมีหลายชนิด เช่นหลอดทังสแตนหลอดซีนอน เป็นต้น แต่ละแบบจะให้คลื่นแสงที่ ความยาวคลื่นแตกต่างกันออกไป

2. วัตถุมีสี เมื่อแสงตกกระทบวัตถุหรือแสงเคลื่อนที่ จากตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกตัวกลางหนึ่งจะพบว่ามีปรากฏการณ์ต่างๆเกิดขึ้น ได้แก่การดูดกลืน (absorption) การสะท้อน (reflection) และการ ส่องผ่าน (transmission) การที่เรามองเห็นวัตถุมีสี ได้เนื่องจาก วัตถุมีสีเกิดการดูดกลืน พลังงานของแสง บางความยาวคลื่นไว้ และสะท้อนพลังงานของแสง ในช่วงความยาวคลื่นของสีของ วัตถุนั้นออกมา

3. ผู้สังเกตการณ์ เมื่อแสงสะท้อนจากวัตถุมีสีเข้าสู่ตาของผู้ สังเกตการณ์แสงจะเดินทางเข้าสู่เรตินาและถูก แยกแยะจากเซลล์ส่วนที่มีความไวต่อแสงต่างกัน 2 ชนิด คือเซลล์รูปแท่ง

(rods cell) เป็นส่วนแยกความแตกต่างระหว่างความมืดกับความสว่างและ เซลล์รูปกรวย (cones cell) เป็นส่วนที่แยกความแตกต่างของสีโดยเซลล์รูปกรวยประกอบไปด้วย เซลล์ 3 ชนิด คือเซลล์ที่ไวต่อแสงสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน เมื่อได้รับแสงเซลล์รับแสงทั้งสามจะ ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนที่ต่างกันขึ้นกับสีและความเข้ม ของแสงที่ตกกระทบ จากนั้นสมองก็จะแปลสัญญาณที่แตกต่างกันนั้นทำให้เห็นเป็นสีต่างๆ ขึ้นมา

สี เป็นคุณสมบัติเชิงแสงที่สามารถใช้บรรยายคุณลักษณะของวัสดุได้ง่ายที่สุดวิธีหนึ่ง ในการอธิบายสีของวัตถุด้วยคำพูด มาตรฐานของการบรรยายลักษณะสีอาจจะแตกต่างกันได้ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ ลักษณะทางกายภาพของตาของผู้บรรยาย ลักษณะแสงที่ตกกระทบ เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องมีการจัดมาตรฐานการวัดสีและบรรยายสีในเชิงวิชาการ เพื่อลดความไม่เป็นกลางของผู้บรรยายวัตถุ

องค์กรที่มีบทบาทสำคัญเกี่ยวกับ การกำหนดมาตรฐานด้านสีคือ Commission International de l'Eclairage (CIE) หรือในชื่ออังกฤษว่า International Commission on Illumination องค์กรนี้ได้กำหนดมาตรฐานการวัดสีซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างในวงการวิชาการและการวิจัยคือระบบ CIE Lab scale ในระยะเริ่มแรก CIE ได้กำหนดสเกลการวัดสีเป็น X-Y-Z ซึ่งใช้บรรยายสีแดง (Red) เขียว (Green) และ น้ำเงิน (Blue) แต่เนื่องจากระบบสีดังกล่าวไม่สามารถบรรยาย ถึงลักษณะความมืด-สว่างของสีได้ CIE ได้พัฒนาต่อมาเป็นระบบ X-Y-L ซึ่งบรรยายถึงค่าสีแดง เขียว และความสว่าง (lightness) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวก็ยังขาดส่วนที่ บรรยายถึงค่าสีน้ำเงิน CIE จึงได้พัฒนาระบบสีต่อมาจนเป็นระบบที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือระบบ $L^*a^*b^*$ ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ

โดย CIE ได้มีการปรับปรุงระบบนี้ จนได้ระบบที่นิยมอย่างกว้างขวางก็คือ CIE LAB 1976 โดยมีค่าดังนี้

L^* เป็นตัวกำหนดค่าความสว่าง (Lightness)

$L = 0$ มีค่าเป็นความมืด

$L = 100$ มีค่าเป็นความสว่าง

a^* เป็นตัวกำหนดค่าสีแดง หรือสีเขียว

a เป็น + มีค่าวัตถุเป็นสีแดง

a เป็น - มีค่าวัตถุเป็นสีเขียว

b^* เป็นตัวกำหนดค่าสีเหลือง หรือสีน้ำเงิน

b เป็น + มีค่าวัตถุเป็นสีเหลือง

b เป็น - มีค่าวัตถุเป็นสีน้ำเงิน

Hue angle เป็นตัวเลขที่จะระบุตำแหน่งสีว่าอยู่ที่ใดในกราฟ มีหน่วยเป็นองศา

$h^* = 90$ แสดงถึง สีแดง

$h^* = 180$ แสดงถึง สีเหลือง

$h^* = 270$ แสดงถึง สีเขียว

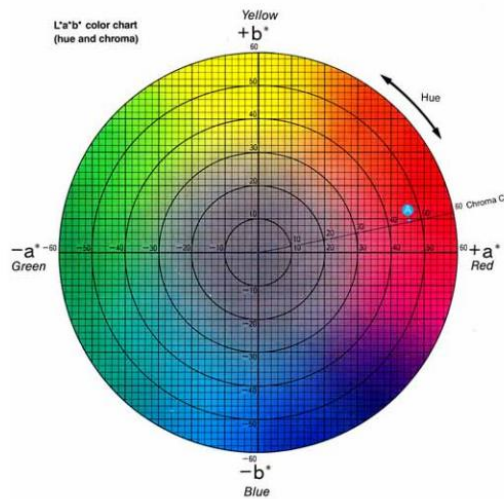
$h^* = 360$ แสดงถึง สีน้ำเงิน

โดยสามารถอธิบายได้ว่า

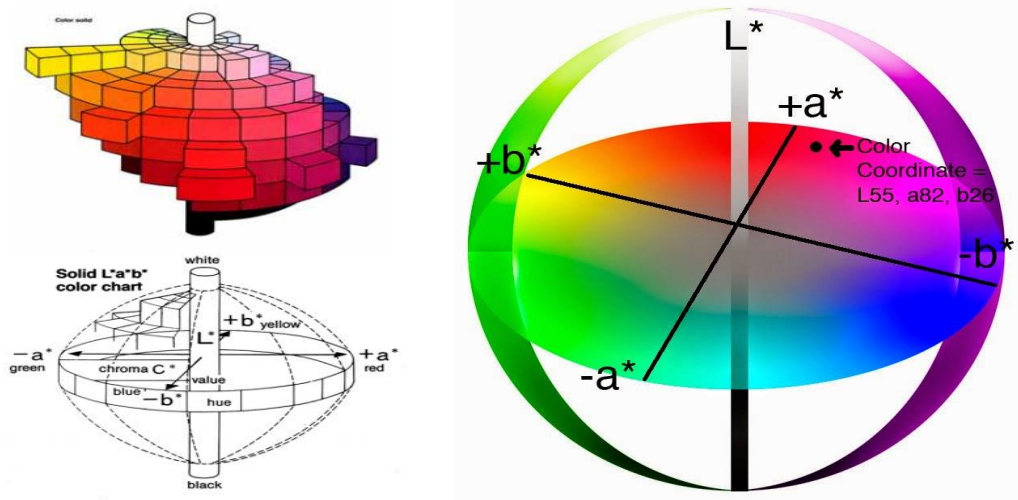
แกน L^* แสดงค่าความสว่าง (Lightness) จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว ไปถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ

แกน a^* จะแสดงถึงแกนสีเขียว $-a^*$ ไปจนถึง แกนสีแดง $+a^*$

แกน b^* จะแสดงถึงแกนสีน้ำเงิน $-b^*$ ไปจนถึง แกนสีเหลือง $+b^*$
 แสดงดังรูปที่ 2.10 และ รูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 การบรรยายสีในระบบ CIE Lab มองในระนาบ 2 มิติ (Minolta, 1997)



รูปที่ 2.11 การบรรยายสีพื้นในระบบ CIE Lab ในภาพ 3 มิติ (Minolta, 1997)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอน สปีดเตอริง เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงและสมบัติต่างๆของฟิล์มบางอลูมินา

Liang et al. (1979) ได้เคลือบฟิล์มซิลิกอนด้วยวิธีอาร์เอฟ สปีดเตอริง โดยใช้ซิลิกอน เวเฟอร์ เป็นแผ่นรองรับ ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าอยู่ในช่วง 12.5 ถึง 14.5 MHz อุณหภูมิระหว่างเคลือบเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ความดันก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 30 และ 40 mTorr พบว่าความหนาของฟิล์มตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า แต่มีค่าลดลงเมื่อความดันก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้น และความหนาของฟิล์มมีค่าลดลงมากที่ความถี่ 13.56 MHz จากการวัดความเข้มข้นของอาร์กอนในฟิล์มตัวอย่างด้วยเทคนิค Rutherford backscattering พบว่าความเข้มข้นของอาร์กอนและอัตราการเคลือบฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า แต่มีค่าลดลงเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของฟิล์มบางซิลิกอนเพิ่มขึ้นเมื่อความดันก๊าซอาร์กอนลดลงและความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

อธิจิต กล่ำสมบูรณ์, (2553) การเคลือบฟิล์มบางอลูมินาด้วย วิธี ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง มีกระบวนการดังนี้ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (Ar) $4 \text{ Cm}^3/\text{s}$, ความดันภายในห้องเคลือบ (Pd) 5×10^{-3} มิลลิบาร์ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ (I) 500 มิลลิแอมแปร์ ค่าความต่างศักย์ของขั้วแคโทดคือเป้าสารเคลือบ กับผนังห้องเคลือบ (V) 250 โวลต์ ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับเป้าสารเคลือบ (d) และมีเงื่อนไขที่แตกต่างกันคือ เวลาที่ใช้เคลือบ (t) และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน (O_2)

ข้อเสนอแนะ

1. ก่อนการทดลองควรออกแบบการทดลองให้ดี เพราะการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขใดๆ อาจส่งผลต่อระยะเวลาในการทดลองได้
2. ในการเคลือบทดลองแต่ละครั้งควรเคลือบทิ้ง 1 ครั้ง เนื่องจากเครื่องที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มไม่ได้เคลือบฟิล์มชนิดใดชนิดหนึ่งอาจจะมีสารตกค้างอยู่ ควรเคลือบทิ้งเพื่อให้ระบบสะอาด
3. ฟิล์มที่ได้ อาจจะไม่เป็นผลึกซึ่งไม่เสถียร อย่างไรก็ตามการพิสูจน์ว่าฟิล์มเป็นผลึกหรือไม่ ต้องใช้เทคนิคหรือเครื่องมืออื่นๆในการทดสอบต่อไป เนื่องจากฟิล์มมีความบางมากไม่สามารถใช้ XRD ในการตรวจสอบลักษณะของฟิล์มได้

งานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย

2.6.1 การศึกษา XPS ของฟิล์มบางอลูมินา

Neelakanta Reddy, et al. (2014) การเคลือบฟิล์มบางอลูมินาบน SS304 และผิวโลหะไททานเนียมโดยใช้เทคนิค RF Magnetron sputtering กำลังไฟฟ้าที่ใช้คือ 300, 500 และ 700 วัตต์ ตรวจสอบลักษณะเฉพาะอย่างละเอียดโดย X-ray photoelectron spectroscopy พบว่าการใช้กำลังไฟฟ้าที่ต่างกันส่งผลต่อการสะสมของชั้นฟิล์มตามอัตราส่วนความเข้มข้นของอะตอมที่ไปเกาะกับผิวของวัสดุรองรับ

ผลวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการสปีดเตอริงแบบรีแอคทีฟจะทำให้ฟิล์มบางอลูมินามีองค์ประกอบทางเคมีที่ตรงกับปริมาณสารสัมพัทธ์ กระบวนการสะสมของฟิล์มโดยการสปีดเตอริงนั้นไม่สำคัญเท่าการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า

2.6.2 ผลกระทบของการหลอมต่อคุณสมบัติของฟิล์มบางอลูมินาที่ผ่านการปรับปรุงและการประยุกต์ใช้ใน TFTS

Ao Liu, et al. (2014) ฟิล์มบาง $AlOx$ ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการอบอ่อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 250, 350, 450 และ 550 องศาเซลเซียส ศึกษาผลของการหลอมต่อคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบาง $AlOx$ พบว่าความหนาแน่นของกระแสไฟลดลงเมื่ออุณหภูมิหลอมเพิ่มขึ้น ฟิล์มบางที่เคลือบ $AlOx$ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสแสดงประสิทธิภาพพจนวนที่ดีที่สุดด้วยความหนาแน่นกระแส $2.7 \times 10^{-9} A/cm^2$ ที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 3 โวลต์ เพื่อแสดงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางในอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์, อินเดียม, ไททาเนียม, และสังกะสี ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้

2.6.3 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์

Voigt et al. (2013) ได้เคลือบฟิล์มบางของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยเปลี่ยนเงื่อนไขในการเคลือบ เช่น อัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจน เป็น 1 ต่อ 1, 10 ต่อ 1, และ 100 ต่อ 1 ความดันของแก๊สระหว่างการเคลือบมีค่าระหว่าง 1.1×10^{-6} ถึง 8.0×10^{-7} Pa และ อัตราการเคลือบฟิล์มมีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 3.4 nm/min เป็นต้น แล้วนำ ฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า เพื่อนำ ไปใช้เป็นฟิล์มฉนวน โดยการวัดกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้า พบว่าที่อัตราส่วนการผสมของ แก๊สออกซิเจน 1% ต่อแก๊สอาร์กอน 99% สมบัติความเป็นฉนวนของฟิล์มเคลือบมีค่าดีขึ้น และ ใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope; AFM) ศึกษาลักษณะผิวและขนาดเกรน พบว่า ฟิล์มที่มีผิวไม่เรียบ และมีขนาดเกรนอยู่ระหว่าง 0.3-0.5 μm

2.6.4 การศึกษาสมบัติของชั้นฟิล์มป้องกันโปร่งใสอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีพัลส์ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงบนเครื่องประดับเคลือบทองชมพู

การศึกษสมบัติฟิล์มบางโปร่งใสอินเดียมทินออกไซด์(ITO) ด้วยหลักการดีซี พัลส์แมกนีตรอนสปัตเตอริงลงบนเครื่องประดับที่ผ่านการเคลือบฟิล์มทองชมพู โดยที่การเคลือบ ป้องกันนั้นจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของเครื่องประดับ โดยทำการศึกษาเงื่อนไขการเคลือบฟิล์ม ต่างๆ ได้แก่ อัตราของแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน, แรงดันไฟฟ้า, กำลังสปัตเตอริง และเวลาที่ใช้ใน การเคลือบ ซึ่งฟิล์มป้องกันที่ดีจะต้องมีความโปร่งแสงสูง แสงสามารถทะลุผ่านได้ดี (ธิภาพร ศรีสมบูรณ์, 2560)

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ

3.1. วัสดุ สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือ

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย

1. กระจกสไลด์
2. แผ่นสแตนเลส
3. แผ่นซิลิกอน
4. พLOYเนื้ออ่อน ได้แก่ เพอริดอต อความารีน ควอตซ์ และอะพาไทต์
5. เป้าสารเคลือบอลูมินา (Al_2O_3 99.99%)



กระจกสไลด์



แผ่นสแตนเลส



แผ่นซิลิกอน



พLOYเพอริดอต



พLOYอความารีน



เป้าสารเคลือบอลูมินา



พLOYควอตซ์



พLOYอะพาไทต์

รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

สารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.2 ประกอบด้วย

1. อะซีโตน
2. แก๊สอาร์กอน (Ar)
3. แก๊สออกซิเจน (O₂)
4. เมทานอล
5. น้ำกลั่น



1



2



3



4



5

รูปที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.3 อุปกรณ์

อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัยสามารถจำแนกเป็นอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

3.1.3.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมวัสดุรองเคลือบ

อุปกรณ์การหลอม แสดงดังรูปที่ 3.3 ตามหมายเลขดังนี้

1. กระจาดขี้ผึ้งไ้ฝุ่น
2. Forceps
3. เทปคาร์บอน
4. ถังมือยางชนิดไม่มีแป้ง
5. กรรไกร
6. ลูยกางเป่าฝุ่น
7. กระจาดทราย เบอร์600 และ 1000
8. อลูมิเนียมฟอยล์
9. หน้ากากอนามัย



1



2



3



4



5



6



7



8



9

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์การเตรียมวัสดุรองเคลือบ

3.1.3.2 อุปกรณ์สำหรับล้างกระจกสไลด์และแผ่นอลูมิเนียม

อุปกรณ์สำหรับล้างกระจกสไลด์และแผ่นอลูมิเนียม แสดงดังรูปที่ 3.4

ตามหมายเลขดังนี้

1. เครื่องเป่าลมร้อน
2. น้ำยาล้างจาน
3. ฟองน้ำ
4. ปีกเกอร์
5. ถังมืออย่างชนิดไม่มีแปรง



1

2

3



4



5

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์สำหรับล้างกระจกสไลด์และแผ่นอลูมิเนียม

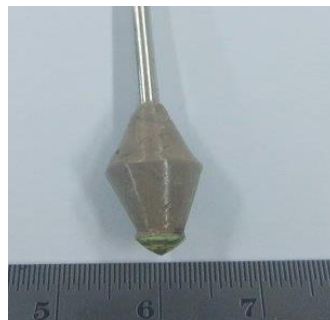
3.1.3.3 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการดูดซับเบื้องต้น

อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการดูดซับเบื้องต้น แสดงดังรูปที่ 3.5 ตามหมายเลขดังนี้

1. ขาตั้งและแคลมป์จับ (stand)
2. กาวดินน้ำมัน
3. ไม้ทวนติดปลาย
4. ฐานรองปลาย
5. เทปเยื่อกระดาษสองหน้า



1



3



5

รูปที่ 3.5 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการดูดซับ

3.1.4 สารเคมีสำหรับล้างกระจกสไลด์และแผ่นอลูมิเนียม

สารเคมีสำหรับล้างกระจกสไลด์และแผ่นอลูมิเนียม แสดงดังรูปที่ 3.6 ตามหมายเลข
ดังนี้

1. เมทานอล
2. อะซิโตน
3. น้ำ DI (De-ionized Water)



1



2



3

รูปที่ 3.6 สารเคมีสำหรับล้างกระจกสไลด์และแผ่นอลูมิเนียม

3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.5.1 เครื่องมือพื้นฐาน

เครื่องมือพื้นฐานในการแยกประเภทของพลอยต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย แสดงดังรูปที่

3.7 ประกอบด้วย

- เครื่องชั่งแบบ Hydrostatic Weighting Balance เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับหาค่าความถ่วงจำเพาะ
- Refractometer เป็นเครื่องมือที่ใช้หาค่าดัชนีหักเหทางแสง



1



2

รูปที่ 3.7 เครื่องมือพื้นฐาน

3.1.5.2 เครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มบาง

เครื่อง Physical Vapour Deposition (PVD) รุ่น FM500 PID
Plasma Implantation and Deposition System เครื่อง PVD

เครื่องเคลือบฟิล์มบางใช้การตกตะกอนของไอสารที่ได้มาโดยวิธีการทางฟิสิกส์ เป็นเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมผิววัสดุ เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มบางที่มีระบบการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคอาร์

เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง สถานที่ตั้งอุปกรณ์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



รูปที่ 3.8 เครื่อง FM500 PID Plasma implantation and Deposition System
(Non-Thermal plasma)

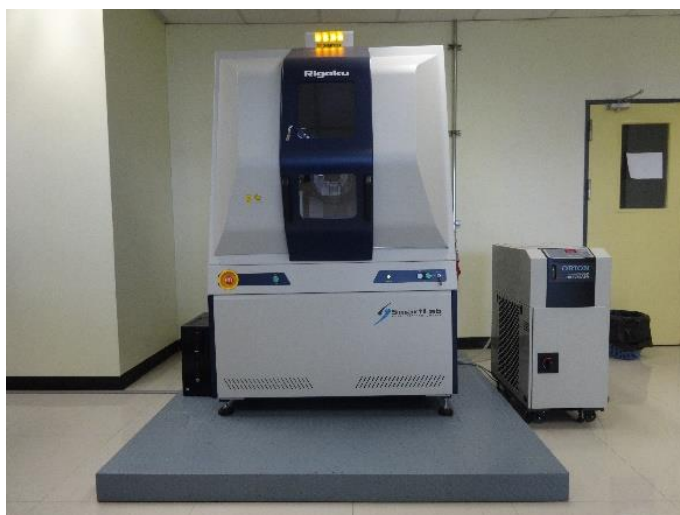
3.1.5.3 เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง

เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.9-3.13 ประกอบด้วย

1. X-Ray Diffractometer (XRD)

X-Ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ/รุ่น: Rigaku /SmartLab ใช้เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์มาใช้วิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆกัน โดยมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูลองค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมืองศาในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ในมุมที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นกับองค์ประกอบรูปร่าง และลักษณะผลึก ซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ใน

สารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้นอกจากนั้นแล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ ความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง



รูปที่ 3.9 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ/รุ่น: Rigaku /SmartLab

2. Wavelength dispersive X-Ray Fluorescence (WDXRF)

Wavelength dispersive X-Ray Fluorescence (WDXRF) ยี่ห้อ/รุ่น: Bruker/S8 TIGER เทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลวและสารแขวนลอยได้ อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสีเอ็กซ์ ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา (fluoresced) เนื่องจากโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่น (พลังงาน) เฉพาะสำหรับธาตุนั้นๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนที่เปล่งออกมาจะขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง ข้อมูลนี้สามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้



รูปที่ 3.10 เครื่อง Wavelength dispersive X-Ray Fluorescence (WDXRF)
ยี่ห้อ/รุ่น: Bruker/S8 TIGER

4. UV-Vis Spectrophotometer

UV/Vis Spectrophotometer ยี่ห้อ/รุ่น: Shimadzu / UV-1700 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณการส่งผ่านแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนที่ตัวอย่าง โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ สมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในการระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



รูปที่ 3.11 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ยี่ห้อ/รุ่น: Shimadzu / UV-1700

5. Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope ,SEM) ยี่ห้อ/รุ่น: FEI / Nova Nanosem 450 เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการศึกษาและอธิบายสัณฐานของวัสดุได้ ทั้งที่กำลังขยายต่ำ ประมาณ 30 เท่า หรือกำลังขยายสูงมากถึงประมาณ 200,000 เท่า ซึ่งจะให้กำลังแยกของภาพ (resolution) สูงถึง 2-5 นาโนเมตร โดยอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกบีบให้เป็นลำขนาดเล็กประมาณ 10 nm และโฟกัสลงบนผิวตัวอย่าง ด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ชุดมี Scanning Coil ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนวิ่งไปบนผิวตัวอย่างเป็นพื้นที่ที่มากขึ้นตามกำลังขยายที่ต้องการ ภายใต้ความต่างศักย์ ฟุ้งชนผิวตัวอย่าง จะให้สัญญาณหลายชนิดออกมา สัญญาณเหล่านี้สามารถนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะของตัวอย่างได้ ทั้งในด้านส่วนประกอบ ลักษณะของผิว โครงสร้างของผลึก และอื่นๆ สัญญาณจาก Secondary Electrons และ Backscattered Electrons เท่านั้นที่จะทำให้เกิดภาพ SEM เมื่อสัญญาณผ่าน Detector จะถูกเปลี่ยนเป็นแสงด้วย Scintillator ผ่านไปตามท่อนำแสง จนถึง Photomultiplier ซึ่งจะเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าอีกครั้ง ก่อนที่จะประมวลภาพให้ปรากฏบนจอรับภาพ สถานที่ตั้งอุปกรณ์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



รูปที่ 3.12 เครื่อง Scanning Electron Microscope(FESEM)
ยี่ห้อ/รุ่น: FEI / Nova Nanosem 450

2. Scratch tester

การวัดค่า adhesion โดยเครื่อง Scratch test ยี่ห้อ/รุ่น Anton Paar/ MST 3 จะให้ค่าเชิงปริมาณ และสามารถทำการวิเคราะห์ลักษณะความเสียหายของ ระบบ coating-substrate ในเครื่องนี้ ชิ้นงานที่มี coating จะถูกขีดด้วยหัวเข็มที่ทำจากเพชรลากไปด้วยความเร็วคงที่และมีการ เพิ่มแรงกดขึ้นเรื่อยๆ (Progressive load) และในระหว่างการทดสอบนี้ ระบบ sensor จะตรวจวัดสัญญาณเสียง (Acoustic emission sensor) ความลึกของหัวเข็มที่เจาะ ลงไปในชิ้นงาน (Penetration depth sensor) และค่าความฝืดที่กำลังเปลี่ยนแปลง (Tangential force sensor) เมื่อถึงแรงกดวิกฤติ (Critical load, lc) ค่าหนึ่ง coating จะเริ่มเสียหาย โดยการตรวจจับของ sensor ต่างๆผู้ทำการวัดจะสามารถแบ่งระดับของความเสียหายที่ค่าแรงกดต่างๆ ออกได้หลายระดับ (เช่น lc_1 , lc_2 etc.) จนกว่าจะถึงค่าสุดท้ายที่ทำให้เกิดการหลุดลอกของ coating โดยสมบูรณ์



รูปที่ 3.13 เครื่อง Scratch tester ยี่ห้อ/รุ่น Anton Paar/ MST 3

3. UV-Vis Spectrophotometer

UV-Vis-NIR ยี่ห้อ/รุ่น PerkinElmer/ Lambda 950 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดการ ดูดกลืนแสง (Absorbance) การส่องผ่านแสง (Transmittance) และการสะท้อนแสง (Reflectance) ซึ่งปริมาณการดูดกลืน จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ทำให้เทคนิค UV-Vis-NIR สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการ วิเคราะห์ทดสอบสารได้อย่างหลากหลายทั้งในกลุ่มสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และสารประกอบเชิงซ้อนที่ดูดกลืนรังสีในช่วงดังกล่าวได้มีระบบการวัดการดูดกลืนแสงเป็นแบบลำแสงคู่ (Double beam Spectrophotometer) สามารถทดสอบค่าการส่องผ่าน (Transmittance) และการดูดกลืน (Absorbance) ของแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 175 ถึง 3300 นาโนเมตร ทำงานร่วมกับโปรแกรมคำนวณค่าสี (Color software) จากสเปกตรัมของสารตัวอย่าง โดยแสดงค่าตามมาตรฐานแบบ Tristimulus values (XYZ), CIE L*a*b*
 สถานที่ตั้ง ห้องวิเคราะห์ LA-ICP-MS & UV-VIS ห้องปฏิบัติการส่วนวิจัยประยุกต์เพื่ออุตสาหกรรม ฝ่ายสถานีวิจัย



รูปที่ 3.14 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer
 ยี่ห้อ/รุ่น PerkinElmer/ Lambda 95

3.2 กรรมวิธีในการวิจัย

โครงการวิจัย การเคลือบฟิล์มบางอลูมินาด้วยเทคนิค แมกนีตรอน สเปตเตอริง เพื่อปรับปรุงคุณภาพอัญมณีเนื้ออ่อน ได้แบ่งเป็นการวิจัย เป็น 2 ชุด

การวิจัยชุดที่ 1 เป็นการวิจัยเพื่อหาศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟในการสร้างคลื่นวิทยุแ (RF Power) และเวลาในการเคลือบที่เหมาะสม

การวิจัยชุดที่ 2 เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตของก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจน และเวลาในการเคลือบที่เหมาะสม

แล้วนำไปศึกษาผลการวิจัย ทดสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มด้วยเครื่อง UV/vis ศึกษาปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิคXRF ศึกษาความหนาฟิล์มด้วยเทคนิค XRR ศึกษาโครงสร้างฟิล์มด้วยเทคนิค XRD หลังจากนั้นนำไปทดสอบการการขีดข่วนของฟิล์มด้วยเครื่อง Scratch tester

3.2.1 การเตรียมชิ้นงานก่อนทำการเคลือบฟิล์มบาง

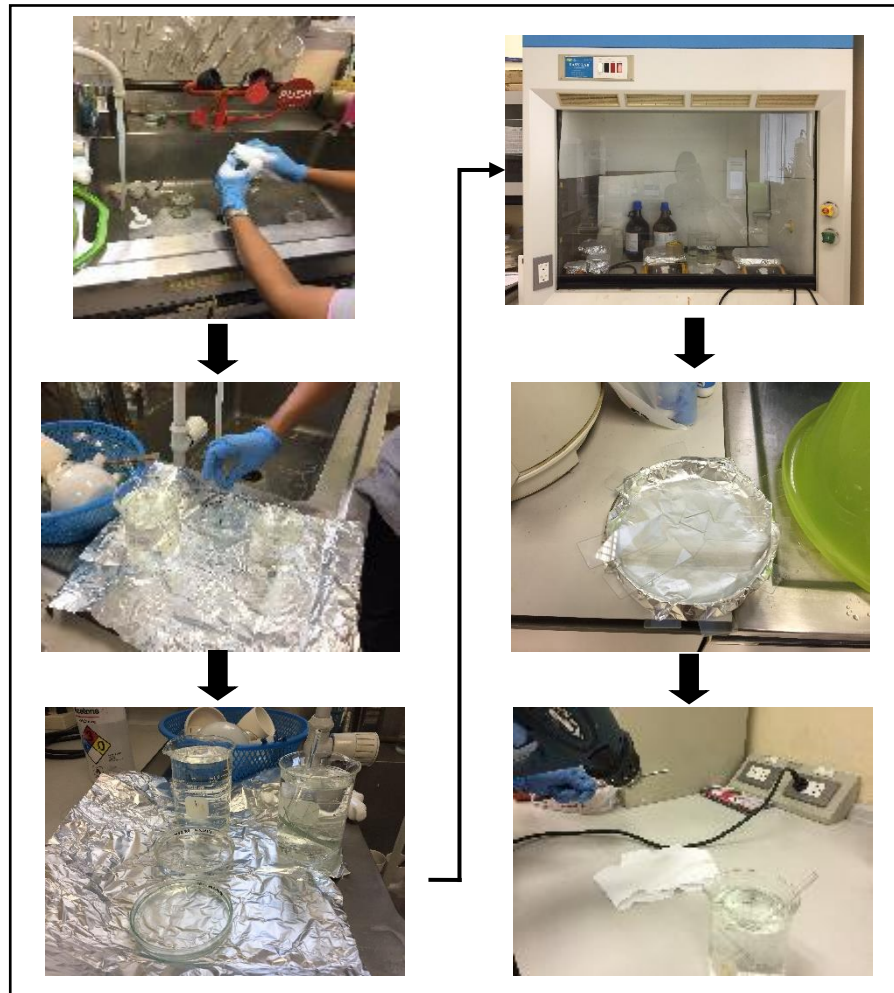
การเตรียมพลอยสำหรับการวิจัย

นำพลอยที่จะทำการวิจัยไปทำการตัดและโกนให้ได้รูปทรงที่ต้องการ โดยใช้เครื่องตัดและโกนพลอย แล้วนำไปแต่งให้ได้ระนาบโดยใช้เครื่องแต่งพลอย จากนั้นนำพลอยมาติดกับไม้ทวน โดยนำแชลคและปลายไม้ทวนมาลนไฟเพื่อให้ปลายไม้ทวนร้อนแล้วนำแชลคมาขึ้นให้เป็นเหมือนกับรูปกรวยสองอันประกบกัน จากนั้นนำพลอยติดกับปลายไม้ทวนที่ติดแชลคโดยนำพลอยไปลนกับความร้อนห้ามให้พลอยโดนไฟโดยตรงเพราะพลอยจะไหม้ต้องคอยหมุนพลอยตลอดในการให้ความร้อนเพื่อป้องกันการแตกร้าวได้ง่าย จากนั้นนำพลอยไปขัดเงาโดยเครื่องเจียรระโน เมื่อเสร็จแล้วแกะพลอยออกจากแชลคแล้วนำไปแช่โซดาไฟเพื่อละลายแชลคออกจากพลอย

การทำความสะดวกชิ้นงานสำหรับการวิจัย

ชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ กระจกสไลด์ พลอยเนื้ออ่อนชนิดต่างๆ และแผ่นสแตนเลส ต้องมีการล้างทำความสะอาดเพื่อขจัดฝุ่นและคราบก่อนการวิจัย โดยมีขั้นตอนดังนี้ แสดงดังรูปที่ 3.15

1. เตรียมชิ้นงานที่จะใช้ทดลองสำหรับเป็นแผ่นรองรับในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิจัย
2. นำ ชิ้นงาน มาล้างด้วยน้ำ DI เพื่อกำจัดฝุ่นละอองและคราบไขมัน
3. ผสมน้ำยาล้างจานกับน้ำ DI และนำ ชิ้นงาน มาแช่ในบีกเกอร์ ประมาณ 4 ชั่วโมง
4. นำ ชิ้นงาน ที่แช่น้ำยาล้างจานไว้ครบ 4 ชั่วโมงแล้วไปขัดด้วยฟองน้ำหิ้ง 2 ด้าน
5. ล้าง ชิ้นงาน ให้สะอาดด้วยน้ำ DI อีก 2 ครั้ง ให้สะอาด
6. นำ ชิ้นงาน ที่ล้างสะอาดแล้วไปแช่ไว้ในบีกเกอร์อะซิโตนเป็นเวลา 15 นาที โดยวางบีกเกอร์ในเครื่องอัลตราโซนิก
7. นำ ชิ้นงาน ที่แช่ในอะซิโตนแล้วไปแช่ไว้ในบีกเกอร์เมทานอลเป็นเวลา 15 นาที โดยวางบีกเกอร์ในเครื่องอัลตราโซนิก
8. นำ ชิ้นงาน ออกมาแช่ในบีกเกอร์น้ำ DI อีกครั้งเป็นเวลา 15 นาที โดยวางบีกเกอร์ในเครื่องอัลตราโซนิก
9. นำ ชิ้นงาน ออกมาเป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน โดยใช้อุณหภูมิในการเป่า 150 องศาเซลเซียส เก็บในภาชนะที่เหมาะสม



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการเตรียมกระจกสไลด์

3.2.2 ขั้นตอนการวิจัย

3.2.2.1 การวิจัย ชุดที่ 1

การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ แบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข ได้แก่

เงื่อนไขการเคลือบที่ 1.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟในการควบคุมคลื่นวิทยุ (Radio frequency , RF) ทำการวิจัยเคลือบบนกระจกสไลด์และซิลิกอน

เงื่อนไขการเคลือบที่ 1.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการเคลือบโดยไม่เปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงาน ทำการเคลือบบนควอตซ์ อะพาไทต์ กระจกสไลด์ และซิลิกอน

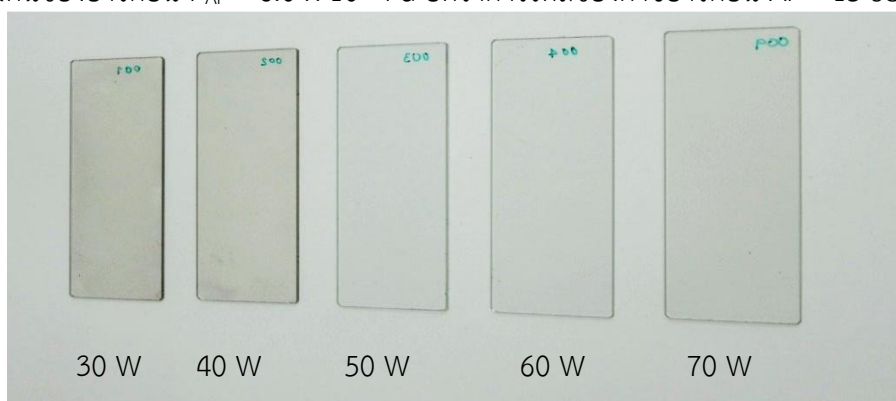
รายละเอียดแสดงตามตารางที่ 3.1 โดย การเคลือบจะใช้เงื่อนไขที่คงที่คือ ความดันก่อนสปัตเตอริง $P_B = 6.0 \times 10^{-4}$ Pa ความดันของอาร์กอน $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1}$ Pa อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน Ar = 15 sccm

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขในการเคลือบโดยการเปลี่ยนแปลงเวลา

ชิ้นงาน	เงื่อนไขที่ศึกษา		เงื่อนไขที่ควบคุม
	RF Power (Watt)	เวลาที่เคลือบ (นาที)	
เงื่อนไขการเคลือบที่ 1.1			$P_B = 6.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ $Ar = 15 \text{ sccm}$
Glass, Si	30 วัตต์	30	
Glass, Si	40 วัตต์		
Glass, Si	50 วัตต์		
Glass, Si	60 วัตต์		
Glass, Si	70 วัตต์		
เงื่อนไขการเคลือบที่ 1.2			
Glass, Si, Q1, A1	50 วัตต์	30	
Glass, Si, Q2, A2		180	
Glass, Si, Q3, A3		300	

เงื่อนไขการเคลือบที่ 1.1 การวิจัยเคลือบบนกระจกสไลด์และซิลิกอน โดยเวลาที่ใช้ 30 นาที เงื่อนไขที่จะเปลี่ยนแปลงคือ RF Power 30 วัตต์, 40 วัตต์, 50 วัตต์, 60 วัตต์ และ 70 วัตต์ ตามลำดับ โดยทำการวิจัยกับกระจกสไลด์และซิลิกอน พบว่าที่เงื่อนไข 50 วัตต์ สีของฟิล์มที่ได้ใสที่สุด จากการสังเกตด้วยตาเปล่า แสดงดังรูปที่ 3.16

จากนั้นจึงได้ทำเงื่อนไขการเคลือบที่ 1.2 การศึกษา RF Power ที่ 50 วัตต์ และนำมาเปลี่ยนแปลงเวลาเพื่อให้ได้ฟิล์มที่หนาและไม่มีผลต่อสีของพลอย คือเวลา 30 นาที 180 นาที และ 300 นาที ตามลำดับ โดยทำการวิจัยกับควอทซ์ อะพาไทต์ กระจกสไลด์ และซิลิกอน การเคลือบทั้งหมดนี้จะควบคุมให้ระบบมีค่าต่างๆ เหล่านี้ที่คงที่ คือ ความดันก่อนสปัตเตอร์ $P_B = 6.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ ความดันของอาร์กอน $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน $Ar = 15 \text{ sccm}$



รูปที่ 3.16 สีของกระจกสไลด์ที่เงื่อนไข RF Power 30 , 40, 50, 60 และ 70 วัตต์

3.2.2.2 การวิจัย ชุดที่ 2

การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ แบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข ได้แก่

การทดลองที่ 2.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน ที่ 2%-6% บนวัสดุรองเคลือบซึ่งเป็นกระจกสไลด์ และซิลิกอน ตามเงื่อนไขการเคลือบที่ 2.1 ดังแสดงในตารางที่ 3.2

การทดลองที่ 2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการเคลือบโดยไม่เปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงาน เพอร์ิตอต อความารีน กระจกสไลด์ และซิลิกอน และเลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุดมาให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิต่างกัน รายละเอียดแสดงตามเงื่อนไขการเคลือบที่ 2.1 ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดย การเคลือบจะใช้เงื่อนไขที่คงที่คือ ความดันก่อนสปัตเตอริง $P_B = 6.0 \times 10^{-4}$ Pa ความดันของอาร์กอน $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1}$ Pa อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน $Ar = 15$ sccm

การทดลองที่ 2.3 การศึกษาการให้ความร้อนกับชิ้นงานหลังผ่านการเคลือบฟิล์มบาง ที่อุณหภูมิ 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส โดยเลือก ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบที่เงื่อนไขการเคลือบที่ความดันคงที่ของแก๊สอาร์กอน $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1}$ Pa ความดันคงที่ของแก๊สออกซิเจน $P_{O_2} = 3.6 \times 10^{-2}$ Pa พลังงาน RF = 50 วัตต์ เวลาในการเคลือบ 300 นาที

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขในการเคลือบ ชุดการวิจัยที่ 2

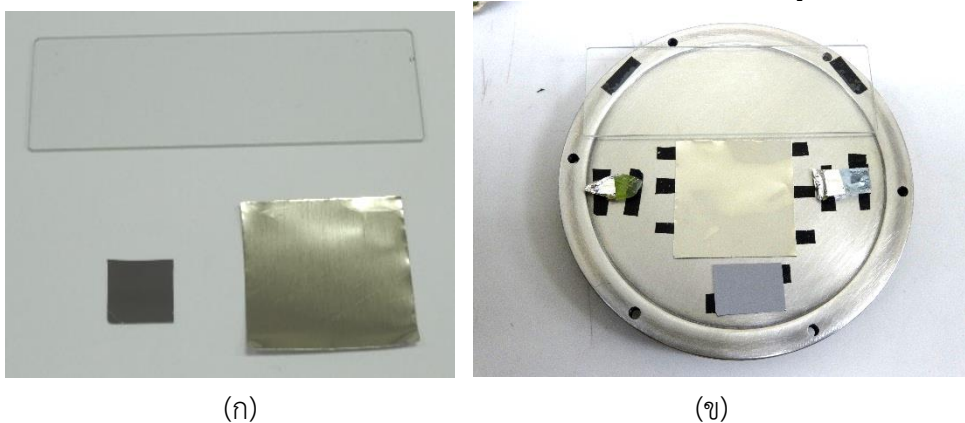
ชิ้นงาน	ความดัน Ar (ปาสคาล)	ความดัน O ₂ (ปาสคาล)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	โวลต์เตจ (โวลต์)**	ชื่อ ตัวอย่าง
เงื่อนไขการเคลือบที่ 2.1						
กระจกสไลด์ แผ่นซิลิกอน	6.0×10^{-1}	0	50	300	-335.6	FN001
		3.0×10^{-2}			-328.9	FN002
		2.4×10^{-2}			-311.2	FN003
		1.8×10^{-2}			-341.3	FN004
		1.2×10^{-2}			-350.5	FN005
		3.6×10^{-3}			-350.8	FN006
เงื่อนไขการเคลือบที่ 2.2						
กระจกสไลด์ แผ่นซิลิกอน แผ่นสแตนเลส เพอร์ิตอต อความารีน	6.0×10^{-1}	3.6×10^{-3}	50	90	-358.7	FN007
				300	-350.8	FN006
				600	-366.3	FN010

**หมายเหตุ โวลต์เตจ เป็นค่าที่วัดได้

การเคลือบฟิล์มบางอลูมินาด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การทดลองที่ 2.1 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสม ตามเงื่อนไขการเคลือบที่ 2.1 โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สออกซิเจน แสดงดังตารางที่ 3.2 ประกอบด้วย $O_2 = 0\%$, 2% , 3% , 4% , 5% และ 6% ตามลำดับ

และมีการกำหนดให้ความดันภายในห้องเคลือบก่อนการเคลือบ $P_B = 6.0 \times 10^{-4}$ Pa ความดันคงที่ของแก๊สอาร์กอน $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1}$ Pa พลังงาน RF = 50 วัตต์ ใช้เวลาในการเคลือบ 300 นาที โดยวัสดุรองเคลือบในครั้งนี คือ กระจกสไลด์ แผ่นซิลิกอน แผ่นสแตนเลส แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองแต่ละชุด

- (ก) ชิ้นงานสำหรับการวิจัย ชุดที่ 1 กระจกสไลด์ แผ่นซิลิกอน แผ่นสแตนเลส
- (ข) ชิ้นงานสำหรับการวิจัย ชุดที่ 2 กระจกสไลด์ แผ่นซิลิกอน แผ่นสแตนเลส เพอรिटอต และอความารีน

จากการวิจัยพบว่าเงื่อนไขที่มีการเติม O_2 ทำให้ฟิล์มมีการส่งผ่านแสงที่ดีกว่าไม่ได้เติม O_2 จากการสังเกตด้วยตาเปล่า และการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV/Vis จึงนำเงื่อนไขที่ได้มาศึกษาต่อโดยเปลี่ยนแปลงเวลาเพื่อศึกษาความหนาบางของฟิล์มในเงื่อนไขการเคลือบที่ 2.2

2. การทดลองที่ 2.2 การเคลือบด้วยเงื่อนไขการเคลือบที่ 2.2 นำเงื่อนไขที่เหมาะสมจากเงื่อนไขการเคลือบที่ 2.1 มาศึกษาต่อโดยเปลี่ยนแปลงเวลาเพื่อศึกษาความหนาบางของฟิล์ม โดยให้ความดันภายในห้องเคลือบก่อนการเคลือบ $P_B = 6.0 \times 10^{-4}$ Pa ความดันคงที่ของแก๊สอาร์กอน $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1}$ Pa ความดันคงที่ของแก๊สออกซิเจน $P_{O_2} = 3.6 \times 10^{-2}$ Pa พลังงาน RF = 50 วัตต์ โดยมีเงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลงคือเวลา 300 และ 600 นาที แสดงดังตารางที่ 3.2 โดยวัสดุรองเคลือบในครั้งนี คือกระจกสไลด์ แผ่นซิลิกอน แผ่นสแตนเลส เพอรिटอต และอความารีน แสดงดังรูปที่ 3.18 พบว่าฟิล์มที่ผ่านการเคลือบ 600 นาทีมีความหนาเป็นสองเท่าของฟิล์มที่ผ่านการเคลือบ 300 นาที แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง scratch tester

3. การทดลองที่ 2.3 การศึกษาการให้ความร้อนกับชิ้นงานหลังผ่านการเคลือบฟิล์มบาง ที่อุณหภูมิ 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส เมื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอลูมินาแล้ว นำเงื่อนไขที่ทำให้ฟิล์มมีการส่งผ่านแสงที่ดี (คือเงื่อนไขการเคลือบที่ความดันคงที่ของแก๊สอาร์กอน $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1}$ Pa ความดันคงที่ของแก๊สออกซิเจน $P_{O_2} = 3.6 \times 10^{-2}$ Pa พลังงาน RF = 50 วัตต์ เวลาในการเคลือบ 300 นาที มาให้ความร้อนภายใน chamber ที่เป็นระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 3.3 จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบดรรชนีหักเห ทดสอบการวัดสี ศึกษาโครงสร้างฟิล์ม และข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบและอภิปรายผลการวิจัย

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขในการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อน

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (C°)	เวลา (นาที)
FN019	50	60
FN017	100	60
FN018	150	60

3.2.4 ขั้นตอนการใช้งานเครื่องเคลือบฟิล์มบาง Physical Vapour Deposition (PVD)

รุ่น FM500 PID Plasma implantation and Deposition System

1. เปิดปั๊มลม (air compressor)
2. เปิด main switches
3. เปิดระบบ cooling กด RUN ตรวจสอบว่ามีไฟสีเขียวขึ้น
4. เปิด Backing Pump (ตรวจสอบ Throttle Valve ทำมุม 90 องศา ให้ได้อัตราการปั๊มสูงสุด)
5. เปิด Roughing Valve รอให้ความดันประมาณ 5×10^{-1} Pa แล้วปิด Roughing Valve
6. เปิด Foreline Valve และ เปิด Gate Valve
7. กดปุ่มเปิด Turbo-molecular Pump กด RUN (ความถี่สูงสุดของ Turbo-molecular Pump แสดงที่ 400 Hz)
8. รอจนกระทั่งให้ได้ความดันลดต่ำลงประมาณ 5.0×10^{-4} Pa
9. เปิดแก๊สอาร์กอน
10. ปรับ Throttle Valve ให้ทำมุม 12 องศา
11. เปิด Gas Valve 4 (แก๊สอาร์กอน)
12. เปิด MFC control unit
13. ปรับอัตราการไหลของแก๊สที่ MFC control unit ไปที่ 11 sccm ให้ความดันเท่ากับ 6.0×10^{-4} Pa
14. ปรับปุ่มแผ่นรองรับให้หมุนได้
15. เปิดสวิทช์ RF generator ปรับ output power ไปที่ 50W
16. กดปุ่ม ON ที่ RF generator ให้พลาสมาติด
17. เปิดชัตเตอร์ และ จับเวลาการสปัตเตอร์

3.2.5 การตรวจสอบสมบัติฟิล์มบางอลูมินา

ฟิล์มบางอลูมินาที่เคลือบบนผิวพลอยเพอริโดตและอะความารีนด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง ต้องมีความโปร่งใส ไม่ทำให้สีของพลอยเปลี่ยนไป และมีความแข็งที่ทำให้พลอยทนต่อรอยขีดข่วนได้ดี จึงต้องมีการนำไปตรวจสอบคุณสมบัติด้วยเครื่องมือต่างๆ ดังนี้

3.2.5.1 การศึกษาสมบัติทางแสง

- การวัดสีระบบ $L^*a^*b^*$ ด้วยโปรแกรมวัดสี
 - การวัดการส่งผ่านแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
- การใช้ฟิล์มบางอลูมินาเพื่อเป็นชั้นป้องกันรอยขีดข่วนและเพิ่มความแข็งให้กับพลอยเพอริโดตและอะความารีนจำเป็นต้องมีการทดสอบการส่งผ่านแสงและวัดสีที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการเคลือบ

3.2.5.2 การศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง

- ตรวจสอบปริมาณธาตุองค์ประกอบของฟิล์มบางอลูมินา ด้วยเครื่อง XRF
- ตรวจสอบความหนาของฟิล์มด้วยเทคนิค XRR และ SEM
- ตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างด้วย XRD

3.2.5.3 การศึกษาสมบัติทางฟิลิกส์

- การทดสอบความต้านทานการขีดข่วนของฟิล์มด้วยเครื่อง Scratch tester

3.2.6 การทดสอบการขีดข่วน (ในการวิจัยชุดที่ 1)

การทดสอบขีดข่วนทั้งก่อนและหลังการเคลือบฟิล์มบาง แสดงดังรูปที่ 3.18 โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบ ดังนี้

1. **ทดสอบกับพลอย** การทดสอบการขีดข่วนบนผิวของควอตซ์และอะพาไทต์ ทดสอบโดยการขีดข่วนบนผิวควอตซ์จะใช้โทแพสและคอร์ันดัมซึ่งมีค่าความแข็ง 8 และ 9 ตามหลักโมห์สเกลตามลำดับ และอะพาไทต์จะใช้เพอริโดท ควอตซ์ โทแพส และคอร์ันดัม ซึ่งมีค่าความแข็ง 6, 7, 8 และ 9 ตามหลักโมห์สเกล ตามลำดับ ในการทดสอบการขีดข่วน

2. **ทดสอบกับกระจกสไลด์** การวิเคราะห์การขีดข่วนที่ผิวของกระจกสไลด์ จะใช้อัญมณี 3 ชนิดในการทดสอบ คือ โทแพส CZ และ คอร์ันดัม ซึ่งค่าความแข็ง 8, 8.5 และ 9 ตามหลักโมห์สเกล ตามลำดับ



รูปที่ 3.18 พลอยที่ใช้ในการทดสอบขีดข่วนควอตซ์และอะพาไทต์

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัยชุดที่ 1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟและเวลาในการเคลือบ

การวิจัย ชุดที่ 1 วางแผนการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ เริ่มต้นจากการเคลือบฟิล์มบางตามเงื่อนไขการเคลือบที่ 1.1 แล้วจึงเลือกเงื่อนไขการเคลือบ เพื่อนำไปศึกษาต่อตามเงื่อนไขการเคลือบที่ 1.2 โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 3.1 ผลการวิจัย แสดงดังนี้

การทดลองที่ 1.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟในการควบคุมคลื่นวิทยุ (Radio frequency , RF) ทำการวิจัยเคลือบบนกระจกสไลด์และซิลิกอน เพื่อให้ได้กำลังไฟที่สามารถเคลือบฟิล์มบางที่ใส ทำให้ได้เงื่อนไขของกำลังไฟ 50 วัตต์ โดยแสดงผลของสีของกระจกสไลด์ ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งสนับสนุนการเลือกกำลังไฟ 50 วัตต์ เพื่อนำไปศึกษาต่อในการทดลองที่ 1.2 โดยการทดลองที่ 1.1 ทำการทดลองเพียงเพื่อศึกษาด้วยตาเปล่าเพียงอย่างเดียว

การทดลองที่ 1.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการเคลือบโดยไม่เปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงาน ทำการเคลือบบนควอตซ์ อะพาไทต์ กระจกสไลด์ และซิลิกอน ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอัญมณีที่เคลือบฟิล์มบางด้วยเวลาต่างๆ โดยการเคลือบจะใช้เงื่อนไขที่คงที่คือ ความดันก่อนสปัตเตอริง $P_B = 6.0 \times 10^{-4}$ Pa ความดันของอาร์กอน $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1}$ Pa อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน $Ar = 15$ sccm การทดลองเงื่อนไขการเคลือบที่ 1.2 นำมาใช้ศึกษาการเคลือบบนอัญมณีเนื้ออ่อน สองชนิด ได้แก่ ควอตซ์ และอะพาไทต์ ผลการวิจัยจากการทดลองที่ 1.2 แสดงดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยเครื่องมือพื้นฐาน

จากการเคลือบในเงื่อนไขการเคลือบที่ 1.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือพื้นฐาน ตรวจสอบด้วยเครื่อง Refractometer (ค่า RI) เป็นค่าดัชนีหักเหของพลอย ซึ่งในการทดลองควอตซ์ต้องมีค่า RI อยู่ระหว่าง 1.544-1.553 และอะพาไทต์ต้องมีค่า RI อยู่ระหว่าง 1.632-1.649 และเครื่อง hydrostatic weight balance (ค่า SG) เป็นค่าความถ่วงจำเพาะของควอตซ์และอะพาไทต์ ซึ่งในการทดลองควอตซ์ต้องมีค่า SG ประมาณ 2.66 และอะพาไทต์ต้องมีค่า SG อยู่ในช่วง 3.16-3.23 จึงจะเป็นไปตามทฤษฎีของควอตซ์และอะพาไทต์

ผลการวิเคราะห์ควอตซ์ด้วยเครื่องมือพื้นฐานพบว่าก่อนการเคลือบ ค่า RI และค่า SG ของพลอยเป็นไปตามทฤษฎี และหลังเคลือบฟิล์มบางก็พบว่าพลอยควอตซ์มีค่า RI และค่า SG คงเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง และผลการวิเคราะห์อะพาไทต์ด้วยเครื่องมือพื้นฐานพบว่าก่อนการเคลือบ ค่า RI และ SG ของพลอยเป็นไปตามทฤษฎี และหลังเคลือบฟิล์มบางก็พบว่าอะพาไทต์มีค่า RI และค่า SG คงเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือพื้นฐานของควอตซ์

เวลาเคลือบ (นาทีก)	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือพื้นฐาน					
	ก่อนเคลือบฟิล์มบางอลูมินา			หลังเคลือบฟิล์มบางอลูมินา		
	ค่าดัชนีหักเห	ค่าความถ่วงจำเพาะ	รูปพลอย	ค่าดัชนีหักเห	ค่าความถ่วงจำเพาะ	รูปพลอย
30	1.547-1.550	2.65		1.548-1.550	2.65	
180	1.545-1.551	2.66		1.548-1.550	2.66	
300	1.545-1.551	2.65		1.548-1.550	2.66	

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์เครื่องมือพื้นฐานของอะพาไทต์

เวลาเคลือบ (นาทีก)	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือพื้นฐาน					
	ก่อนเคลือบฟิล์มบางอลูมินา			หลังเคลือบฟิล์มบางอลูมินา		
	ค่าดัชนีหักเห	ค่าความถ่วงจำเพาะ	รูปพลอย	ค่าดัชนีหักเห	ค่าความถ่วงจำเพาะ	รูปพลอย
30	1.635-1.640	3.22		1.634-1.638	3.22	
180	1.634-1.638	3.21		1.635-1.638	3.23	
300	1.635-1.639	3.20		1.639-1.641	3.23	

4.2 การวิเคราะห์สีด้วยเครื่อง UV – Vis NIR spectrophotometer

การวิเคราะห์สีควอตซ์และอะพาไทต์ด้วยเครื่อง UV – Vis NIR spectrophotometer ทั้งก่อนเคลือบฟิล์มและหลังเคลือบฟิล์ม ที่ความยาวคลื่น 300-800 นาโนเมตร เพื่อตรวจสอบความสว่างและสีของพลอยที่เปลี่ยนแปลงไป ด้วยระบบสีแบบ $L^*a^*b^*$ แสดงดังตารางที่ 4.3 และนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบ a^* และ b^* ของควอตซ์และอะพาไทต์ที่เวลาเคลือบ 30 นาที 180 นาที และ 300 นาที แสดงดังรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, และ 4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่า L^* a^* b^* และค่า ΔE ของตัวอย่างพลอยควอตซ์และอะพาไทต์

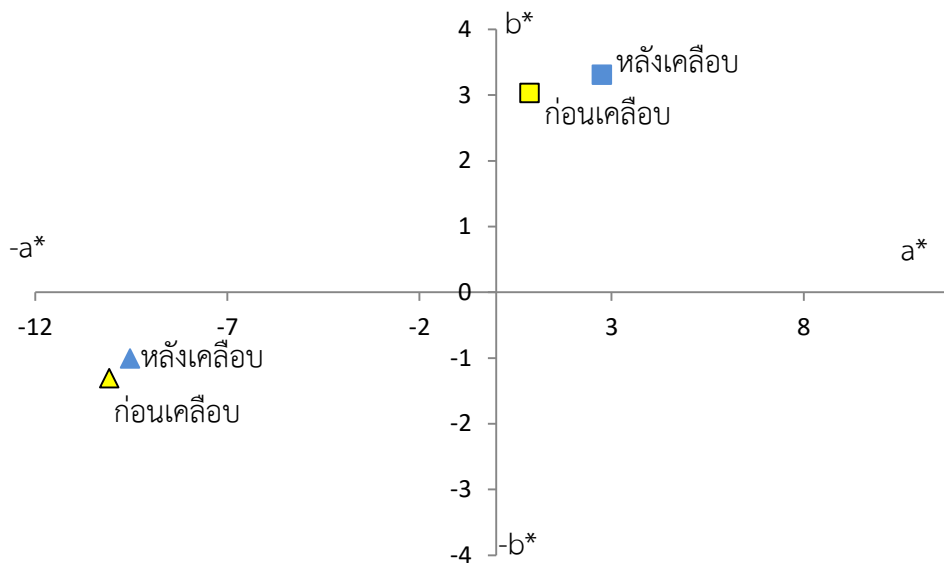
ตัวอย่าง	เวลาเคลือบ (นาที)	ก่อนเคลือบฟิล์ม			หลังเคลือบฟิล์ม			ΔE
		L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*	
ควอตซ์	30	85.57	0.86	3.03	88.05	2.75	3.31	3.13
	180	89.38	0.62	1.72	87.60	1.55	2.38	2.11
	300	91.42	1.38	1.32	87.79	1.68	1.55	3.64
อะพาไทต์	30	80.81	-10.08	-1.31	82.05	-9.53	-1.01	1.38
	180	68.61	-9.71	8.60	70.82	-8.26	12.20	4.46
	300	69.04	-26.38	-15.72	66.88	-25.77	-17.11	2.64

ตารางที่ 4.4 ค่า ΔE ในหน่วยมาตรฐานนานาชาติของการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า

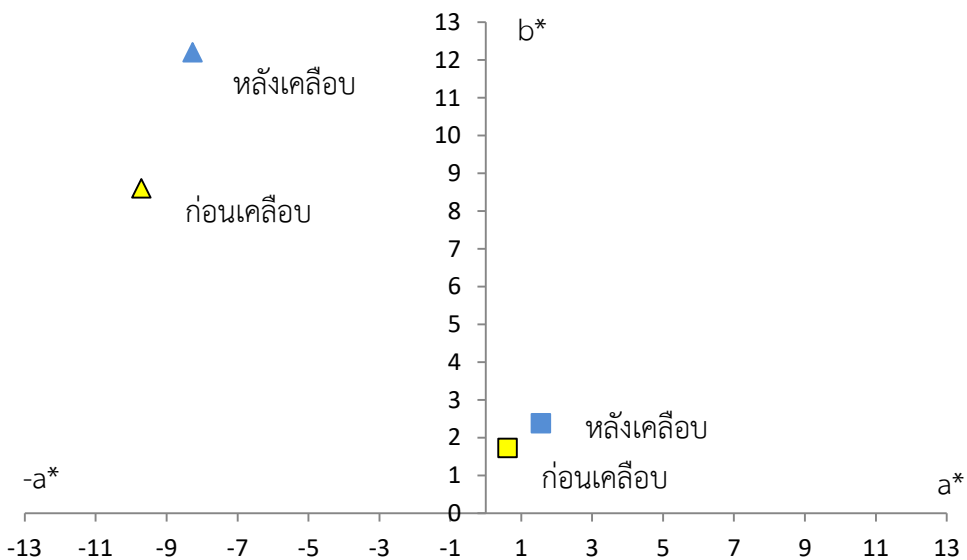
ค่า ΔE	ข้อสังเกตที่สำคัญของความแตกต่างสี
0~0.5	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยมาก
0.5~1.5	การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย
1.5~3.0	เห็นการเปลี่ยนแปลงที่สามารถสังเกตเห็นได้
3.0~6.0	มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด
6.0~12.0	มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก
12.0	เปลี่ยนเป็นสีอื่นๆ

หมายเหตุ หน่วย NBS คือ มาตรฐานนานาชาติที่ใช้ในห้องปฏิบัติการดูแลโดยสำนักงานมาตรฐานนานาชาติ NBS (National Bureau of standards) (Xiongzi, 2012 และคณะ, 2012)

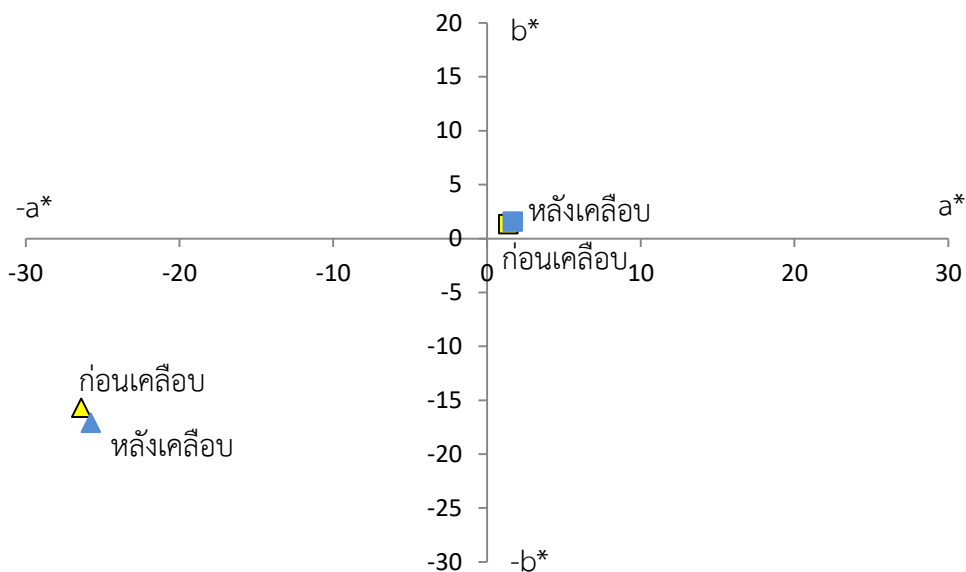
จากการคำนวณค่า ΔE ในตารางที่ 4.3 แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานนานาชาติ หน่วย NBS แสดงความแตกต่างของสีด้วยค่า ΔE กับการสังเกตด้วยตาเปล่า ดังตารางที่ 4.4 ผลที่ได้คือค่า ΔE ของควอตซ์และอะพาไทต์หลังเคลือบฟิล์มบางอลูมินา เมื่อเคลือบครบทุกเงื่อนไข พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 1.98 – 4.46 ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานนานาชาติที่ระดับ มีการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็นได้สังเกตเห็นได้ แต่เมื่อนำพลอยมาสังเกตด้วยตาเปล่าแล้วไม่สามารถแยกสีก่อนเคลือบและหลังเคลือบได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสีของควอตซ์และอะพาไทต์หลังเคลือบด้วยฟิล์มบางอลูมินาไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า



รูปที่ 4.1 กราฟการเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของควอตซ์ (รูปสี่เหลี่ยม) และอะพาไทต์ (รูปสามเหลี่ยม) ก่อนและหลังเคลือบฟิล์มบาง เวลา 30 นาที



รูปที่ 4.2 กราฟการเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของควอตซ์ (รูปสี่เหลี่ยม) และอะพาไทต์ (รูปสามเหลี่ยม) ก่อนและหลังเคลือบฟิล์มบาง เวลา 180 นาที



รูปที่ 4.3 กราฟการเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของควอตซ์ (รูปสี่เหลี่ยม) และอะพาไทต์ (รูปสามเหลี่ยม) ก่อนและหลังเคลือบฟิล์มบาง เวลา 300 นาที

รูปที่ 4.1 เป็นภาพของผลค่าการวัดสีของควอตซ์และอะพาไทต์ก่อนเคลือบและหลังเคลือบใช้เวลา 30 นาที จากภาพจะเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นว่าก่อนเคลือบและหลังเคลือบฟิล์มบางอลูมินา นั้น ควอตซ์และอะพาไทต์มีการเปลี่ยนแปลงสี หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

ได้นำตัวอย่างควอตซ์ไปทำการตรวจวัดค่าสี a^* b^* พบว่าหลังเคลือบฟิล์มบางอลูมินา มีค่า a^* b^* ที่เปลี่ยนแปลงจากเดิม และค่า ΔE เท่ากับ 3.1306 ทำให้สีแดงของควอตซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมองด้วยตาเปล่าพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสีเกิดขึ้น

ได้นำตัวอย่างอะพาไทต์ไปทำการตรวจวัดค่าสี a^* b^* พบว่าหลังเคลือบฟิล์มบางอลูมินา มีค่า a^* b^* ที่เปลี่ยนแปลงจากเดิม และค่า ΔE เท่ากับ 1.3892 ทำให้สีเขียวของอะพาไทต์มีค่าลดลง เมื่อมองด้วยตาเปล่าพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสีเกิดขึ้น

รูปที่ 4.2 เป็นภาพของผลค่าการวัดสีของควอตซ์และอะพาไทต์ก่อนเคลือบและหลังเคลือบใช้เวลา 180 นาที จากภาพจะเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นว่าก่อนเคลือบและหลังเคลือบฟิล์มบางอลูมินา นั้น ควอตซ์และอะพาไทต์มีการเปลี่ยนแปลงสี หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

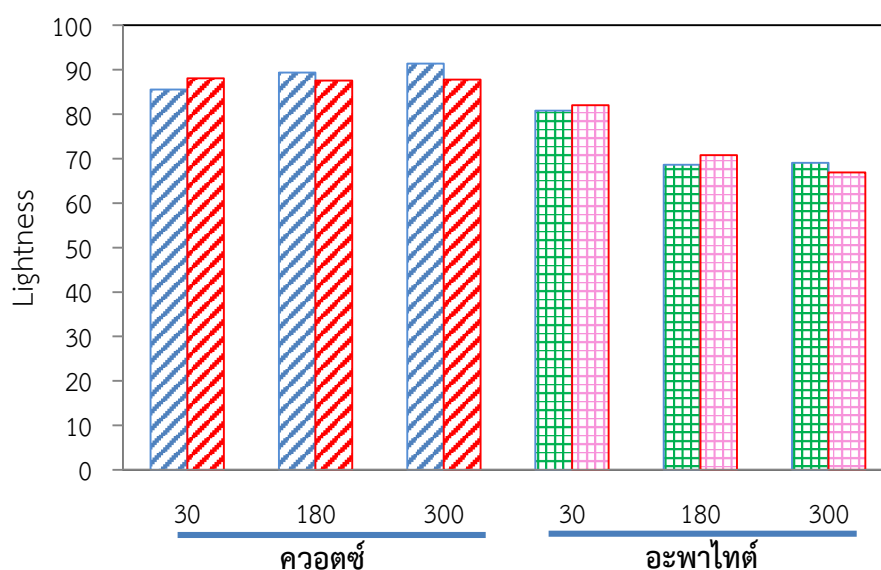
ได้นำตัวอย่างควอตซ์ไปทำการตรวจวัดค่าสี a^* b^* พบว่าหลังเคลือบฟิล์มบางอลูมินา มีค่า a^* b^* ที่เปลี่ยนแปลงจากเดิม และค่า ΔE เท่ากับ 2.1139 ทำให้สีแดงและสีเหลืองของควอตซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมองด้วยตาเปล่าพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสีเกิดขึ้น

ได้นำตัวอย่างอะพาไทต์ไปทำการตรวจวัดค่าสี a^* b^* พบว่าหลังเคลือบฟิล์มบางอลูมินา มีค่า a^* b^* ที่เปลี่ยนแปลงจากเดิม และค่า ΔE เท่ากับ 4.4661 ทำให้สีเขียวลดลงและสีเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมองด้วยตาเปล่าพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสีเกิดขึ้น

รูปที่ 4.3 เป็นภาพของผลค่าการวัดสีของควอตซ์และอะพาไทต์ก่อนเคลือบและหลังเคลือบใช้ เวลา 300 นาที จากภาพจะเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นว่าก่อนเคลือบและหลังเคลือบฟิล์มบางอลูมินา นั้น ควอตซ์และอะพาไทต์มีการเปลี่ยนแปลงสี หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

ได้นำตัวอย่างควอตซ์ไปทำการตรวจวัดค่าสี a^* b^* พบว่าหลังเคลือบฟิล์มบางอลูมินา มีค่า a^* b^* ที่ไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม และค่า ΔE เท่ากับ 3.6496

ได้นำตัวอย่างอะพาไทต์ไปทำการตรวจวัดค่าสี a^* b^* พบว่าหลังเคลือบฟิล์มบางอลูมินา มีค่า a^* b^* ที่เปลี่ยนแปลงจากเดิม และค่า ΔE เท่ากับ 2.6400 ทำให้สีเซียวมีค่าลดลง และสีน้ำเงินของอะพาไทต์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมองด้วยตาเปล่าพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสีเกิดขึ้น

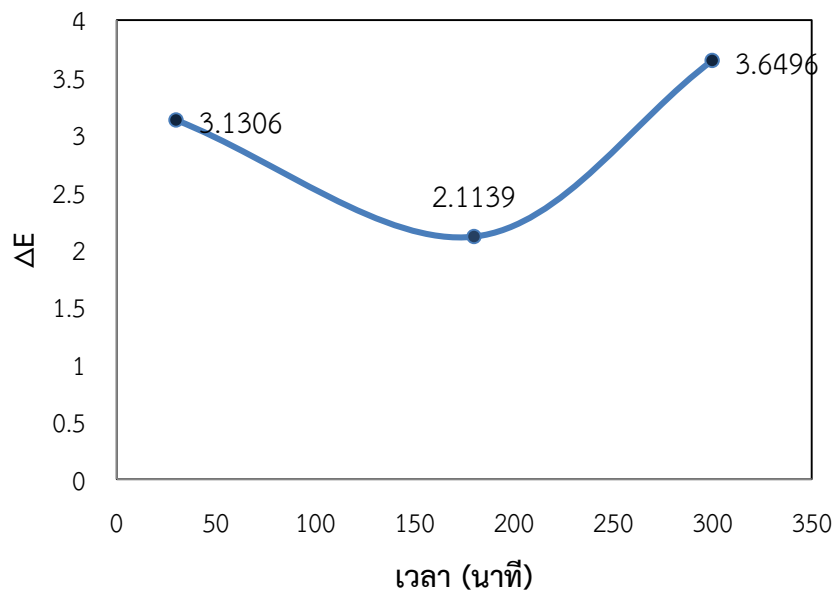


รูปที่ 4.4 กราฟ L^* ของควอตซ์และอะพาไทต์ ก่อนและหลังเคลือบฟิล์มบางทั้ง 3 เงื่อนไข

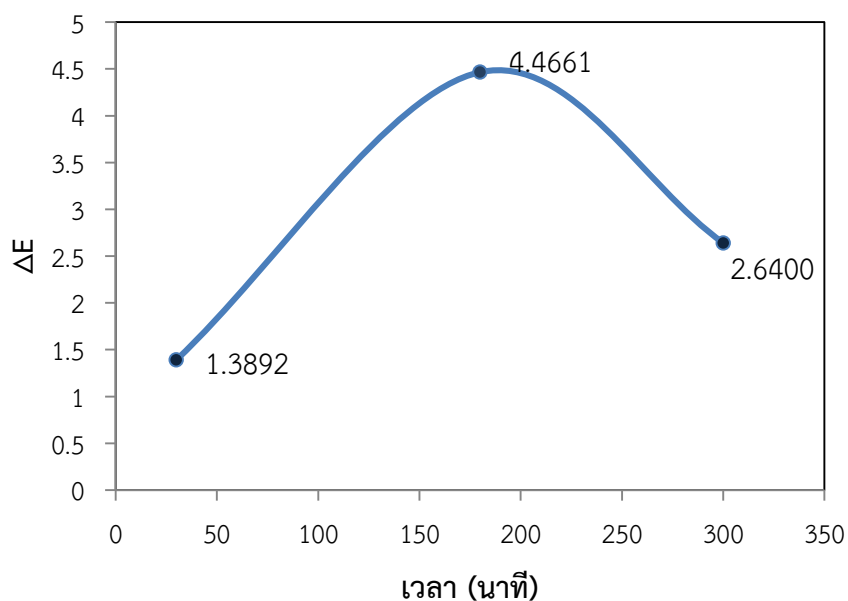
รูปที่ 4.4 เป็นกราฟเปรียบเทียบความสว่างของควอตซ์และอะพาไทต์ก่อนและหลังเคลือบฟิล์มบางอลูมินา ดังนี้

ค่า L^* ของควอตซ์ ที่เวลา 30 นาที ควอตซ์มีค่า L^* มากขึ้นหลังเคลือบฟิล์มบาง และที่เวลา 180 และ 300 นาที พบว่า L^* ของควอตซ์มีค่าลดลง

ค่า L^* ของอะพาไทต์ ที่เวลา 30 และ 180 นาที อะพาไทต์มีค่า L^* มากขึ้นหลังเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งขัดแย้งกับผลของควอตซ์ซึ่งอาจเป็นเพราะสีของอะพาไทต์ที่เวลา 180 นาที มีความเข้มมาก และมีสีแตกต่างจากอะพาไทต์ที่เวลา 30 และ 300 นาที และที่เวลา 300 นาที พบว่า L^* ของอะพาไทต์มีค่า L^* ลดลง



รูปที่ 4.5 กราฟค่า ΔE ของควอตซ์หลังเคลือบที่เวลา 30 นาที, 180 นาที และ 300 นาที



รูปที่ 4.6 กราฟค่า ΔE ของอะพาไทต์หลังเคลือบที่เวลา 30 นาที, 180 นาที และ 300 นาที

ค่า ΔE เป็นค่าที่บอกให้ทราบความแตกต่างของสีก่อนเคลือบและหลังเคลือบ ซึ่งแสดง ดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 เวลาที่ใช้ในการเคลือบมีผลต่อสีของควอตซ์และอะพาไทต์ดังนี้

ผลจากการวิเคราะห์กราฟ ΔE จากรูปที่ 4.4 ของควอตซ์ทั้ง 3 เงื่อนไข แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสีของควอตซ์ ทั้ง 3 เงื่อนไข พบว่าสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดคือ เงื่อนไขที่ 2 เวลา 180 นาที มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นที่เงื่อนไขที่ 1 เวลา 30 นาที และเงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดคือเงื่อนไขที่ 3 เวลา 300 นาที

ผลจากการวิเคราะห์กราฟ ΔE ของอะพาไทต์ทั้ง 3 เงื่อนไข แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสีของอะพาไทต์ ทั้ง 3 เงื่อนไข พบว่าสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดคือ เงื่อนไขที่ 1 เวลา 30 นาที มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นที่เงื่อนไขที่ 3 เวลา 300 นาที และเงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดคือเงื่อนไขที่ 2 เวลา 180 นาที ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการทดลองโดยสีที่ได้จากการสังเกตด้วยตาเปล่าของกระจกสไลด์และซีลิกอน อาจเนื่องจากสีของอะพาไทต์ในเงื่อนไขที่ 2 เวลา 180 นาที สีแตกต่างจากอะพาไทต์ที่เงื่อนไขที่ 1 และ 3

4.3 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่อง XRF โดยจะตรวจสอบทั้ง 3 เงื่อนไข เพื่อตรวจสอบปริมาณการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาบนผิวพลอยควอตซ์และอะพาไทต์

สูตรเคมีของพลอยควอตซ์คือ SiO_2 และสูตรเคมีของพลอยอะพาไทต์คือ $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl},\text{OH}))$ โดยหลังจากที่นำไปตรวจสอบหลังเคลือบฟิล์มแล้วตรวจพบปริมาณธาตุ Al_2O_3 ในตัวอย่างทั้ง 3 เงื่อนไข แสดงให้เห็นว่ามีการเคลือบฟิล์มบางลงบนพลอยควอตซ์และอะพาไทต์ แสดงดังตารางที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณธาตุของควอตซ์หลังเคลือบฟิล์มบาง

เวลาที่เคลือบ (นาที)	องค์ประกอบ	
	SiO_2 (Wt%)	Al_2O_3 (Wt%)
ไม่ได้เคลือบ	99.9	-
30	99.1	0.84
180	97.6	2.22
300	94.4	5.52

ตารางที่ 4.6 ปริมาณธาตุของอะพาไทต์หลังเคลือบฟิล์มบาง

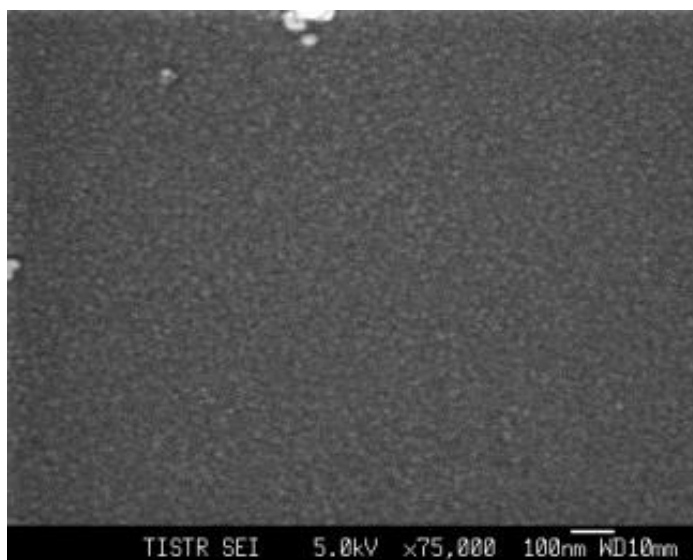
เวลาที่เคลือบ (นาที)	องค์ประกอบ		
	CaO (Wt%)	P_2O_5 (Wt%)	Al_2O_3 (Wt%)
ไม่ได้เคลือบ	56.0	39.3	-
30	59.87	39.88	0.23
180	57.9	39.28	2.73
300	57.60	35.90	6.42

4.4 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)

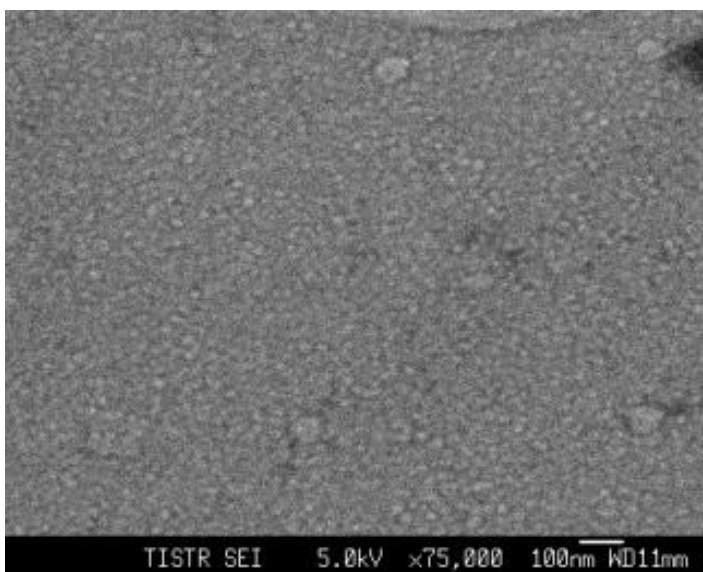
การวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วยเครื่อง FESEM เพื่อดูความหนาของฟิล์ม ซึ่งตัวอย่างชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบคือ แผ่นซิลิกอน ขนาด 5x5 ตารางเซนติเมตร โดยนำไปวิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มและภาพตัดขวางของฟิล์ม

4.4.1 การวิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์ม

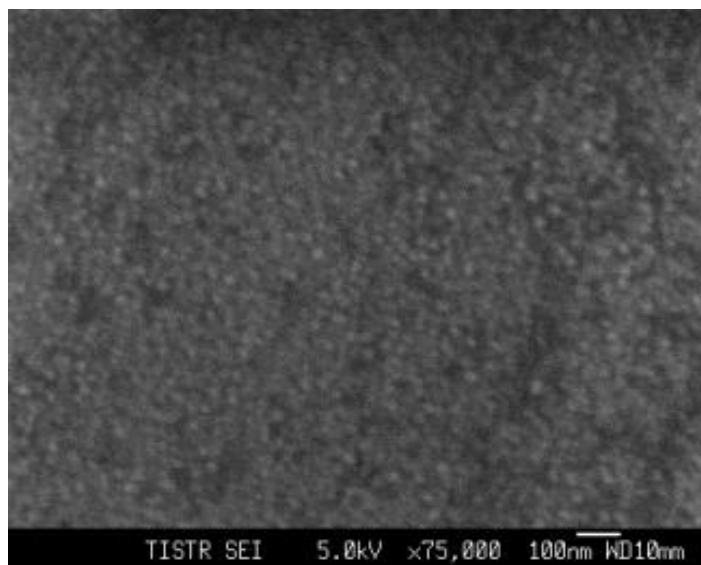
การวิเคราะห์ฟิล์มบางอลูมินา ที่ตรวจจากแผ่นซิลิกอน โดยตรวจวัดที่กำลังขยาย 75000 เท่า เพื่อดูความเรียบของฟิล์ม พบว่าทุกตัวอย่างจะสังเกตเห็นจุดสีขาวซึ่งฟิล์มมีความขรุขระที่เกิดจากการก่อตัวเป็นชั้นนูนขึ้นมาของฟิล์มเล็กน้อย ที่เวลา 30 นาที, 180 นาที และ 300 นาที แสดงดังรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมินาบนซิลิกอน เวลา 30 นาที กำลังขยาย 75000 เท่า



รูปที่ 4.8 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมินาบนซิลิกอน เวลา 180 นาที กำลังขยาย 75000 เท่า



รูปที่ 4.9 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมินาบนซิลิกอน เวลา 30 นาทีกำลังขยาย 75000 เท่า

4.4.2 การวิเคราะห์ภาพตัดขวางของฟิล์ม

การวิเคราะห์ฟิล์มบางอลูมินา ที่ตรวจจากแผ่นซิลิกอน โดยตรวจวัดที่กำลังขยาย 75000 เท่า เพื่อดูความหนาของฟิล์มที่มีการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ พบว่าชิ้นงานที่มีความบางมาก จึงตรวจสอบด้วย FESEM ไม่พบ แต่ที่เวลา 30 นาที ฟิล์มมีความหนาที่ 80 nm แสดงดังรูปที่ 4.9 จึงได้คาดคะเนจากการคำนวณหาความหนาของฟิล์มบางในเวลา 30 และ 180 นาที จากสมการที่ (4.1) และ (4.2) แสดงดังตารางที่ 4.6

คำนวณอัตราการเกิดฟิล์มบางที่ได้ต่อนาทีจากความหนาของฟิล์ม (d) และเวลาที่ใช้ในการเคลือบ (t) โดยเราทราบความหนาที่ 80 นาโนเมตร ใช้เวลาในการเคลือบ 300 นาที จากการวิเคราะห์ด้วย SEM

$$\text{Rate} = \frac{d}{t} \quad (4.1)$$

$$\text{Rate} = \frac{80}{300} = 0.26 \text{ nm/min}$$

โดย Rate คือ อัตราการเกิดฟิล์ม (นาโนเมตร / นาที)

d คือ ความหนา (นาโนเมตร) t คือ เวลา (นาที)

ถ้าที่อัตราเร็ว 0.26 nm/min เวลา 30 นาที จะมีความหนาเท่าไร

$$\text{ความหนา} = \text{Rate} \times \text{เวลา} \quad (4.2)$$

$$D = 0.26 \times 30 = 8 \text{ nm / min}$$

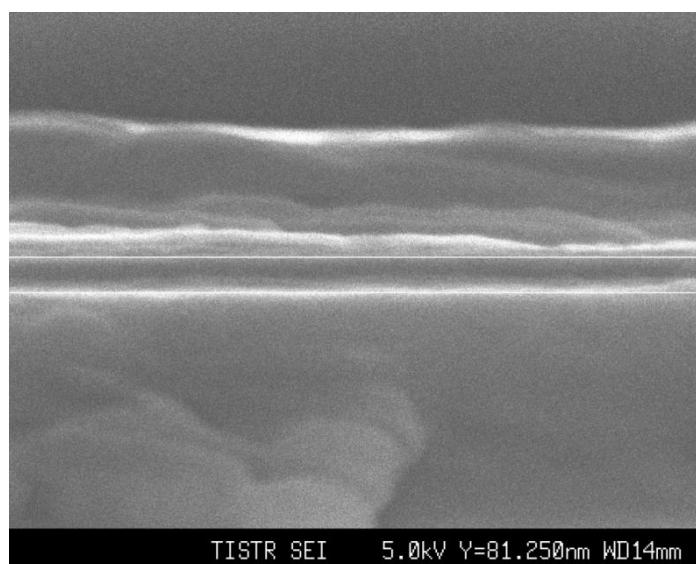
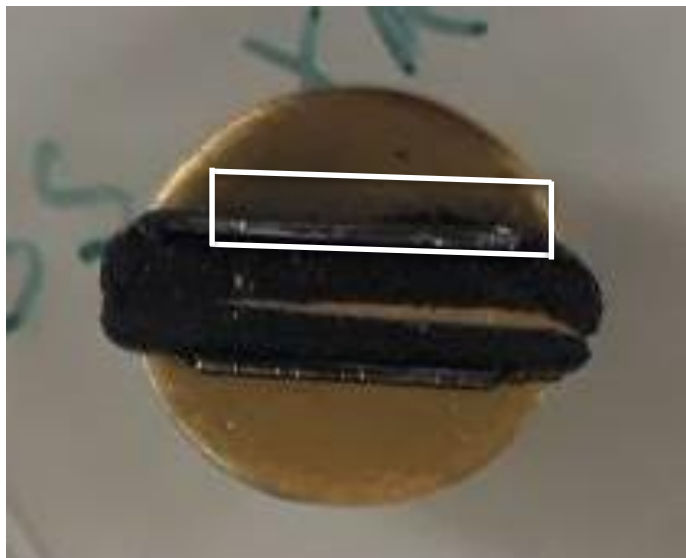
ดังนั้น ที่เวลา 30 นาที ฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น 7.5 nm/min

ถ้าที่อัตราเร็ว 0.26 nm/min เวลา 180 นาที จะมีความหนาเท่าไร

$$\text{ความหนา} = \text{Rate} \times \text{เวลา} \quad (4.2)$$

$$D = 0.26 \times 180 = 47 \text{ nm / min}$$

ดังนั้น ที่เวลา 180 นาที ฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น 45 nm/min



เทปคาร์บอน
 Al_2O_3 ผิวหน้า
 Al_2O_3 ด้านขอบ
 ซิลิกอนเวเฟอร์

TISTR SEI 5.0kV $\gamma=81.250\text{nm}$ WD14mm

รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางฟิล์มที่ เวลา 300 นาทีกำลังขยาย 75000 เท่า

ตารางที่ 4.7 ความหนาของฟิล์มตามเวลาที่ใช้เคลือบจากการคำนวณตามสมการ (4.1) และ (4.2)

เวลาที่เคลือบ (นาที)	ความหนา (นาโนเมตร)
30	8
180	47
300	80

4.5 การวิเคราะห์การขูดขีด

การวิเคราะห์การขูดขีดของฟิล์มบางอลูมินาที่เคลือบลงบนผิวควอตซ์และอะพาไทต์ โดยเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบตามหลักโมห์สเกล พบว่าการหลังเคลือบฟิล์มบางแล้วสามารถป้องกันรอยขูดขีดได้หรือไม่ จึงได้ทำการทดสอบกับขูดขีดบนผิวพลอยและกระจกสไลด์

4.5.1 ทดสอบขูดขีดกับพลอย

การวิเคราะห์ขูดขีดบนผิวพลอยควอตซ์และอะพาไทต์ ทดสอบโดยการขูดขีดบนผิวควอตซ์จะใช้โทแพสและคอร์ันดัมซึ่งมีค่าความแข็ง 8 และ 9 ตามหลักโมห์สเกล ตามลำดับ และอะพาไทต์จะใช้เพอริโดท ควอตซ์ โทแพส และคอร์ันดัม ซึ่งมีค่าความแข็ง 6, 7, 8 และ 9 ตามหลักโมห์สเกล ตามลำดับ ในการทดสอบขูดขีด ภายหลังจากการทดสอบพบว่าพลอยควอตซ์ไม่พบรอยขูดขีด แต่อะพาไทต์พบรอยขูดขีดที่เวลา 30 นาที แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการขูดขีดที่ผิวควอตซ์และอะพาไทต์

ตัวอย่าง	เวลาที่เคลือบ (นาที)	เพอริโดท	ควอตซ์	โทแพส	คอร์ันดัม
		ความแข็ง 6	ความแข็ง 7	ความแข็ง 8	ความแข็ง 9
ควอตซ์	30	x		x	/
	180	x		x	/
	300	x		x	/
อะพาไทต์	30	/	/	/	/
	180	x	x	x	/
	300	x	x	x	/

หมายเหตุ เครื่องหมาย / คือพบรอยขูดขีด และเครื่องหมาย x คือไม่พบรอยขูดขีด

4.5.2 การทดสอบกับกระจกสไลด์

การวิเคราะห์ขูดขีดบนผิวกระจกสไลด์ โดยการขูดขีดจะใช้โทแพส CZ และคอร์ันดัม ที่มีความแข็ง 8, 8.5 และ 9 ตามหลักโมห์สเกล ตามลำดับ ในการทดสอบขูดขีดบนกระจกสไลด์ พบว่าที่เวลา 30 นาที พบรอยขูดขีดที่กระจกสไลด์ ส่วนที่เวลา 180 นาที และ 300 นาที พบรอยขูดขีดของคอร์ันดัม แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบการขูดขีดที่ผิวกระจกสไลด์

ตัวอย่าง	เวลาที่เคลือบ (นาที)	โทแพส	CZ	คอร์ันดัม
		ความแข็ง 8	ความแข็ง 8.5	ความแข็ง 9
กระจกสไลด์	30	/	/	/
	180	x	x	/
	300	x	x	/

หมายเหตุ เครื่องหมาย / คือพบรอยขูดขีด และเครื่องหมาย x คือไม่พบรอยขูดขีด

บทที่ 5 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัยชุดที่ 2 การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของออกซิเจนและเวลาในการเคลือบ

การวิจัย ชุดที่ 2 วางแผนการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ เริ่มต้นจากการเคลือบฟิล์มบางตามเงื่อนไขการเคลือบที่ 2.1 แล้วจึงเลือกเงื่อนไขการเคลือบ เพื่อนำไปศึกษาต่อตามเงื่อนไขการเคลือบที่ 2.2 โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 3.1 ผลการวิจัย แสดงดังนี้

การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ แบ่งออกเป็น 3 การทดลอง ได้แก่

การทดลองที่ 2.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน ที่ 2%-6% บนวัสดุรองเคลือบซึ่งเป็นกระจกสไลด์ และซิลิกอน ตามเงื่อนไขการเคลือบที่ 2.1 ดังแสดงในตารางที่ 3.2

การทดลองที่ 2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการเคลือบโดยไม่เปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงาน เพอร์ไดออกไซด์ อความารีน กระจกสไลด์ และซิลิกอน และเลือกเงื่อนไขที่ตีมาให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิต่างกัน รายละเอียดแสดงตามตามเงื่อนไขการเคลือบที่ 2.1 ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดย การเคลือบจะใช้เงื่อนไขที่คงที่คือ ความดันก่อนสปัตเตอร์ริง $P_B = 6.0 \times 10^{-4}$ Pa ความดันของอาร์กอน $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1}$ Pa อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน $Ar = 15$ sccm การศึกษาการให้ความร้อนกับชิ้นงานหลังผ่านการเคลือบฟิล์มบาง ที่อุณหภูมิ 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส โดยเลือก ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบที่เงื่อนไขการเคลือบที่ความดันคงที่ของแก๊สอาร์กอน $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1}$ Pa ความดันคงที่ของแก๊สออกซิเจน $P_{O_2} = 3.6 \times 10^{-2}$ Pa พลังงาน RF = 50 วัตต์ เวลาในการเคลือบ 300 นาที

การศึกษาเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาบนผิวพลอยเพอร์ไดออกไซด์และอความารีนด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ทำการเคลือบโดยศึกษา 3 เงื่อนไขดังนี้



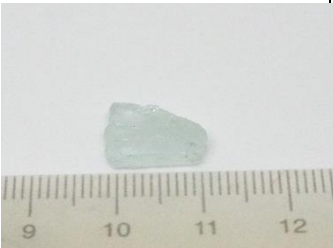
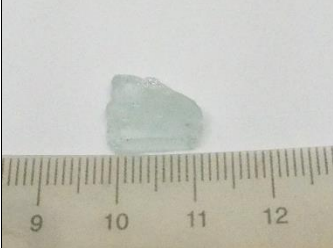
1. อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน ที่ 2%-6% บนวัสดุรองเคลือบซึ่งเป็นกระจกสไลด์
2. เวลาที่ใช้การเคลือบ 300 และ 600 นาที
3. การให้ความร้อนหลังการเคลือบเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส เมื่อนำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองไปตรวจสอบด้วยเครื่องมือต่างๆ สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

5.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือพื้นฐาน

การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือพื้นฐานตรวจสอบด้วยเครื่อง Refractrometer (RI) เป็นการวัดค่าดัชนีหักเหของพลอย ค่าดัชนีหักเหทางแสง คืออัตราส่วนระหว่างความเร็วของแสงในอากาศต่อความเร็วของแสงในพลอยซึ่งมีความสำคัญในการแยกชนิดอัญมณี และเครื่อง Hydrostatic weight balance (SG) ความถ่วงจำเพาะ คืออัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของสารหนึ่ง ๆ ต่อความหนาแน่นของน้ำ เมื่อทั้งสองอย่างมีอุณหภูมิเท่ากัน ค่าความถ่วงจำเพาะเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่ใช้จำแนกชนิดของอัญมณี ซึ่งในการทดลองนี้เพอร์ไดออกไซด์มีค่า RI อยู่ระหว่าง 1.654-1.690 และอความารีนอยู่ระหว่าง 1.560-1.600 ส่วนค่า SG ของเพอร์ไดออกไซด์ เท่ากับ 3.34 และอความารีนเท่ากับ 2.72 จึงจะเป็นไปตามทฤษฎีของพลอยเพอร์ไดออกไซด์และอความารีน

จากการนำพลอยเพอร์ไดออกไซด์และอความารีนไปเคลือบฟิล์มบางอลูมินาโดยใช้เงื่อนไขอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน 6% ใช้เวลาในการเคลือบ 300 นาที ผลการตรวจวิเคราะห์จาก

เครื่องมือพื้นฐานพบว่า การเคลือบฟิล์มบางบนผิวพลอยมีค่า RI และ SG เท่าเดิม แสดงว่าการเคลือบฟิล์มบางทำให้คุณสมบัติพื้นฐานในการตรวจวัดพลอยไม่เปลี่ยนแปลง แสดงดังตารางที่ 5.1 ตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์หัตถ์ภูมิด้วยเครื่องมือพื้นฐานก่อนและหลังการทดลองชุดที่ 2

ก่อนเคลือบฟิล์มบางอูมินา			หลังเคลือบฟิล์มบางอูมินา		
รูปพลอย	RI	SG	รูปพลอย	RI	SG
	1.654- 1.690	3.34		1.654- 1.685	3.34
	1.560- 1.600	2.72		1.558- 1.600	2.72

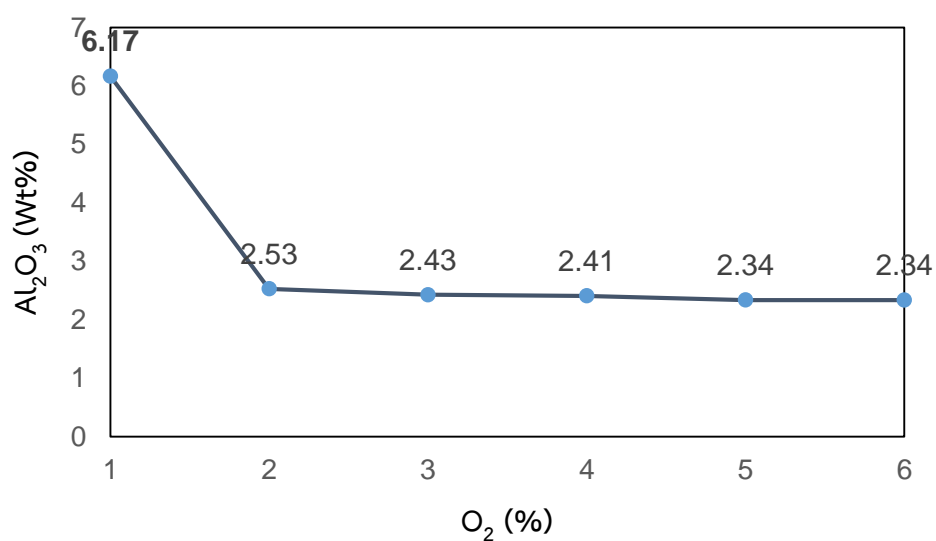
5.2 การตรวจสอบปริมาณธาตุองค์ประกอบของฟิล์มอลูมินา

การศึกษาปริมาณธาตุด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) เพื่อดูปริมาณ Al_2O_3 บนวัสดุรองรับซึ่งเป็นแผ่นสแตนเลส สแตนเลสเป็นโลหะผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอน ซึ่งส่วนประกอบจะมีปริมาณคาร์บอนต่ำ มีโครเมียมเป็นส่วนผสมหลัก ประมาณ 10.5 % หรือมากกว่า จึงทำให้สังเกตปริมาณ Al_2O_3 ได้ง่ายโดยตรวจสอบเงื่อนไขอัตราการเติมออกซิเจนในปริมาณต่างกัน และเงื่อนไขที่ใช้เวลาต่างกัน

ผลของการตรวจสอบฟิล์มบางอลูมินาหลังจากการผ่านกระบวนการเคลือบโดยเทคนิคอาร์เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง เงื่อนไขอัตราการเติมออกซิเจนในปริมาณที่ต่างกันตั้งแต่ 2%-6% ตามลำดับพบว่า เมื่อเติมออกซิเจนเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณ Al_2O_3 ลดลง แสดงดังตารางที่ 5.2 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความหนาจากเทคนิค XRR (ในหัวข้อที่ 5.5) แสดงดังรูปที่ 5.1 เมื่อแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาน้อยลง และผลของการตรวจสอบฟิล์มบางอลูมินาเงื่อนไขที่ใช้เวลาในการเคลือบต่างกัน 90 150 300 และ 600 นาที ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้เวลาในการเคลือบนานขึ้นปริมาณ Al_2O_3 จะเพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 5.3 สังเกตการเคลือบ ที่เวลา 300นาที แบบไม่เติมแก๊สออกซิเจนมีปริมาณ Al_2O_3 เท่ากับ 6.17% ซึ่งใกล้เคียงกับการเคลือบที่เวลา 600 นาที เงื่อนไขการเคลือบที่เติม O_2 6% มีปริมาณ Al_2O_3 เท่ากับ 5.68% แต่ฟิล์มที่เติม O_2 มีความใสมากกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เติม O_2 แสดงดังรูปที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ปริมาณธาตุที่วัดได้จากวัสดุรองเคลือบสแตนเลสที่ผ่านการเคลือบเวลา 300 นาที ที่ปริมาณออกซิเจนต่างๆ

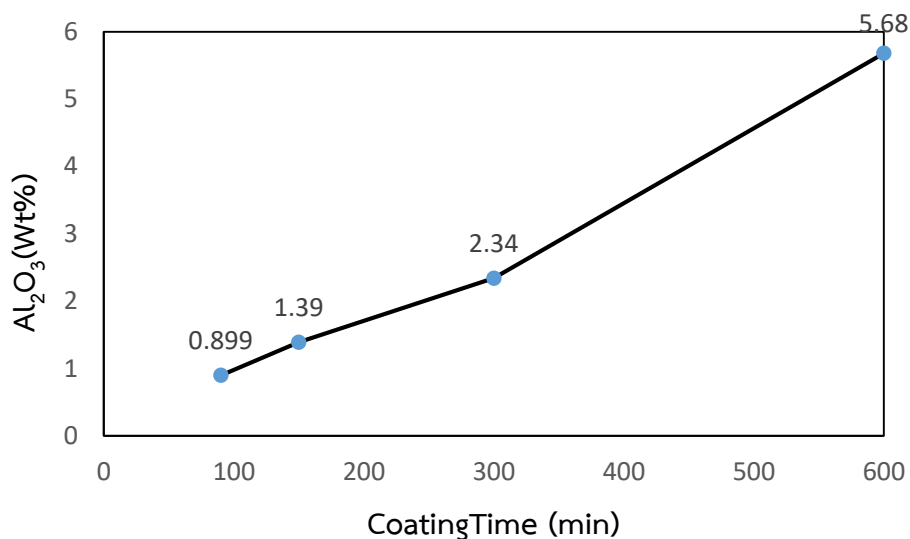
เงื่อนไขการเคลือบ	ปริมาณ Al_2O_3 ที่วัดได้ (%)
O ₂ 0%	6.17
O ₂ 2%	2.53
O ₂ 3%	2.43
O ₂ 4%	2.41
O ₂ 5%	2.34
O ₂ 6%	2.34



รูปที่ 5.1 ปริมาณ Al_2O_3 ที่เปลี่ยนแปลงในการเติมออกซิเจนปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 5.3 ปริมาณธาตุที่วัดได้จากวัสดุรองเคลือบสแตนเลสที่เติมแก๊ส O₂ 6% ที่เวลาต่างๆ

เงื่อนไขการเคลือบ	ปริมาณ Al_2O_3 ที่วัดได้ (wt.%)
90min	0.899
150min	1.39
300min	2.34
600min	5.68

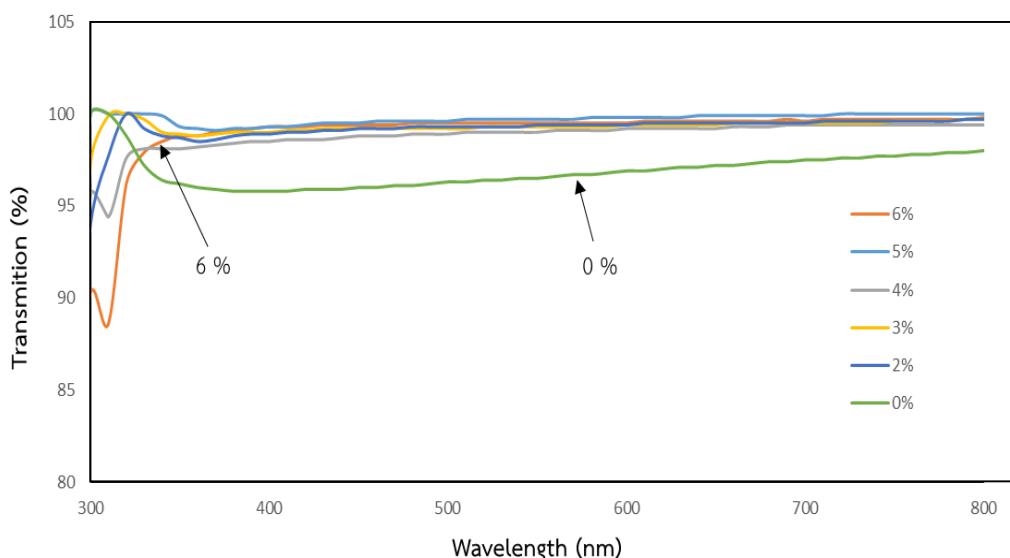


รูปที่ 5.2 ปริมาณ Al₂O₃ ที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาต่างๆ เติม O₂ 6%

5.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอลูมินา

5.3.1 เงื่อนไขไม่เติมแก๊สออกซิเจนและอัตราการเติมแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 2%-6%

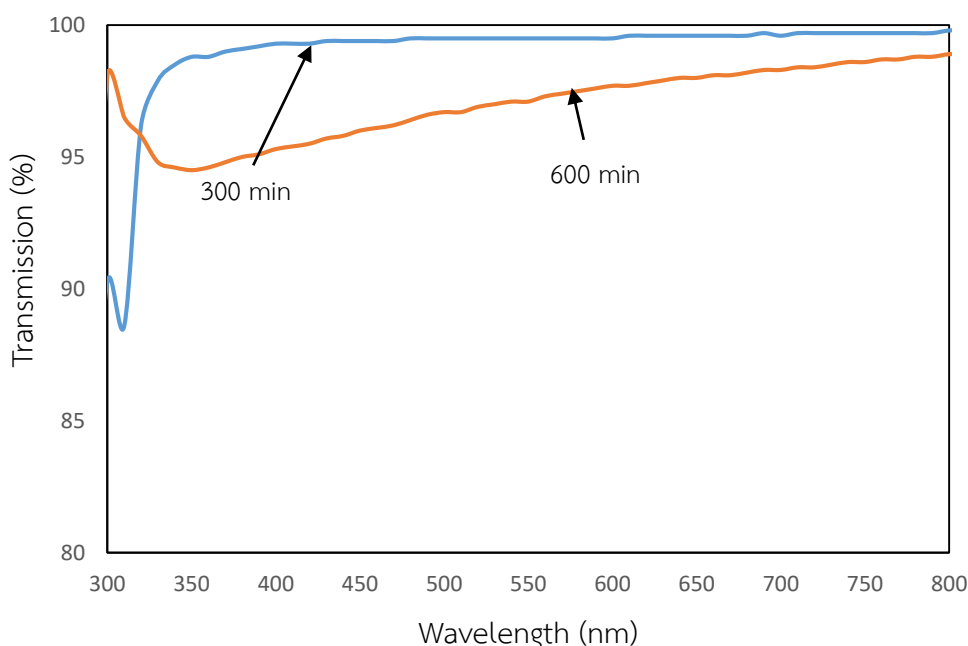
เมื่อใช้เวลาในการเคลือบ 300 นาที บนวัสดุรองเคลือบซึ่งเป็นกระจกสไลด์ ตรวจสอบด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer พบว่าเมื่อมีการเติมปริมาณแก๊สออกซิเจนมากขึ้น 2% ถึง 6% โดยควบคุมปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 6×10^{-2} Pa โดยใช้ RF power = 50 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการเคลือบ 300 นาที พบว่าฟิล์มอลูมินาที่เติมแก๊สออกซิเจน 2% - 6% มีการส่งผ่านแสงที่ดีขึ้นในช่วงที่ตามองเห็น (380-750 นาโนเมตร) มากกว่าเงื่อนไขที่ไม่ได้เติมแก๊สออกซิเจน โดยการเติม O₂ ทำให้ได้ฟิล์มที่บางขึ้นเนื่องจากเกิดการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของพลาสมาภายในห้องเคลือบ ทำให้พลาสมาเคลื่อนที่ไปเรียงตัวที่วัสดุรองรับได้น้อยลง แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางอลูมินาที่ใช้แก๊สออกซิเจนปริมาณต่างๆ โดยใช้เวลาในการเคลือบ 300 นาที

5.3.2 เงื่อนไขที่ใช้เวลาในการเคลือบ 300 และ 600 นาที

เมื่อควบคุมปริมาณแก๊สอาร์กอนคงที่ 6×10^{-2} Pa โดย RF power = 50 วัตต์ อัตราแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน 6% บนวัสดุรองรับซึ่งเป็นกระจกสไลด์ พบว่าฟิล์มที่ได้จากการเคลือบที่เวลา 300 นาที มีการส่งผ่านแสง ได้ดีกว่าฟิล์มที่เคลือบเวลา 600 นาที เนื่องจากฟิล์มที่เคลือบเป็นเวลานานอาจทำให้การเรียงตัวของอนุภาคภายในเนื้อฟิล์มไม่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้นจึงทำฟิล์มมีความขุ่นเมื่อนำมาวางเปรียบเทียบกันสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า สรุปได้ว่าฟิล์มบางเมื่อมีความหนามากจะมีความทึบแสงมากทำให้เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงแปรผกผันกับความหนาฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 5.4

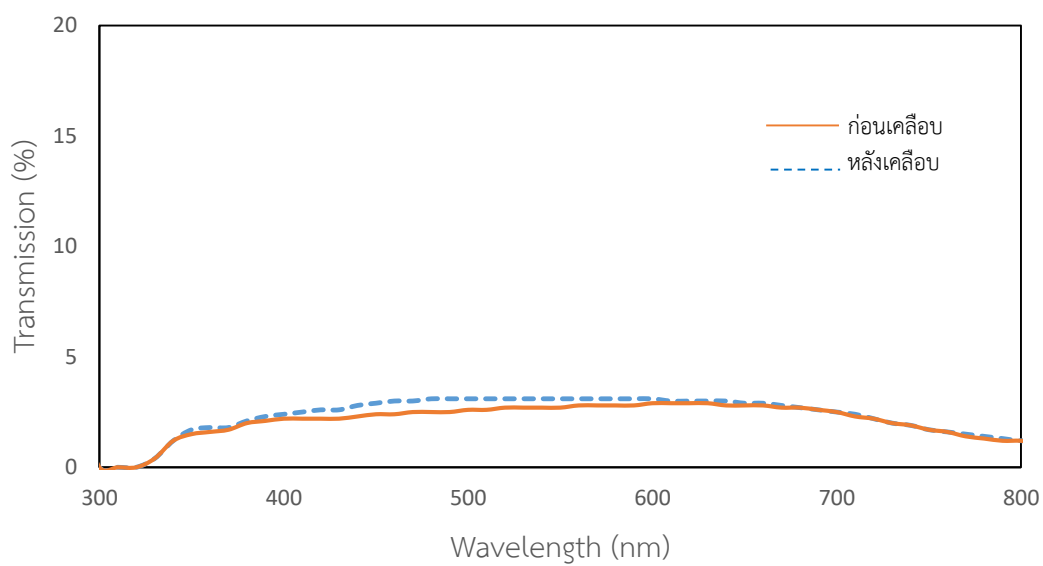


รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางอลูมินาบนกระจกสไลด์ที่เวลา 300 และ 600 นาที ปริมาณแก๊สออกซิเจน 6%

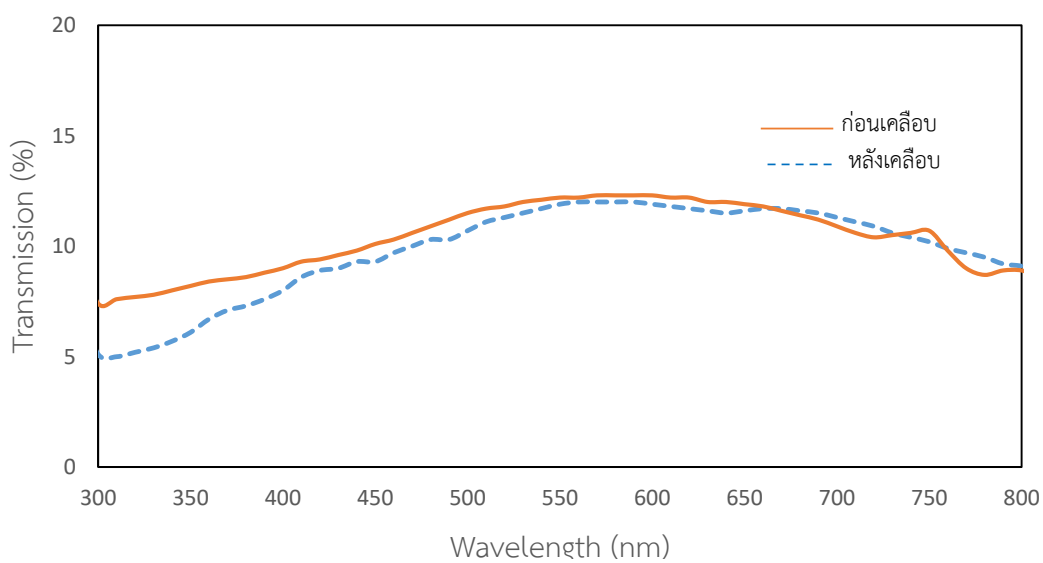
เมื่อนำเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาที่เติมปริมาณแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน 6% ใช้เวลาในการเคลือบ 300 และ 600 นาที มาเคลือบบนพลาวยเพอริดอตและอความารีน

ในการเคลือบที่เวลา 300 นาที พบว่าการส่งผ่านแสงในช่วงที่ตามองเห็น ไม่แตกต่างกันมากจากก่อนเคลือบและหลังเคลือบ แสดงดังรูปที่ 5.5

ในการเคลือบที่เวลา 600 นาที พบว่าพลาวยเพอริดอตมีค่าการส่งผ่านแสงที่เปลี่ยนไปหลังเคลือบมากกว่าเล็กน้อย เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพลาวยมีสีขุ่นขึ้นจากเดิม แสดงดังรูปที่ 5.6

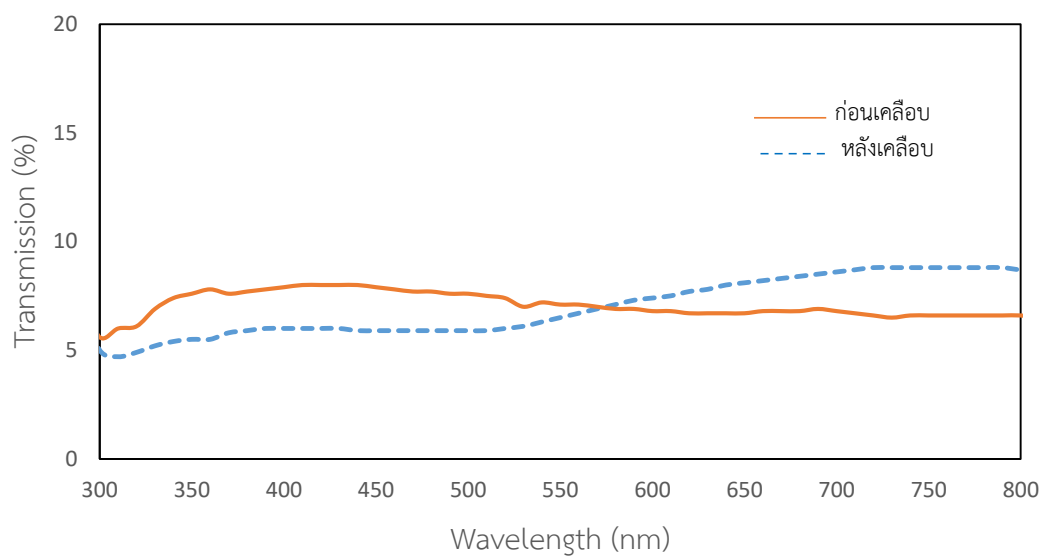


(ก.) อความารีน

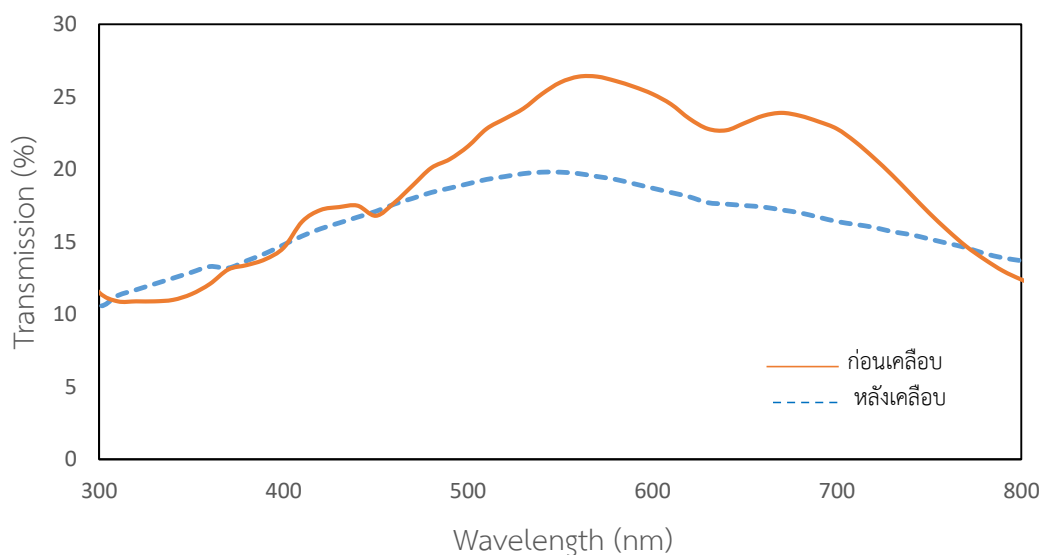


(ข.) เพอริดอต

รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านแสงของพลอยก่อนและหลังเคลือบฟิล์มอลูมินาโดยใช้เวลา 300 นาที ปริมาณ $O_2=6\%$ (ก) อความารีน และ (ข) เพอริดอต



(ก.) อความารีน



(ข.) เพอริดอต

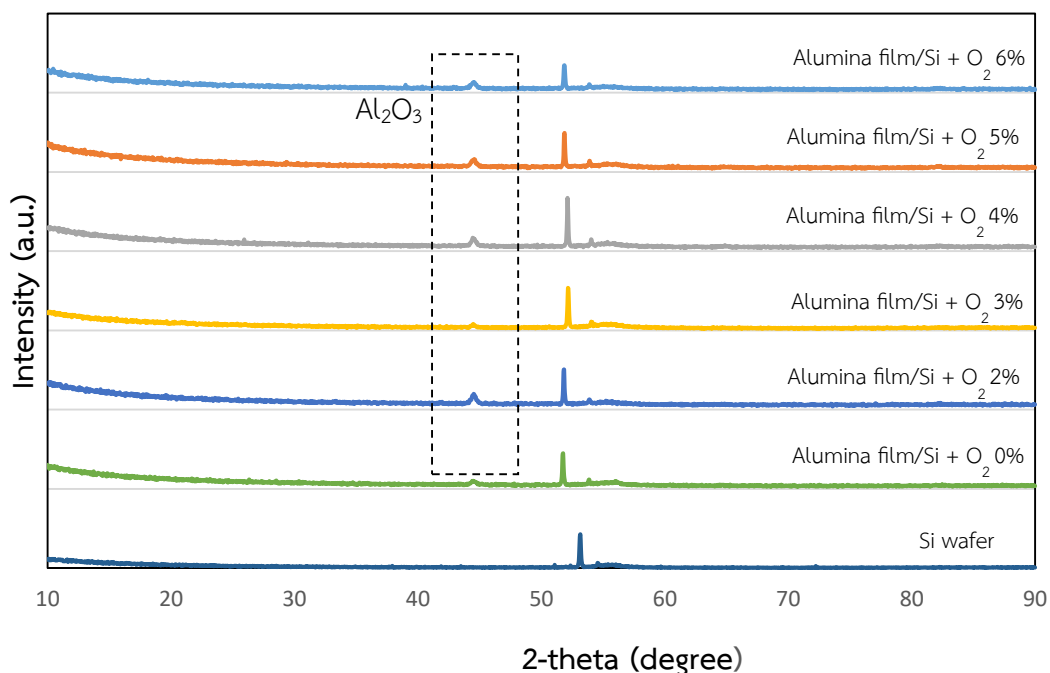
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มอลูมินาบนผิวพลอย (ก) อความารีน และ (ข) เพอริดอต โดยใช้เวลา 600 นาที ปริมาณ $O_2=6\%$

5.4 การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางอลูมินา

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางอลูมินาด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ บนวัสดุรองเคลือบที่เป็นแผ่นซิลิกอนสามารถแบ่งได้ 2 เงื่อนไขดังนี้

5.4.1 เงื่อนไขไม่เติมแก๊สออกซิเจน และเติมแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 2% ถึง 6%

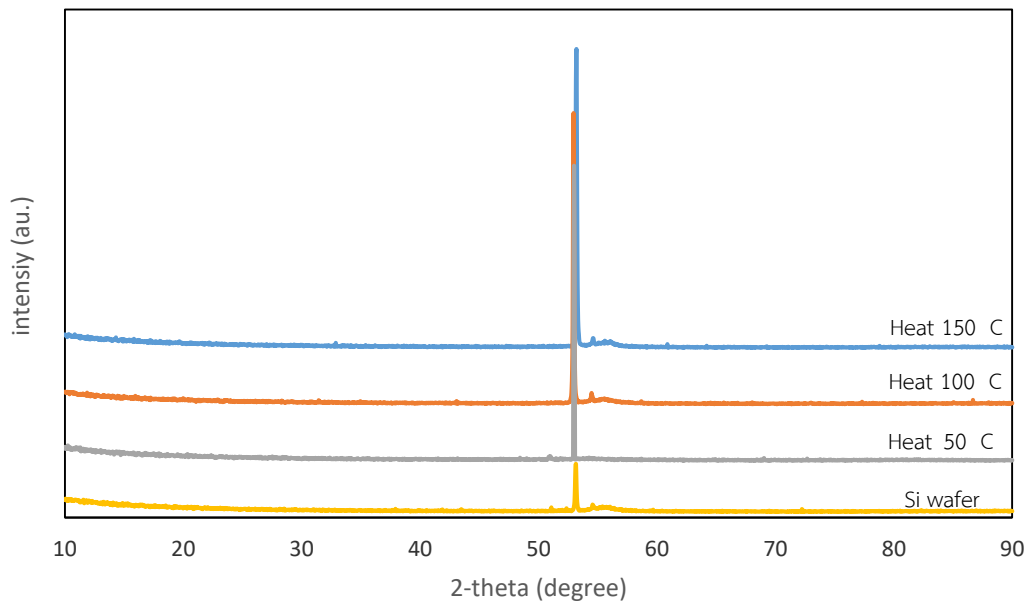
โดยใช้เวลาในการเคลือบ 300 นาที จากการนำแผ่นซิลิกอนเปล่าไปเคลือบฟิล์มบางอลูมินาผลการวิเคราะห์พบพีคของ Al_2O_3 ที่มุม 2-theta ประมาณ 45.79 องศา ซึ่งในแผ่นซิลิกอนเปล่าที่ไม่พบพีคของ Al_2O_3 แสดงดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ผลการตรวจ XRD ของฟิล์มอลูมินาบนแผ่นซิลิกอนที่เวลา 300 นาที
 Al_2O_3 reference from ICDD card No. 00-002-1421 (45.79 2-theta)

5.4.2 เงื่อนไขการให้ความร้อนในการเคลือบฟิล์มบางอลูมินา

โดยใช้อัตราแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน 6% เวลา 300 นาที มาให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.8 พบว่าเกิดความเปลี่ยนแปลงของพีคซิลิกอนมีความสูงขึ้นซึ่งบอกได้ว่าการให้ความร้อนทำให้ซิลิกอนมีความเป็นผลึกมากขึ้น และพีคของ Al_2O_3 ไม่ปรากฏที่มุม 45.79 องศา ซึ่งผลของก่อนการให้ความร้อนจะพบพีคดังกล่าว อาจเป็นไปได้ว่าฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นอสัณฐานจากการให้ความร้อน หรือเครื่องไม่สามารถตรวจพบได้



รูปที่ 5.8 ผลการตรวจ XRD ของฟิล์มอลูมินาบนแผ่นซิลิกอนโดยให้ความความร้อน เวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส

5.5 การตรวจสอบความหนาของผิวฟิล์มบางอลูมินา

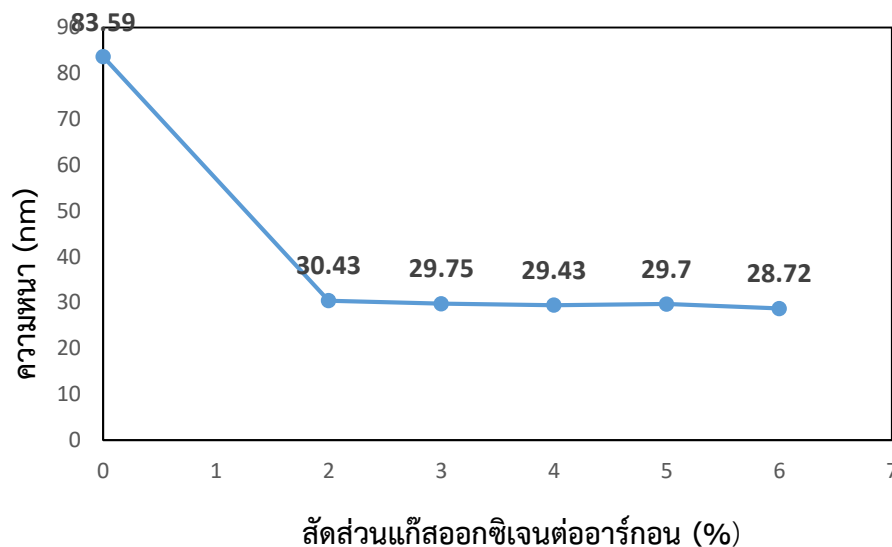
ผลการทดสอบการหาความหนาของฟิล์มบางอลูมินาที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นแผ่นซิลิกอน เพื่อการแทรกสอดภายในเนื้อฟิล์มจากเทคนิค X-ray reflectivity โดยการใช้โปรแกรมคำนวณ

5.5.1 เจือไนที่เติมปริมาณแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอนตั้งแต่ 2-6%

ฟิล์มบางอลูมินาที่ไม่เติมแก๊สออกซิเจนมีความหนามากกว่าที่เติมออกซิเจน แสดงดังตารางที่ 5.4 โดยการเติมแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน 6% ทำให้ฟิล์มมีความบางมากที่สุด เท่ากับ 28.72 นาโนเมตร ฟิล์มที่ไม่ได้เติมแก๊สออกซิเจนมีความหนามากที่สุด เท่ากับ 83.59 นาโนเมตร เนื่องจากการเติมแก๊สออกซิเจนเข้าไประบบทำให้เกิดการชนกันระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบกับ อะตอมของแก๊สเพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคพลังงานสูงเคลื่อนไปเกาะบนผิววัสดุรองรับได้น้อยลง ซึ่งสนับสนุนผลการส่งผ่านแสงที่ว่าฟิล์มบางทำให้แสงส่งผ่านได้ดี เปรียบเทียบข้อมูล แสดงดังรูปที่ 5.9

ตารางที่ 5.4 ความหนาของฟิล์มบางอลูมินาที่เติมแก๊สออกซิเจนในปริมาณต่างๆ ที่เวลา 300 นาที

ปริมาณแก๊สออกซิเจน (O ₂)	ความหนา (นาโนเมตร)
6%	28.72
5%	29.70
4%	29.43
3%	29.75
2%	30.43
0%	83.59



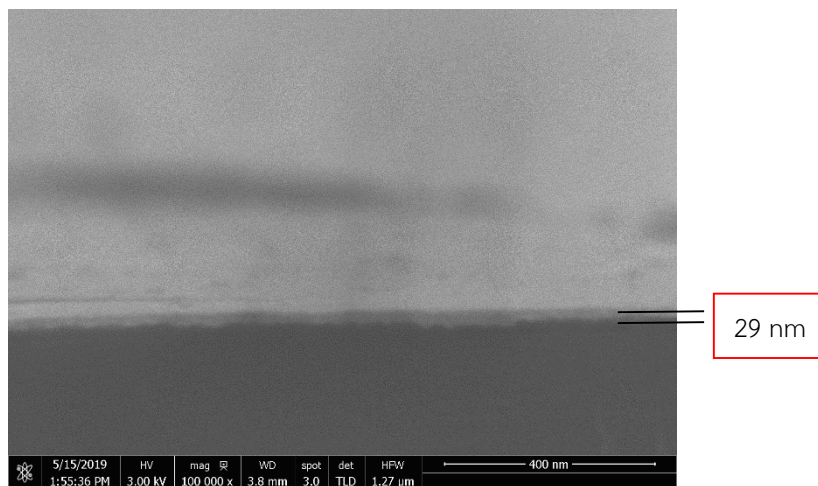
รูปที่ 5.9 ความหนาของฟิล์มเมื่อเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน จากการวัดด้วยเทคนิค XRR โดยใช้โปรแกรมคำนวณ

5.5.2 เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงเวลา 300 นาทีและ 600 นาที

โดยควบคุมปริมาณแก๊สอาร์กอนคงที่ 6×10^{-2} Pa โดยใช้ RF power = 50 วัตต์ อัตราแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน 6% แสดงดังตารางที่ 5.5 พบว่าเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มมีความหนามากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคในภาคตัดขวางของแผ่นซิลิกอนที่ได้จากการวัดจริงจากเครื่อง SEM เท่ากับ 29 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 5.10

ตารางที่ 5.5 ความหนาของฟิล์มบางอลูมินาที่เติมแก๊สออกซิเจน 6% ที่เวลา 300 และ 600 นาที

เวลา (นาที)	ความหนา (นาโนเมตร)
300	28.72
600	66.01



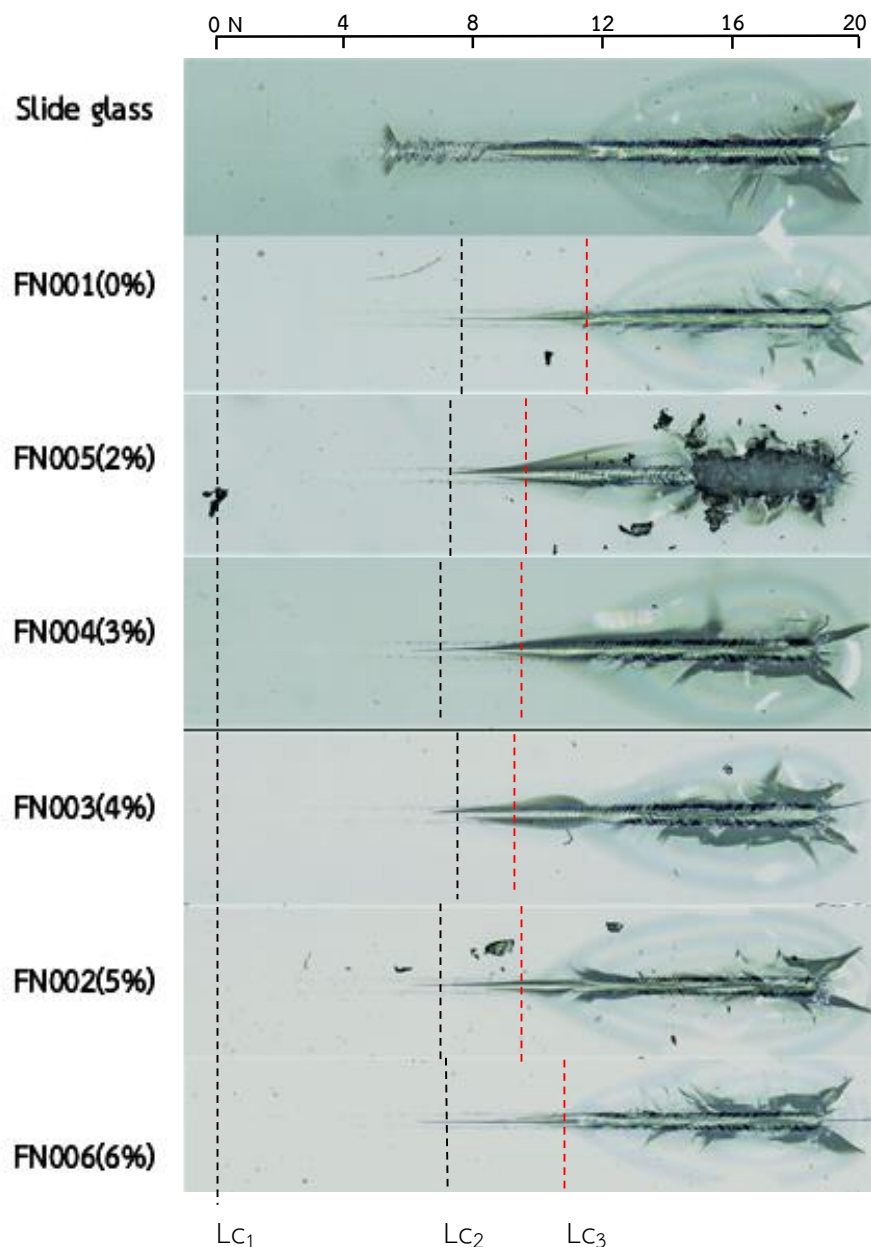
รูปที่ 5.10 ภาคตัดขวางของฟิล์มบางอลูมินาที่ได้จากกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า โดยใช้เวลาในการเคลือบ 300 นาที ปริมาณแก๊ส $O_2=6\%$

5.6 การทดสอบความต้านทานการขีดข่วนของฟิล์มบางอลูมินา

การทดสอบความต้านทานการขีดข่วน ทำการทดสอบด้วยเครื่อง scratch tester อาศัยหลักการใช้หัวเพชรขูดลากไปด้วยความเร็วคงที่และเพิ่มแรงกดขึ้นเรื่อยๆ การให้แรงกระทำตั้งแต่ 0-20 นิวตัน ค่าแรงกดแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ค่าแรก Lc1 คือจุดที่เข็มเริ่มขูดลงไปบนเนื้อฟิล์ม ค่า Lc2 คือจุดที่ทำให้ฟิล์มเป็นรอยและเริ่มหลุดลอก ค่าสุดท้าย Lc3 จุดที่เห็นรอยแตกหรือผิวของวัสดุรองรับ สามารถบอกได้ว่าการหลุดลอกของฟิล์มโดยสมบูรณ์เรียกว่า complete delamination

5.6.1 เงื่อนไขการเติมปริมาณแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน 2-6% เวลา 300 นาที

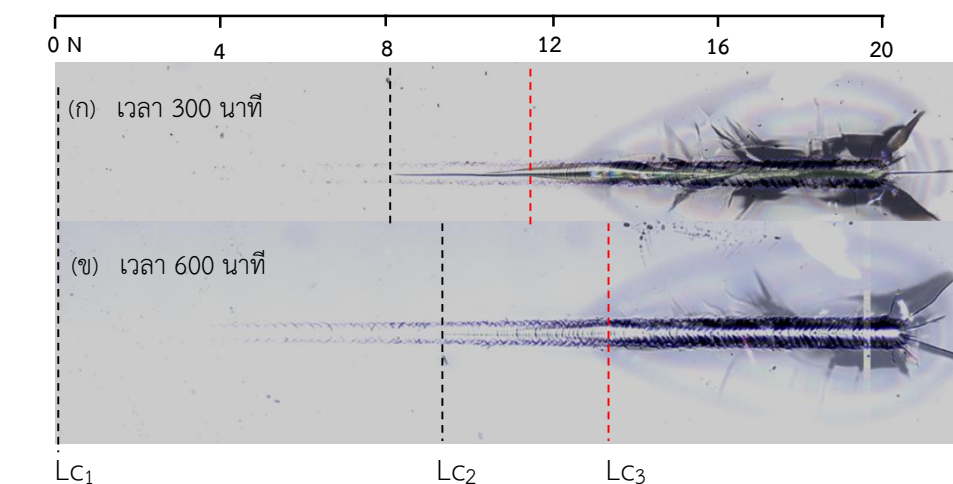
รอยที่เกิดจากการขีดข่วนของหัวเพชรบนกระจกสไลด์เปล่าที่ไม่มีการเคลือบฟิล์มบางอลูมินา เป็นรอยได้ง่ายกว่ากระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์ม และพบว่าฟิล์มที่ทำการเคลือบโดยไม่เติมแก๊สออกซิเจน เกิดรอยได้ยากกว่าฟิล์มที่เติม O_2 เป็นผลมาจากความหนาของฟิล์มที่ที่มีความหนามากกว่าฟิล์มที่เติมแก๊สออกซิเจน เมื่อมีการเติมปริมาณแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากร่องรอยของเข็มที่ขูดลงบนเนื้อฟิล์มจะมีลักษณะการขีดของหัวเข็มในจุดแรกคือจุดเริ่มต้นของฟิล์มที่เกิดรอยเริ่มที่จุดเดียวกัน และจุดที่สองคือจุดที่ทำให้ฟิล์มเป็นรอย จะเห็นความกว้างของรอยเพิ่มขึ้นเมื่อใช้แรงกดที่มากขึ้นของทุกตัวอย่าง จนถึงจุดสุดท้ายจุดที่แตกหรือที่เป็นรอยกว้างอย่างเห็นเนื้อวัสดุรองรับได้ชัดทำให้ฟิล์มเกิดการหลุดลอกโดยสมบูรณ์ (Complete delamination) โดยรอยที่เห็นจากตัวอย่างที่เติมปริมาณแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 2%-6% ค่าที่อ่านได้ทั้ง 3 จุดไม่แตกต่างกันมากแต่รอยที่แตกมีลักษณะต่างกัน แสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 รอยห้วกจากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดของชั้นเคลือบบนกระจกสไลด์ เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณแก๊สออกซิเจน

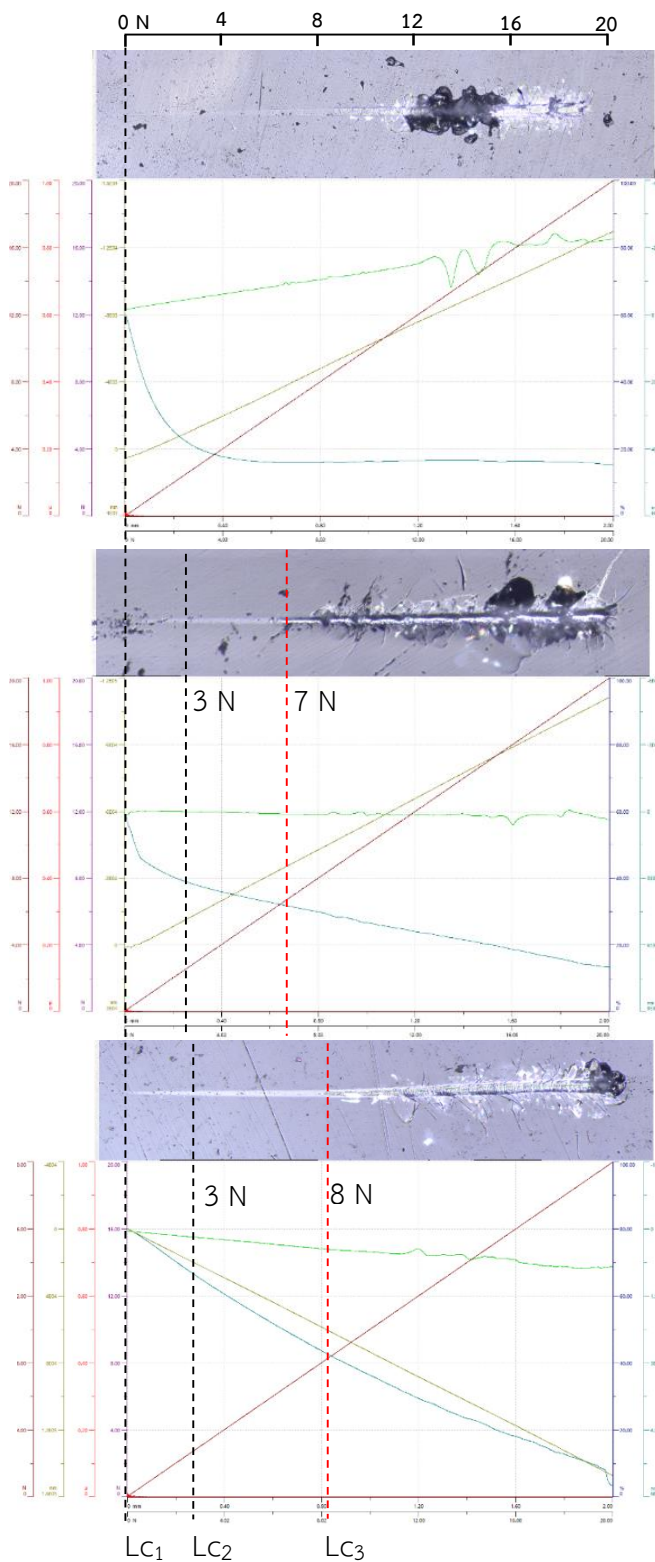
5.6.2 เงื่อนไขการปรับเปลี่ยนเวลา 300 และ 600 นาที

ลักษณะรอยขูดขีดของชั้นเคลือบบนวัสดุรองเคลือบซึ่งเป็นกระจกสไลด์โดยสังเกตจากรูปและสังเกตด้วยตาเปล่า พบว่าลักษณะของกระจกสไลด์ที่มีการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาที่เคลือบเป็นเวลา 300 นาที จะเกิดรอยขูดขีดได้เร็วกว่า (LC_2) รอยความเสียหายของกระจกที่เวลา 300 นาทีเกิดการการแตกมากกว่า และขนาดของรอยความเสียหายมีความกว้างน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เคลือบเวลา 600 นาที แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีความหนากว่าต้องใช้แรงมากกว่าในการทำให้ฟิล์มเกิดรอยขูดขีด แสดงดังรูปที่ 5.10 ซึ่งสอดคล้องกับความหนาของฟิล์มที่ใช้โปรแกรมคำนวณ



รูปที่ 5.12 รอยหวักดจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีดข่วนของชั้นเคลือบบนกระจกสไลด์ ปริมาณ O_2 6%

ผลจากการนำเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาโดยเติมแก๊สออกซิเจน 6% ใช้เวลาในการเคลือบ 300 นาที และ 600 นาที มาเคลือบบนพลอยเพอริดอตและความมารีน เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าลักษณะของเนื้อพลอยที่ผ่านการเคลือบทนต่อรอยขีดข่วนได้มากกว่าพลอยที่ไม่ผ่านการเคลือบ ร่องรอยการขีดข่วนบนพลอยความมารีนพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้ฟิล์มหลุดลอก โดยที่การเคลือบเวลา 300 นาที พลอยเกิดรอยแตกที่เร็วและเห็นได้ชัดกว่าที่เวลา 600 นาที แสดงดังรูปที่ 5.13 และ ร่องรอยการขีดข่วนบนพลอยเพอริดอตพบว่าพลอยที่ไม่ผ่านการเคลือบเกิดรอยแตกเร็วมาก เมื่อใช้เวลาเพิ่มขึ้นโดยการเคลือบที่เวลา 300 นาที ฟิล์มมีการหลุดลอกไปจนเห็นเนื้อพลอย และที่เวลา 600 นาที เห็นรอยลากจนถึงจุดแตกของพลอยไปได้ไกลกว่าแสดงดังรูปที่ 5.14 โดยแรงที่ทำให้ฟิล์มบางอลูมินาที่เคลือบเวลา 300 นาที หลุดออกจากผิวพลอยความมารีน และผิวพลอยเพอริดอต โดยสมบูรณ์อยู่ที่ประมาณ 7 และ 6 นิวตัน ตามลำดับ

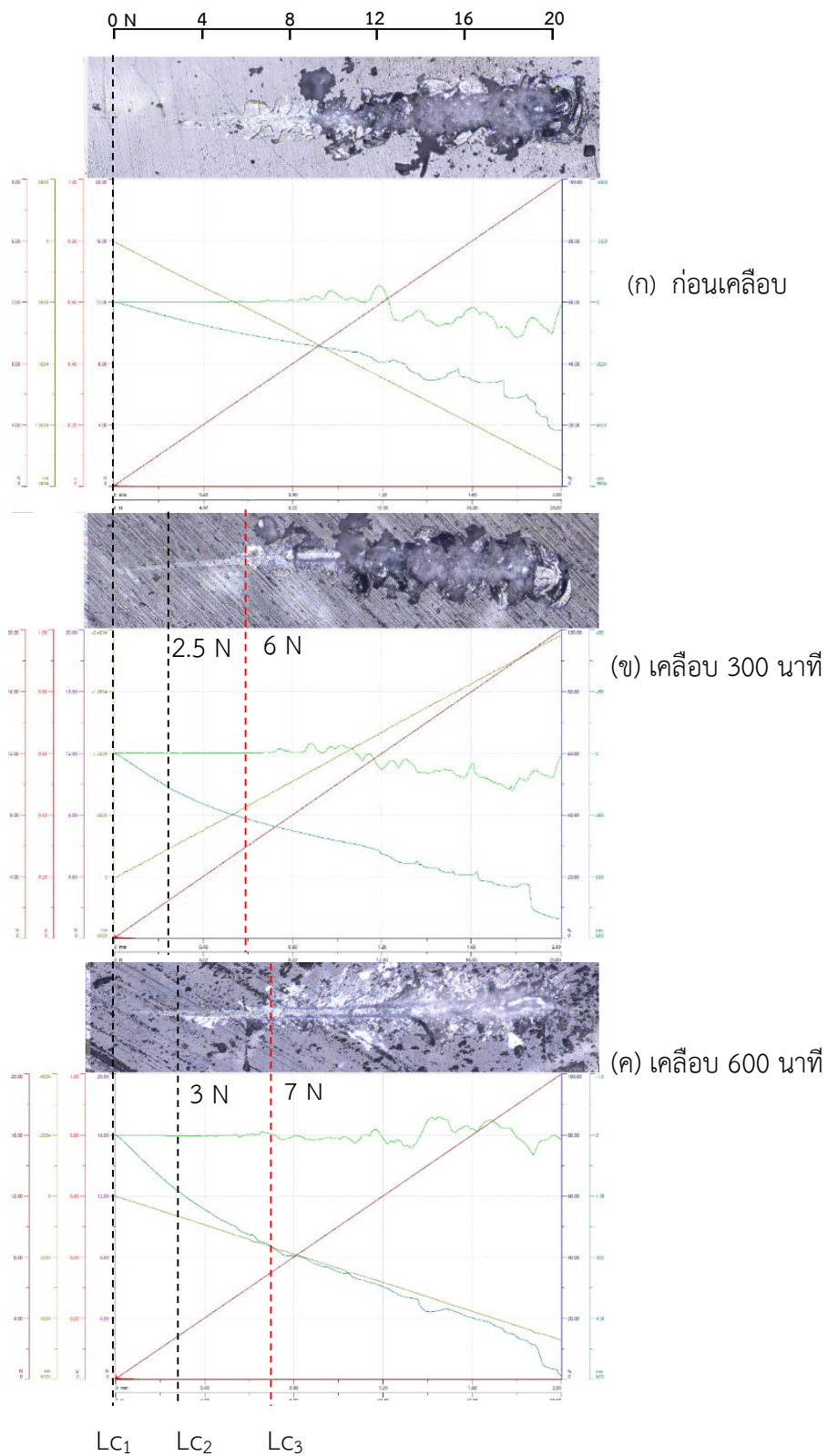


(ก) ก่อนเคลือบ

(ข) เคลือบ 300 นาที

(ค) เคลือบ 600 นาที

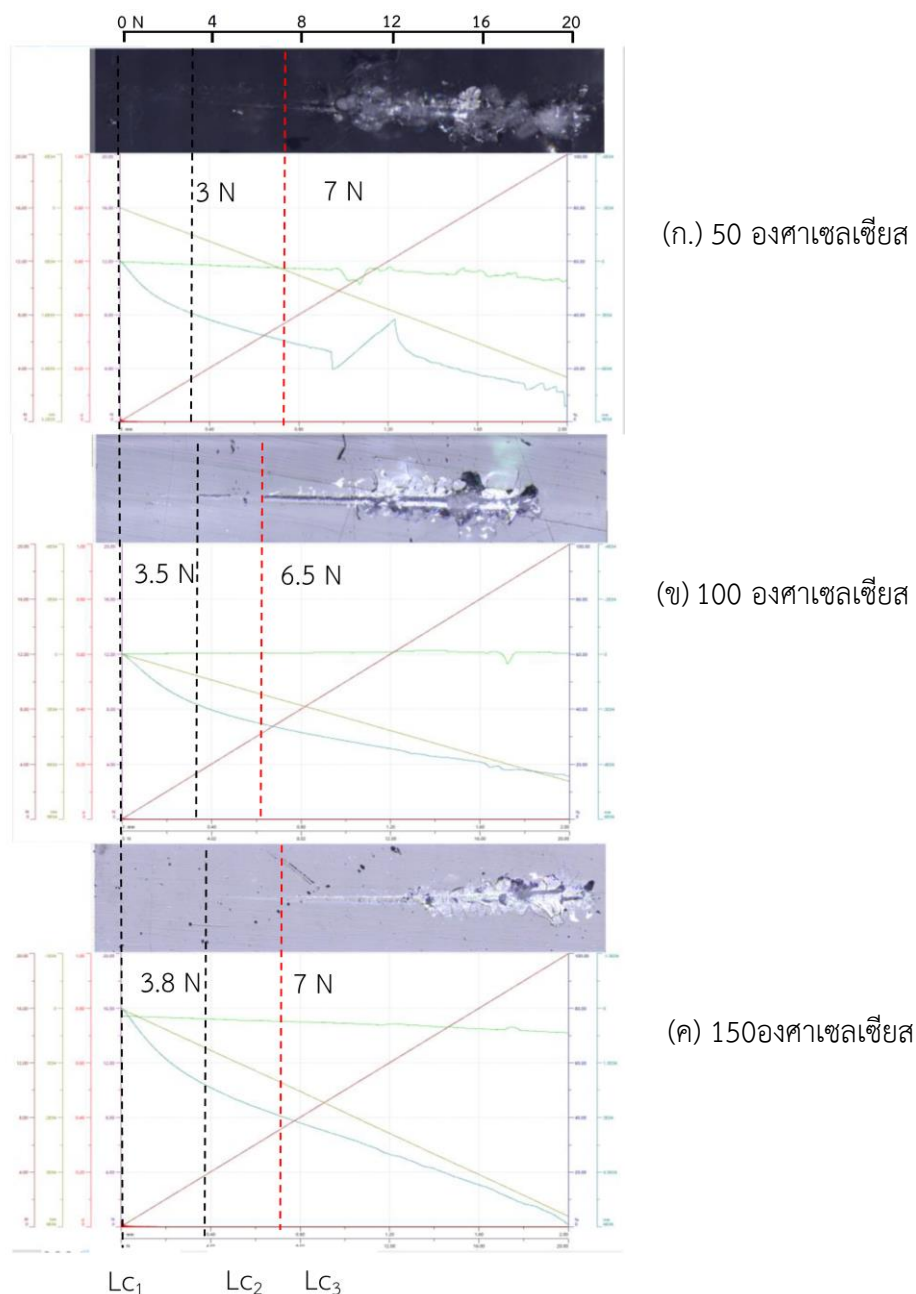
รูปที่ 5.13 รอยลากจากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดของชั้นเคลือบบนพลอยเอความารีน



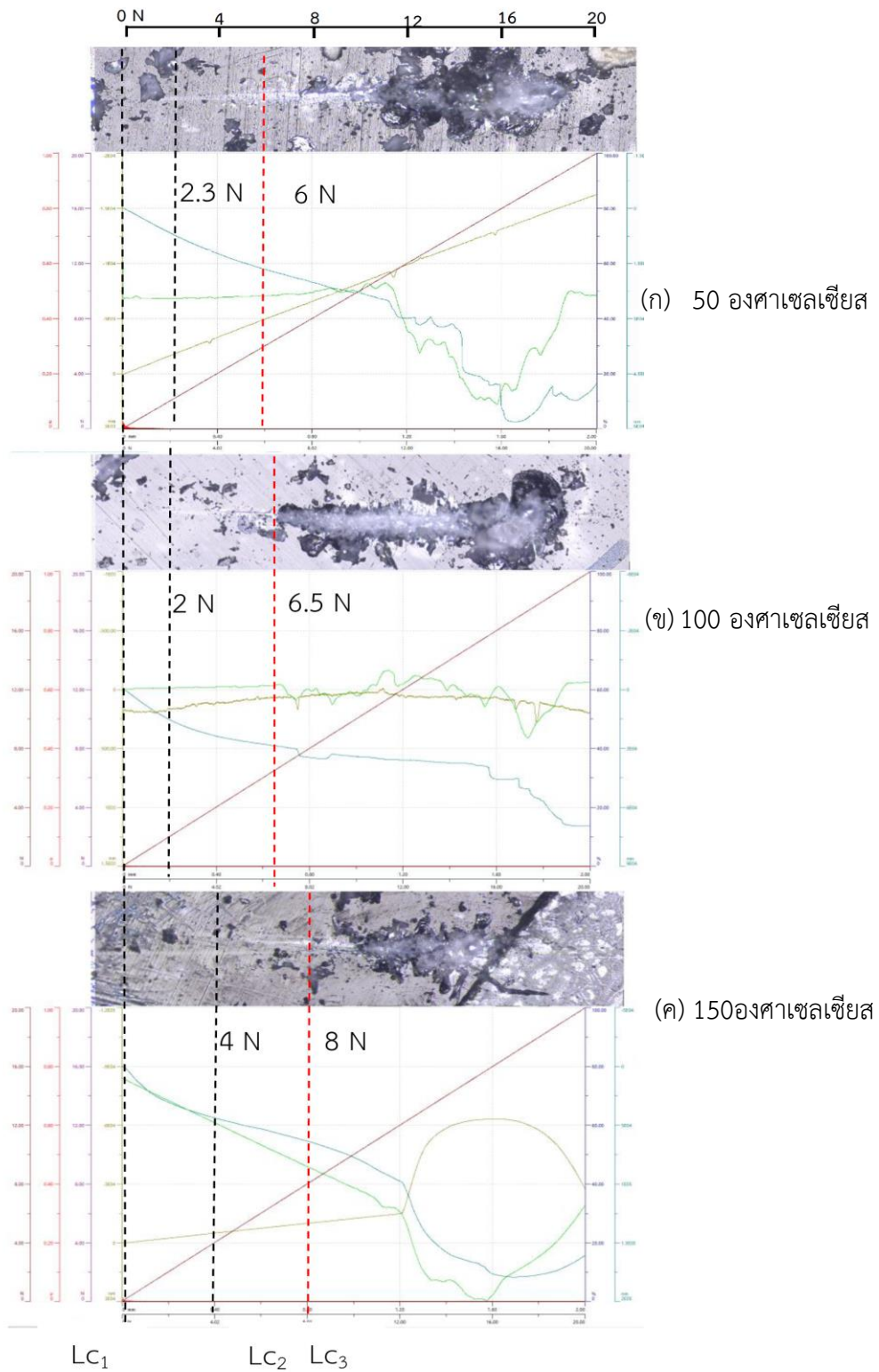
รูปที่ 5.14 รอยลากจากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดของชั้นเคลือบบนพอลิเอทิลีน

5.6.3 เงื่อนไขการนำฟิล์มบางหลังเคลือบมาให้ความร้อน

ผลจากการนำเงื่อนไขการเติมปริมาณแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน 6% ใช้เวลาในการเคลือบ 300 นาที มาให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ใช้ 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พลอยออกมารีน แสดงดังรูปที่ 5.15 และ พลอยเพอริดอตแสดงดังรูปที่ 5.16 พบว่าจากการสังเกตด้วยตาเปล่าผลของการให้ความร้อนไม่มีผลต่อการทนรอยขีดข่วนได้เพิ่มขึ้น โดยรอยที่สังเกตเห็นนั้นอาจเกิดจากมลทินหรือรอยแตกภายในเนื้อพลอยร่วมด้วย



รูปที่ 5.15 รอยลากจากการทดสอบความต้านทานต่อการขีดข่วนของชั้นเคลือบบนพลอยออกมารีนที่ให้ความร้อน (ก) 50 (ข) 100 และ(ค) 150 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.16 รอยลากจากการทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดของชั้นเคลือบบนพลอย เพอริดอตที่ให้ความร้อน (ก) 50 (ข) 100 และ(ค) 150 องศาเซลเซียส

5.7 การทดสอบการวัดสีของชิ้นงานเคลือบฟิล์มบางที่ผ่านการให้ความร้อน

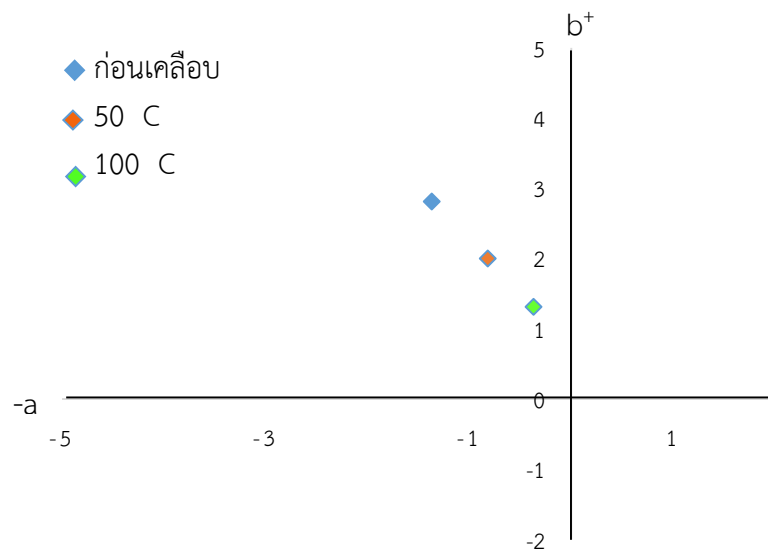
ผลการทดสอบการวัดสีด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ซึ่งทำงานร่วมกับโปรแกรมวัดสีโดยใช้ความยาวคลื่น 380-780 นาโนเมตร วัดด้วยระบบวัดสี $L^*a^*b^*$ ทั้งก่อนเคลือบฟิล์มบางและหลังเคลือบฟิล์มบางอลูมินาแล้วผ่านกระบวนการให้ความร้อนบนผิวพลอยเพอริดอตและอความารีนที่ให้ความร้อน 50 100 และ 150 องศาเซลเซียสตามลำดับ เพื่อตรวจสอบสีของพลอยที่เปลี่ยนแปลงไปโดยดูจากค่า a^* b^* และค่า ΔE ว่ามีความแตกต่างของสีก่อนเคลือบและหลังเคลือบมากน้อยเพียงใดแสดงดังตารางที่ 5.6 และนำข้อมูลมาสร้างกราฟเปรียบเทียบ a^* ละ b^* แสดงดังรูปที่ 5.17 และ 5.18

ตารางที่ 5.6 ค่า $L^*a^*b^*$ และค่า ΔE ของพลอยเพอริดอตและอความารีน

ตัวอย่าง	Heat (C)	ก่อนเคลือบฟิล์ม			หลังเคลือบฟิล์ม+Heat			ΔE	สังเกตด้วยตาเปล่า
		L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*		
เพอริดอต	50	74	-1.37	2.81	71.78	-0.82	2	2.42	ไม่เปลี่ยนแปลง
	100	74	-1.37	2.81	71.2	-0.37	1.31	3.33	ไม่เปลี่ยนแปลง
	150	74	-1.37	2.81	ไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากพลอยแตก			-	ไม่เปลี่ยนแปลง
อความารีน	50	64.79	-1.85	2.32	67.69	-0.54	-0.04	3.96	ไม่เปลี่ยนแปลง
	100	64.79	-1.85	2.32	70.65	-0.44	-0.07	6.48	ไม่เปลี่ยนแปลง
	150	64.79	-1.85	2.32	69.52	-0.42	-0.07	5.48	ไม่เปลี่ยนแปลง

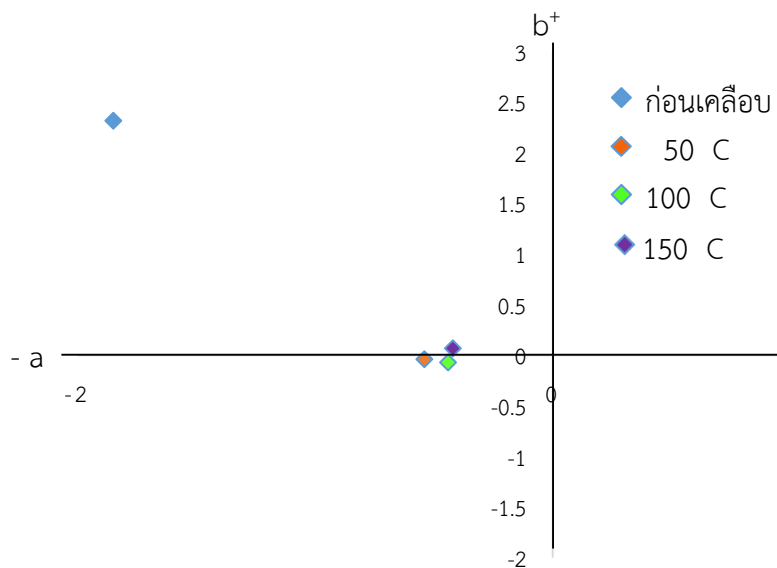
ตารางที่ 5.7 ค่า ΔE ในหน่วยมาตรฐานนานาชาติของการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า (Xiongzi, 2012 และคณะ)

ค่า ΔE	ข้อสังเกตที่สำคัญของความแตกต่างสี
0~0.5	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยมาก
0.5~1.5	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย
1.5~3.0	เห็นการเปลี่ยนแปลงที่สามารถสังเกตเห็นได้
3.0~6.0	มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด
6.0~12.0	มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก
12.0	เปลี่ยนเป็นสีอื่นๆ



รูปที่ 5.17 กราฟเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของพอลิโพรพิลีน ก่อนเคลือบและหลังการเคลือบ แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 100 องศาเซลเซียส โดยเงื่อนไขการเติม O_2 6% เวลาเคลือบ 300 นาที

กราฟแสดงการเปรียบเทียบ a^* b^* ของพอลิโพรพิลีน ก่อนเคลือบฟิล์มบางและหลังเคลือบฟิล์มบางโดยมีเงื่อนไขในการเคลือบโดยเติมแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน 6% ใช้เวลาในการเคลือบ 300 นาที แล้วนำมาให้ความร้อนที่ อุณหภูมิ 50 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่าหลังการผ่านกระบวนการให้ความร้อนสีของพอลิโพรพิลีนมีการเปลี่ยนแปลงของสีเขียวลดลง ค่อนข้างสีน้ำเงินเมื่อมองด้วยตาเปล่าไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้น (ตัวอย่างที่ 150 องศาเซลเซียส ไม่สามารถวัดผลได้ เนื่องจากพอลิโพรพิลีนในระหว่างการให้ความร้อน)



รูปที่ 5.18 กราฟเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของพลอยอคความารีน ก่อนเคลือบและหลังการเคลือบ แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส โดยเงื่อนไขการเติม O_2 6% เวลาเคลือบ 300 นาที

กราฟแสดงการเปรียบเทียบ a^* b^* ของพลอยอคความารีน ก่อนเคลือบฟิล์มบางและหลังเคลือบฟิล์มบางโดยมีเงื่อนไขในการเคลือบคือ เติมแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน 6% ใช้เวลาในการเคลือบ 300 นาที แล้วนำมาให้ความร้อนที่ อุณหภูมิ 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส พบว่าหลังการผ่านกระบวนการให้ความร้อนสีของพลอยอคความารีนมีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย โดยพลอยหลังการให้ความร้อนทั้ง 3 อุณหภูมิเปลี่ยนสีไปในทางเดียวกันคือมีค่าเข้าใกล้สีเขียวมากขึ้น

บทที่ 6 สรุปผลและผลผลิต

6.1 สรุปผลการวิจัย

กระบวนการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาบนผิวอัญมณีเนื้ออ่อน ด้วยเทคนิค อาร์เอฟ แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง โดยการควบคุมเงื่อนไขในการเคลือบ ด้วยความดันก่อนสปัตเตอร์ริง $P_B = 6.0 \times 10^{-4}$ Pa ความดันของอาร์กอน $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1}$ Pa อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน $Ar = 15$ sccm โดยมี การวิจัย 2 ชุด ได้แก่ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟสำหรับคลื่นวิทยุ (RF power) และเวลาในการเคลือบ และการศึกษาอัตราการผสมออกซิเจนและเวลาในการเคลือบ ซึ่งนำไปสู่การเคลือบฟิล์มบางอลูมินาบนอัญมณีเนื้ออ่อนชนิดต่างๆ ดังต่อไปนี้

ผลจากการวิจัยชุดที่ 1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟสำหรับคลื่นวิทยุ (RF power) และเวลาในการเคลือบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เวลาที่เคลือบมีผลปริมาณของสารที่ตกเคลือบบนชิ้นงาน ซึ่งเวลาที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้นซึ่งตรวจสอบได้จากการตรวจสอบด้วย FESEM โดยเรียงจากที่เวลาในการเคลือบฟิล์ม 30, 180 และ 300 นาที มีความหนาของฟิล์มที่เพิ่มมากขึ้นจากการคาดคะเนด้วยการคำนวณซึ่งผลที่ได้คือ คือ 8, 48 และ 80 นาโนเมตร ตามลำดับ และลักษณะของฟิล์มมีความขรุขระที่แตกต่างกันตามความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้น

2. การวัดสีจากเครื่อง UV-VIS NIR Spectrophotometer ควอตซ์และอะพาไทต์ ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มบางทั้ง 3 เงื่อนไขนั้นพบว่าที่เวลา 180 นาที ควอตซ์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มบางมีการเปลี่ยนแปลงของสีที่น้อยที่สุด แต่อะพาไทต์ที่ผ่านการเคลือบที่เวลา 180 นาที มีการเปลี่ยนแปลงสีมากที่สุด เมื่อเทียบกับเวลา 30 และ 300 นาที ซึ่งไม่สอดคล้องจากการสังเกตด้วยตาเปล่า ที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเคลือบที่เวลา 180 นาที

3. สรุปผลจาก Scratch test ฟิล์มที่ผ่านการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาพบว่าที่เวลา 180 และ 300 นาที สามารถป้องกันรอยขีดขูดได้ที่ระดับความแข็ง 8 ตามหลักโมห์สเกล และพบรอยขีดขูดจากคอร์นดัมทั้ง 3 เงื่อนไข

ผลจากการวิจัยชุดที่ 2 การศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงของแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน เวลาที่ใช้ในการเคลือบ และอุณหภูมิในการให้ความร้อนฟิล์มบางหลังเคลือบ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงอัตราการเติมแก๊สออกซิเจน 0% และ 2-6% เมื่อปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ฟิล์มบางอลูมินามีการส่งผ่านแสงได้ดีขึ้นในช่วงที่ตามองเห็น การเติมออกซิเจนในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มมีความหนาลดลง การทดสอบการขีดขูดจากการเติมออกซิเจนในปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับรอยที่ได้จากแรงกดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

2. การเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการเคลือบ 300 และ 600 นาที เมื่อเวลาในการเคลือบนานขึ้นฟิล์มที่ได้จะหนาขึ้น และสามารถทนต่อรอยขีดขูดได้มากขึ้น แต่ฟิล์มส่งผ่านแสงได้ลดลงจากการสังเกตด้วยตาเปล่า

3. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาบนผิวพลอยเพอริดอต และอความารีนหลังจากที่ผ่านการให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส การให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่ทำให้ความหนาทนต่อการขีดขูดเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความหนาของฟิล์มที่คงเดิม และพบความเป็นผลึกของฟิล์มบาง และไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสีในระดับที่

สังเกตได้ด้วยตาเปล่า แต่พบมีการเปลี่ยนแปลงสีเล็กน้อยเมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องยูวี วิสสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

4. วัสดุรองรับต่างชนิดกัน เมื่อเคลือบด้วยฟิล์มบางอลูมินาชนิดเดียวกัน ในที่นี้คือพลอยเพอริดอตและอความารีน จะทนต่อแรงที่ทำให้เกิดร่องรอยที่แตกต่างกันด้วย โดยพลอยอความารีนซึ่งมีความแข็งแรงกว่าจะมีความต้านทานรอยขีดขูดได้มากกว่า โดยเงื่อนไขการเคลือบที่ใช้เวลา 300 นาที อัตราแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน 6% เพอริดอต และอความารีนที่ผ่านการเคลือบฟิล์มบาง จะเกิดรอยจากการขีดขูดที่แรงประมาณ 6 นิวตัน และ 7 นิวตัน ตามลำดับ

5. เงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาบนผิวพลอยเพอริดอตและอความารีนด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงคือ ความดันคงที่ของแก๊สอาร์กอน $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1}$ Pa ปริมาณแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน 6% พลังงาน RF = 50 วัตต์ ใช้เวลาในการเคลือบ 300 นาที และไม่ต้องผ่านกระบวนการให้ความร้อนเนื่องจากผลของการทดสอบการขีดขูดไม่เปลี่ยนแปลงและสีไม่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยซึ่งจากการเคลือบด้วยเงื่อนไขข้างต้นที่ทำให้ฟิล์มมีการส่งผ่านแสงที่ดีและสีของพลอยไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า โดย

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเลือกตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลองควรเป็นตัวอย่างที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้งานจริงให้มากที่สุด
2. การออกแบบขั้นตอนในการทดลองควรมีการวางแผนเป็นอย่างดี เพราะถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขระหว่างการทดลองจะส่งผลกระทบต่อระยะเวลา อาจทำให้การทดลองล่าช้าได้
3. ในระหว่างทำการสปัตเตอริงควรดูแลควบคุมความดันในระบบให้คงที่ และทำความสะอาดห้องเคลือบเสมอเมื่อนำชิ้นงานออกมาในแต่ละครั้ง
4. ก่อนการเคลือบในแต่ละครั้งที่เปลี่ยนเงื่อนไขควรเคลือบทิ้ง 1 ครั้ง เพื่อให้ระบบสะอาด
5. ฟิล์มบางที่ได้มีความบางมาก ซึ่งอาจไม่สามารถตรวจสอบด้วยเครื่องมือบางชนิดได้

6.3 ผลผลิต (Output)

กระบวนการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาบนผิวอัญมณีเนื้ออ่อน ด้วยเทคนิค อาร์เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยการควบคุมเงื่อนไขในการเคลือบ ด้วยความดันก่อนสปัตเตอริง $P_B = 6.0 \times 10^{-4}$ Pa ความดันของอาร์กอน $P_{Ar} = 6.0 \times 10^{-1}$ Pa อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน $Ar = 15$ sccm RF Power 50 วัตต์ และ ปริมาณแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน 6% ระยะเวลาในการเคลือบ 300 นาที เมื่อเคลือบฟิล์มบางบนอัญมณีเนื้ออ่อน จะไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสี สองสามารถป้องกันรอยขีดขูดได้ที่ระดับความแข็ง 8 ตามโมห์สเกล สามารถนำมาผลิตเครื่องประดับ ได้แก่ แหวนและจี้ ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แหวนและจี้ที่ทำด้วยควอตซ์ที่ผ่านการเคลือบที่เสร็จสมบูรณ์

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRMS 13 หลัก) 256108A1080036 สัญญาเลขที่ 186/2561
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ การเคลื่อนฟิล์มบางอลูมินาด้วยเทคนิค แมกนีตรอน สเปตเตอริง เพื่อปรับปรุง
คุณภาพพอลิเมอร์เนื้ออ่อน

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน ผศ.ดร.สายสมร นิยมสรวนุญ.....

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2560 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2562

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี 11 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2560

รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%)	275,000	บาท	เมื่อ วันที่	7 ธันวาคม 2560
งวดที่ 2 (40%)	220,000	บาท	เมื่อ วันที่	20 เมษายน 2561
งวดที่ 3 (10%)	55,000	บาท	เมื่อ วันที่	15 กันยายน 2562
			รวม	550,000 บาท

รายจ่าย

รายการ	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงิน คงเหลือ/เกิน
1. งบบุคลากร	192,000	192,000	-
2. ค่าตอบแทน	108,000	115,000	-7,000
3. ค่าใช้สอย	151,000	140,700	10,300
4. ค่าวัสดุ	44,000	47,300	-3,300
5. ค่าครุภัณฑ์	-	-	-
6. ค่าธรรมเนียมอุดหนุนสถาบัน	55,000	55,000	-
รวม	550,000	550,000	-

(ผศ.ดร.สายสมร นิยมสรวนุญ)
ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

บรรณานุกรม

- กรรณิการ์ วรณทวิ, นิรันดร์ วิทิตอนันต์และ สุรสิงห์ ไชยคุณ. 2555. ผลของความดันย่อยแก๊ส ไนโตรเจนต่อโครงสร้างของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง, <http://www.lib.ku.ac.th/KUCONF/2555/KC4905003.pdf>
- กระบวนการสเป็คเตอริง. Thin film deposition process Retrieved มีนาคม 18, 2560, from <http://www.vt-sun.com/index.php?option=com>
- เกียรติพงษ์ ได้การ. (2560). มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. Retrieved มีนาคม 18, 2560, from <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/x-ray-analysis-instrument-menu/item/88%E0%>
- จินดาวรรณ สิงห์คต, นิรันดร์ วิทิตอนันต์, สุรสิงห์ ไชยคุณ, 2552, ผลของความดันรวมต่อโครงสร้างและสมบัติโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง, การประชุม วิชาการและเสนอผลงานวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่19 ประจำปี 2552, <http://www.pt.tsu.ac.th/rdi/ConAll/POSTER19/P4.pdf>
- เจริญชัย เหลืองอ่อน. (2553). การวัดสีด้วยเทคนิค UV-VIS-NIR SPECTROPHOTOMETRY. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
- ทรัพย์สินกรรม. (2016). โอลิวัน. วันที่ค้นข้อมูล 7 มกราคม 2561. เข้าถึงได้จาก www.krusarawut.net/wp/?p=13362
- เทคโนโลยีการพิมพ์. (2014). ทฤษฎีสีของระบบสีLab. วันที่ค้นข้อมูล 8 มีนาคม 2562. เข้าถึงได้จาก [https:// เทคโนโลยีการพิมพ์.blogspot.com/2014/06/Lab.html](https://เทคโนโลยีการพิมพ์.blogspot.com/2014/06/Lab.html)
- ธิภาพร ศรีสมบุญ. (2560). ศึกษาสมบัติของชั้นฟิล์มป้องกันโปร่งใสอินทรีย์บนออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธี พัลส์ดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริงบนเครื่องประดับทองชมพู. สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
- บริษัท วิทีซัน จำกัด. กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (Thin film process). วันที่ค้นข้อมูล 11 สิงหาคม 2561. เข้าถึงได้จาก <http://www.vt-sun.com/index.php?option=com>
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัปสร บุญย้ง. (2560). มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์. Retrieved มีนาคม 18, 2560, from <https://www.wu.ac.th/th/news/9138/1/%>
- พัฒนา เทพชโลธร. (2548). การเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง แบบรีแอคทีฟ.
- ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ. (2558). การศึกษาฟิล์มบางไททานเนียมออกไซด์คาร์ไบด์โดยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอน สเป็คเตอริงเพื่อความแข็งแรงและป้องกันไฟฟ้าสถิตย์. งานวิจัย, วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ร.อ. พัฒนา เทพชโลธร. 2548. การสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง แบบรีแอคทีฟ,

- http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snamcn/Pattana_Thepchalotorn/Fulltext.pdf
- วิลาสินี วุฒิภกรสกล. (2553). การออกแบบและสร้างแคโทดสำหรับระบบปลูกฟิล์มบาง อาร์เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ(องค์การมหาชน). (2560). สถานการณ์การนำเข้าส่งออกสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับไทย. วันที่ค้นข้อมูล 12 ตุลาคม 2561. เข้าถึงได้จาก https://infocenter.git.or.th/Content_View.aspx?id=2402&mail=1
- สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). (2545). เทคโนโลยีฟิล์มบางในสุญญากาศทางเลือกใหม่ในอุตสาหกรรมอัญมณีไทย. วันที่ค้นข้อมูล 9 สิงหาคม 2561. เข้าถึงได้จาก <https://www.trf.or.th>
- ศุภเดช สุจินพรัหม, ขวลิต ภูมณี, สุภาพ ชูพันธ์, สุชีวัน กรอบทองและ สุทธิพจน์ สุทชนะ, 2557, ผลของแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอนต่อสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ที่เตรียมด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอนสปีดเตอริง, <http://journal.rmutp.ac.th/wp-content/uploads/2014/08/Special-Science-38.pdf>
- สมศักดิ์ แดงดี. (2551). การทดลองวัดสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มบาง ITO และ PEDOT-PSS.
- สุรศักดิ์ สุรินทร์พงษ์. (2552). Adhesion ของ PVD hard coating การวัดและเกร็ดความรู้ที่เกี่ยวข้อง. SPECIAL FEATURE, 65. วันที่ค้นข้อมูล 19 ตุลาคม 2561. เข้าถึงได้จาก <http://www.researchgate.net>
- สุรสิงห์ ไชยคุณ นิรันดร์ วิทอนันต์ และจักพันธ์ ถาวรจิร. 2549. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการเคลือบในสุญญากาศ. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา หน้า26
- อธิจิต กล่ำสมบูรณ์. (2553). การต้านทานการหมองของโลหะเงินสเตอร์ริงโดยการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์.

- Ao Liu, et al., (2014). Effects of melting on the properties of alumina thin film that has been improved and its application in TFTS.
- dmr. (2560). *dmr*. Retrieved มีนาคม 15, 2560, from <http://www.dmr.go.th/main.php?filename=apatite>
- Du, S., Kishimoto, K., Yin, X., Zhang, L., Zhang, X., Zhu, J., (2013). Crystallization of alumina films deposited by reactive magnetron sputtering with resputtering technique at low temperature. *Surface & Coating Technology*. Vol. 228, pp. s393-396.
- Fan, S., Gao, Y., Hu, S., Lin, S., Tsai, Y., (2014). Properties of Ti-doped Al₂O₃ thin films deposited by simultaneous RF and DC magnetron sputtering. *Vacuum*. Vol. 107, pp. 255-230.

- glasswarechemical. (2560). *glasswarechemical*. Retrieved มีนาคม 18, 2560, from <http://glasswarechemical.com/scientific-instrument/%E0% A3-uv-vis-spectrophotometer/>
- Klumsomboon, A., Niyomsoan, S., Chaiyakun, S., & Chomsaeng, N. (2012). Aluminium Oxide Coating on Silver Alloy by DC Magnetron Sputtering [Abstract]. *Proceedings of the 29th MST Annual Conference, January 30,- February 1, 2012* (pp. 151-152). Cham: The Microscopy Society of Thailand.
- Levin, I. and Brandon, D. (1998). "Metastable Alumina Polymorphs: Crystal Structures and Transition Sequences". *Journal of the American Ceramic Society* 81 (8): 1995–2012. doi:10.1111/j.1151-2916.1998.tb02581.x
- Magnetron Sputtering Technology [Online], 2014,**
<http://www.directvacuum.com/sputter.asp>
- Miho Yasaka. (2010). X-ray thin-film measurement techniques. *The Rigaku Journal*. 26(2).
- Minolta,+1997. (2560). *patchra*. Retrieved มีนาคม 15, 2560, from [https://www.google.co.th/search?q=\(Minolta,+1997\)&source=lnms&tbm=isch&sa=X&v](https://www.google.co.th/search?q=(Minolta,+1997)&source=lnms&tbm=isch&sa=X&v)
- Neelakanta R., Parthasarathi, B., V. Rajagopal R., et al. (2014). XPS study of sputtered alumina thin films. *Journal of ceramics international*, 40, 11099-11107.
- patchra. (2560). *patchra*. Retrieved มีนาคม 15, 2560, from <http://www.patchra.net/minerals/MinDesc/quartz.php>
- Sputtering Sources [Online]. 2010. <http://www.scotech.ltd.uk/sputtering-sources.htm>
- The Gem and Jewelry Institute of Thailand (GIT). (2019). Aquamarine, Retrieved January 8, 2019, from Website://www.git.or.th/Aquamarine.html.
- Voigt et al. (2013). Electrical properties of aluminum oxide thin film.
- Zeman, P. and Takabayashi, S. (2002), Effect of total and oxygen partial pressures on structure of photo catalytic TiO₂ films sputtered on unheated substrate, *Surface and Coatings Technology*, Volume 153, Issue 1, 1 April 2002, Pages 93-9