

การเคลือบฟิล์มครึ่งสะท้อนบนพลาสติก  
สำหรับประยุกต์ใช้เชิงแสง  
HALF REFLECTION COATINGS ON PLASTICS  
FOR OPTICAL APPLICATIONS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

การเคลือบฟิล์มครึ่งสะท้อนบนพลาสติก  
สำหรับประยุกต์ใช้เชิงแสง  
HALF REFLECTION COATINGS ON PLASTICS  
FOR OPTICAL APPLICATIONS



TB00130

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2558

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# HALF REFLECTION COATINGS ON PLASTICS FOR OPTICAL APPLICATIONS



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

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ACADEMIC YEAR 2015

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเคลือบฟิล์มครึ่งสะท้อนบนพลาสติกสำหรับประยุกต์ใช้เชิงแสง  
Half Reflection Coatings on Plastics for Optical Applications

ชื่อนักศึกษา นางสาวฐานิดา รูปสุวรรณ รหัสนักศึกษา 55051487

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.พิทักษ์ เอี่ยมชัย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.สาทร่าย เล็กชะอุ่ม ประธานกรรมการ	
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข กรรมการ	
ดร.พิศาล สุขวิสูตร กรรมการ	
ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ดร.พิทักษ์ เอี่ยมชัย กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเคลือบฟิล์มครึ่งสะท้อนบนพลาสติกสำหรับประยุกต์ใช้เชิงแสง
ชื่อนักศึกษา	นางสาวฐานิดา ฐปสุวรรณ รหัสนักศึกษา 55051487
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.พิทักษ์ เอี่ยมชัย

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการที่จะพัฒนาในส่วนการแสดงผลของเลนส์แว่นตา เพื่อต้องการทำให้เลนส์แว่นตานั้นมีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงสูง ทำโดยการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมลงบนพลาสติก ทั้งนี้จะทำการเคลือบโดยกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ในระบบสุญญากาศด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง (Sputtering) แล้วนำมาวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงและเชิงกายภาพ พบว่าฟิล์มมีการยึดติดกับพลาสติกดีมากและเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น จะมีการสะท้อนแสงเพิ่มขึ้นด้วย และที่เวลา 40 วินาที มีการสะท้อนแสงเป็นครึ่งหนึ่งพอดี จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่ 130°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง แล้วนำมาทดสอบความแข็งแรงและความยึดติดของหน้าฟิล์มหลังจากได้รับความร้อนดังกล่าว พบว่าฟิล์มอะลูมิเนียมยังคงติดอยู่บนพลาสติกดีมากเช่นเดิม จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงและเชิงกายภาพอีกครั้งหนึ่ง พบว่าฟิล์มมีขนาดหดเข้าจากเดิมเล็กน้อยเนื่องจากผลของความร้อน และแนวโน้มการสะท้อนแสงยังคงเป็นเช่นเดิม ที่เวลาการเคลือบ 40 วินาที เหมือนกันมีการสะท้อนแสงน้อยกว่าก่อนได้รับความร้อน สุดท้ายแล้วทดลองทำชิ้นงานจริงโดยการเทพลาสติก Trivex ทับชิ้นงานก่อนหน้านี้อีกครั้งหนึ่งเพื่อรวมชิ้นงานเป็นชิ้นเดียวกันแล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงและเชิงกายภาพเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง รวมถึงข้อดี-ข้อเสียของชิ้นงานจากการทดลองและชิ้นงานจริง พบว่าก่อนหน้าเท Trivex ทับมีการสะท้อนแสงได้เป็นครึ่งหนึ่งโดยประมาณ แต่เมื่อเท Trivex ทับแล้วแนวโน้มการสะท้อนแสงมีการผิผันไปส่งผลให้ค่าการสะท้อนแสงของชิ้นงานก่อนเท Trivex ทับอีกชิ้นหนึ่งนั้นให้ผลที่ดีกว่า

คำสำคัญ : การเคลือบฟิล์ม ประยุกต์ใช้เชิงแสง

Title	Half Reflection Coatings on Plastics For Optical Applications
Student	Miss Thanida Thoopsuwan Student ID 55051487
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2015
Advisor	Asst.Prof.Dr.Nathaporn Promros
Co-Advisor	Dr.Pitak Eiamchai

### Abstract

In this project, develop a display of eyeglass for eyeglass lenses property a half reflection by coating Aluminium thin film on plastic lenses with Physical Vapor Deposition process with Sputtering. Next analyze spectroscopy and physical properties found thin film good adhesion to plastic and increase time for coating Aluminium film affect increase a reflection and time for coating Aluminium film at 40 second is a half reflection. Then heat all of plastic on hot plate at 130 degree Celsius for 24 hours and test an adhesion to plastic found Aluminium thin film still a good adhesion to plastic. Then spectroscopy and physical properties found Aluminium film a smaller than before heat and time for coating Aluminium film at 40 second decrease a reflection. Last form a lenses sample by casting process on plastic and analyze spectroscopy and physical properties found plastic before casting process is a half reflection but after casting process found mistake a reflection therefore plastic before casting process better.

**Keywords :** Coating, Optical application

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ ผศ. ดร. ธีรพร พรหมรส อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย ขอขอบคุณ ดร.พิทักษ์ เอี่ยมชัย สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือในทุกๆด้านในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย นอกจากนี้ขอขอบคุณ พี่ๆและเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการ Optical thin-film Technology Research Laboratory (OTL) จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษเรื่องนี้ รวมถึงเพื่อนๆในภาควิชาฟิสิกส์ด้วย สำหรับคำแนะนำต่างๆเพื่อนำมาปรับปรุงแก้ไขโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ฐานิดา อูปสุวรรณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	5
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและการดำเนินงาน	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	8
2.1 แสงและการมองเห็น	8
2.1.1 สมบัติของคลื่นแสง	8
2.1.2 อัตราเร็วแสง	16
2.1.3 ความยาวคลื่น	16
2.2 การแทรกสอดของแสง	18
2.2.1 การแทรกสอดของคลื่นแสง (Optical Interference)	18
2.2.2 การแทรกสอดในฟิล์มบางชั้นเดียว	21
2.3 การส่องผ่านแสง การดูดกลืนแสง และการสะท้อนแสง	23
2.3.1 การส่องผ่านแสง	23
2.3.2 การดูดกลืนแสง	23
2.3.3 การสะท้อนแสง	24
2.4 วิธีการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงเฉลี่ย	25
2.5 กระบวนการสร้างฟิล์มด้วยวิธีสปัตเตอริง	26
2.5.1 กระบวนการสปัตเตอริง	26
2.5.2 กระบวนการก่อเกิดฟิล์มบาง	27
2.6 เทคนิคทางวิทยาศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ฟิล์ม	27
2.6.1 เทคนิคสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)	27
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

### 3.1 การเตรียมวัสดุรองรับ

31

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.1 การทำความสะอาดวัสดุรองรับที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม	31
3.1.2 ตัดขนาดวัสดุรองรับ	34
3.1.3 แปะเทพกาวบนวัสดุรองรับ	35
3.2 การสร้างฟิล์ม	36
3.1.1 การทำให้เป็นสภาวะสุญญากาศ	36
3.2.2 การสร้างฟิล์มอะลูมิเนียม	36
3.2.3 การทำความสะอาดเครื่องสร้างฟิล์มแบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	40
3.3 การวิเคราะห์	40
3.3.1 การวิเคราะห์เชิงแสง	40
3.4 การให้ความร้อนวัสดุรองรับ	42
3.5 การทดสอบหน้าฟิล์ม	43
3.6 การวัดความหนาของฟิล์ม	44
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	<b>45</b>
4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุรองรับ	45
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุรองรับก่อนได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง	45
4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุรองรับหลังได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง	48
4.2 ผลการวัดค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มอะลูมิเนียมบนวัสดุรองรับเปล่า	50
4.3 ผลการวัดค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มอะลูมิเนียมบนกระจกสไลด์	51
4.4 ผลการวัดค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มอะลูมิเนียมบน Trivex	53
4.5 ผลการวัดค่าการสะท้อนของฟิล์มอะลูมิเนียมบน Trivex	54
4.6 ทดสอบบนชิ้นงานจริง	60
4.6.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานจริง	60
4.6.2 ลักษณะเชิงแสงของชิ้นงานจริง	67
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>68</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	
<b>ภาคผนวก</b>	
<b>ภาคผนวก ก</b>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงข้อดีและข้อเสียของการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์แต่ละแบบ	4
1.2 แสดงข้อดีและข้อเสียของประเภทของเป่าที่ใช้ในการเคลือบ	4
1.3 แสดงข้อดีและข้อเสียของตัวอย่างเป่าโลหะที่นิยมใช้เคลือบฟิล์ม	5
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ	6
2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงในช่วงที่ตามองเห็น	17
3.1 แสดงเงื่อนไขในการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียม	40
4.1 แสดงตารางขนาดของฟิล์มอะลูมิเนียมก่อนและหลังให้ความร้อน 130°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง	49
4.2 แสดงค่าการส่งผ่าน การสะท้อนและการดูดกลืนแสงของวัสดุรองรับ Trivex ที่เวลาการเคลือบต่างๆกัน ก่อนได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	59
4.3 แสดงค่าการส่งผ่าน การสะท้อนและการดูดกลืนแสงของวัสดุรองรับ Trivex ที่เวลาการเคลือบต่างๆกัน หลังได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	59
4.4 แสดงค่าการส่งผ่านและการสะท้อนของชิ้นงานจริงก่อนและหลังเคลือบ TVX ทับอีกชั้น	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงแบบแว่นตาทั่วไป	2
1.2 แสดงส่วนแสดงผลที่เคลื่อนลงบนเลนส์พลาสติก	2
1.3 แสดงภาพที่สะท้อนออกมาหลังจากการประมวลผล	2
2.1 แสดงบนกระจกเงา มุมตกกระทบ ( $\theta_i$ ) จะทำมุมกับเส้นปกติเท่ากับมุมสะท้อน ( $\theta_r$ )	9
2.2 แสดงการเปรียบเทียบรังสีสะท้อนบนผิวเรียบและผิวขรุขระ	10
2.3 แสดงการหักเหเมื่อคลื่นเดินทางจากน้ำลึกไปสู่ตื้น	11
2.4 แสดงการแทรกสอดของแสงจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่งที่เดินทางมาพบกันที่จุดเดียว	12
2.5 แสดงการเกิดแถบมืด แถบสว่างต่างๆบนฉากเมื่อแสงผ่านสลิตเดี่ยว	14
2.6 แสดงการเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว	15
2.7 แสดงการเลี้ยวเบนผ่านช่องเดี่ยวที่มีความกว้างต่างกัน	16
2.8 แสดงวงล้อสี	17
2.9 แสดงสเปกตรัมของแสงที่ความยาวคลื่นช่วงต่างๆ	17
2.10 แสดงการทดลองช่องเปิดคู่ของยัง	18
2.11 แสดงการเกิดแถบสว่างและแถบมืดบนฉาก	19
2.12 แสดงระยะต่างๆ ในการทดลองของยัง (Young)	20
2.13 แสดงการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากฟิล์มบาง	23
2.14 แสดงสเปกตรัมของแสงในช่วงที่ตามองเห็น	25
2.15 แสดงสเปกตรัมการแผ่รังสีพลังงานแสงอาทิตย์ที่มวลอากาศ 1.5	26
2.16 แสดงอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับเป้าสารเคลือบ	26
2.17 แสดงเครื่อง Spectrophotometer รุ่น Cary 7000	27
3.1 แสดงไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	30
3.2 แสดงการเตรียมอุปกรณ์ทำความสะอาดวัสดุรองรับ	32
3.3 แสดงขั้นตอนการทำความสะอาดวัสดุรองรับ	34
3.4 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดวัสดุรองรับ	35
3.5 แสดงตัวอย่างการตัดกระจก	35
3.6 แสดงตัวอย่างการแปะเทปกาวขนาด $2 \times 2$ cm บนวัสดุรองรับ	36
3.7 แสดงการวางวัสดุรองรับภายในภาชนะเคลือบสุญญากาศ	36
3.8 แสดงภาชนะสุญญากาศภายนอกสำหรับสร้างฟิล์ม	37
3.9 แสดงส่วนควบคุมแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง	38
3.10 แสดงหน้าจอส่วนควบคุมการปล่อยแก๊สและแสดงค่าอัตราการไหลของแก๊ส 38	
3.11 แสดงเครื่อง DC Magnetron Sputtering จากห้องปฏิบัติการ Optical Thin Film (OTL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)	39
3.12 แสดงเครื่อง Spectrophotometer ของบริษัท Agilent Technologies รุ่น Cary 7000	41
3.13 แสดงตำแหน่งการวางวัสดุรองรับและปิดยึดไม่ให้เคลื่อนที่ก่อนทำการวัด Spectroscopy	41
3.14 แสดงการตั้งค่าเริ่มต้นด้วยระบบซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ก่อนเริ่มวัด Spectroscopy	42

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 แสดง Hot Plate ที่ใช้ในการให้ความร้อนวัสดุรองรับ	42
3.16 แสดง TVX ที่เวลาในการสร้างฟิล์มต่างๆก่อนให้ความร้อน	43
3.17 แสดงตัวอย่างการกรีดฟิล์มบนวัสดุรองรับหลังจากได้รับความร้อน 130°C นาน 24 ชั่วโมง	43
3.18 แสดงตัวอย่างการแปะเทปลงบนฟิล์มหลังจากถูกกรีด	44
3.19 แสดงเครื่อง Ellipsometry จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)	44
4.1 แสดงวัสดุรองรับหลังจากเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 10 วินาที ก่อนได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	46
4.2 แสดงวัสดุรองรับหลังจากเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 15 วินาที ก่อนได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	46
4.3 แสดงวัสดุรองรับหลังจากเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 20 วินาที ก่อนได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	47
4.4 แสดงวัสดุรองรับหลังจากเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 40 วินาที ก่อนได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	47
4.5 แสดงวัสดุรองรับ TVX หลังจากเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่เวลาต่างๆ หลังได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	48
4.6 แสดงตัวอย่างการวัดขนาดฟิล์มที่ถูกเคลือบที่เวลา 10 วินาที บน TVX ก่อนและหลังได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง	49
4.7 แสดงแบบจำลองความหนาที่วัดจาก Ellipsometry ของวัสดุรองรับ TVX ที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมต่างๆ	50
4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของวัสดุรองรับก่อนเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม 0°	51
4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของกระจกสไลด์หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม 0°	52
4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของ TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม 0°	53
4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของ TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม 0° ก่อนนำไปให้ความร้อน 130°C 24 ชั่วโมง	55
4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของ TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม 8° ก่อนนำไปให้ความร้อน 130°C 24 ชั่วโมง	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของ TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม 0° หลังนำไปให้ความร้อน 130°C 24 ชั่วโมง	57
4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Reflection ของ TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม 8° หลังนำไปให้ความร้อน 130°C 24 ชั่วโมง	57
4.15 แสดงแบบจำลองชิ้นงานการสร้างชิ้นงานจริงด้านบนและด้านข้าง	60
4.16 แสดงชิ้นงานจริงที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 2 นาที ด้านหน้า	61
4.17 แสดงชิ้นงานจริงที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 2 นาที ด้านหลัง	61
4.18 แสดงชิ้นงานจริงที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 2 นาที ด้านข้างทั้งสี่ด้าน	62
4.19 แสดงการสะท้อนแสงของชิ้นงานจริงหลังที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 2 นาที	62
4.20 แสดงการส่งผ่านแสงของชิ้นงานจริงหลัง cast TVX ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 2 นาที	63
4.21 แสดงชิ้นงานจริงหลัง cast TVX ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 4 นาที ด้านหน้า	63
4.22 แสดงชิ้นงานจริงหลัง cast TVX ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 4 นาที ด้านหลัง	64
4.23 แสดงชิ้นงานจริงหลัง cast TVX ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 4 นาที ด้านข้างทั้งสี่ด้าน	64
4.24 แสดงการสะท้อนแสงของชิ้นงานจริงหลัง cast TVX ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 4 นาที	65
4.25 แสดงการส่งผ่านแสงของชิ้นงานจริงหลัง cast TVX ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 4 นาที	65
4.26 แสดงตัวอย่างชิ้นงานก่อนและหลังทำการ cast TVX ของการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม ที่เวลา 4 นาที	66
4.27 แสดงแบบจำลองชิ้นงานก่อนและหลังทำการ cast TVX ของการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม ที่เวลา 4 นาที	66

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	ความหมาย
sin	ค่าของด้านตรงข้ามมุมหารด้วยค่าของด้านตรงข้ามมุมฉาก
c	อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ
rad	เรเดียน
DI	น้ำที่ปราศจากไอออน
ISO	แอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งใช้เป็นสารฆ่าเชื้อ
mbar	มิลลิบาร์
Si	ธาตุซิลิกอน
Al	ธาตุอะลูมิเนียม
DC	ไฟฟ้ากระแสตรง
A	แอมแปร์
Ar	ธาตุอาร์กอน
sccm	หน่วยอัตราการไหลของแก๊ส (Standard Cubic Centimeter per Minute)
s	วินาที
nm	นาโนเมตร
min	นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

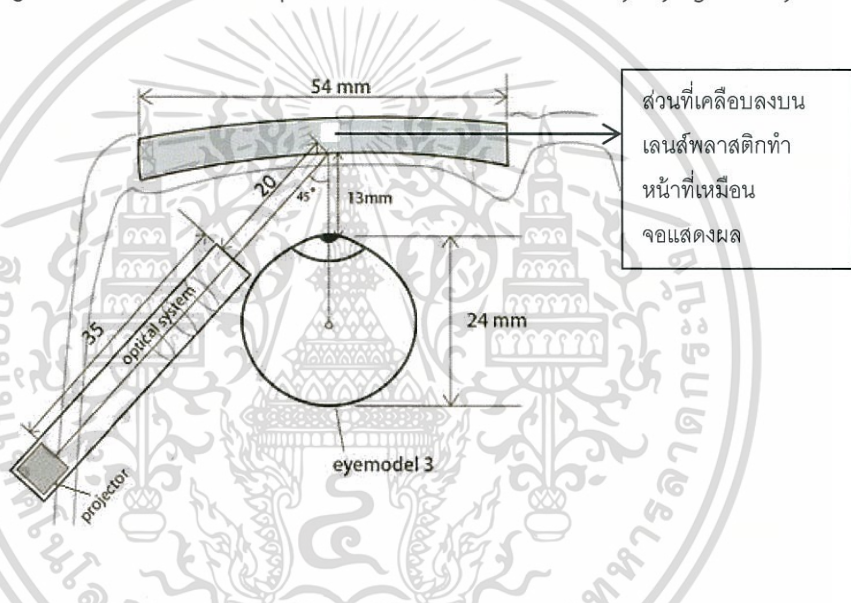
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันแว่นตาถือเป็นสิ่งสำคัญและเป็นสิ่งที่มนุษย์มีความนิยมใช้ เพราะฉะนั้นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับแว่นตาจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งลักษณะภายนอกรวมถึงการนำไปใช้งานเพื่ออำนวยความสะดวกและรองรับกับความต้องการของมนุษย์ในยุคปัจจุบัน โดยทั่วไปแล้วแว่นตามักจะมีคุณสมบัติในการใช้งานได้อย่างเฉพาะเจาะจง เช่น แว่นสายตา แว่นกันแดด เป็นต้น แต่ในปัจจุบันซึ่งเป็นยุคเทคโนโลยีจึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาการใช้งานที่ทันสมัยและความสะดวกสบายมาใช้ร่วมกับแว่นตา เสมือนเป็นการนำคอมพิวเตอร์และแว่นตารวมกัน จึงถือได้ว่าเป็นแว่นตาที่ดูแปลกใหม่และมีความฉลาดเทียบเท่ากับคอมพิวเตอร์ เนื่องจากมีส่วนประมวลผลเหมือนกับคอมพิวเตอร์และนอกจากนี้ยังสามารถแสดงผลที่ได้ออกมาทางแว่นตาให้ผู้ใช้ได้เห็นทันทีซึ่งถือได้ว่าเหมาะกับคนในยุคปัจจุบันเป็นอย่างมาก การที่จะทำให้เลนส์แว่นตามีประสิทธิภาพได้ดังที่กล่าวมานั้นจะต้องทำการเคลือบฟิล์มลงบนเลนส์แว่นตา ซึ่งการเคลือบที่เลนส์นั้นเป็นการปรับปรุงและปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเลนส์ให้มีคุณสมบัติดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งจากเดิมนั้นได้นำวัสดุจำพวกแก้วมาเคลือบในการทำเป็นเลนส์แว่นตาแต่เนื่องจากแก้วมีน้ำหนักและเปราะแตกได้ง่าย ทั้งนี้อาจมีเลนส์แก้วบางประเภทที่เคลือบสารเคมีที่ผิวเพื่อให้เลนส์เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อสัมผัสแสงสว่าง จึงทำให้เกิดการพัฒนาและเลือกใช้วัสดุโปร่งใสชนิดอื่นแทนมาเคลือบแทน เช่น พลาสติก เนื่องจากพลาสติกมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์เลนส์หลายด้าน เช่น มีน้ำหนักเบา สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ ไม่แตกง่าย แต่พลาสติกก็มีข้อเสียคือ คุณสมบัติในการโปร่งใสและความเรียบเนียนของผิวเลนส์ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เลนส์พลาสติกได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันรวมทั้งมีแนวโน้มที่จะพัฒนาต่อไปในอนาคต



รูปที่ 1.1 แสดงแบบแว่นตาทั่วไป

ที่มา : <http://blog.framesdirect.com/quick-facts-mid-20th-century-eyeglass-styles/>



รูปที่ 1.2 แสดงส่วนแสดงผลที่เคลือบลงบนเลนส์พลาสติก

ที่มา : [http://techfinder.stanford.edu/technology\\_detail.php?ID=28805](http://techfinder.stanford.edu/technology_detail.php?ID=28805)



รูปที่ 1.3 แสดงภาพที่สะท้อนออกมาหลังจากการประมวลผล

ที่มา : <http://www.dmc.tv/pagesความรู้รอบตัว/Google-Glass./html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลือบ คือ การตกตะกอนของไอสารเพื่อสังเคราะห์ฟิล์มบาง โดยจะทำการเคลือบในระบบสุญญากาศระดับสูง สารตั้งต้นจะถูกกระทำให้เป็นไอในระบบสุญญากาศแล้วไอสารนั้น ซึ่งมีได้ทั้ง atom ion ฯลฯ จะตกตะกอนลงบนพื้นผิวที่ต้องการเพื่อสร้างสารเคลือบต่างๆตามความต้องการของผู้ใช้งาน การเคลือบฟิล์มแบ่งอย่างสังเขปได้ 2 แบบ คือ กระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition process: PVD ) และกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงเคมี (Chemical Vapor Deposition process: CVD ) แต่จะเน้นทางด้าน PVD เป็นหลัก กระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ (PVD) ยังแบ่งได้ ดังนี้ ประเภทแรก คือ การทำให้เป็นไอโดยความร้อน (Thermal Evaporation) เป็นการทำให้ฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยเป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศโดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอ ซึ่งสารเคลือบนี้จะพุ่งไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนโตเป็นชั้นฟิล์มบางต่อไป ประเภทต่อมา คือ สเปตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกระดมยิง (bombarded) ด้วยอนุภาคพลังงานสูงจะทำให้เกิดการสึกกร่อนและมีอนุภาคที่ผิวหน้าของวัสดุนั้นหลุดออกมา เนื่องจากการชนของอนุภาคพลังงานสูงกับอนุภาคที่ผิวหน้า โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว และสุดท้ายคือการเคลือบด้วยไอจากการอาร์ค (Arc Vapor Deposition) เป็นใช้การทำให้ขั้วไฟฟ้ากลายเป็นไอภายใต้เงื่อนไขการอาร์คซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของสารที่เป็นไอในการเคลือบ ส่วนมากสารที่หลุดออกมาถูกระเหยโดยความร้อน แต่บางส่วนหลุดออกมาเป็นหยดจากการหลอมเหลวหรืออนุภาคของแข็งจากแคโทด การอาร์คสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างขั้วไฟฟ้าที่อยู่ใกล้ชิดกันในปริภูมิสุญญากาศสูง โดยขั้วไฟฟ้าหนึ่งจะกลายเป็นไอหรือระหว่างขั้วไฟฟ้าในความดันต่ำหรือสภาพแวดล้อมแก๊สความดันสูง (Gaseous Arc)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แสดงข้อดีและข้อเสียของการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์แต่ละแบบ

ประเภทการเคลือบ	ข้อดี	ข้อเสีย
การทำให้เป็นไอโดยความร้อน	กระบวนการเคลือบไม่ซับซ้อน	แรงยึดติดของชั้นเคลือบกับวัสดุรองรับไม่สูงนัก ทำให้หลุดออกได้ง่าย
สปัตเตอร์ริง	เคลือบฟิล์มโลหะได้ดี สามารถปลูกฟิล์มได้หลากหลายชนิด เปลี่ยนเป้าสารเพื่อปรับเปลี่ยนสารประกอบของฟิล์มได้	ต้นทุนการผลิตสูง ระยะเวลาในกระบวนการเคลือบนาน
การเคลือบด้วยไอจากการอาร์ค	ไม่มีความร้อน	ความเสถียรภาพและการเคลื่อนที่ของการอาร์คบนผิวของแข็ง เกิดเม็ดเล็กๆขนาดไมครอนที่ปลดปล่อยออกมาจากผิวของแข็ง

ในส่วนของเป้าสารที่ใช้ในการการเคลือบมี 3 แบบ ได้แก่ โลหะ โลหะออกไซด์และแบบผสม เนื่องจากเป้าโลหะนั้นสามารถเคลือบพลาสติกได้เร็วจึงเลือกใช้เป้าโลหะในการเคลือบ และเป้าโลหะที่นิยมใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์ม ได้แก่ อลูมิเนียม ไทเทเนียม เงิน แพลทินัม เป็นต้น

ตารางที่ 1.2 แสดงข้อดีและข้อเสียของประเภทของเป้าที่ใช้ในการเคลือบ

ประเภทการเคลือบ	ข้อดี	ข้อเสีย
โลหะ	กระบวนการเคลือบไม่ซับซ้อน เคลือบฟิล์มพลาสติกได้เร็ว	ได้ชั้นเคลือบโลหะหนา อนุภาคโลหะที่เคลือบมีขนาดใหญ่
โลหะออกไซด์	มีการส่งผ่านแสงที่สูงในช่วงความยาวคลื่นที่เฉพาะเจาะจงได้	เคลือบบนพื้นผิวที่มีขนาดใหญ่ เช่น บานกระจกประตูหรือหน้าต่างนั้น ต้องลงทุนสูง
ผสม	สามารถควบคุมอัตราการสปัตเตอร์สารเคลือบ	ความบริสุทธิ์ของเป้าสารที่เคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.3 แสดงข้อดีและข้อเสียของตัวอย่างเป่าโลหะที่นิยมใช้เคลือบฟิล์ม

เป่าสาร	ข้อดี	ข้อเสีย
อะลูมิเนียม	คงทนต่อการหัก/การกัดกร่อน ทนความร้อน น้ำหนักเบา สะท้อนแสงได้ดี	ราคาแพง
ไทเทเนียม	มีความเหนียว ป้องกันการกัดกร่อน น้ำหนักเบา	ความแข็งแรงปานกลาง
เงิน	นำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี	มีความอ่อนนุ่มมากเกินไป
แพลทินัม	แวววาว มีความเหนียว ทนต่อการกัดกร่อนมาก	มีความนิ่ม เป็นรอยขีดข่วนง่าย มีน้ำหนักมาก

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการที่จะพัฒนาในส่วนการแสดงผลของเลนส์แว่นตา เพื่อต้องการทำให้เลนส์แว่นตานั้นมีคุณสมบัติในการสะท้อนสูงและมีการดูตกสีต่ำ ทำโดยการเคลือบฟิล์มโลหะลงบนเลนส์พลาสติก เนื่องจากการเคลือบฟิล์มโลหะมีกระบวนการเคลือบฟิล์มที่ไม่ซับซ้อนและสามารถเคลือบฟิล์มพลาสติกได้เร็ว ซึ่งเป่าโลหะที่เลือกใช้ในกระบวนการเคลือบ คือ อะลูมิเนียม เนื่องจากมีความคงทนต่อการหัก มีน้ำหนักเบาและสะท้อนแสงได้ดี ทั้งนี้จะทำการเคลือบโดยกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ในระบบสุญญากาศด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เนื่องจากสามารถเคลือบฟิล์มโลหะได้ดีและเปลี่ยนเป่าสารที่ใช้ในการเคลือบได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เคลือบฟิล์มบางโลหะ โดยกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์
- 2) ฟิล์มบางโลหะ มีคุณสมบัติการสะท้อน 50% และส่วนที่เหลือเป็นการส่งผ่านและการดูตกสี
- 3) ศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงและเชิงกายภาพของฟิล์มบางที่ถูกเคลือบโดยกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เคลือบฟิล์มบางโลหะโดยกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง
- 2) ฟิล์มบางโลหะมีคุณสมบัติการสะท้อน 50% คลาดเคลื่อนไม่เกิน 10% และส่วนที่เหลือเป็นการส่งผ่านและการดูตกสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ตรวจสอบคุณสมบัติเชิงแสงและเชิงกายภาพของฟิล์มบางที่ถูกเคลือบโดยกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ด้วยวิธีสปีตเตอร์ริง

#### 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ

ตารางที่ 1.4 แสดงขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ

การดำเนินงาน	ระยะเวลา												
	มี.ย	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	
ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัย	↔												
ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางโดยกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ด้วยวิธีสปีตเตอร์ริง		↔											
เคลือบฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ						↔							
ตรวจสอบคุณสมบัติเชิงแสงและเชิงกายภาพของฟิล์มบาง									↔				
สร้างชิ้นงานจริงจากเงื่อนไขการทดลอง													↔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ทักษะและความรู้จากการเคลือบฟิล์มบางโลหะด้วยกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิลิกส์ด้วยวิธีสปีดเทอริง
- 2) ได้ทักษะและความรู้จากการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ถูกเคลือบโดยกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิลิกส์ด้วยการทำให้เป็นไอด้วยวิธีสปีดเทอริง
- 3) ได้รับฟิล์มบางโลหะที่มีคุณสมบัติการสะท้อน 50% และส่วนที่เหลือเป็นการส่งผ่านและการดูดกลืน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทัศนศาสตร์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แว่นตาสวมศีรษะกับหน่วยประมวลผลรวม สำหรับจอแสดงผลและแหล่งกำเนิดภาพรวม สำหรับจอแสดงผลและแหล่งกำเนิดภาพรวมนั้น เกิดจากการที่แสงรวมกันแล้วส่งผ่านมายังผู้ใช้งาน ทำให้มองเห็นสภาพแวดล้อมรอบๆ แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะตรงมาสู่ฟิล์มโพลาริซแบบโค้ง เพื่อรวมแสงและสะท้อนแสงออกมาแสดงเป็นรูปภาพทางจอแสดงผล

### 2.1 แสงและการมองเห็น

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทหนึ่ง สามารถเคลื่อนที่ผ่านสุญญากาศได้และมี สมบัติเหมือนคลื่นตามขวางทั่วไป คือ การสะท้อน (Reflection) การหักเห (Refraction) การแทรกสอด (Interference) และการเลี้ยวเบน (Diffraction)

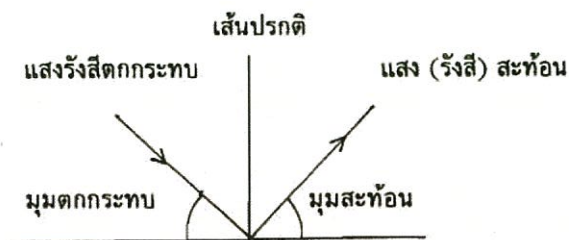
แสงมีสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค แสงประพฤติตัวเป็นคลื่นพบได้ในปรากฏการณ์ของยัง (Young) ทัศนศาสตร์ของฮอยเกนส์ใช้อธิบายการสะท้อนและการหักเห สมบัติความเป็นคลื่นแสงใช้อธิบายการทดลองการเลี้ยวเบนของเฟรสเนล (Fresnel) แต่สมบัติความเป็นคลื่นไม่สามารถใช้อธิบายการเกิดอิเล็กตรอนอิสระบนผิวโลหะเมื่อมีแสงตกกระทบ ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์คอมพ์ตัน และไม่สามารถอธิบายการแผ่รังสีของวัตถุดำได้อย่างสมบูรณ์ ปรากฏการณ์เหล่านี้ต้องใช้สมบัติความเป็นอนุภาคของแสงอธิบายโดยตั้งสมมติฐานว่าแสงเป็นอนุภาคไร้มวล เรียกว่า โฟตอน พลังงานของโฟตอน 1 ตัวมีค่าเท่ากับ  $hf$  เมื่อ  $h$  คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ  $6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  และ  $f$  เป็นความถี่ของแสง ซึ่งจะกล่าวถึงเฉพาะสมบัติความเป็นคลื่นของแสง คลื่นแสงขบวนหนึ่งๆ สามารถแทนด้วยเส้นตรงในทิศการเคลื่อนที่ เรียกเส้นนี้ว่า รังสี (Ray) ของแสง รังสีของแสงจะตั้งฉากกับหน้าคลื่น (Wave front) ของแสง

#### 2.1.1 สมบัติของคลื่นแสง

##### 2.1.1.1 การสะท้อนแสง

การสะท้อนของแสง เป็นปรากฏการณ์ที่แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นค่าหนึ่งมายังตัวกลางที่มีความหนาแน่นอีกตัวหนึ่ง ทำให้แสงตกกระทบกับตัวกลางใหม่แล้วสะท้อนกลับสู่ตัวเดิม เช่น การสะท้อนของแสงจากอากาศกับผิวหน้าของกระจกเงาจะเกิดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าของกระจกเงาราบแล้วกลับสู่อากาศดังเดิม เมื่อแสงตกกระทบกับผิวหน้าของตัวกลางใดๆ ปริมาณและทิศทางของการสะท้อนของแสงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพื้นผิวหน้าของตัวกลางที่ตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงบนกระจกเงา มุมตกกระทบจะทำมุมกับเส้นปกติเท่ากับมุมสะท้อน  
ที่มา : [http://ebook.nfe.go.th/nfe\\_ebook/data\\_o\\_ebook/html/019/171.htm](http://ebook.nfe.go.th/nfe_ebook/data_o_ebook/html/019/171.htm)

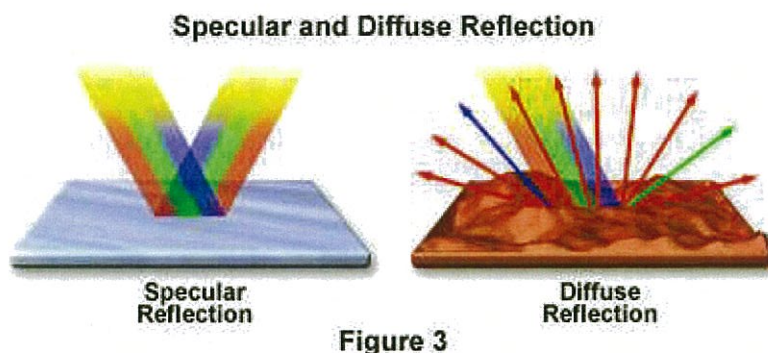
โดยที่ รังสีตกกระทบ (Incident Ray) คือ รังสีของแสงที่พุ่งเข้าหาพื้นผิวของวัตถุ  
รังสีสะท้อน (Reflected Ray) คือ รังสีของแสงที่พุ่งออกจากพื้นผิวของวัตถุ  
เส้นปกติ (Normal) คือ เส้นที่ลากตั้งฉากกับพื้นผิวของวัตถุตรงจุดที่แสงกระทบ  
มุมตกกระทบ (Angle of Incidence) คือ มุมที่รังสีตกกระทบทำกับเส้นปกติ  
มุมสะท้อน (Angle of Reflection) คือ มุมที่รังสีสะท้อนทำกับเส้นปกติ

การสะท้อนปกติ วัสดุที่มีผิวเรียบไม่ว่าจะเป็นวัตถุผิวราบหรือผิวโค้ง การสะท้อนของแสง จะให้ผลเช่นเดียวกัน คือรังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และเส้นปกติ (เส้นแนวฉาก) จะอยู่ในระนาบ เดียวกัน นอกจากนี้มุมตกกระทบและมุมสะท้อนจะมีค่าเท่ากันเสมอ

การสะท้อนกระจาย เราได้เห็นการสะท้อนปกติมาแล้วจากกระจกเงาและวัตถุเรียบมันอื่นๆ เช่น ผิวโลหะต่างๆ แต่วัตถุที่มีผิวขรุขระ เช่น กระดาษ ไม้ และวัตถุทึบแสงอื่นๆ ก็มีการสะท้อนแสง เช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากผิวของวัตถุหยาบ แสงจึงสะท้อนออกไปในหลายทิศทาง เรียกว่า การสะท้อนกระจาย เมื่อพิจารณาบริเวณเล็กๆของผิวขรุขระ จะเห็นว่าประกอบด้วยผิวเรียบจำนวนมาก โดยที่มุมระหว่างผิวเหล่านั้นจะมีค่าต่างๆกัน และมุมตกกระทบจะเท่ากับมุมสะท้อน ณ ตำแหน่งที่แสงตกกระทบเสมอ

การสะท้อนกลับหมด แสงที่เดินทางจากตัวกลางที่โปร่งแสงไปสู่ตัวกลางที่โปร่งใส เช่น จากแก้วไปสู่อากาศ ถ้ามุมตกกระทบน้อยกว่า 42 องศา แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับและบางส่วนจะ ทะลุแก้วออกสู่อากาศ แต่ถ้ามุมที่ตกกระทบแก้วเท่ากับ 42 องศา แสงจะสะท้อนกลับคืนสู่แก้วหมด ไม่มีแสงออกสู่อากาศเลย ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การสะท้อนกลับหมดนั่นคือ รอยต่อระหว่างแก้วกับ อากาศทำหน้าที่เสมือนการตกกระทบที่จะทำให้แสงสะท้อนกลับหมด ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ ชนิดของตัวกลาง การมองผ่านแผ่นกรองแสงสีต่าง ๆ ทำให้เราเห็นปรากฏการณ์ของแสงที่น่าสนใจ เช่น แผ่นกรองแสงสีแดงจะสะท้อนและยอมให้แสงสีแดงทะลุผ่านออกไปได้ เราจึงเห็นแผ่นกรองแสง นั้นมีสีแดง แผ่นกรองแสงสีเหลืองจะสะท้อนและยอมให้แสงสีแดงและสีเขียวทะลุผ่านออกไปได้ เพราะว่าแสงสีเหลืองเป็นสีทุติยภูมิซึ่งเกิดจากแสงสีแดงและสีเขียวรวมกัน ถ้าเรามองผ่านแผ่นกรอง แสงสีต่างๆ เพื่อวัตถุอย่างหนึ่ง จะเห็นวัตถุนั้นมีสีต่างไปจากการมองวัตถุในแสงขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบรังสีสะท้อนบนผิวเรียบและผิวขรุขระ

ที่มา : <https://sites.google.com/site/nidchakoonsriaoodno1242/kar-sathxn-khxng-saeng>

ในการสะท้อนของแสงกับผิวของวัตถุ ถ้าผิวของวัตถุเรียบแสงที่สะท้อนออกมาจะเป็นระเบียบ ภาพที่มองเห็นจากการสะท้อนจึงชัดเจน แต่ถ้าผิวสะท้อนขรุขระ รังสีสะท้อนจะไม่มีระเบียบ จะมองเห็นภาพจากการสะท้อนไม่ชัด

#### 2.1.1.2 การหักเหของแสง

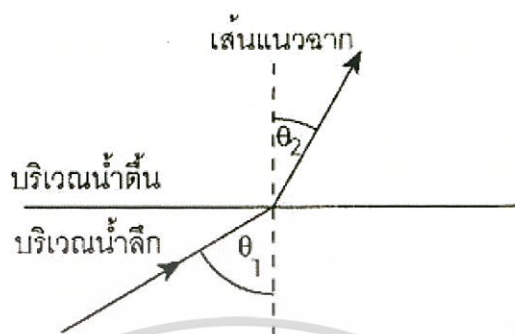
การหักเหของแสง (Refraction) หมายถึง การเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงเมื่อแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางชนิดหนึ่งไปยังอีกตัวกลางชนิดหนึ่งที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน สาเหตุที่ทำให้แสงหักเหเนื่องจากอัตราเร็วของแสงในตัวกลางทั้งสองไม่เท่ากัน การหักเหของแสงเกิดขึ้นตรงผิวรอยต่อของตัวกลาง ลักษณะการหักเหของแสง เมื่อแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยเข้าสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่า แสงจะหักเหเข้าหาเส้นปกติในทางตรงกันข้ามถ้าแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากเข้าสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า แสงจะหักเหออกจากเส้นปกติ ซึ่งในขณะที่แสงเกิดการหักเหก็จะเกิดการสะท้อนของแสงขึ้นพร้อมๆกันด้วย เมื่อแสงเดินทางผ่านวัตถุหรือตัวกลางโปร่งใส เช่น อากาศ แก้ว น้ำ พลาสติกใส แสงจะสามารถเดินทางผ่านได้เกือบหมด เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางชนิดเดียวกัน แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรงเสมอ แต่ถ้าแสงเดินทางผ่านตัวกลางหลายตัวกลาง แสงจะหักเห

สาเหตุที่ทำให้แสงเกิดการหักเห เกิดจากการเดินทางของแสงจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลาง หนึ่งซึ่งมีความหนาแน่นแตกต่างกัน จะมีความเร็วไม่เท่ากันด้วย โดยแสงจะเคลื่อนที่ในตัวกลางโปร่งกว่าได้เร็วกว่าตัวกลางที่ทึบกว่า เช่น ความเร็วของแสงในอากาศมากกว่าความเร็วของแสงในน้ำ และความเร็วของแสงในน้ำมากกว่าความเร็วของแสงในแก้วหรือพลาสติก

การที่แสงเคลื่อนที่ผ่านอากาศและแก้วไม่เป็นแนวเส้นตรง เดียวกันเพราะเกิดการหักเหของแสง โดยแสงจะเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า (โปร่งกว่า) ไปยังตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่า (ทึบกว่า) แสงจะหักเหเข้าหาเส้นปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางตรงข้ามถ้าแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่าไปยังตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า แสงจะหักเหออกจากเส้นปกติ



รูปที่ 2.3 แสดงการหักเหเมื่อคลื่นเดินทางจากน้ำลึกไปสู่น้ำตื้น  
ที่มา : <http://kruweerajit1.blogspot.com/p/blog-page.html>

กฎของสเนลล์ (Snell's Law)

สำหรับตัวกลางคู่หนึ่งๆ อัตราส่วนของค่า  $\sin$  ของมุมในตัวกลางตกกระทบ (ตัวกลางที่ 1 :  $\theta_1$ ) ต่อค่า  $\sin$  ของตัวกลางในมุมหักเห (ตัวกลางที่ 2 :  $\theta_2$ ) จะมีค่าคงที่เสมอ จากกฎของสเนลล์เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2.1)$$

หรือ

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (2.2)$$

โดยที่	$\theta_1$	คือ	มุมตกกระทบในตัวกลาง 1
	$\theta_2$	คือ	มุมตกกระทบในตัวกลาง 2
	$v_1$	คือ	อัตราเร็วของคลื่นตกกระทบในตัวกลาง 1
	$v_2$	คือ	อัตราเร็วของคลื่นตกกระทบในตัวกลาง 2
	$\lambda_1$	คือ	ความยาวคลื่นตกกระทบในตัวกลาง 1
	$\lambda_2$	คือ	ความยาวคลื่นตกกระทบในตัวกลาง 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมวิกฤต ( $\theta_c$ ) คือ มุมตกกระทบที่ทำให้มุมหักเหเป็น  $90^\circ$  ในการคำนวณมุมวิกฤตเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\frac{\sin\theta_c}{\sin 90^\circ} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \sqrt{\frac{d_1}{d_2}} \quad (2.3)$$

โดยที่  $d$  คือ ความลึกของน้ำ

### 2.1.1.3 การแทรกสอดของแสง

การแทรกสอด เกิดขึ้นจากการที่คลื่นต่อเนื่องจากแหล่งกำเนิดอาพันธ์สองคลื่นที่มีความถี่คงที่ ความยาวคลื่นและอัตราเร็วคลื่นคงที่) ตั้งแต่สองแหล่งกำเนิดขึ้นไปเดินทางมาพบกันจะเกิดการแทรกสอดหรือเกิดการรวมกันของคลื่น

ถ้าให้ ช่องแคบ  $S_1$  และ  $S_2$  เป็นแหล่งกำเนิดแสงห่างกันเป็นระยะ  $d$  เมื่อแสงเดินทางจากช่องแคบมาถึงฉากด้วยระยะทางที่ต่างกัน เดินทางมาพบกันบนจุดเดียวกันคือจุด P จะได้ผลต่าง  $S_1P$  กับ  $S_2P$



รูปที่ 2.4 แสดงการแทรกสอดของแสงจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่งที่เดินทางมาพบกันที่จุดเดียว

ที่มา : <http://slideplayer.in.th/slide/2854551/>

จากภาพการแทรกสอดของแสง พบว่า

$$S_2P - S_1P = d \sin \theta \quad (2.4)$$

เนื่องจากมุม  $\theta$  เป็นมุมน้อยๆ จะได้ว่า  $\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{L}$  (2.5)

สามารถสรุปสมการที่ใช้คำนวณเกี่ยวกับสลิตคู่ ดังนี้

เอก.1: เมื่อ  $S_1$  และ  $S_2$  มีเฟสตรงกัน การบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแทรกสอดแบบเสริม (แนวกลางเป็นแนวปฏิบัติ  $A_0$ )

$$S_2P - S_1P = n\lambda \quad (2.6)$$

$$d\sin\theta = n\lambda \quad (2.7)$$

$$d\frac{y}{L} = n\lambda \quad (2.8)$$

โดยที่  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

การแทรกสอดแบบหักล้างกัน

$$S_2P - S_1P = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2.9)$$

$$d\sin\theta = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2.10)$$

$$d\frac{y}{L} = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2.11)$$

โดยที่  $n = 1, 2, 3, \dots$

2. เมื่อ  $S_1, S_2$  มีเฟสตรงข้ามกัน

การแทรกสอดแบบเสริมกัน

$$S_2P - S_1P = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2.12)$$

$$d\sin\theta = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2.13)$$

$$d\frac{y}{L} = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2.14)$$

โดยที่  $n = 1, 2, 3, \dots$

การแทรกสอดแบบหักล้างกัน (แนวกลางเป็นแนวปฏิบัติ  $N_0$ )

$$S_2P - S_1P = n\lambda \quad (2.15)$$

$$d\sin\theta = n\lambda \quad (2.16)$$

$$d\frac{y}{L} = n\lambda \quad (2.17)$$

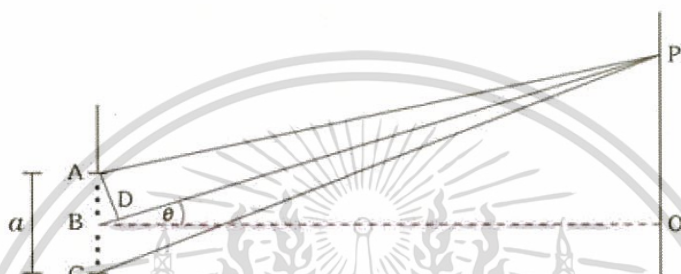
โดยที่  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

#### 2.1.1.4 การเลี้ยวเบนของแสง

เมื่อให้แสงผ่านสลิตที่แคบ (คือความยาวมากกว่าความกว้างของสลิตมาก) จะเกิด

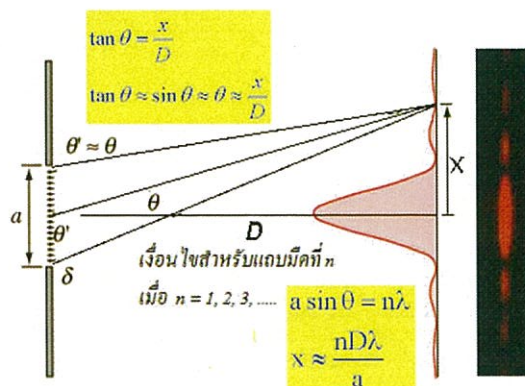
ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนมีผลให้แถบสว่างกลางมีขนาดกว้างกว่าสลิต นอกจากนี้ถัดจากแถบสว่าง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สมานไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
กลางออกไปทั้งสองข้างยังมีแถบสว่างและแถบมืดสลับกันไป ซึ่งสามารถอธิบายเมื่อใช้แสงความยาว  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นเดี่ยวจากหลอดไฟส่องผ่านสลิตเดี่ยว โดยให้หลอดไฟอยู่ห่างจากสลิตเดี่ยวไกลมากๆ เมื่อเทียบกับความกว้างของสลิต เราจึงอาจประมาณได้ว่าคลื่นแสงที่มาตกกระทบสลิตนั้นเป็นคลื่นระนาบ โดยใช้หลักการของฮอยเกนส์ที่ถือว่าทุกจุดบนสลิตจะทำหน้าที่เหมือนแหล่งกำเนิดคลื่นอาพันธ์ใหม่และคลื่นจากแหล่งกำเนิดนี้เมื่อพบกันจะแทรกสอดแบบหักล้างหรือแบบเสริม จึงทำให้เกิดแถบมืดแถบสว่าง โดยแถบสว่างกลางจะกว้างและสว่างที่สุด ถ้าความกว้างของสลิตเพิ่มความกว้างของแถบสว่างจะแคบลง แต่ถ้าความกว้างของสลิตแคบลง ความกว้างของแถบสว่างกลางจะเพิ่มขึ้น ส่วนแถบสว่างที่อยู่ถัดไปจะมีความสว่างลดลงตามลำดับ การเกิดแถบมืด แถบสว่างอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดแถบมืด แถบสว่างต่างๆบนฉากเมื่อแสงผ่านสลิตเดี่ยว  
ที่มา : <http://wipha-guntawong.blogspot.com/2011/01/blog-post.html>

สำหรับการเกิดแถบสว่างที่ O ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางฉากที่อยู่ไกลสลิต อธิบายได้ดังนี้ ตามรูป 2.5 ตามหลักของฮอยเกนส์ ทุกจุดบนสลิตเดี่ยว AC จะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีเฟสตรงกันและกระจายแสงออกโดยรอบ O ห่างจากทุกคู่ จุดบน AB และ AC เท่ากัน ดังนั้นคลื่นแสงจากทั้งสองส่วนนี้จึงแทรกสอดแบบเสริมกันตลอดเวลา จุด O จึงเป็นจุดกึ่งกลางของแถบสว่าง



รูปที่ 2.6 แสดงการเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว

[http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh\\_21.htm](http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_21.htm)

สมการการแทรกสอดของแสงจากการเลี้ยวเบนผ่านสลิตเดี่ยว

การแทรกสอดแบบเสริมกัน (Anti-Node)

$$S_2P - S_1P = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2.18)$$

$$d \sin \theta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2.19)$$

$$d \frac{x}{L} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2.20)$$

โดยที่  $n = 1, 2, 3, \dots$

การแทรกสอดแบบหักล้างกัน (Node)

$$S_2P - S_1P = n\lambda \quad (2.21)$$

$$d \sin \theta = n\lambda \quad (2.22)$$

$$d \frac{x}{L} = n\lambda \quad (2.23)$$

โดยที่  $d =$  ความกว้างของช่องสลิต (เมตร)

$\theta =$  มุมที่เบนไปจากแนวกลาง

$n =$  จำนวนเต็มบวก ( 1, 2, 3, .... )

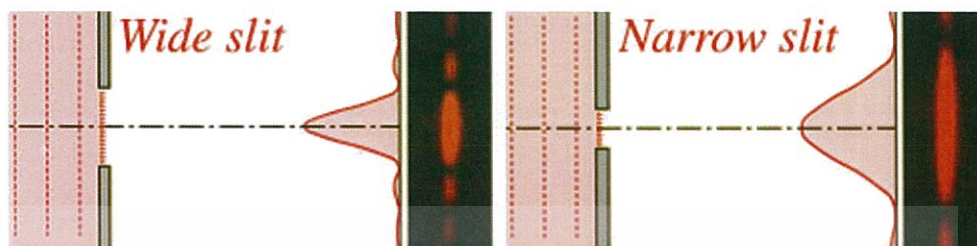
$\lambda =$  ความยาวคลื่นแสง (เมตร)

$x =$  ระยะจากกึ่งกลางของแถบสว่างกลางถึง กึ่งกลางของแถบมืดที่  $n$  ใด ๆ

$L =$  ระยะจากช่องเดี่ยวถึงฉาก (เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเราแบ่งช่องเดี่ยวออกเป็นสองส่วนเท่าๆ กัน คือครึ่งบนและครึ่งล่าง แสงจากแหล่งกำเนิดแสงใหม่ครึ่งบนจะทำให้เกิดแถบมืดแถบสว่างด้านบนของแถบสว่างกลาง และแสงจากแหล่งกำเนิดแสงใหม่ครึ่งล่างจะทำให้เกิดแถบมืดแถบสว่างด้านล่างของแถบสว่างกลาง



รูปที่ 2.7 แสดงการเลี้ยวเบนผ่านช่องเดี่ยวที่มีความกว้างต่างกัน

ที่มา : [http://www.sa.ac.th/winyoo/light/light\\_physical/diffraction\\_light.htm](http://www.sa.ac.th/winyoo/light/light_physical/diffraction_light.htm)

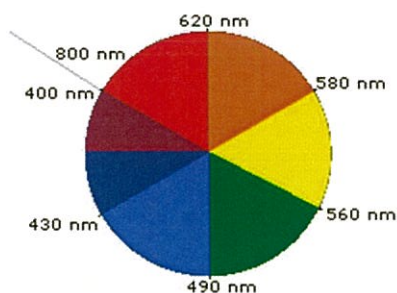
### 2.1.2 อัตราเร็วแสง

อัตราเร็วของแสง (Speed of light) ในสุญญากาศมีนิยามว่าเท่ากับ 299,792,458 เมตรต่อวินาที ค่านี้เขียนแทนด้วยตัว  $c$  และเรียกว่าเป็นค่าคงที่ของอินส์ไตน์ แสงเป็นสิ่งที่แปลกประหลาด นั่นคือไม่ว่าผู้สังเกตจะเคลื่อนที่หรือหยุดนิ่ง ไม่ว่าจะอยู่ในสถานที่ใดด้วยเงื่อนไขใดอัตราเร็วของแสงที่ผู้สังเกตคนนั้นวัดได้จะเท่าเดิมเสมอ ซึ่งขัดกับความรู้สึกของคนทั่วไปแต่เป็นไปตามทฤษฎีสัมพัทธภาพของอัลเบิร์ต ไอน์สไตน์

สังเกตว่าอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศเป็นนิยามไม่ใช่การวัด ในหน่วย SI กำหนดให้ เมตรมีนิยามว่าเป็นระยะทางที่แสงเดินทางในสุญญากาศในเวลา  $1/299,792,458$  วินาที แสงที่เดินทางผ่านตัวกลางโปร่งแสง (คือไม่เป็นสุญญากาศ) จะมีอัตราเร็วต่ำกว่า  $c$  อัตราส่วนของ  $c$  ต่ออัตราเร็วของแสงที่เดินทางผ่านในตัวกลาง เรียกว่า ดรรชนีหักเหของตัวกลางนั้น

### 2.1.3 ความยาวคลื่น

คลื่นแสงที่ตาของมนุษย์สามารถมองเห็นได้อยู่ในช่วงประมาณ 400-800 nm แสดงดังรูป 2.9 ถ้านัยน์ตาถูกกระตุ้นด้วยแสงตลอดทั้งช่วงความยาวคลื่น (400-800 nm) ผลก็คือจะมองเห็นแสงนั้นเป็นแสงขาว แต่ถ้าคลื่นแสงถูกดูดกลืนแสงไปบางส่วน แสงที่ตามองเห็นจะเป็นสีผสม (complementary) หรือสีที่อยู่ตรงข้ามของสีที่ถูกดูดกลืนเมื่อเทียบตามวงล้อสี ดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงวงล้อสี

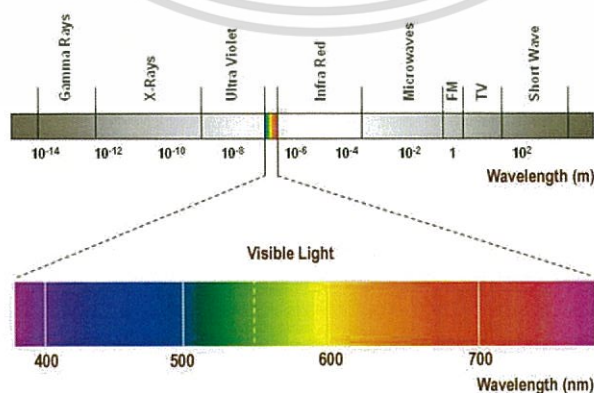
ที่มา : [http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page1\\_4.html](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page1_4.html)

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนกับสีของสารที่มองเห็นมีประโยชน์  
สำหรับการทำนายว่าสารประกอบที่มีสีจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงใด แสดงดังตาราง  
2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงในช่วงที่ตามองเห็น

แสง	ช่วงความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
ม่วง	380-425
น้ำเงิน	425-480
เขียว	480-570
เหลือง	570-590
แสด	590-610
แดง	610-720

ที่มา <http://www.trueplookpanya.com/examination/answer/4206>



รูปที่ 2.9 แสดงสเปกตรัมของแสงที่มีความยาวคลื่นช่วงต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิจัยทางเคมีใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ที่มา : <http://chemistryprc1.wix.com/atom404#!bohr/cjsb>  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

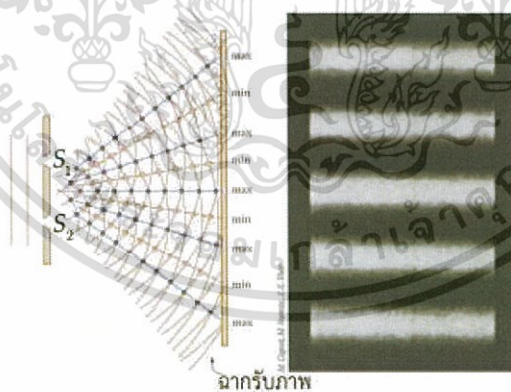
## 2.2 การแทรกสอดของแสง

### 2.2.1 การแทรกสอดของคลื่นแสง (Optical Interference)

การแทรกสอดของคลื่นคือการรวมกันของคลื่นหลายขบวน โดยผลลัพธ์ของการรวมคลื่นจะหาได้จากการรวมกันแบบพีชคณิตโดยตรง ซึ่งการรวมคลื่นมีทั้งการรวมแบบเสริมกันและแบบหักล้างกัน เมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งจะเกิดการรวมคลื่นเสมอ แต่อาจไม่เห็นผลของการแทรกสอดเนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงต่างเป็นอิสระจากกัน ทำให้ความต่างเฟสของแสงจากแต่ละแหล่งไม่คงที่และเปลี่ยนไปตามเวลา (ซึ่งเร็วมาก) จึงไม่เห็นผลของการแทรกสอด ดังนั้นเงื่อนไขสำคัญเพื่อสังเกตผลของการแทรกสอดด้วยตาเปล่า คือความต่างเฟสที่คงตัว แม้ว่าเฟสของคลื่นอาจเปลี่ยนตามเวลาแต่แหล่งกำเนิดต้องมีความต่างเฟสคงที่ เรียกว่า แหล่งกำเนิดอาพันธ์ (Coherent) และแหล่งกำเนิดแสงนั้นควรจะมีสีเดียว (Monochromatic) คือ มีความยาวคลื่นหรือความถี่ค่าเดียว

#### การทดลองช่องเปิดคู่ของยัง (Young's Double-Slit Experiment)

วิธีหนึ่งในการสร้างแหล่งกำเนิดอาพันธ์คือการทำช่องเปิดเล็กๆสองช่องแล้วให้แสงต้นกำเนิดส่องผ่านช่องเปิดทั้งสอง แม้ว่าเฟสของแสงที่ออกจากต้นกำเนิดจะเปลี่ยนตามเวลาแต่แสงที่ลอดออกมาจากช่องเปิดนั้นเป็นแสงจากต้นกำเนิดจริงเดียวกัน ดังนั้นความต่างเฟสของคลื่นที่ออกมาจากช่องเปิดทั้งสองจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แสงจากช่องเปิดทั้งสองจึงเป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์เมื่อแสงเดินทางผ่านช่องเปิดจะเกิดการเลี้ยวเบนแล้วไปเกิดการแทรกสอด ซึ่งสามารถสังเกตผลการแทรกสอดของแสงได้โดยให้แสงจากช่องเปิดไปตกบนฉากรับภาพ

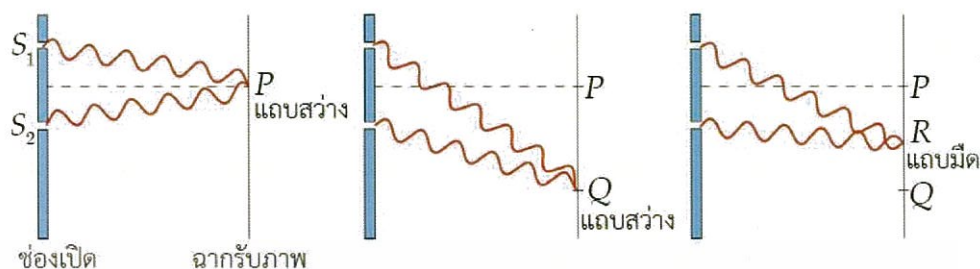


รูปที่ 2.10 แสดงการทดลองช่องเปิดคู่ของยัง

ที่มา : <http://slideplayer.in.th/slide/2091159/>

ผลที่ได้บนฉากคือภาพของแถบสว่างและแถบมืดสลับกันโดยมีแถบสว่างกลางอยู่บริเวณแนวกลางจากช่องเปิดทั้งสองตามด้วยแถบมืดและแถบสว่างสลับกันไปซึ่งเป็นผลจากการแทรกสอดของแสงที่ออกมาจากช่องเปิดทั้งสอง ให้  $S_1$  และ  $S_2$  แทนแหล่งกำเนิดแสง จากรูปแบบการแทรกสอดด้านล่างจะเห็นว่าแถบสว่างกลางที่จุด P และแถบสว่างอันดับถัดไปที่จุด Q เกิดจากการแทรกสอดเอกภาคของคลื่น ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเสริมกันของแสงจาก  $S_1$  และ  $S_2$  แถบมืดที่จุด R เกิดจากการแทรกสอดแบบหักล้างกันของแสงจาก  $S_1$  และ  $S_2$



รูปที่ 2.11 แสดงการเกิดแถบสว่างและแถบมืดบนฉาก

ที่มา : <http://pueng1.blogspot.com/2013/01/blog-post.html>

ที่จุด P แสงจาก  $S_1$  และ  $S_2$  เดินทางเป็นระยะทางเท่ากัน ถ้าพิจารณาการแกว่งกวัดของสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิด  $S_1$  และ  $S_2$  ที่ตกลงบนจุด P มีเฟสตรงกัน (คงที่และไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา) ผลรวมของคลื่นเป็นแบบเสริมกันจึงเห็นเป็นแถบสว่าง (คลื่นรวมมีแอมพลิจูดเป็นสองเท่าและมีการแกว่งกวัดเร็วมาก ซึ่งตาเราแยกการกระพริบของแสงไม่ออก)

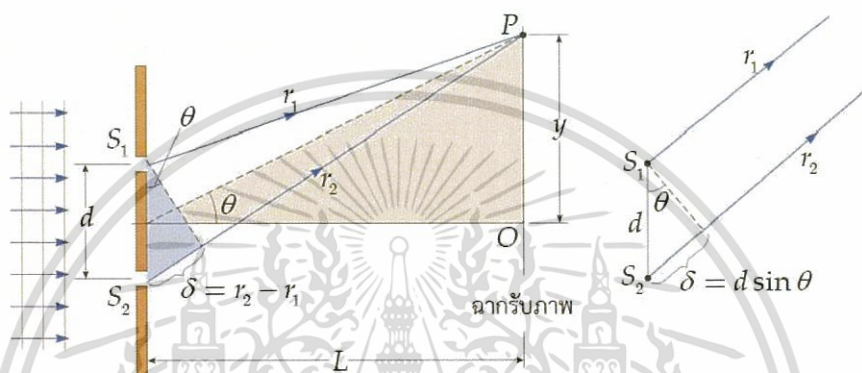
ที่จุด Q แสงจาก  $S_1$  เดินทางไกลกว่า  $S_2$  เป็นระยะทางเท่ากับ 1 ความยาวคลื่นพอดีซึ่งระยะทางที่ต่างกัน (Path difference,  $\delta$ ) นี้จะเลื่อนขบวนคลื่นที่รวมกันที่จุด Q ออกไป  $1 \lambda$  พอดี ถ้าพิจารณาการแกว่งกวัดของสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิด  $S_1$  และ  $S_2$  (ซึ่งเลื่อนไป  $1 \lambda$ ) ที่จุด Q จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าที่ตกลงบนฉากจะมีเฟสตรงกัน ผลรวมของคลื่นเป็นแบบเสริมกันจึงเห็นเป็นแถบสว่าง

ที่จุด R แสงจาก  $S_1$  เดินทางไกลกว่า  $S_2$  เป็นระยะทางเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นพอดี ซึ่งระยะทางที่ต่างกันนี้จะเลื่อนขบวนคลื่นที่รวมกันที่จุด R ออกไป  $\frac{1}{2} \lambda$  พอดี ถ้าพิจารณาการแกว่งกวัดของสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิด  $S_1$  และ  $S_2$  (ซึ่งเลื่อนไป  $\frac{1}{2} \lambda$ ) ที่จุด R จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าที่ตกลงบนฉากจะมีเฟสตรงข้ามกัน (คงที่และไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา) ผลรวมของคลื่นเป็นแบบหักล้างกันจึงเห็นเป็นแถบมืด (คลื่นรวมมีแอมพลิจูดเป็นศูนย์เสมอและไม่มีการแกว่งกวัด)

จะเห็นว่าสิ่งสำคัญที่มีผลต่อรูปแบบการแทรกสอดบนฉากคือระยะทางที่ต่างกัน  $\delta$  ของแสงจากแหล่งกำเนิด จะเห็นว่าในระบบนี้ถ้า เป็นจำนวนเต็มของความยาวคลื่น  $\delta$  ผลรวมของคลื่นจะเป็นแบบเสริมกันเห็นเป็นแถบสว่าง (Bright fringes) และถ้า  $\lambda$  เป็นจำนวนครึ่งของความยาวคลื่น  $\lambda$  ผลรวมของคลื่นจะเป็นแบบหักล้างกันเห็นเป็นแถบมืด (Dark fringes) สามารถสรุปความสัมพันธ์ได้

$$\delta = \begin{cases} m\lambda & m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad \text{สว่าง} \\ \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda & m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad \text{มืด} \end{cases} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $m$  เป็นจำนวนเต็มแทนจำนวนลูกคลื่นที่ต่างกัน เครื่องหมายบวกและลบใช้เพียงเพื่อแสดงว่าระยะทางจาก  $S_2 > S_1$  หรือ  $S_1 > S_2$  ทั้งนี้ค่าของ  $\delta$  หาได้จากระยะต่าง ๆ ของระบบดังนี้



รูปที่ 2.12 แสดงระยะต่าง ๆ ในการทดลองของยัง (Young)

ที่มา : <http://slideplayer.in.th/slide/2090717/>

จากรูป ให้ช่องเปิดทั้งสองห่างกันเป็นระยะ  $d$  ระยะจากช่องเปิดไปยังฉากเป็น  $L$  ระยะทางที่แสงเดินทางจาก  $S_1$  และ  $S_2$  ไปถึงฉากที่จุด  $P$  เป็น  $r_1$  และ  $r_2$  ดังนั้นระยะทางที่แสงเดินทางต่างกันจะเท่ากับ  $r_2 - r_1$  ทั้งนี้เมื่อมองจากช่องเปิดไปที่จุด  $P$  จะทำมุม  $\theta$  กับแนวกลาง โดยทั่วไปฉากกับช่องเปิดจะอยู่ห่างกันมากและระยะ  $L$  จะมากกว่า  $d$  มาก ( $L \gg d$ ) ประมาณได้ว่าทางเดินของแสง  $r_1$  และ  $r_2$  ขนานกัน ( $r_1 \parallel r_2$ ) จากรูปจะได้ระยะทางของแสงที่ต่างกันคือ

$$\delta = d \sin \theta \quad (2.25)$$

จะได้เงื่อนไขของมุมที่บอกตำแหน่งของแถบสว่างและแถบมืดบนฉากเป็น

$$\begin{aligned} d \sin \theta_{\text{bright}} &= m\lambda & m &= 0, \pm 1, \pm 2 \\ d \sin \theta_{\text{dark}} &= \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda & m &= 0, \pm 1, \pm 2 \end{aligned} \quad (2.26)$$

สังเกตว่าสำหรับเงื่อนไขแถบสว่าง เมื่อ  $m = 0$  มุม  $\theta_{\text{bright}} = 0$  ซึ่งเป็นตำแหน่งของแถบสว่างกลางที่วางตัวบนแนวกลาง และเมื่อ  $m = 1, 2, 3, \dots$  จะเป็นแถบสว่างอันดับที่  $1, 2, 3, \dots$  ซึ่งไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สอดคล้องกับระยะทางที่ต่างกันเป็น  $1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$  ไปเรื่อย ๆ

สำหรับเงื่อนไขแถบมืด เมื่อ  $m=0$  จะได้ผลต่างของระยะทางเป็น  $\frac{1}{2}\lambda$  ทำให้เกิดแถบมืดอันดับที่ 1 และเมื่อ  $m=1,2,3,\dots$  จะได้ผลต่างของระยะทางเป็น  $\frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \frac{7}{2}\lambda, \dots$  ทำให้เกิดแถบมืดอันดับที่ 2,3,4,... ไปเรื่อย ๆ ซึ่งค่าของ  $m$  ใช้เพียงเพื่อความสมบูรณ์ของสมการไม่มีความหมายแทนอันดับในการแทรกสอดของแสง

เมื่อรู้มุม  $\theta$  ที่เกิดแถบต่าง ๆ จะหาระยะหรือตำแหน่งของแถบนั้น ๆ เทียบกับแถบสว่างกลางได้ โดยใช้ความสัมพันธ์

$$y = L \tan \theta \quad (2.27)$$

ทั้งนี้ถ้าตำแหน่งของแถบนั้นเกิดขึ้นที่มุม  $\theta$  เล็กๆจะประมาณค่าของ  $y$  ได้จาก

$$\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta \quad (2.28)$$

จะได้

$$y = L \sin \theta \quad (2.29)$$

$$y_{\text{bright}} = m\lambda \frac{L}{d} \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.30)$$

$$y_{\text{dark}} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \frac{L}{d} \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีมุมเล็กเท่านั้น การประมาณมุมเล็กอาจดูแปลกแต่ถ้าลองคำนวณค่าจากเครื่องคำนวณจะพบว่า การประมาณนี้ให้ค่าที่เชื่อถือได้ถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 3 เมื่อมุม  $\theta < 0.114$  rad หรือประมาณ  $7^\circ$  และถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 2 เมื่อมุม  $\theta < 0.25$  rad หรือประมาณ  $14^\circ$  ดังนั้นการใช้สมการนี้ต้องพึงระลึกว่าคำตอบที่ได้จะคลาดเคลื่อนจากค่าจริงเมื่อมุมใหญ่ขึ้น

## 2.2.2 การแทรกสอดในฟิล์มบางชั้นเดียว

เมื่อแสงเดินทางไปที่ตกกระทบฟิล์มบาง (เช่น ฟองสบู่) แสงบางส่วนจะสะท้อนที่รอยต่อของอากาศกับผิวฟิล์ม (ลำแสงที่ 1) แสงบางส่วนจะผ่านเข้าไปในเนื้อฟิล์มแล้วสะท้อนที่รอยต่อของผิวฟิล์มกับอากาศอีกด้านหนึ่ง (ลำแสงที่ 2) ลำแสงที่ 1 กับ 2 เป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์เพราะมีต้นกำเนิดแสงเดียวกัน ถ้าฟิล์มบางมากแอมพลิจูดของลำแสงที่ 1 กับ 2 ใกล้เคียงกันจะสังเกตเห็นผลการแทรกสอดของแสงได้

พิจารณาเส้นทางเดินของแสงและดัชนีหักเหของฟิล์ม ( $n > 1$ ) แสงจากแหล่งกำเนิดเดินทางผ่านอากาศ (ดัชนีหักเหเท่ากับ 1) มาตกกระทบผิวฟิล์ม แสงบางส่วนจะสะท้อนที่ผิวฟิล์มซึ่งมีดัชนีหักเหมากกว่าทำให้ลำแสงที่ 1 มีเฟสเปลี่ยนไป  $180^\circ$  (เทียบกับต้นกำเนิด) และแสงจากต้นกำเนิดบางส่วนเป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า บางส่วนจะผ่านเข้าไปในเนื้อฟิล์มที่หนา  $t$  แล้วสะท้อนที่รอยต่อระหว่างฟิล์มกับอากาศซึ่งมีดัชนีหักเหไม่ต่ำกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยกว่าทำให้ลำแสงที่ 2 มีเฟสเช่นเดียวกับต้นกำเนิด ลำแสงนี้จะสะท้อนออกจากเนื้อฟิล์มที่หนา  $t$  ไปแทรกสอดกับลำแสงที่ 1 ดังนั้นที่ผิวฟิล์มลำแสงที่ 1 และ 2 มีเฟสต่างกัน  $180^\circ$  จากรูปลำแสงที่ 2 เดินทางไกลกว่าลำแสงที่ 1 เป็นระยะทางที่ผ่านเข้าไปในเนื้อฟิล์มแล้วสะท้อนออกเท่ากับ

$$\delta = 2 \frac{t}{\cos \theta_r} \quad (2.31)$$

โดยที่  $\theta_r$  คือ มุมที่ลำแสงหักเหในเนื้อฟิล์ม เพื่อความสะดวกจะประมาณว่าแสงจากต้นกำเนิดตกกระทบเกือบตั้งฉากกับผิวฟิล์มทำให้  $\theta_r$  เล็กมาก ( $\theta_r \approx 0$ ) จะได้ผลต่างของระยะทาง  $\delta \approx 2t$

คลื่นที่เดินทางในตัวกลางจะมีความถี่คงเดิม แต่เนื่องจากคลื่นเดินทางช้าลงดังนั้นความยาวคลื่นจะสั้นลงเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นในสุญญากาศ ( $\lambda$ ) ความยาวคลื่นของแสงในเนื้อตัวกลางที่มีดัชนีหักเห  $n$  จะเท่ากับ

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \quad (2.32)$$

เนื่องจากลำแสงทั้งสองมีเฟสต่างกัน  $180^\circ$  ดังนั้นเงื่อนไขของแสงที่จะสะท้อนออกมาแล้วแทรกสอดแบบเสริมกัน คือ

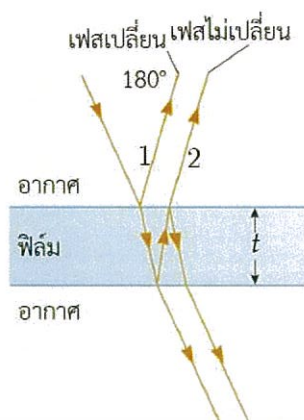
$$\delta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda_n \approx 2t \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2.33)$$

เงื่อนไขการแทรกสอดแบบหักล้างกัน คือ

$$\delta = m \lambda_n \approx 2t \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2.34)$$

สังเกตว่าเงื่อนไขการแทรกสอดขึ้นกับความยาวคลื่นและความหนาของฟิล์ม ทั้งนี้จำนวนเต็ม  $m$  จะสัมพันธ์กับความหนาคือเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นเงื่อนไขการแทรกสอดจะมีจำนวนคลื่น  $m$  มากขึ้น จะเห็นว่าที่ความหนา  $t$  ค่าหนึ่ง ๆ ถ้าให้แสงขาว (ซึ่งเป็นแสงที่ประกอบด้วยแสงหลายสี) ตกกระทบฟิล์ม แสงที่มีความยาวคลื่นตรงกับเงื่อนไขการแทรกสอดแบบเสริมกันจะสะท้อนออกมาได้ดีที่สุดจึงเห็นแสงบางสีสะท้อนออกมาเท่านั้น (เช่น แสงสีต่าง ๆ ที่สะท้อนจากฟองสบู่) ข้อสำคัญประการหนึ่งคือเมื่อหนาฟิล์มมากขึ้น แอมพลิจูดของลำแสงที่ 2 จะน้อยกว่าลำแสงที่ 1 มากเนื่องจากการสูญเสียในเนื้อฟิล์ม ทำให้ผลการแทรกสอดไม่ชัดเจนและมองไม่เห็นเมื่อฟิล์มหนามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากฟิล์มบาง  
ที่มา : <http://slideplayer.in.th/slide/2091159/>

## 2.3 การส่องผ่านแสง การดูดกลืนแสง และการสะท้อนแสง

### 2.3.1 การส่องผ่านแสง

เป็นคุณสมบัติพื้นผิวที่เกิดขึ้นในเฉพาะตัวกลางโปร่งแสง (Semitransparent) หมายถึงคุณลักษณะอย่างหนึ่งของผิวที่ยอมให้รังสีผ่านทะลุ เรียกว่า Transmissivity (J) โดยใช้ Hemispherical Transmissivity จะได้ค่าการส่องผ่านของสเปกตรัมว่าเป็นส่วนหนึ่งของการแผ่รังสี (G) ที่ผ่านทะลุพื้นผิว ดังนั้น

$$\rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (2.35)$$

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.36)$$

ถ้าเป็นผิวทึบ (opaque) ซึ่ง  $\tau_{\lambda} = 0$  หรือ  $\tau = 0$  จะได้  $(2.37)$

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1 \text{ และ } \alpha + \rho = 1 \quad (2.38)$$

สำหรับวัตถุดำ  $\rho = 0$  เสมอ นั่นคือถ้าเป็นวัตถุดำและเป็นผิวทึบจะได้  $\alpha = 1$

### 2.3.2 การดูดกลืนแสง

การดูดกลืน คือ การที่แสงถูกดูดกลืนหายไปในตัวกลางทั่วไปเมื่อมีพลังงานแสงถูกดูดกลืนหายไปในตัวใด ๆ

ในคุณสมบัติอย่างหนึ่งของพื้นผิวในการดูดกลืนรังสีความร้อนไว้ และยังแสดงลักษณะที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง และการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น ค่า Spectral directional absorptivity นิยามว่าเป็นเศษส่วนของความเข้มที่ความยาวคลื่นหนึ่งที่ตกกระทบผิว ( $I_{\lambda,i}$ ) ในทิศทางของ ( $u, \phi$ ) ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าดูดกลืนโดยผิวตัวนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,i,abs}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (2.39)$$

ค่า Total, hemispherical absorptivity,  $\alpha$  แทนการรวมค่าเฉลี่ยทั่วทั้งทุกทิศทางและทุกความยาวคลื่น โดยได้กำหนดเป็นเศษส่วนของ total irradiation ที่ดูดกลืนโดยผิว

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G} \quad (2.40)$$

เนื่องจาก  $\alpha$  ขึ้นอยู่กับการกระจายคลื่นของการแผ่รังสีและค่านี้ขณะพื้นผิวได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์จะแตกต่างจากค่าที่ผิวนี้ได้รับจากรังสีคลื่นยาวซึ่งเกิดจากแหล่งอุณหภูมิต่ำ เพราะว่าการกระจายคลื่นของรังสีดวงอาทิตย์แทบจะเป็นสัดส่วนกับค่าที่ได้จากการปล่อยออกของวัตถุดำที่ 5800 K จากสมการซึ่งค่า  $\alpha_s$  เนื่องจากแสงอาทิตย์ประมาณ

$$\rho_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,i,ref}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (2.41)$$

### 2.3.3 การสะท้อนแสง

Reflectivity ( $\rho$ ) เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของพื้นผิวในการสะท้อนรังสีที่มากกระทบ หาได้จากเศษส่วนรังสีที่มากกระทบที่สะท้อนโดยพื้นผิว อย่างไรก็ตามนิยามเฉพาะนี้ให้รูปแบบที่แตกต่างกัน ค่า spectral, directional reflectivity,  $\rho_{\lambda,u}(\lambda, \mu, \phi)$  กำหนดเป็นเศษส่วนของความเข้มรังสีตกกระทบที่คลื่นหนึ่งในทิศทาง  $[\mu, \phi]$  ที่ถูกสะท้อนโดยผิว ดังนั้น

$$\rho_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,i,ref}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (2.42)$$

เมื่อคิดเป็นค่าเฉลี่ยทั่วทั้งครึ่งทรงกลม นั่นคือไม่ขึ้นกับทิศทางเพราะฉะนั้นค่า spectral, hemispherical reflectivity,  $\rho_{\lambda}(\lambda)$  นิยามว่าเป็นเศษส่วนของ การแผ่รังสีของคลื่นหนึ่งที่สะท้อนโดยพื้นผิว

$$\rho_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda,ref}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (2.43)$$

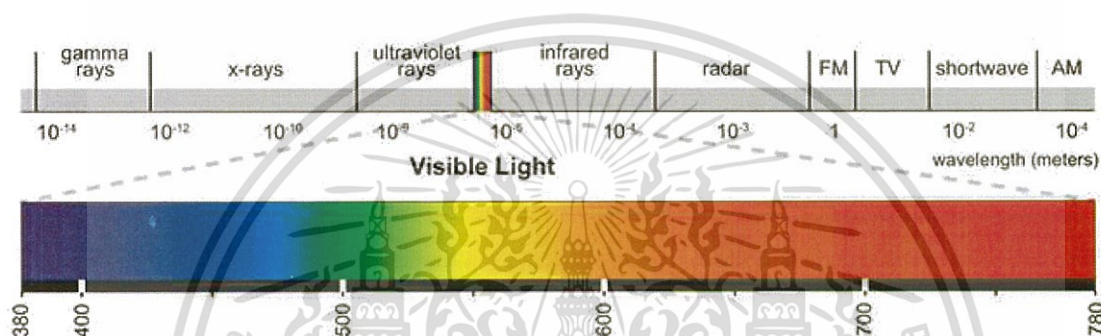
ส่วนค่า total reflectivity,  $\rho$  กำหนดเป็น

$$\rho = \frac{G_{ref}}{G} \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 วิธีการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยและ เปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงเฉลี่ย

วิธีการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ย (Luminous Transmission or Average Transmission (%Tv)) และเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงเฉลี่ย (Luminous Reflection or Average Reflection (%Rv)) เฉพาะในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น สำหรับการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยสามารถคำนวณได้ ตามสมการ 2.45 และสำหรับการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงเฉลี่ยสามารถคำนวณได้ ดังสมการ 2.45 เช่นกัน แต่เปลี่ยนการส่องผ่านแสง (T) เป็นการสะท้อนแสง (R)



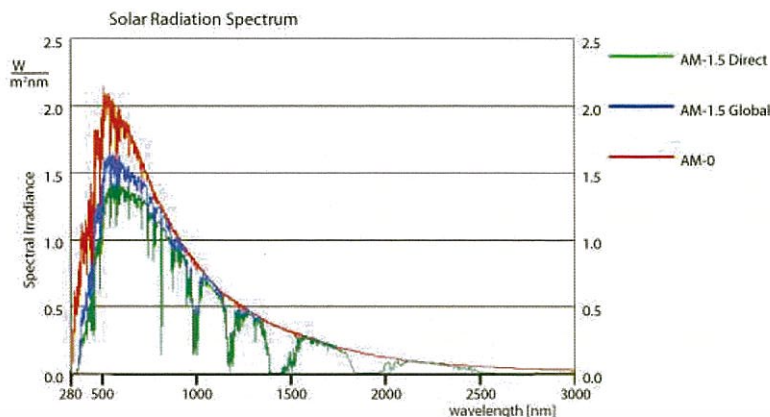
รูป 2.14 แสดงสเปกตรัมของแสงในช่วงที่ตามองเห็น

ที่มา : <http://www.space.mict.go.th/knowledge.php?id=spectroscopy>

$$\%T_{avg} = \frac{\sum_{\lambda_a} T(\lambda) E(\lambda)}{\sum_{\lambda_a} E(\lambda)} \quad (2.45)$$

โดยที่ T แทนด้วย ค่าการส่องผ่านแสง  
E แทนด้วย ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ ณ ระดับน้ำทะเล และมวลอากาศ 1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

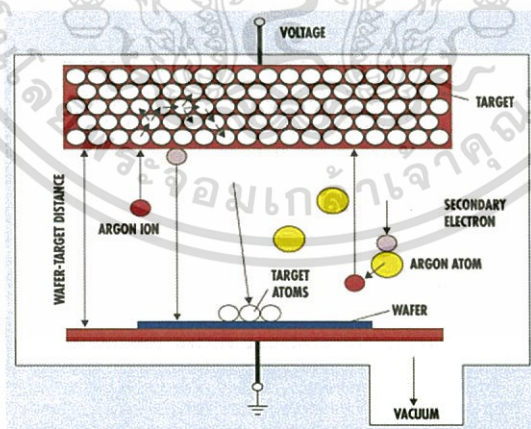


รูปที่ 2.15 แสดงสเปกตรัมการแผ่รังสีพลังงานแสงอาทิตย์ที่มวลอากาศ 1.5  
ที่มา : <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/spectra.php>

## 2.5 กระบวนการสร้างฟิล์มด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง

### 2.5.1 กระบวนการสปัตเตอร์ริง

กระบวนการสปัตเตอร์ริง เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมบริเวณผิวหน้าของวัสดุของแข็งหลุดออกมาด้วยการชนอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคที่ใช้เป็นตัวชนนี้อาจเป็นอนุภาคที่เป็นกลางหรือมีประจุก็ได้ แต่เนื่องจากการทำให้อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงสำหรับใช้ในกระบวนการสปัตเตอร์ริงนั้นทำได้ค่อนข้างยาก จึงได้นิยมใช้วิธีเร่งอนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้าที่สามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ อนุภาคพลังงานสูงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นต่อเนื่องเพื่อให้กระบวนการเคลือบสารได้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มที่เคลือบตามต้องการ



รูปที่ 2.16 แสดงอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับเป้าสารเคลือบ  
ที่มา : <http://micromagazine.fabtech.org/archive/02/07/rampf.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันตรกิริยาระหว่างผิวเป่าสารเคลือบกับไอออนที่วิ่งเข้าชนด้วยพลังงานต่างๆจะเกิดปรากฏการณ์ดังนี้

1. ไอออนบวกที่เข้าชนอะตอมของเป่าเป็นการชนแบบยืดหยุ่นจะสะท้อนกลับออกจากผิวหน้าของเป่า ซึ่งส่วนใหญ่รวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป่าสารเคลือบและสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมเป็นกลางทางไฟฟ้า
2. ไอออนบวกที่มีพลังงานสูงมากเมื่อชนกับเป่าสารเคลือบอาจฝังตัวในเป่าสารเคลือบโดยที่ระดับความลึกที่ฝังตัวจะแปรผันตรงกับพลังงานของไอออนที่เข้าชน
3. ไอออนบวกที่มีพลังงานสูงพอที่เข้าชนอะตอมของเป่า ทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป่าสารเคลือบ ทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป่าสารเคลือบ

### 2.5.2 กระบวนการก่อเกิดฟิล์มบาง

กระบวนการก่อเกิดฟิล์มบาง เป็นกระบวนการทำให้สารเคลือบตกเคลือบบนผิวของวัสดุที่ต้องการ โดยเริ่มจากการสร้างสารเคลือบในรูปของอะตอม โมเลกุลหรืออนุภาคจากนั้นเป็นการเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับเมื่อสารเคลือบตกกระทบบนผิววัสดุรองรับก็เกิดการควบแน่นและพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับในที่สุด

## 2.6 เทคนิคทางวิทยาศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ฟิล์ม

### 2.6.1 เทคนิคสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสงในช่วง UV-VIS-NIR ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยชิ้นงานที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดชิ้นงาน คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของชิ้นงานเมื่อโมเลกุลของชิ้นงานถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากชิ้นงานเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆ ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของชิ้นงานจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่ 2.17 แสดงเครื่อง Spectrophotometer รุ่น Cary 7000 ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภายในเลนส์จะประกอบด้วยระบบซอฟต์แวร์ภายในที่รวมสื่อมัลติมีเดียสำหรับอำนวยความสะดวกในการนำไปใช้งานแบบเสมือนจริงในระบบ 3มิติ การใช้งานของซอฟต์แวร์ในระบบ 3มิตินี้ได้ถูกพัฒนาให้เชื่อมต่อกับแอปพลิเคชันในโทรศัพท์มือถือ การทำงานของระบบซอฟต์แวร์ภายในจะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่าง input และ output โดยเริ่มจากผู้ใช้งานมองเห็นสภาพแวดล้อมรอบๆ และสั่งงานให้อุปกรณ์จับภาพจากนั้นจะเป็นการประมวลผลภายใน การประมวลผลมัลติมีเดียภายในรวมทั้งอื่นๆ , กล้อง , เซ็นเซอร์ , ไมโครโฟน แล้วส่งไปยังตัวรับและส่งสัญญาณในตัวเดียวกัน ซึ่งระบบการทำงาน วิธีการทำงาน ลูกเล่นต่างๆในการใช้งานรวมถึงประโยชน์การใช้งานต่างๆได้ถูกเปิดเผยแล้วในปัจจุบันนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

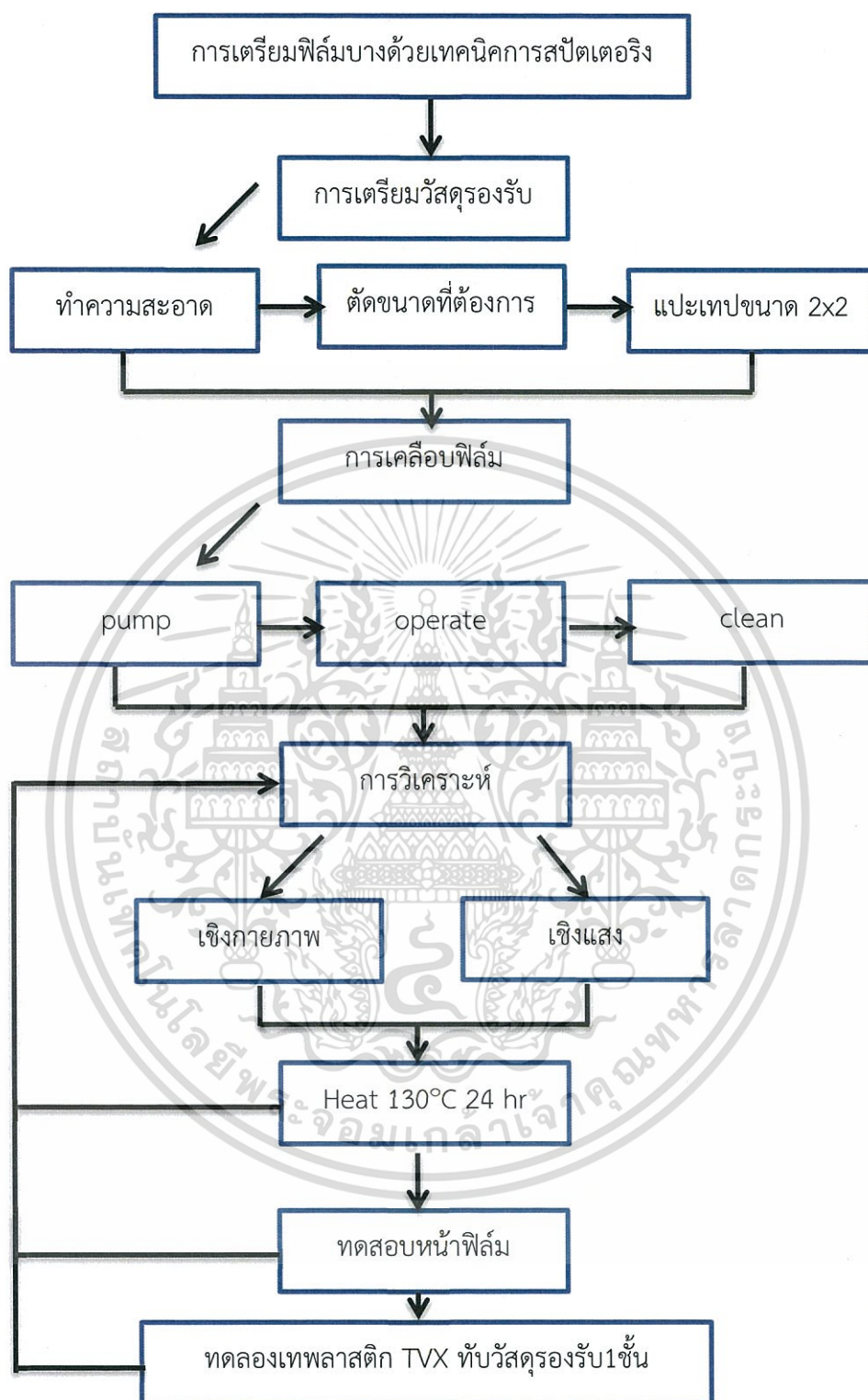
### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมวัสดุรองรับที่ใช้ในการเคลือบได้แก่ กระจกสไลด์ , TVX และซิลิกอน ขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มด้วยกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ในระบบสุญญากาศ ด้วยวิธีการสปัตเตอริง (Sputtering) และการวิเคราะห์ฟิล์มที่ได้จากการเคลือบในเชิงแสงและเชิงกายภาพ การให้ความร้อนแก่วัสดุรองรับหลังจากเคลือบแล้ว และการทดสอบความยึดติดของหน้าฟิล์มหลังจากที่ได้รับความร้อน ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยอธิบายได้ตามรูป 3.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 การเตรียมวัสดุรองรับ

#### 3.1.1 การทำความสะอาดวัสดุรองรับที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม

ปกติแล้ววัสดุรองรับจะมีฝุ่นละออง คราบน้ำมันและสิ่งสกปรกอื่นๆเกาะอยู่ เพื่อให้ฟิล์มที่เคลือบนั้นมีคุณภาพดี ดังนั้นขั้นตอนแรกในการเคลือบฟิล์มจะเริ่มจากการทำความสะอาดวัสดุรองรับ ซึ่งวัสดุรองรับที่เลือกใช้ในการเคลือบฟิล์มได้แก่ กระจกสไลด์ , พลาสติกชนิด TVX และซิลิกอน ขั้นตอนการทำความสะอาดวัสดุรองรับมีดังนี้

##### 3.1.1.1 การเตรียมอุปกรณ์ทำความสะอาดวัสดุรองรับ

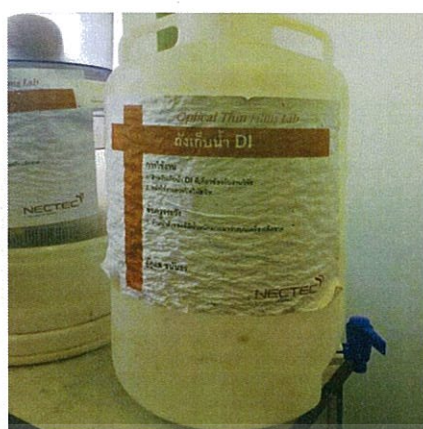
1. กระจกสไลด์ , พลาสติกชนิด TVX และซิลิกอน (รูป ก-1)
2. น้ำยาล้างจานและฟองน้ำ (รูป ก-2)
3. น้ำ DI (DIONIZED WATER) (รูป ก-3)
4. Isopropanol (รูป ก-4)
5. Acetone (รูป ก-5)
6. ปีกเกอร์ขนาด 250 ml (รูป ก-6)
7. ถังที่บรรจุแก๊สไนโตรเจนพร้อมหัวเป่า (รูป ก-7)
8. ภาชนะสำหรับเก็บวัสดุรองรับที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว (รูป ก-8)



รูป ก-1



(รูป ก-2)



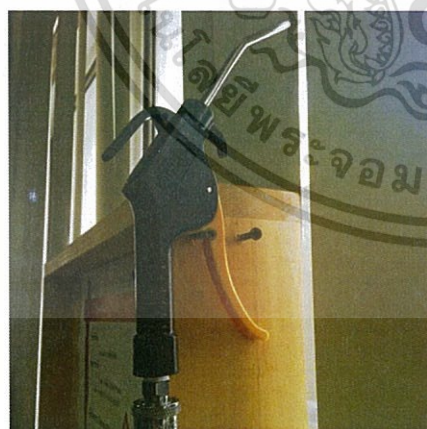
(รูป ก-3)



(รูป ก-4-5)



(รูป ก-6)



(รูป ก-7)



(รูป ก-8)

### รูปที่ 3.2 แสดงการเตรียมอุปกรณ์ทำความสะอาดวัสดุรองรับ

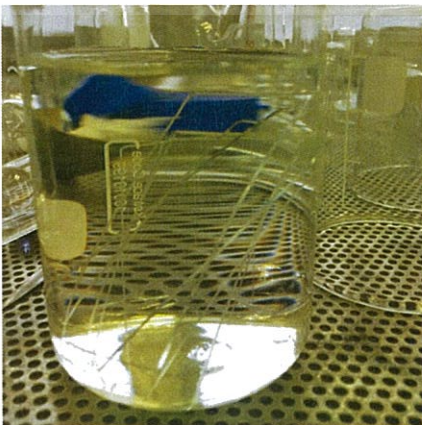
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดวัสดุรองรับ

1. ใช้น้ำยาล้างจานขัดทำความสะอาดวัสดุรองรับเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและฝุ่นละอองที่เกาะอยู่แล้วล้างน้ำให้สะอาด (รูป ข-1)
2. นำวัสดุรองรับที่ได้จากขั้นตอนที่ 1. มาแช่น้ำ DI (DIONIZED WATER) ในปริมาณ 250 ml (รูป ข-2)
3. นำวัสดุรองรับจากขั้นตอนที่ 2. ไปแช่ Acetone แล้วใส่ใน Ultrasonic cleaner เป็นเวลา 10 นาที (รูป ข-3)
4. นำวัสดุรองรับที่ได้จากขั้นตอนที่ 3. ไปแช่ ISO แล้วใส่ใน Ultrasonic cleaner เป็นเวลา 10 นาที (รูป ข-4)
5. นำวัสดุรองรับที่ได้จากขั้นตอนที่ 4. ไปแช่น้ำ DI (DIONIZED WATER) แล้วใส่ใน Ultrasonic cleaner เป็นเวลา 10 นาที (รูป ข-5)
6. นำวัสดุรองรับที่ผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดทั้งหมดแล้วไปเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (รูป ข-6)
7. ตรวจสอบวัสดุรองรับว่าไม่มีคราบสกปรกแล้ว จากนั้นเก็บใส่กล่องให้เรียบร้อย



(รูป ข-1)



(รูป ข-2)



(รูป ข-3)

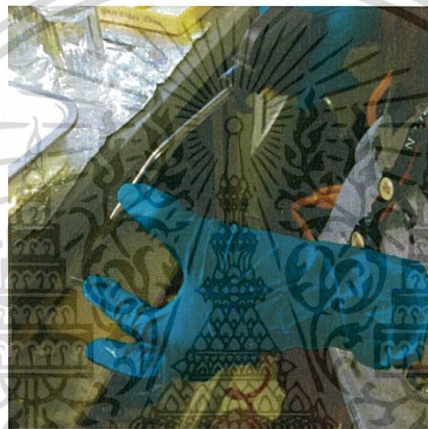
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(รูป ข-4)



(รูป ข-5)



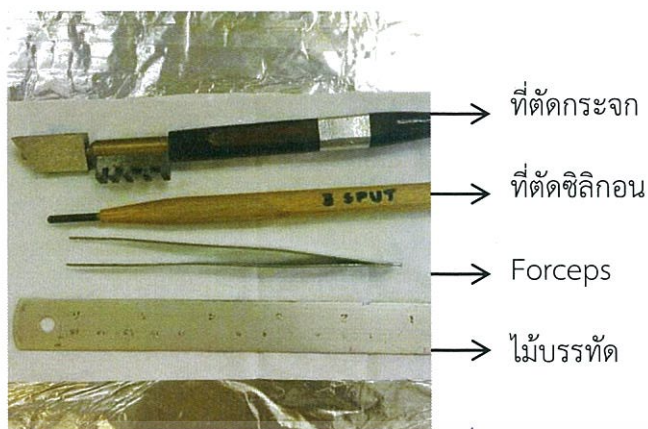
(รูป ข-6)

รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการทำความสะอาดวัสดุรองรับ

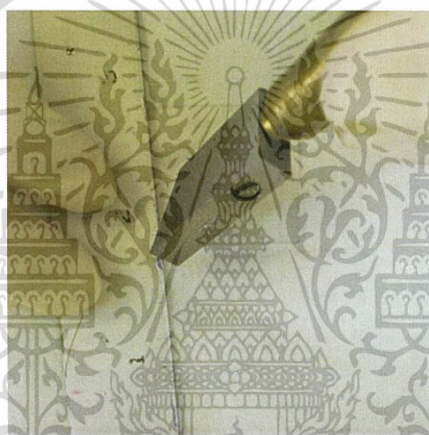
### 3.1.2 ตัดขนาดวัสดุรองรับ

หลังจากที่ทำความสะอาดวัสดุรองรับเรียบร้อยแล้ว ต่อมาเป็นการนำวัสดุรองรับนั้นมาตัดขนาดตามความเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



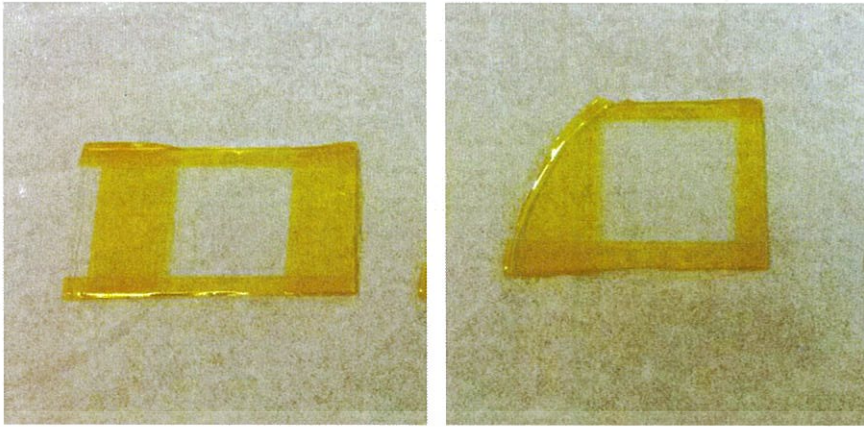
รูปที่ 3.4 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดวัสดุรองรับ



รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างการตัดกระจก

### 3.1.3 แพะเทพกาวบนวัสดุรองรับ

หลังจากที่ตัดขนาดของวัสดุรองรับแล้ว จากนั้นนำเทพกาวแปะลงบนวัสดุรองรับในลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $2 \times 2$  cm เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของหน้าฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุรองรับหลังจากที่ได้รับความร้อน ซึ่งรายละเอียดการให้ความร้อนวัสดุรองรับนั้นจะกล่าวในหัวข้อการให้ความร้อนวัสดุรองรับ

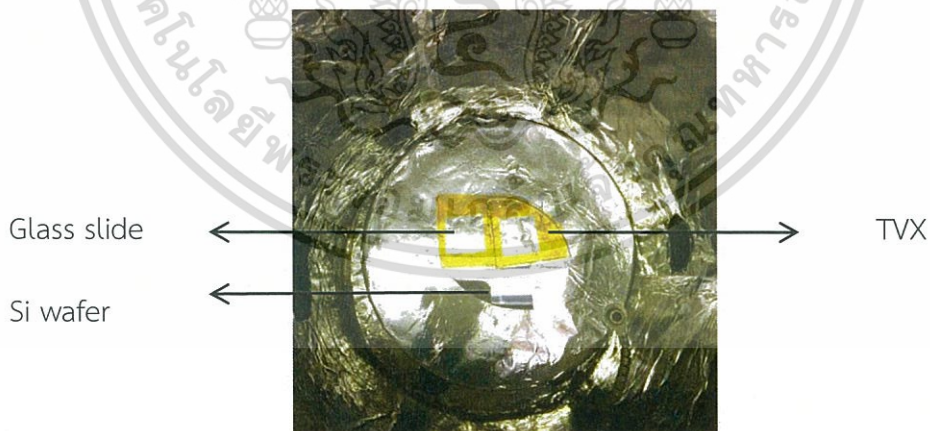


รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างการแปะเทปกาวขนาด 2 x 2 cm บนวัสดุรองรับ

## 3.2 การสร้างฟิล์ม

### 3.2.1 การทำให้เป็นสถานะสุญญากาศ

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างสุญญากาศในภาชนะเคลือบ เริ่มจากนำวัสดุรองรับวางลงบนแผ่นวางวัสดุรองรับภายในภาชนะเคลือบฟิล์มในระบบสุญญากาศ แล้วปิดฝาภาชนะเคลือบฟิล์มให้เรียบร้อย จากนั้นให้เครื่องสูบลมโรตารีลดความดันในภาชนะเคลือบให้มีค่าประมาณ  $10^{-1}$  mbar แล้วให้เครื่องสูบลมแบบเทอร์โบโมเลกูลาร์ลดความดันในภาชนะเคลือบให้มีค่าประมาณ  $10^{-6}$  mbar และกำหนดให้เป็นค่าความดันพื้นฐาน (Base Pressure)



รูปที่ 3.7 แสดงการวางวัสดุรองรับภายในภาชนะเคลือบสุญญากาศ

### 3.2.2 การสร้างฟิล์มอะลูมิเนียม

#### 3.2.2.1 การเตรียมอุปกรณ์ในการสร้างฟิล์ม

เครื่องเคลือบฟิล์มที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นเครื่องเคลือบฟิล์มแบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า แบ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ 8 ส่วน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. ภาชนะสุญญากาศ

การเคลือบฟิล์มบางจะทำในภาชนะสุญญากาศ มีฝาเปิด-ปิดเพื่อใส่ชิ้นงาน มีช่องหน้าต่างกระจกสำหรับสังเกตดูระหว่างกระบวนการสเป็คเตอริงเพื่อสามารถควบคุมกระบวนการสเป็คเตอริงได้



→ ฝาเปิด-ปิด

→ ภาชนะสุญญากาศ

→ ช่องสังเกตดู

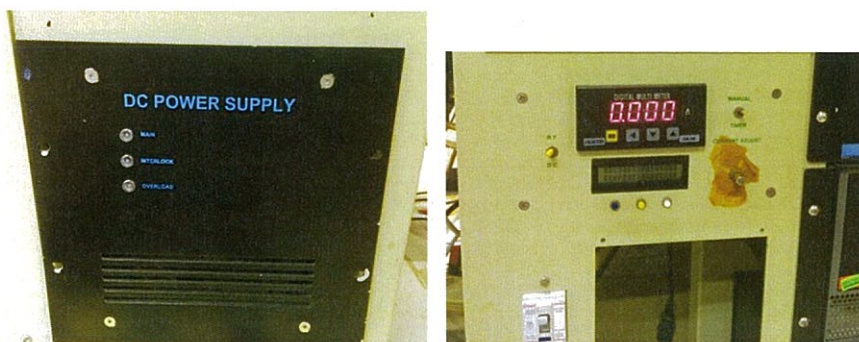
รูปที่ 3.8 แสดงภาชนะสุญญากาศภายนอกสำหรับสร้างฟิล์ม

### 2. ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศ

ทำหน้าที่สูบลอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ ประกอบด้วยเครื่องสูบล 2 ชนิด คือ เครื่องสูบลสุญญากาศโรตารี (Rotary Pump) ทำหน้าที่ในการสร้างสุญญากาศขั้นต้นให้กับภาชนะสุญญากาศ สามารถสร้างสุญญากาศภายในภาชนะสุญญากาศให้มีความดันต่ำประมาณ  $10^{-1}$  mbar และเครื่องสูบลโมเลกุลแบบเทอโบ (Turbo Molecular Pump) ทำหน้าที่สูบลอากาศจากภาชนะสุญญากาศออกให้มีความดันได้ต่ำในระดับ  $10^{-6}$  mbar

### 3. แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง

มีหน้าที่เป็นแหล่งให้กำลังงานไฟฟ้าแก่ส่วนหัวแมกนีตรอนคาโทด โดยจะจ่ายไฟกระแสตรงเพื่อทำให้เกิดสอาร์กอนแตกตัวเป็นไอออนและสนามไฟฟ้าจะเร่งไอออนนี้ที่เกิดขึ้นนำไปสู่กระบวนการสเป็คเตอริง



รูปที่ 3.9 แสดงส่วนควบคุมแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง

#### 4. อิเล็กโทรดและหัวแมกนีตรอน

หัวแมกนีตรอนเป็นแบบทรงกระบอก ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรและขั้วอิเล็กโทรดทำจากทองแดง และส่วนทองแดงนี้ใช้สำหรับติดตั้งเป้าสารเคลือบ โดยมีตัวยึดครอบอยู่เพื่อป้องกันหัวแมกนีตรอน ระบายความร้อนด้วยน้ำโดยมีแผ่นปิดอยู่ด้านหลังของเป้าสารเคลือบ ใช้เป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับเป็นขั้วอิเล็กโทรด

#### 5. เครื่องควบคุมการป้อนแก๊ส

ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยมีมอเตอร์ควบคุมการเปิด-ปิดวาล์ว มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ Mass flow controller เป็นส่วนควบคุมการเปิด-ปิดและอัตราการไหลของแก๊ส และส่วนแสดงผลการทำงาน โดยมีหน้าจอเพื่อแสดงอัตราการไหลของแก๊ส



รูปที่ 3.10 แสดงหน้าจอส่วนควบคุมการปล่อยแก๊สและแสดงค่าอัตราการไหลของแก๊ส

#### 6. ระบบหล่อเย็น

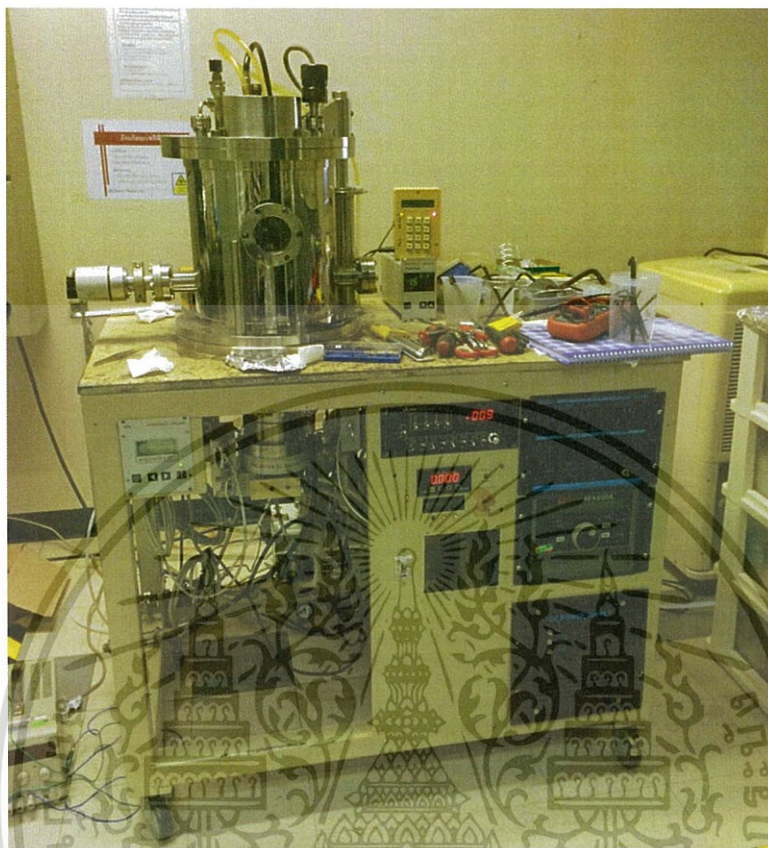
ระบบหล่อเย็นนี้เป็นระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับเครื่อง หัวแมกนีตรอนและเป้าสารเคลือบ

#### 7. เป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับ

7.1 เป้าสารที่ใช้เคลือบเป็นอะลูมิเนียม ความบริสุทธิ์ 99.99% มีลักษณะเป็นแผ่นกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.2 วัสดุรองรับที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มเป็นกระจกสไลด์ พลาสติกชนิด Trivex และซิลิกอน



รูปที่ 3.11 แสดงเครื่อง DC Magnetron Sputtering จากห้องปฏิบัติการ Optical Thin Film (OTL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

### 3.2.2.2 ขั้นตอนการสร้างฟิล์ม

1. เปิดเครื่องระบบหล่อเย็น
2. เปิดวาล์วเพื่อปล่อยแก๊สอาร์กอนจากถังบรรจุแก๊สเข้าสู่ภาชนะเคลือบสุญญากาศและปรับตั้งค่าอัตราการไหลของแก๊ส
3. เปิดแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงและปรับตั้งค่ากระแส
4. ปรับตั้งค่าเวลาในการสร้างฟิล์ม
5. หลังจากสร้างฟิล์มตามเวลาที่ตั้งค่าไว้แล้วปิดการปล่อยแก๊สอาร์กอน
6. ปรับตั้งค่ากระแสเป็นค่าเริ่มต้น
7. นำชิ้นงานออกจากภาชนะสร้างฟิล์มสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.3 เงื่อนไขในการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียม

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขในการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียม

Substrate	Glass slide , TVX , Si wafer
Substrate holder	0 °
Target	Al
DC Power	0.2 A
Ar flow	20 sccm
Time (s)	10 , 15 , 20 , 40 , 60 , 120 , 240
Base Pressure (mbar)	$5 \times 10^{-6}$
Operate Pressure (mbar)	$5 \times 10^{-3}$

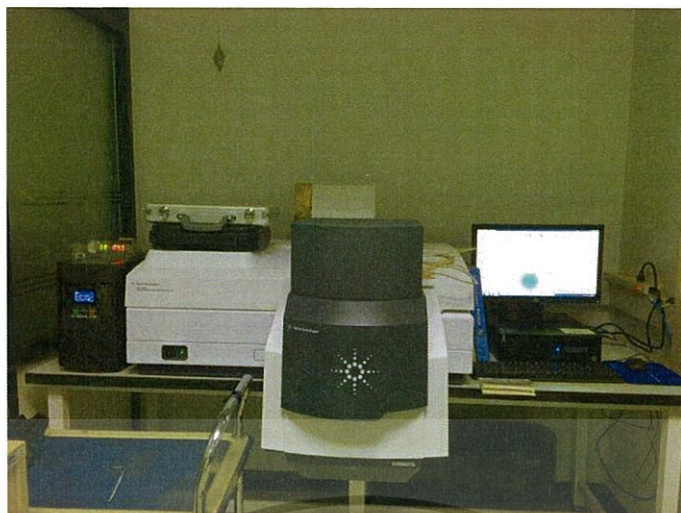
### 3.2.3 การทำความสะอาดเครื่องสร้างฟิล์มแบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง

ขั้นตอนนี้เป็นกรนำชิ้นส่วนของเครื่องสร้างฟิล์มแบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงมาขัดทำความสะอาด โดยชิ้นส่วนที่ต้องนำมาขัดทำความสะอาดได้แก่ shutter , chimney และที่ใส่เป้าสาร และชิ้นส่วนที่เหลือก็นำมาห่อฟอยล์ทับใหม่พร้อมกับใช้ ISO เซ็ดเพื่อทำความสะอาดอีกรอบ เมื่อเสร็จเรียบร้อยทั้งหมดแล้วให้ทำการดูฝุ่นภายในเครื่องสร้างฟิล์มสุญญากาศ

## 3.3 การวิเคราะห์

### 3.3.1 การวิเคราะห์เชิงแสง

ขั้นตอนนี้เป็นกรนำวัสดุรองรับที่ผ่านการสร้างฟิล์มแล้วมาวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสง เพื่อต้องการดูเปอร์เซ็นต์การสะท้อน เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านและเปอร์เซ็นต์การดูดกลืน และพิจารณาว่าวัสดุรองรับแบบไหนที่มีความใกล้เคียงกับจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ โดยการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ดังกล่าวจะใช้เครื่อง Spectrophotometer ของบริษัท Agilent Technologies รุ่น Cary 7000

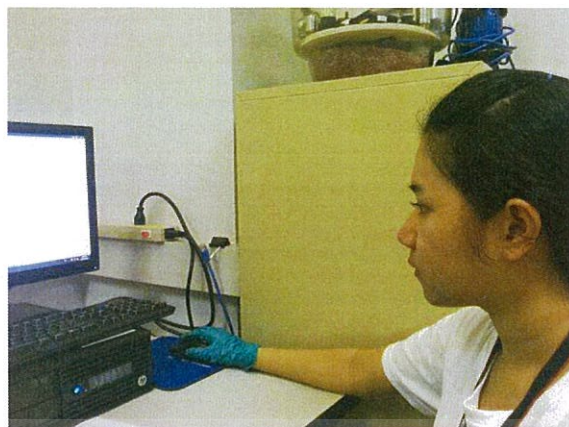


รูปที่ 3.12 แสดงเครื่อง Spectrophotometer ของบริษัท Agilent Technologies รุ่น Cary 7000



รูปที่ 3.13 แสดงตำแหน่งการวางวัสดุรองรับและปิดยึดไม่ให้เคลื่อนที่ก่อนทำการวัด Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แสดงการตั้งค่าเริ่มต้นด้วยระบบซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ก่อนเริ่มวัด Spectroscopy

### 3.4 การให้ความร้อนวัสดุรองรับ

ขั้นตอนนี้เป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุรองรับที่ผ่านการสร้างฟิล์มมาแล้ว โดยให้ความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง เพื่อต้องการดูความเปลี่ยนแปลงและความยึดติดของฟิล์มที่ถูกสร้างขึ้น



รูปที่ 3.15 แสดง Hot Plate ที่ใช้ในการให้ความร้อนวัสดุรองรับ

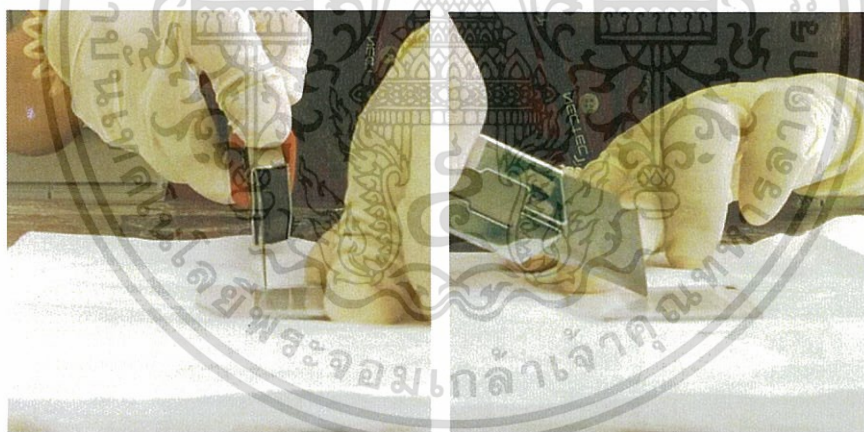
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แสดง TVX ที่เวลาในการสร้างฟิล์มต่างๆก่อนให้ความร้อน

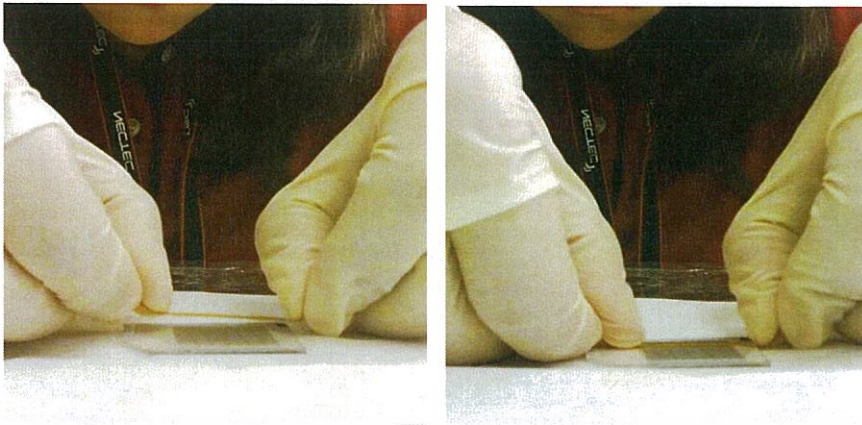
### 3.5 การทดสอบหน้าฟิล์ม

ขั้นตอนนี้เป็น การทดสอบความยึดติดระหว่างฟิล์มกับวัสดุรองรับหลังจากที่ได้รับความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ทำได้โดยการใช้คัตเตอร์กรีดลงที่หน้าฟิล์ม จากนั้นใช้เทปแปะลงบนฟิล์มที่ถูกรีดแล้วดึงออก แล้วสังเกตความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.17 แสดงตัวอย่างการกรีดฟิล์มบนวัสดุรองรับหลังจากได้รับความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  นาน 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แสดงตัวอย่างการแกะเทปลงบนฟิล์มหลังจากถูกกรีด

### 3.6 การวัดความหนาของฟิล์ม

ในการวัดความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมที่ถูกเคลือบบนวัสดุรองรับจะใช้เครื่อง Ellipsometry ในการวัด โดยตัวเครื่องจะมี 3 ส่วนหลัก ประกอบด้วยตัวฐานไว้วางชิ้นงาน แขนข้างหนึ่งจะต่อกับแหล่งกำเนิดแสงด้วย fiber optic ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งจะติดกับหัววัดแสง โดยทั้ง 2 แขนจะมี polarizer ระหว่างวัด polarizer ฟังก์ชันอยู่ที่ติดกับหัวจะทำการหมุน เพื่อวัดสนามไฟฟ้าของแสงใน 2 แกนเทียบระนาบแสง สามารถนำไปคำนวณหามุม  $\psi$  (มุมของโพลาไรซ์) และ  $\Delta$  (phase ระหว่าง 2 แกน) ซึ่ง  $\psi$  และ  $\Delta$  จะเป็นข้อมูลที่สัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุ ซึ่งสัมพันธ์กับดัชนีหักเหและความหนา จากนั้นทำการสร้าง Model จากดัชนีหักเหและความหนา เพื่อนำไปสร้างกราฟ  $\psi$  และ  $\Delta$  เพื่อเปรียบเทียบ  $\psi$  และ  $\Delta$  ที่วัด และทำการ fit model ก็จะสามารถหาค่าที่ถูกต้องได้เมื่อ กราฟ  $\psi$  กับ  $\Delta$  ที่สร้างนั้นทับซ้อนกับ  $\psi$  กับ  $\Delta$  ที่วัด



รูปที่ 3.19 แสดงเครื่อง Ellipsometry จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

(NECTEC) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะทางกายภาพและทางแสงของการทดลองการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่เวลาต่างๆ เพื่อหาเงื่อนไขในการทดลองให้มีความใกล้เคียงและเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยให้มากที่สุด จากนั้นจะทำการทดลองกับชิ้นงานจริงโดยการนำวัสดุรองรับที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมมาแล้วเข้าสู่กระบวนการการเทพลาสติกชนิด Trivex (TVX) ทับอีกชั้นหนึ่ง และดูการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานจริงหลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนดังกล่าว ทั้งทางกายภาพและทางแสง

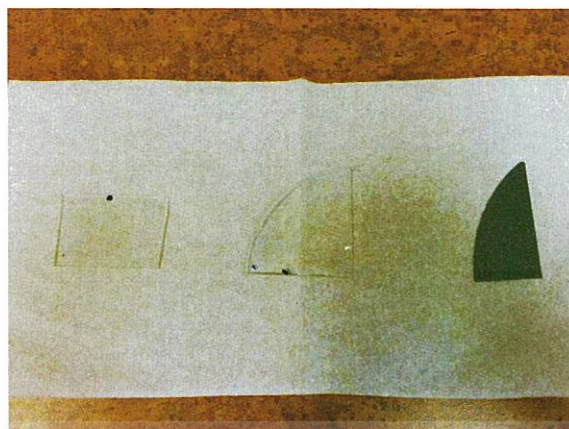
#### 4.1. ลักษณะทางกายภาพของวัสดุรองรับ

วัสดุรองรับที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ได้แก่กระจกสไลด์และพลาสติกชนิด Trivex (TVX) ผู้วิจัยจะทำการเสนอผลและอภิปรายผล ซึ่งจะกล่าวถึงลักษณะทางกายภาพของวัสดุรองรับหลังจากผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมมาแล้วทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานานถึง 24 ชั่วโมง โดยจะกล่าวถึงลักษณะรูปร่างของฟิล์มที่ถูกเคลือบ ขนาดของฟิล์มและความหนาของฟิล์ม รวมทั้งลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของฟิล์มหลังจากได้รับความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานานถึง 24 ชั่วโมง

##### 4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุรองรับก่อนได้รับความร้อน

$130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง

หลังจากที่วัสดุรองรับดังกล่าวได้ผ่านกระบวนการการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมมาแล้ว ต่อไปจะเป็นการแสดงผลในลักษณะทางกายภาพของวัสดุรองรับก่อนที่จะได้รับความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง โดยรูปที่จะแสดงต่อไปด้านล่างนี้ในแต่ละรูปจะเรียงลำดับของวัสดุรองรับจากกระจกสไลด์ TVX และซิลิกอน ตามลำดับจากซ้ายไปขวา

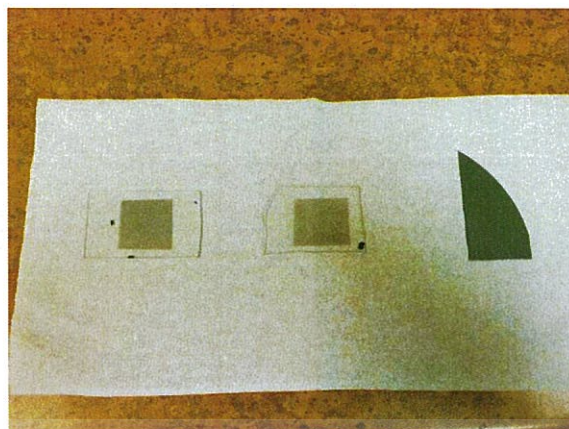


รูปที่ 4.1 แสดงวัสดุรองรับหลังจากเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 10 วินาที ก่อนได้รับความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

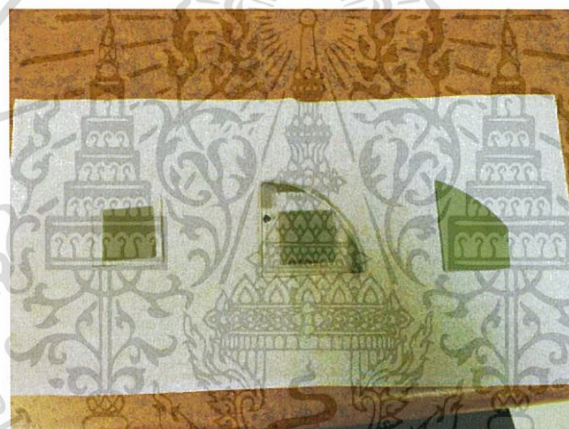


รูปที่ 4.2 แสดงวัสดุรองรับหลังจากเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 15 วินาที ก่อนได้รับความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงวัสดุรองรับหลังจากเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 20 วินาที ก่อนได้รับความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.4 แสดงวัสดุรองรับหลังจากเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 40 วินาที ก่อนได้รับความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากที่แสดงดังรูป 4.1 ถึง 4.4 จะสังเกตเห็นได้ว่าที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่ 10 และ 15 วินาที จะยังมองไม่เห็นเนื้อฟิล์มอะลูมิเนียม เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม นั้นน้อยมาก ฟิล์มที่เคลือบติดบนวัสดุรองรับจึงบางมาก อาจมองไม่ชัดด้วยตาเปล่า แต่เมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้น จะสังเกตเห็นได้ชัดว่ายิ่งเวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จะยิ่งมองเห็นฟิล์มอะลูมิเนียมที่เคลือบติดบนวัสดุรองรับนั้นชัดเจนมากขึ้นและสีของฟิล์มอะลูมิเนียมที่เคลือบติดมานั้นจะยิ่งมีความเข้มชัดมากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุรองรับหลังได้รับความร้อน

130°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง

การให้ความร้อนแก่วัสดุรองรับที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ เป็นการให้ความร้อนโดยใช้ Hot plate โดยผู้วิจัยได้สนใจในการให้ความร้อนเฉพาะวัสดุรองรับที่เป็น TVX เท่านั้น ให้ความร้อนแก่วัสดุรองรับดังกล่าวโดยวางวัสดุรองรับบน Hot plate และให้ความร้อนที่ 130°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง เพื่อสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นของวัสดุรองรับนั้น แสดงดังรูป 4.5 แสดงวัสดุรองรับ TVX หลังจากเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่เวลา 10 , 15 , 20 และ 40 วินาที ตามลำดับ หลังได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

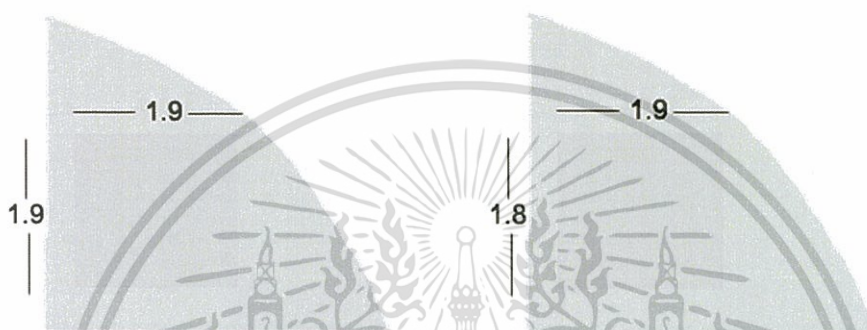


รูปที่ 4.5 แสดงวัสดุรองรับ TVX หลังจากเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่เวลาต่างๆหลังได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

หลังจากที่ได้นำวัสดุรองรับ TVX ผ่านการให้ความร้อนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมงแล้ว พบว่าวัสดุรองรับดังกล่าวมีความโค้งงอเล็กน้อย ลักษณะทางกายภาพของวัสดุนั้นผิดเพี้ยนไปเพียงเล็กน้อย กล่าวคือ ฟิล์มอะลูมิเนียมที่เคลือบติดบนวัสดุรองรับมีการหดเข้าไปเพียงเล็กน้อยแทบจะไม่ต่างจากเดิม หรืออาจกล่าวได้ว่าฟิล์มอะลูมิเนียมยังคงติดอยู่บน TVX คงเดิม แม้ผ่านความร้อนมาแล้วก็ตามแต่เนื้อฟิล์มอะลูมิเนียมแทบจะไม่มีผลการเปลี่ยนแปลงต่อความร้อนแต่อย่างใด ทั้งนี้ขนาดของฟิล์มอะลูมิเนียมที่เคลือบติดบนวัสดุรองรับ TVX ทั้งก่อนและหลังให้ความร้อน 130°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ได้แสดงดังตาราง 4.1 แสดงตารางขนาดของฟิล์มอะลูมิเนียมก่อนและหลังให้ความร้อน 130°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง เพื่อแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเพียงเล็กน้อยของฟิล์มให้ชัดเจนเพิ่มมากขึ้น โดย Width (W) แทนด้วยขนาดของฟิล์มอะลูมิเนียมด้านกว้าง , Long (L) แทนด้วยขนาดของฟิล์มอะลูมิเนียมด้านยาว , Coat แทนด้วยขนาดของฟิล์มอะลูมิเนียมก่อนได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง , Heat แทนด้วยขนาดของฟิล์มอะลูมิเนียมหลังได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%Change แทน %การเปลี่ยนแปลงของขนาดฟิล์มอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนไปของด้านกว้างและด้านยาว โดยทำการวัดขนาดฟิล์มที่เปลี่ยนไปทั้งก่อนและหลังที่ได้รับความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง วิธีการวัดขนาดฟิล์มจะแสดงตามภาพจำลอง ดังรูป 4.6 และจากตาราง 4.1 จะเห็นว่าขนาดของฟิล์มอะลูมิเนียมที่เคลือบบนวัสดุรองรับ TVX นั้นมีการหดเข้าไปเพียงเล็กน้อย ถ้าไม่สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงด้วยตาเปล่าก็อาจจะมองเห็นไม่ชัดว่าฟิล์มมีการหดเข้าไป ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มไม่ได้มีผลต่อการหดเข้าของฟิล์มแต่อย่างใด เพราะเมื่อดูจากตาราง 4.1 การเปลี่ยนแปลงของเนื้อฟิล์มอะลูมิเนียม (%Change) ไม่ได้มีแนวโน้มที่มีผลขึ้นกับเวลา



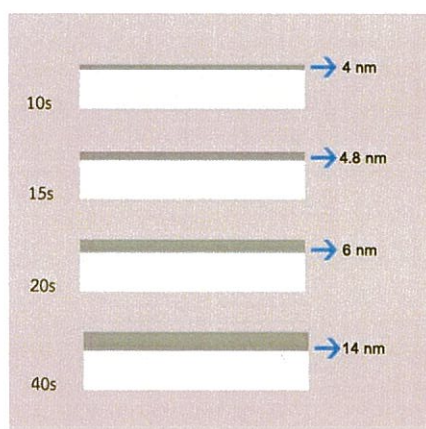
รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างการวัดขนาดฟิล์มที่ถูกเคลือบที่เวลา 10 วินาที บน TVX ก่อนและหลังได้รับความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.1 แสดงตารางขนาดของฟิล์มอะลูมิเนียมก่อนและหลังให้ความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง

Time (s)	Coat		Heat		%Change	
	W	L	W	L	W	L
10	1.9	1.9	1.9	1.8	0	5.26
15	1.9	1.9	1.9	1.7	0	10.52
20	2	1.8	2	1.7	0	5.55
40	1.9	2	1.9	2	0	0

หลังจากที่นำวัสดุรองรับ TVX ผ่านการให้ความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมงแล้ว จากนั้นจะทำการหาความหนาของวัสดุรองรับดังกล่าว จากเครื่อง Ellipsometry แสดงภาพจำลอง ดังรูป 4.7

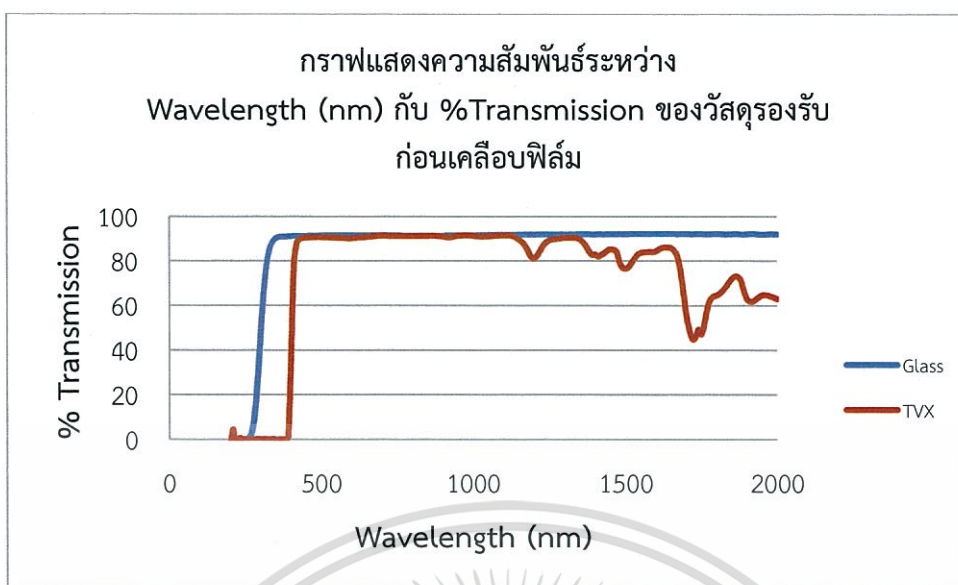
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงแบบจำลองความหนาที่วัดจาก Ellipsometry ของวัสดุรองรับ TVX ที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมต่างๆ

## 4.2 ผลการวัดค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มอะลูมิเนียมบนวัสดุรองรับเปล่า

เนื่องด้วยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกวัสดุรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และพลาสติกชนิด TVX มาใช้ในการทดลอง เพราะฉะนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการวัดค่าการส่องผ่านแสงและการสะท้อนแสงของวัสดุรองรับดังกล่าวมาแล้วก่อนทำการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม ผลการวัดสเปกตรัมการส่องผ่านแสงและการสะท้อนแสงทั้งช่วงสเปกตรัม จะถูกนำมาคำนวณเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ย (luminous transmission or average transmission (%Tv)) และเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงเฉลี่ย (luminous reflection or average reflection (%Rv)) เฉพาะในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.45 ดังแสดงไว้แล้วในหัวข้อ 2.4. เพื่อใช้เป็นวัสดุรองรับอ้างอิงกับวัสดุรองรับดังกล่าวหลังจากทำการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม เพื่ออภิปรายผลการทดลองจากการเปลี่ยนแปลงต่อไป

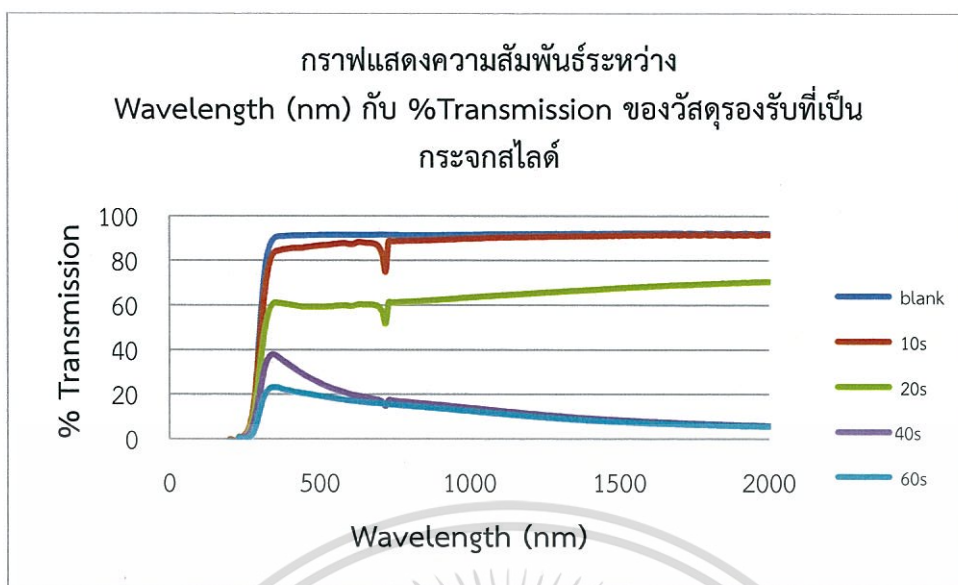


รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของวัสดุรองรับก่อนเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม  $0^\circ$

จากรูป 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของวัสดุรองรับก่อนเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม โดยวัดค่า %Transmission ของวัสดุรองรับที่มุม  $0^\circ$  โดยวัสดุรองรับดังกล่าว ได้แก่ กระจกสไลด์และพลาสติกชนิด TVX จากลักษณะของกราฟดังรูป 4.9 จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็น วัสดุรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ก่อนนำไปเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมนั้นมีค่า %Transmission สูงถึง 92.42% ในขณะที่พลาสติกชนิด TVX มีค่า %Transmission 91.66% ซึ่งต่ำกว่ากระจกสไลด์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น หรืออาจมองค่า %Transmission ของวัสดุรองรับดังกล่าวเทียบเท่ากันได้

### 4.3 ผลการวัดค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มอะลูมิเนียมบนกระจกสไลด์

จากที่กล่าวมาข้างต้น ต่อไปจะเริ่มแสดงผลของวัสดุรองรับที่เป็นกระจกสไลด์หลังจากเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมมาแล้วที่เวลาการเคลือบต่างๆกัน เพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างข้อดีและข้อเสียกับวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX เพื่อสนับสนุนเหตุผลที่เลือกใช้วัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX ในการอภิปรายผล

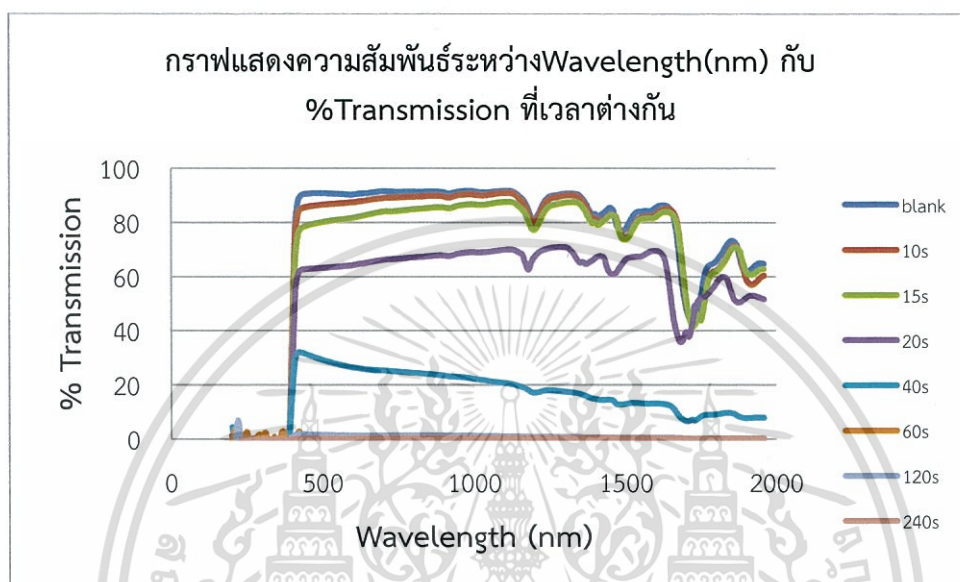


รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของกระจกสไลด์หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม  $0^\circ$

จากรูป 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของวัสดุรองรับที่เป็นกระจกสไลด์หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม โดยวัดค่า %Transmission ของกระจกสไลด์ที่มุม  $0^\circ$  จากลักษณะกราฟดังรูป 4.9 จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็นจะพบว่าวัสดุรองรับที่เป็นกระจกสไลด์หลังได้รับการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมมีค่า %Transmission ลดลงเมื่อเทียบกับกระจกสไลด์ก่อนได้รับการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม ดังแสดงรูป 4.7 และเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ค่า %Transmission จะมีค่าลดลง พบว่าที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 10 วินาที มีค่า %Transmission 91.82 ซึ่งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมทั้งหมดที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 60 วินาที มีค่า %Transmission 23.06 ซึ่งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมทั้งหมดที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และพบว่าเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่ 20 วินาที จะได้ %Transmission อยู่ที่ 60.33 ซึ่งมีความใกล้เคียงตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ที่ต้องการให้เลนส์แว่นมี %Transmission และ %Reflection อย่างละครึ่งหนึ่งโดยประมาณ

#### 4.4 ผลการวัดค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มอะลูมิเนียมบน Trivex

หลังจากที่แสดงผลของวัสดุรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ไปแล้วข้างต้น ต่อไปจะแสดงผลจากการวัด spectroscopy ของวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX เพื่ออภิปรายข้อสรุปที่เลือกใช้วัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX นี้



รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของ TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม  $0^\circ$

จากรูป 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม โดยวัดค่า %Transmission ของวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX ที่มุม  $0^\circ$  จากลักษณะกราฟดังรูป 4.10 จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็นจะพบว่าวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX หลังได้รับการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมมีค่า %Transmission ลดลงเมื่อเทียบกับพลาสติกชนิด TVX ก่อนได้รับการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม ดังแสดงรูป 4.8 และเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ค่า %Transmission จะมีค่าลดลง พบว่าที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 10 วินาที มีค่า %Transmission 90.97 ซึ่งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมทั้งหมดที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX และที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 60 วินาที มีค่า %Transmission 3.28 ซึ่งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมทั้งหมดที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX และพบว่าเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่ 20 วินาที จะได้ %Transmission อยู่ที่ 55.91 ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ที่ต้องการให้เลนส์แว่นมี %Transmission และ %Reflection อย่างละครึ่งหนึ่งโดยประมาณ และเมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติหนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบกับรูป 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของกระจกสไลด์หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม  $0^{\circ}$  พบว่าวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX นี้มีค่า %Transmission ที่ต่ำกว่า ซึ่งใกล้มีความใกล้เคียงกับจุดประสงค์ของงานวิจัยมากกว่า ที่ต้องการให้มีค่า %Transmission และค่า %Reflection อย่างละครึ่ง ถ้าหากวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX มีค่า %Transmission ที่ต่ำกว่าวัสดุรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แสดงว่าวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX มีค่า %Reflection ที่สูงกว่า ซึ่งค่า %Reflection นี้จะส่งผลถึงการแสดงผลออกมาเป็นภาพให้ผู้ใช้งานได้เห็น ยังมีค่า %Reflection มากนั้นหมายถึงจะยิ่งมองเห็นภาพที่สะท้อนออกมาได้ชัดมากเมื่อเทียบกับเลนส์แว่นที่ทำจากวัสดุรองรับที่มี %Reflection ที่น้อยกว่า และจากค่า %Reflection ที่แสดงออกมานี้ทำให้สามารถเลือกวัสดุรองรับชนิดใดชนิดหนึ่งในการทดลองต่อไปได้ โดยผู้วิจัยได้เลือกวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX ในการทำการทดลองต่อไป เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการนำพลาสติกมาใช้ผลิตทำเลนส์แว่นตา และพลาสติกที่เลือกใช้ในการทดลองคือพลาสติกชนิด TVX นี้ซึ่งมีน้ำหนักเบา และสามารถเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมได้ดีกว่ากระจกสไลด์ ถึงแม้ว่ากระจกสไลด์จะมีผิวที่เรียบเนียนกว่า แต่ก็มีน้ำหนักมากกว่าและมีความเสี่ยงสูงในการเปราะและแตกหักได้ง่ายกว่า TVX

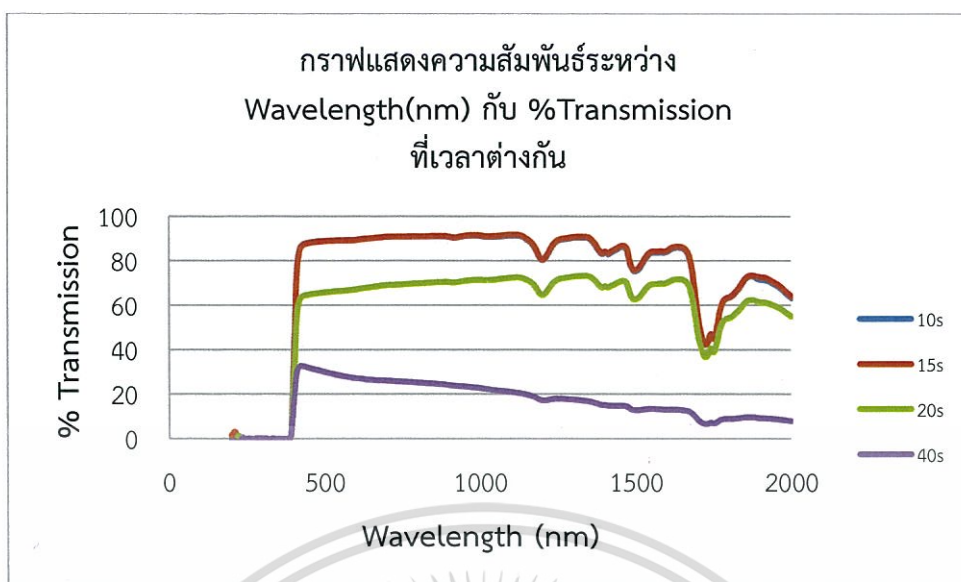
#### 4.5 ผลการวัดค่าการสะท้อนของฟิล์มอะลูมิเนียมบน Trivex

จากการอภิปรายผลการวัด spectroscopy ของวัสดุรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และพลาสติกชนิด TVX หลังผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมแล้ว และผู้วิจัยได้เลือกวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX มาทำการอภิปรายผลต่อ เนื่องจากวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX นี้มีค่า %Reflection ครั้งหนึ่ง ซึ่งไปเป็นตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

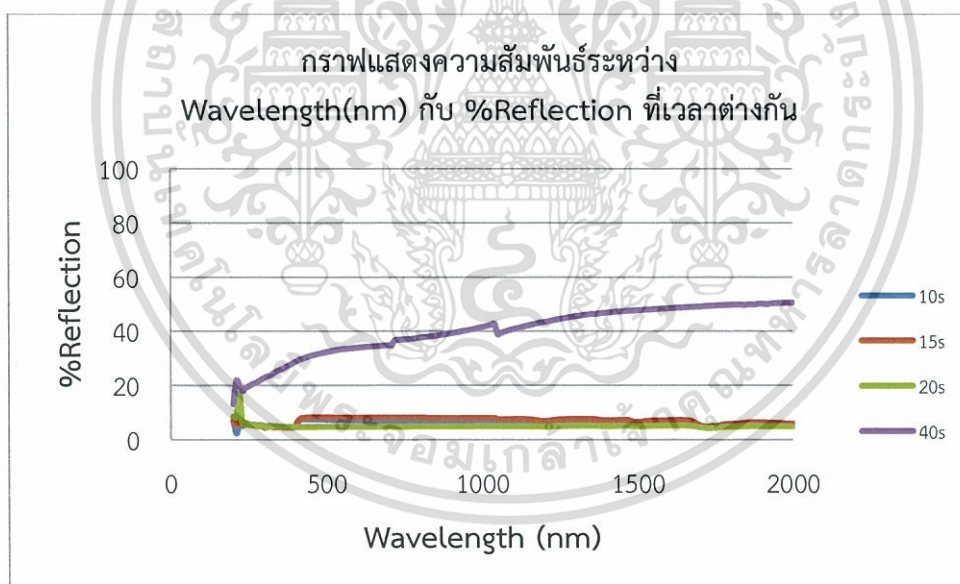


%Transmission ของวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม โดยวัดค่า %Transmission ของวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX ที่มุม  $8^{\circ}$  ก่อนนำไปให้ความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  24 ชั่วโมง จากลักษณะกราฟดังรูป 4.12 จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็นจะพบว่าวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX หลังได้รับการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมมีค่า %Transmission ลดลงเมื่อเทียบกับพลาสติกชนิด TVX ก่อนได้รับการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม ดังแสดงรูป 4.8 และเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ค่า %Transmission จะมีค่าลดลง พบว่าที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 10 วินาที มีค่า %Transmission 89.85 ซึ่งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมทั้งหมดที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX และที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 4 นาที มีค่า %Transmission 1.50 ซึ่งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมทั้งหมดที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX และพบว่าเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่ 20 วินาที จะได้ %Transmission อยู่ที่ 55.27 ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ที่ต้องการให้เลนส์แว่นมี %Transmission และ %Reflection อย่างละครึ่งหนึ่งโดยประมาณ และเมื่อเปรียบเทียบกับ รูป 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของ TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม  $0^{\circ}$  พบว่าผลที่ได้ออกมานั้นมีความใกล้เคียงกันมาก เมื่ออ้างอิงจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่ต้องการให้มีค่า %Transmission และ %Reflection อย่างละครึ่งหนึ่งโดยประมาณ โดยค่า %Transmission ของวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX วัดที่มุม  $0^{\circ}$  มีค่า 55.91% และวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX วัดที่มุม  $8^{\circ}$  มีค่า 55.27% แต่เนื่องจาก รูป 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของ TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม  $0^{\circ}$  ที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้น %Transmission มีค่าลดลงและลดลงมากกว่า รูป 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของ TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม  $8^{\circ}$  แสดงว่าจะมีค่า %Reflection มากกว่า

ข้างต้นเป็นการอภิปรายผลของวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX ที่มุมการวัด %Transmission  $0^{\circ}$  และ  $8^{\circ}$  ก่อนนำไปให้ความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง และจากการอภิปรายผลดังกล่าวพบว่า %Transmission ที่มุมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่มุม  $0^{\circ}$  %Transmission มีค่าลดลงมากกว่าเมื่อเทียบกับที่มุม  $8^{\circ}$  จึงส่งผลให้มีค่า %Reflection ที่มากกว่า จึงได้เลือกวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX ที่วัด %Transmission ที่มุม  $0^{\circ}$  มาทำการอภิปรายผลในส่วนต่อไป ต่อมาจะเป็นการอภิปรายผลของวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX ที่มุมการวัด %Transmission  $0^{\circ}$  และ Reflection  $8^{\circ}$  หลังนำไปให้ความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของ TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม  $0^\circ$  หลังนำไปให้ความร้อน  $130^\circ\text{C}$  24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Reflection ของ TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม  $8^\circ$  หลังนำไปให้ความร้อน  $130^\circ\text{C}$  24 ชั่วโมง

จากรูป 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของ วัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม  $0^\circ$  หลังนำไปให้ความร้อน  $130^\circ\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง จากลักษณะกราฟดังรูป 4.13 จะเห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการเอกเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ค่า %Transmission จะมีค่าลดลง พบว่าที่เวลาการเคลือบฟิล์ม ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะลูมิเนียม 15 วินาที มีค่า %Transmission 91.84 ซึ่งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมทั้งหมดที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX และที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 60 วินาที มีค่า %Transmission 32.48 ซึ่งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมทั้งหมดที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX และพบว่าเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่ 20 วินาที จะได้ %Transmission อยู่ที่ 58.75 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ที่ต้องการให้เลนส์แว่นมี %Transmission และ %Reflection อย่างละครึ่งหนึ่งโดยประมาณ และเมื่อเปรียบเทียบกับรูป 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของ TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม  $0^{\circ}$  ก่อนนำไปให้ความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง พบว่าวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX ก่อนนำไปให้ความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง นี้มีค่า %Transmission ที่ต่ำกว่า ส่งผลให้มีค่า %Reflection ที่สูงกว่าวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX หลังได้รับความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง และจากรูป 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Reflection ของวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม หลังนำไปให้ความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง โดยวัดค่า %Reflection ที่มุม  $8^{\circ}$  เนื่องจากในการวัด spectroscopy นั้น %Reflection ไม่สามารถที่จะวัดที่มุม  $0^{\circ}$  ได้ จึงได้ทำการวัดที่มุม  $8^{\circ}$  แทน เนื่องจากมีความใกล้เคียงกับมุม  $0^{\circ}$  มากที่สุด จากลักษณะกราฟดังรูป 4.14 จะเห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ค่า %Reflection จะมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 40 วินาที มีค่า %Reflection 50.62 ซึ่งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมทั้งหมดที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX และเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่ต้องการให้เลนส์แว่นมี %Transmission และ %Reflection อย่างละครึ่งหนึ่งและที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 10 วินาที มีค่า %Reflection 7.64 ซึ่งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมทั้งหมดที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX และเมื่อเปรียบเทียบกับรูป 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Wavelength (nm) กับ %Transmission ของ TVX หลังเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่มุม  $0^{\circ}$  หลังนำไปให้ความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง พบว่า %Reflection ของวัสดุรองรับจากรูปที่ 4.14 มีค่า %Reflection เป็นไปตามจุดประสงค์หลักของงานวิจัย

จากการอธิบายผลการวัด spectroscopy ของวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX แล้ว เราสามารถสรุปค่า Average Transmission (%Tv) และ ค่า Average Reflection (%Rv) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยสเปกตรัมในช่วงที่ตามองเห็น ที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมต่างๆได้ ซึ่งจากการทราบค่า Average Transmission (%Tv) และ ค่า Average Reflection (%Rv) ดังกล่าวนี้นี้ทำให้สามารถหาค่า Average Absorption (%Av) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยสเปกตรัมในช่วงที่ตามองเห็น ที่เวลาการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมต่างๆได้เช่นกัน ทั้งก่อนและหลังให้ความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมงแสดงดังตาราง 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการส่งผ่าน การสะท้อนและการดูดกลืนแสงของวัสดุรองรับ Trivex ที่เวลาการเคลือบต่างๆกัน ก่อนได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Time (s)	%Tv	%Rv	%Av
10	83.87	15.88	0.24
15	78.55	18.56	2.88
20	62.09	22.54	15.35
40	26.49	50.04	23.46

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการส่งผ่าน การสะท้อนและการดูดกลืนแสงของวัสดุรองรับ Trivex ที่เวลาการเคลือบต่างๆกัน หลังได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Time (s)	%Tv	%Rv	%Av
10	76.02	15.29	8.68
15	73.56	16.86	9.57
20	64.63	10.84	24.52
40	27.21	42.69	30.09

จากตาราง 4.2 และ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้น วัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX จะมีค่าการส่งผ่านแสงที่ลดลง แต่มีการสะท้อนแสงและการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น จากตาราง 4.2 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่ 40 วินาที จะมีค่าการสะท้อนแสงครึ่งหนึ่งพอดี ซึ่งตรงตามจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่ต้องการให้มีค่าการสะท้อนและส่งผ่านอย่างละครึ่ง แต่หากต้องการให้มีการสะท้อนที่มากกว่านั้นสำหรับการนำไปใช้งานที่ต้องการให้มีการสะท้อนสูงๆเพื่อที่จะได้เห็นภาพสะท้อนเยอะๆจะต้องใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นจึงจะได้ค่าการสะท้อนที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ไม่เพียงแต่การสะท้อนเท่านั้นที่เพิ่มมากขึ้นแต่ยังมีค่าการดูดกลืนแสงอีกด้วยที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการสะท้อนเพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีความสนใจค่าการสะท้อนเป็นหลัก เพราะฉะนั้นค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นนั้นจึงไม่มีผลต่องานวิจัย และจากตาราง 4.3 พบว่าเมื่อวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX หลังจากที่ได้ได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง จะมีค่าการสะท้อนเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับตาราง 4.2 ค่าการสะท้อนที่ได้นั้นจะมีค่าน้อยกว่า แต่มีการดูดกลืนที่มากกว่า นอกจากค่าการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นแล้วเมื่อเทียบกับวัสดุรองรับที่เป็นพลาสติกชนิด TVX ก่อนได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ยังพบว่าหน้าฟิล์มที่ถูกเคลือบบนวัสดุรองรับดังกล่าวมีการหดเล็กลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่มีความยึดติดแน่นวัสดุรองรับดีมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

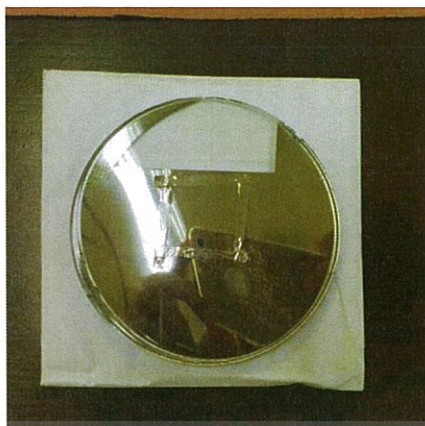
## 4.6 ทดสอบบนชิ้นงานจริง

จากการอภิปรายผลข้างต้นเป็นการทดลองเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมบนวัสดุรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และพลาสติกชนิด TVX มาแล้ว และผู้วิจัยได้เลือกพลาสติกชนิด TVX เพื่อนำมาอภิปรายผลทั้งทางด้านกายภาพและด้านแสง ต่อมาผู้วิจัยได้ทำการทดลองกับชิ้นงานจริงโดยใช้พลาสติกชนิด TVX โดยไม่ตัดให้มีขนาดตามความเหมาะสม แต่ใช้ TVX แบบเต็มชิ้นงาน แล้วให้ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มแบบสปัตเตอร์ริง (Sputtering) โดยทดลองการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่ 2 นาที และ 4 นาที หลังจากขั้นตอนกระบวนการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม ต่อมาเป็นการนำพลาสติกชนิด TVX แบบเดียวกันนั้นเททับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบมาแล้ว แต่เนื่องจากในขั้นตอนการเท TVX ทับชิ้นงานเดิมนั้นแห้งตัวเร็วมาก จึงทำให้ชิ้นงานที่ทำได้มีลักษณะเอียงลาดไปทางใดทางหนึ่ง ส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานที่ทดลองนี้นั้นไม่เท่ากัน ขั้นตอนการทดลองดังกล่าวแสดงดังแบบจำลองตามรูป 4.15

รูปที่ 4.15 แสดงแบบจำลองชิ้นงานการสร้างชิ้นงานจริงด้านบนและด้านข้าง

### 4.6.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานจริง

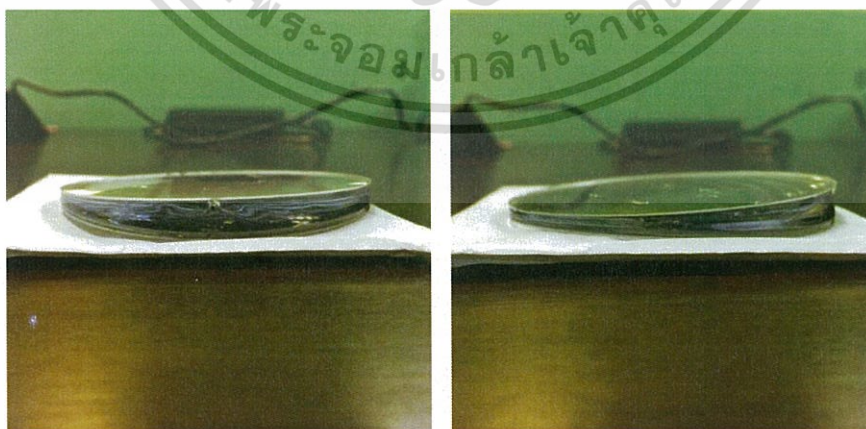
จากแผนผังขั้นตอนดังรูป 4.15 แสดงไดอะแกรมขั้นตอนทดลองจริงที่การเคลือบ TVX ด้วยฟิล์มอะลูมิเนียมแล้วเท TVX ทับ ต่อไปจะแสดงชิ้นงานจริงหลังจากได้ทำการทดลอง โดยจะแสดงชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่ 2 และ 4 นาที ตามลำดับ



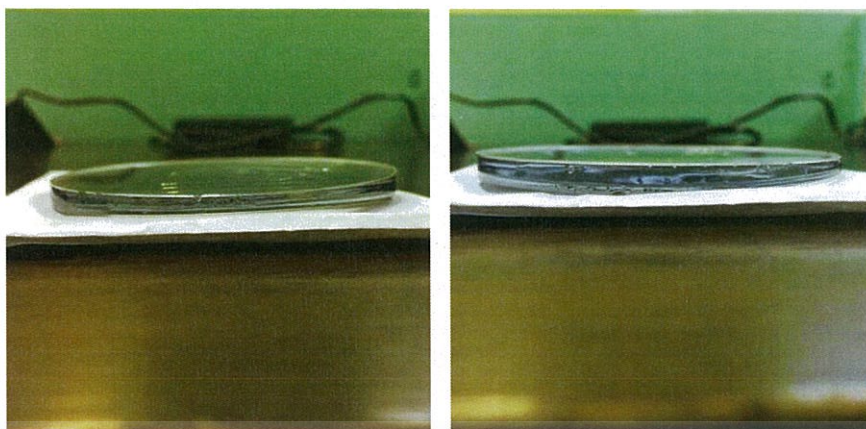
รูปที่ 4.16 แสดงชิ้นงานจริงที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 2 นาที่ ด้านหน้า



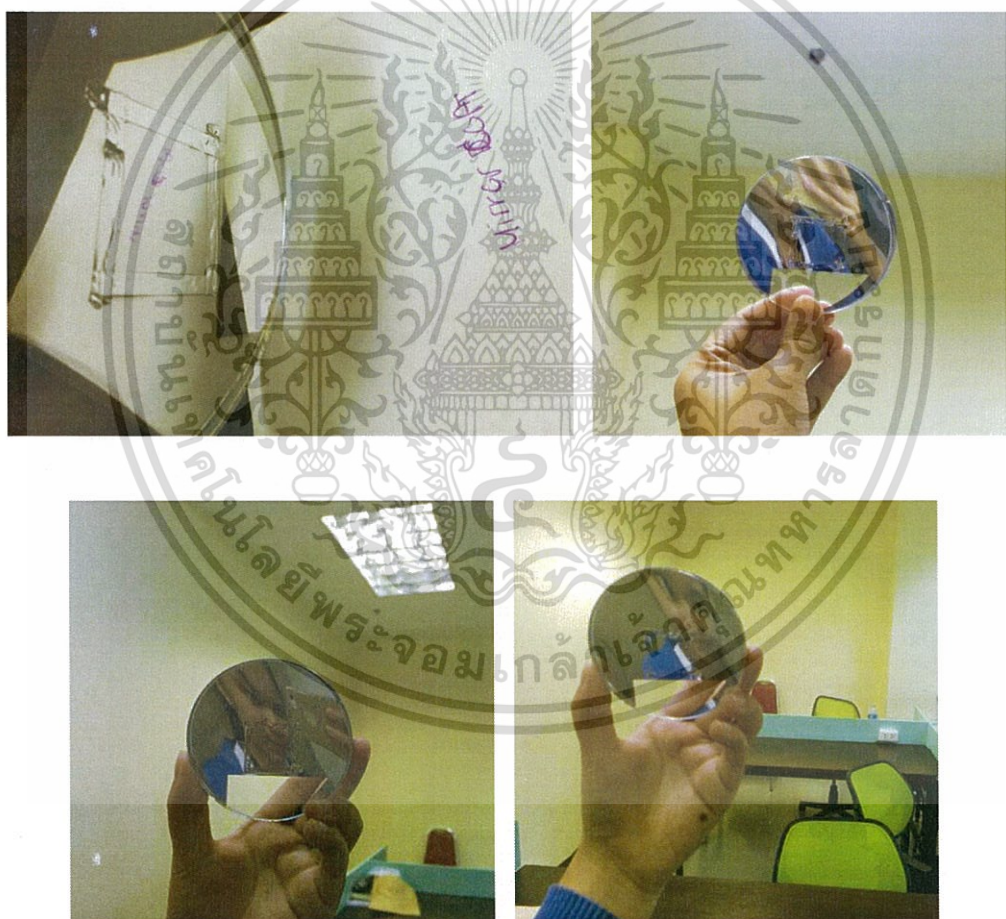
รูปที่ 4.17 แสดงชิ้นงานจริงที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 2 นาที่ ด้านหลัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

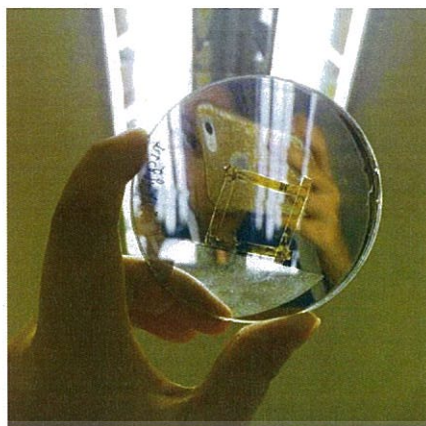


รูปที่ 4.18 แสดงชิ้นงานจริงที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 2 นาที่ ด้านข้างทั้งสองด้าน



รูปที่ 4.19 แสดงการสะท้อนแสงของชิ้นงานจริงหลังที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 2 นาที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

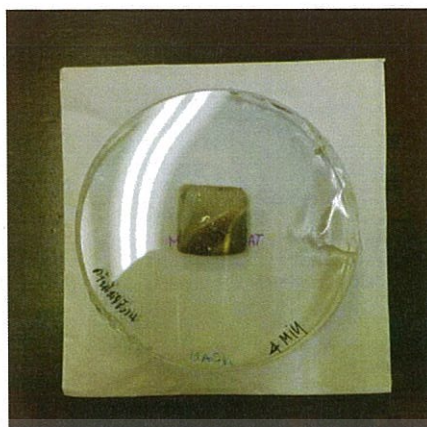


รูปที่ 4.20 แสดงการส่งผ่านแสงของชิ้นงานจริงหลัง cast TVX ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 2 นาที

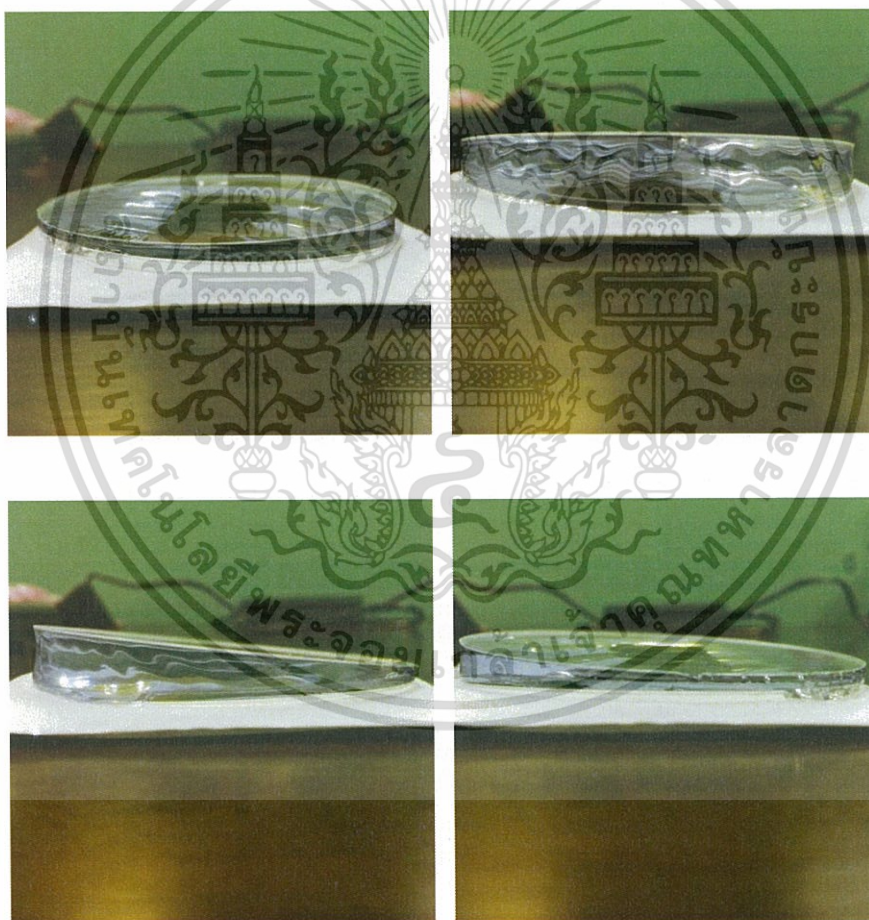


รูปที่ 4.21 แสดงชิ้นงานจริงหลัง cast TVX ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 4 นาที ด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

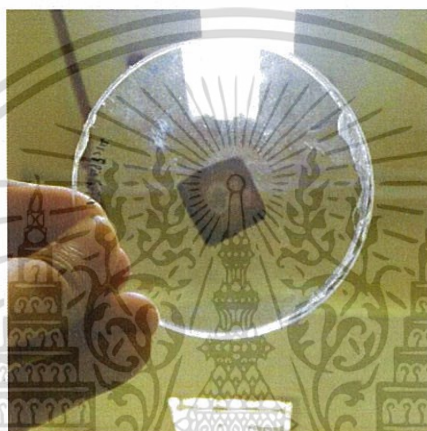
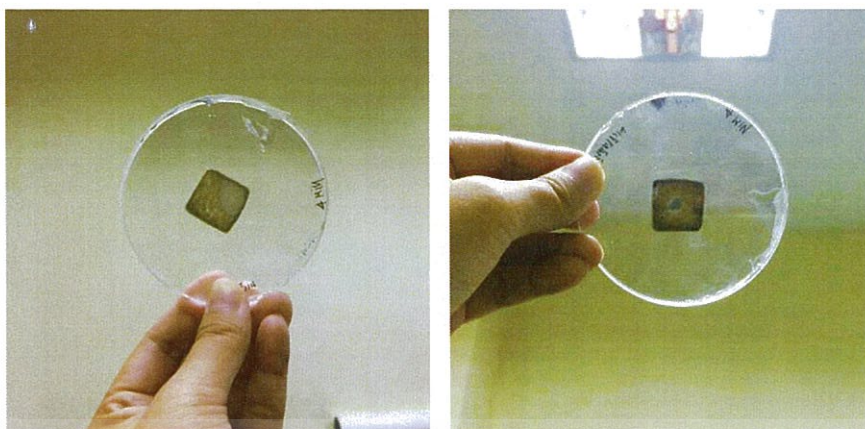


รูปที่ 4.22 แสดงชิ้นงานจริงหลัง cast TVX ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 4 นาที ด้านหลัง

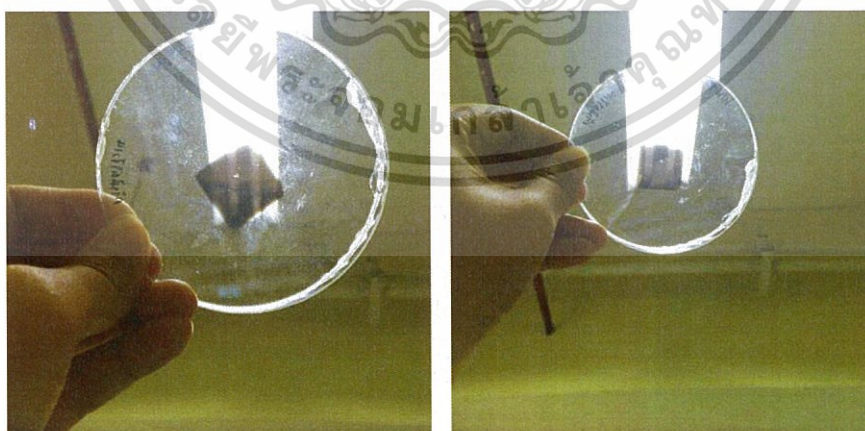


รูปที่ 4.23 แสดงชิ้นงานจริงหลัง cast TVX ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 4 นาที ด้านข้างทั้งสี่ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



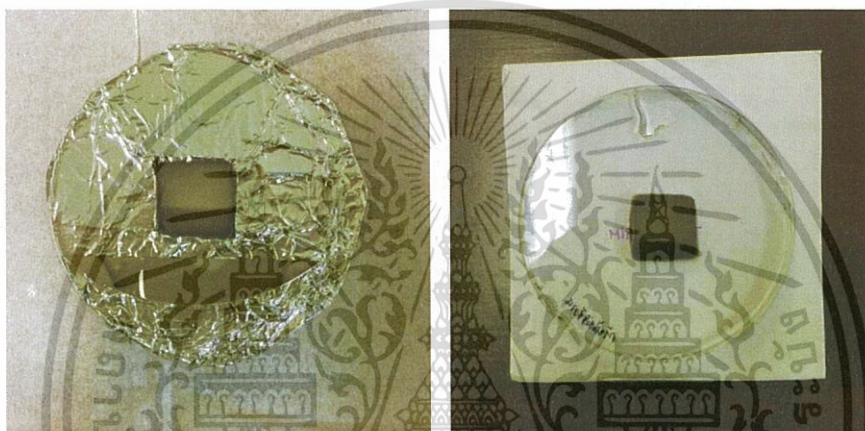
รูปที่ 4.24 แสดงการสะท้อนแสงของชิ้นงานจริงหลัง cast TVX ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 4 นาที



รูปที่ 4.25 แสดงการส่งผ่านแสงของชิ้นงานจริงหลัง cast TVX ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการแสดงผลข้างต้นจะพบว่าชิ้นงาน double TVX ทั้ง 2 นาที และ 4 นาที มีความหนาที่ลาดเอียงไปทางด้านใดด้านหนึ่ง ซึ่งเป็นความผิดพลาดที่เกิดจากกระบวนการการเททับของชิ้นงานจากโรงงานที่ทำกระบวนการนี้ให้ ทำให้ชิ้นงานที่ได้นั้นมีความหนาที่ไม่เท่ากันทั้งสองด้าน ทั้งสองชิ้นงานทั้ง 2 นาที และ 4 นาที และเมื่อนำชิ้นงานก่อนและหลังเท TVX ทับอีกชั้นมาเปรียบเทียบกัน จะพบว่าฟิล์มอะลูมิเนียมที่เคลือบติดบนชิ้นงานนั้นมีลักษณะเป็นขอบสีดำทึบเข้าไปในชิ้นงานซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนจากกระบวนการการเท TVX ทับชิ้นงาน และขนาดฟิล์มมีการหดตัวเล็กน้อย แสดงดังรูป 4.26 และเพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจาก cast TVX แล้วจะแสดงตามแบบจำลองดังรูป 4.27



รูปที่ 4.26 แสดงตัวอย่างชิ้นงานก่อนและหลังทำการ cast TVX ของการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่เวลา 4 นาที

รูปที่ 4.27 แสดงแบบจำลองชิ้นงานก่อนและหลังทำการ cast TVX ของการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมที่เวลา 4 นาที

#### 4.6.2 ลักษณะเชิงแสงของชิ้นงานจริง

หลังจากที่ชิ้นงานจริงได้ผ่านกระบวนการการเท TVX ทับอีกชั้นหนึ่งนั้น ขั้นตอนต่อมาเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การนำชิ้นงานดังกล่าวทั้งสองชิ้นนั้นมาวัดสมบัติทางแสง ได้แก่ %Transmission และ %Reflection ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกับการทดลองตัวอย่างข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น จากการวัด %Transmission และ %Reflection ของชิ้นงานพบว่า ชิ้นงานก่อนได้รับการเท TVX ทับ จะมีค่าการสะท้อนลดลงเมื่อใช้ เวลาในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกันกับค่าการส่งผ่าน และพบว่าเมื่อชิ้นงานจริง ที่ผ่านกระบวนการการเท TVX ทับอีกรอบนั้น ส่งผลให้ลักษณะรูปร่างทางกายภาพของชิ้นงานเกิดการผิดเพี้ยนไปจากเดิม ทำให้ไม่สามารถวัดค่าการสะท้อนได้ เนื่องจาก TVX ที่ถูกเคลือบทับนั้นมีความหนาพอสมควรซึ่งเป็นปัญหาสำหรับการวัดค่าการสะท้อน ส่งผลให้ค่าการสะท้อนที่วัดได้มีแนวโน้มที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิมเมื่อเทียบตาราง 4.2 แสดงค่าการส่งผ่าน การสะท้อนและการดูดกลืนแสงของวัสดุรองรับ TVX ที่เวลาการเคลือบต่างๆกัน ก่อนได้รับความร้อน 130°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในขณะที่ค่าการส่งผ่านยังคงวัดได้ปกติและค่าการส่งผ่านที่วัดได้ไม่มีการผิดเพี้ยน

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการส่งผ่านและการสะท้อนของชิ้นงานจริงก่อนและหลังเคลือบ TVX ทับอีกชั้น

Time (min)	Before TVX cast		After TVX cast	
	%Tv	%Rv	%Tv	%Rv
2	0.83	83.48	1.39	15.46
4	0.15	49.66	0.23	21.83

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองในส่วนการแสดงผลของเลนส์แว่นตา เพื่อต้องการทำให้เลนส์แว่นตามีคุณสมบัติในการสะท้อนสูง ทำโดยการเคลือบฟิล์มโลหะลงบนเลนส์พลาสติกด้วยกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์แบบสปัตเตอร์ริง (Sputtering) แล้ววิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงและเชิงกายภาพของชิ้นงาน

จากการทดลองเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมบนพลาสติกโดยกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์แบบสปัตเตอร์ริง (Sputtering) ที่เวลาการเคลือบฟิล์มต่างๆกัน ซึ่งหลังจากกระบวนการเคลือบฟิล์มแล้วได้ทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์ม เช่น การยึดติด ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม ลักษณะทางแสงของฟิล์ม เป็นต้น พบว่า เมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มเพิ่มมากขึ้น การส่องผ่านแสงจะมีค่าลดลง ในขณะที่การสะท้อนแสงและการดูดกลืนแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้น และที่เวลาการเคลือบฟิล์ม 40 วินาที จะมีการสะท้อนแสงเป็นครั้งแรกซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ หลังจากนั้นทำการทดลองให้ความร้อนแก่วัสดุรองรับที่ผ่านการเคลือบฟิล์มแล้วที่  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง แล้วทำการวิเคราะห์ผล พบว่า ชิ้นงานหลังจากผ่านการให้ความร้อนมาแล้วเนื้อฟิล์มที่ถูกเคลือบบนชิ้นงานมีการหดตัวเข้าไปเล็กน้อย ส่งผลให้ขนาดของฟิล์มมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ค่าการสะท้อนแสงมีค่าลดลงและที่เวลาการเคลือบเดียวกันที่ 40 วินาที พบว่าการสะท้อนแสงมีค่าน้อยกว่าตอนก่อนที่จะให้ความร้อน  $130^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง

จากการทดลองเงื่อนไขข้างต้นนำมาสู่การทดลองกับชิ้นงานจริงโดยการนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มแล้วนำไปให้ความร้อนแล้ว จากนั้นเป็นการนำพลาสติก Trivex เท็บชิ้นงานดังกล่าวอีกชิ้นหนึ่ง เพื่อเป็นการทดลองเสมือนกับการผลิตเลนส์แว่นตาจริง ซึ่งหลังจากทดลองเทพลาสติก Trivex เท็บแล้วพบว่าลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลง คือ ก่อนเท Trivex เท็บ ฟิล์มที่ถูกเคลือบมีลักษณะสี่เหลี่ยมขนาด  $2 \times 2$  เซนติเมตร แต่หลังจากทำการเท Trivex เท็บแล้วฟิล์มที่เคลือบติดมีการหดเข้าเพียงเล็กน้อยและมีขอบสีดำขุ่นๆรอบนอกฟิล์ม นอกจากนี้แล้วยังพบว่าลักษณะทางแสงของชิ้นงานก็มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย คือ การสะท้อนแสงของชิ้นงานมีค่าลดลงอย่างมาก จากการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงข้อดีของชิ้นงานก่อนที่จะได้ทำการทดลองเทพลาสติก Trivex เท็บวัสดุรองรับ มากกว่าหลังการทดลองเทพลาสติก Trivex เท็บวัสดุรองรับ พบว่าผลจากการทดลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดีในระดับหนึ่งเท่านั้นยังไม่ถึงขั้นดีมาก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวัดค่าการสะท้อนแสงแล้วพบว่าชิ้นงานดังกล่าวมีค่าที่ลดลงนั้น ในการแก้ไขอาจจะต้องเริ่มเปลี่ยนเงื่อนไขของการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมก่อน เนื่องจากเงื่อนไขดังกล่าวอาจจะมีเหมาะสมสำหรับการทดลองก่อนที่จะนำไปทำเป็นชิ้นงานจริง แต่เมื่อนำมาทดลองทำเป็นชิ้นงานจริงแล้วพบว่าค่าการสะท้อนมีการลดลงอย่างมาก โดยการทำให้ฟิล์มมีความหนาที่ลดลงเพื่อให้มีค่าการสะท้อนที่เพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์. 2559. พื้นฐานของเทคโนโลยีฟิล์มบางและเทคนิคการผลิตฟิล์มบาง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.sut.ac.th/Engineering/Electrical/courses/429650/IC%20Week%208\\_Thin%20film%20technology.ppt](http://www.sut.ac.th/Engineering/Electrical/courses/429650/IC%20Week%208_Thin%20film%20technology.ppt).
- [2] ณัฐธิดา ศิริโรจน์. 2559. ทักษะอุปกรณ์. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://docs.google.com/presentation/d/1muEN9UrDz26145kZd4suuCfWs/edit#slide=id.i0>.
- [3] นิชากุล ศรีอุตหนู. 2559. การสะท้อนของแสง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://sites.google.com/site/nidchakoonsriaoodno1242/kar-sathxn-khxng-saeng>.
- [4] นิรันดร์ วิทิตอนันต์. 2554. งานเคลือบ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.manager.co.th/Campus/ViewNews.aspx?NewsID=9540000109046>.
- [5] นิรันดร์ วิทิตอนันต์. 2559. “การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบระบบฟิล์มบางแสง.”
- [6] วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [7] บริษัท นาโนชีลด์ จำกัด. 2559. PVD Coating คืออะไร?. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.nanoshield-pvd.com/pvd\\_thai.html](http://www.nanoshield-pvd.com/pvd_thai.html).
- [8] บริษัท Key to Metals AG. 2559. คุณสมบัติไทเทเนียม. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://apac.totalmateria.com/page.aspx?ID=TitaniumProperties&LN=TH>.
- [9] พัฒนา เทพขโลธร. 2548. “การเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบรีแอกทีฟ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [10] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2559. Vacuum / สูญญากาศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0846/vacuum-สูญญากาศ>.
- [11] พิเศษรุ้ง สิงห์ใจ. 2554. พัฒนาเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มบางของโลหะออกไซด์โดยกระบวนการสปาร์ค. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.trf.or.th/index.php?option=com\\_content&view=article&id=254:2013-12-02-09-17-43&catid=55&Itemid=204](http://www.trf.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=254:2013-12-02-09-17-43&catid=55&Itemid=204).
- [12] พรมงคล จัมลิ้ม. 2559. แสงเชิงกายภาพ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.mwit.ac.th/~pornmong/Interference.pdf>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. 2559. แสง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nuch/introphysics/14.pdf>.
- [14] ภาควิชาเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2559. ประโยชน์ของ Thin films. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/thin\\_film/use\\_app.htm](http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/thin_film/use_app.htm).
- [15] วิקיพีเดีย. 2559. การสะท้อน (ฟิสิกส์). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [https://th.wikipedia.org/wiki/การสะท้อน\\_\(ฟิสิกส์\)](https://th.wikipedia.org/wiki/การสะท้อน_(ฟิสิกส์)).
- [16] วิקיพีเดีย. 2559. อัตราเร็วของแสง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://th.wikipedia.org/wiki/อัตราเร็วของแสง>.
- [17] วีรจิต คุ้มวงศ์. 2559. สมบัติการหักเหของคลื่น. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://kruweerajit1.blogspot.com/p/blog-page.html>.
- [18] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2559. สีและแสง การวัดการดูดกลืน. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/12/6/CD/colorandLight/content.html>.
- [19] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.). 2555. วัสดุพิเศษรามิค. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1350-การเตรียมวัสดุพิเศษ?groupid=262>.
- [20] สุทธิมาตร วรการ. 2554. แพลทินัม. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.finejewelthai.com/Tlearning\\_precious\\_platinum.php](http://www.finejewelthai.com/Tlearning_precious_platinum.php).
- [21] สยามเคมี. 2559. อลูมิเนียม (Aluminium). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.siamchemi.com/อลูมิเนียม>.
- [22] สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2559. การแทรกสอดของคลื่นแสง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://science.sut.ac.th/physics/Doc/105102/phys2-6.pdf>.
- [23] ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง มหาวิทยาลัยบูรพา. 2551. ความเป็นมา เทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://vtff.buu.ac.th/index.php?option=com\\_content&view=article&id=22&Itemid=34](http://vtff.buu.ac.th/index.php?option=com_content&view=article&id=22&Itemid=34).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] อัมพร บุญญาสถิตสถาพร. 2559. การแทรกสอดของแสงผ่านฟิล์มบาง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.khayan.net/mata/physic/interference%20in%20thin%20films.pdf>.
- [25] Wikipedia. 2559. **Optical coating**. [Online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_coating](https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_coating).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ ณ ระดับน้ำทะเล และมวลอากาศ 1.5 ในคลื่นแสงช่วงตามองเห็น  
380 – 780 นาโนเมตร

Wavelength (nm)	Energy ( $Wm^{-2} \mu m^{-1}$ )
380	4.98E-01
390	5.85E-01
400	8.40E-01
410	8.09E-01
420	8.85E-01
430	7.01E-01
440	1.10E+00
450	1.29E+00
460	1.28E+00
470	1.27E+00
480	1.38E+00
490	1.40E+00
500	1.34E+00
510	1.35E+00
520	1.33E+00
530	1.36E+00
540	1.31E+00
550	1.36E+00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wavelength (nm)	Energy ( $\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ )
560	1.31E+00
570	1.32E+00
580	1.35E+00
590	1.23E+00
600	1.33E+00
610	1.32E+00
620	1.33E+00
630	1.26E+00
640	1.30E+00
650	1.23E+00
660	1.27E+00
670	1.29E+00
680	1.27E+00
690	1.07E+00
700	1.16E+00
710	1.20E+00
720	8.99E-01
730	1.03E+00
740	1.11E+00
750	1.13E+00
760	2.47E-01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wavelength (nm)	Energy ( $\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ )
770	1.06E+00
780	1.07E+00
Total	4.69E+01



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้