

การเตรียมแผ่นนำแสงโดยกระบวนการสลักด้วยเลเซอร์และการเคลือบด้วย
อนุภาคนาโน

LIGHT GUIDE PLATE FABRICATED BY LASER MARKING AND
NANOPARTICLE COATING PROCESSES

พลกฤษฎ์ เลิศรุ่งวิเชียร

PONRAKITT LEARTRUNGVICHIE

พาณพงค์ สิทธิเมธารักษ์

PANUPONG SITTHIMETHARUK

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุ

วิทยาลัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมวัสดุ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2567

LIGHT GUIDE PLATE FABRICATED BY LASER MARKING AND
NANOPARTICLE COATING PROCESSES

PONRAKITT LEARTRUNGVICHIE

PANUPONG SITTHIMETHARUK

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN NANOMATERIAL
ENGINEERING
COLLEGE OF MATERIALS INNOVATION AND TECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2024

COPYRIGHT 2024

COLLEGE OF MATERIALS INNOVATION AND TECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมวัสดุ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมแผ่นนำแสงโดยกระบวนการสลักด้วยเลเซอร์และการเคลือบด้วย
อนุภาคนาโน

Special Project Title LIGHT GUIDE PLATE FABRICATED BY LASER MARKING AND
NANOPARTICLE COATING PROCESSES

นักศึกษา พลกฤษฎี เลิศรุ่งวิเชียร

 พาณพงค์ สิทธิเมธารักษ์

รหัสประจำตัว

64110067

64110069

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา

นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา

2567

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.วิชญ์ เพชรภา

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ศ.ดร.วิชญ์ เพชรภา	
ผศ.ดร. ทศยาภรณ์ ทิววงศ์	
รศ.ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์	

ภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมวัสดุ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้ โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
วิศวกรรมวัสดุนาโน


(รองศาสตราจารย์ ดร.กรกช อ่อนละออ)

หัวหน้าภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี

วันที่ 22 เดือน.....พ.ค.....พ.ศ. 2568

โครงการพิเศษเรื่อง	การเตรียมแผ่นนำแสงโดยกระบวนการสลักด้วยเลเซอร์และการเคลือบด้วยอนุภาคนาโน
นักศึกษา	พลกฤษฎี เลิศรุ่งวิเชียร , พาณพพงศ์ สิทธิเมธารักษ์
รหัสประจำตัว	64110067, 64110090
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา	2567
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ.ดร. วิษณุ เพชรภา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาแผ่นนำแสง (Light Guide Plate: LGP) โดยใช้เทคโนโลยีการสร้างลวดลายด้วยเลเซอร์ และการเคลือบอนุภาคนาโน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำแสงของแผ่นนำแสง ให้ดียิ่งขึ้น ในงานวิจัยนี้แผ่นนำแสง ที่ใช้จะเป็นแผ่นอะคริลิก ขนาด 100x100 มิลลิเมตร และออกแบบโดยใช้โปรแกรม AutoCAD 2025 เพื่อให้มีรูปแบบและโครงสร้างที่เหมาะสม โดยเลนส์จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ที่ 0.75 มิลลิเมตร. มีระยะห่างของจุดกระจายแสงอยู่ที่ 1.25 1.50 และ 2.00 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นขนาดของเลนส์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ทำแผ่นนำแสง และนอกจากนั้นยังได้นำแผ่นนำแสง มาเคลือบด้วยอนุภาคระดับนาโนได้จากการบดแร่ธรรมชาติ รูไทล์ (Rutile) ที่มีปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์มากกว่า 90% นำมาผสมรวมกับ Polyvinyl Alcohol (PVA) เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนจะช่วยให้การกระจายแสงได้ดี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายแสงให้ดียิ่งขึ้นโดยปริมาณของอนุภาคนาโนคือ 0.5%, 1.0% และ 3.0 % นำมาทำการเคลือบลงบนแผ่นนำแสง แล้วนำไปวัดประสิทธิภาพการกระจายแสงด้วยอุปกรณ์วัดความส่องสว่างพบว่าแผ่นนำแสงที่มีระยะระหว่างจุดกระจายแสงเป็น 1.50 มิลลิเมตร มีการกระจายแสงและให้ความสว่างที่ดีที่สุด และเมื่อเคลือบด้วยอนุภาคนาโนพบว่า การเคลือบที่ปริมาณ 1.0% ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการส่องสว่างขึ้นมากถึง 52% ดังนั้นพบว่า การเคลือบแผ่นนำแสงด้วยอนุภาคนาโน จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายแสงของแผ่นนำแสง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการการกระจายแสงที่ดีขึ้น เช่น แผงหน้าจอแสดงผลและระบบแสงอื่น ๆ ที่ใช้แผ่นนำแสงได้

คำสำคัญ : แผ่นนำแสง, อะคริลิก, อนุภาคนาโน, แกะสลักด้วยเลเซอร์

Title	Light guide plate fabricated by laser marking and nanoparticles coating processes
Students	Ponrakitt Leartrungvichen, Panupong Sitthimetharuk
Student IDs	64110067, 64110069
Degree	Bachelor of Engineering
Field of study	Nanomaterials engineering
Academic year	2024
Advisor	Prof. Dr. Wisanu Pecharapa

Abstract

This research aims to study and develop a light guide plate (LGP) using laser patterning technology and nanoparticle coatings to enhance its light-guiding efficiency. The light guide plate used in this study is a 100x100 mm acrylic plate, designed using AutoCAD 2025 to achieve an optimal scattering dot pattern and structures having a diameter of 0.75 mm and varying spacing of 1.25, 1.50, and 2.00 mm, which are suitable for the light guide plate applications. Additionally, the light guide plate is coated with nanoparticles derived from ground natural Rutile ore which contains approximately 90% of TiO_2 mixed with Polyvinyl Alcohol (PVA). TiO_2 is chosen due to its excellent light-scattering properties, which could enhance light distribution when applied to the LGP. The TiO_2 concentration used in the coating process varies at 0.5%, 1.0%, and 3.0%, fabricated on the light guide plate surface. The results reveal that the light guide plate with the spacing of scattering dot of 1.50 mm coated with the particles with concentration of 1.0% can significantly enhance its luminance up to 52%. This study suggests that the efficiency of the light guide plate can be enhanced by coating with suitable nanoparticles at certain content. This study can lead to the application for devices requiring better light diffusion and distribution, such as display panels and other optical systems utilizing light guide plates.

Keywords: Light Guide Plate, Acrylic, Nanoparticles, Laser Engraving

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบพระคุณแก่อาจารย์ที่ปรึกษา ศาตราจารย์ ดร. วิษณุ เพชรภา
สำหรับการช่วยให้คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางในการทำงานวิจัยขึ้นนี้ให้บรรลุวัตถุประสงค์การวิจัย
ตลอดจนการเรียบเรียงเนื้อหาในรายงานฉบับนี้จนลุล่วงสมบูรณ์ และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการสนับสนุนเงินทุนในการจัดหาและจัดซื้อวัสดุ อุปกรณ์ และ
เครื่องมือที่ใช้ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมวัสดุ สำหรับการอบรมสั่ง
สอนวิชาความรู้ทั้งในภาคทฤษฎี และภาคปฏิบัติ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณะรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโท สำหรับการช่วยเสนอแนะแนวทางการทำงานวิจัย
และการเรียบเรียงเนื้อหาในการเขียนรายงานฉบับนี้

ขอขอบพระคุณพี่นักวิทยาศาสตร์ สำหรับการดูแล และให้คำแนะนำในการใช้งานเครื่องมือ
วิเคราะห์ และตรวจสอบสมบัติต่างๆ ด้วยเทคนิคการตรวจวัดที่เหมาะสม

ขอขอบพระคุณแม่บ้าน และรปภ.ทุกท่าน สำหรับการดูแลทำความสะอาดสถานที่ให้มีความ
สะอาดอย่างสม่ำเสมอ และดูแลรักษาความปลอดภัยให้ได้รับความกังวล

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรีทุกท่าน สำหรับการช่วยแสดงความคิดเห็น และมีส่วนร่วมใน
การให้ความช่วยเหลือในการวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ข้าพเจ้าเคารพรัก สำหรับการให้ความ
ช่วยเหลือในด้านต่างๆ และให้ความสนับสนุนข้าพเจ้ามาโดยตลอด

คณะผู้จัดทำ
พลกฤษฎี เลิศรุ่งวิเชียร
พานพวงส์ สิทธิเมธารักษ์

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1	
บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการทำงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2	
การทบทวนเอกสารหรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เทคโนโลยีแผ่นนำแสง (LGP Technology)	4
2.2 หลักการเคลื่อนที่และการกระเจิงของแสง	5
2.3 การแกะสลักด้วยเลเซอร์ (Laser Etching Technology)	9
2.3.1 หลักการทำงานของเครื่องแกะสลักด้วยเลเซอร์ DAJA A6	10
2.4 สมบัติของสารที่ใช้	11
2.4.1 อะคริลิก (Acrylic)	11

สารบัญ(ต่อ)

หน้าที่

2.4.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂) ที่ได้จากการบดแร่ธรรมชาติรูไทล์ (Rutile)	11
2.4.3 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA)	13
2.5 เครื่องมือวิเคราะห์ (Charterization Instrument)	13
2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	13
2.5.2 เอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffractometer, XRD)	15
2.5.3 เครื่องมือวัดการกระเจิงแสง	16
2.5.4 เครื่องวัดความเข้มแสง (Luminance meter)	17
2.5.5 ฟลูออเรสเซนซ์เอกซเรย์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer)	18
2.5.6 กล้องจุลทรรศน์ (Upright Microscope).....	19
2.6 โปรแกรมที่ใช้ออกแบบ	20
2.6.1 โปรแกรมออโต้ แคด(auto cad)	20
2.6.2 โปรแกรมสเก็ตอัพ(sketchup)	21
2.6.3 โปรแกรมคัตแลบเอ็กซ์ (CutLabX)	21
2.7 ทบทวนวรรณกรรม	22

บทที่ 3

รายละเอียดการปฏิบัติงาน	26
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	26
3.1.1 ซอฟต์แวร์ที่ใช้	26
3.1.2 เครื่องมือการแกะสลักด้วยเลเซอร์	27

สารบัญ(ต่อ)

หน้าที่

3.1.3 เครื่องมือการปาดเคลือบ	27
3.1.4 วัสดุเคลือบ	28
3.1.5 วัสดุที่ใช้ทำแผ่นนำแสง.....	28
3.2 ขั้นตอนการวิจัย	28
3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบแผ่นนำแสง.....	28
3.2.2 กระบวนการแกะสลักด้วยเลเซอร์	28
3.2.3 การเคลือบอนุภาคนาโน	29
3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	30
3.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพในการนำแสง	30
3.3.2 การวัดการกระจายแสง	30
3.3.3 การประเมินประสิทธิภาพการสะท้อนแสง	30
3.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	30
3.3.5 การสรุปผลและอภิปราย	31
3.4 ข้อจำกัดในการวิจัย.....	31
3.4.1 ข้อจำกัดด้านเวลา.....	31
3.4.2 ความแม่นยำของเครื่องมือ.....	31
3.4.3 การเลือกความเข้มข้นของสารเคลือบ.	31
3.4.4 คุณภาพของวัสดุ	32
3.4.5 เงื่อนไขการทดลอง	32

สารบัญ(ต่อ)

หน้าที่

บทที่ 4

ผลการทดลอง	33
------------------	----

4.1 การวัดขนาดอนุภาคนาโนที่ได้จากการบดแร่ธรรมชาติรูไทล์ (Rutile) โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	33
--	----

4.2 การตรวจสอบไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂) ที่ได้จากการบดแร่ธรรมชาติรูไทล์ (Rutile) ด้วยเทคนิคX-rayDiffraction(XRD).....	35
--	----

4.3 การวัดความสามารถในการสะท้อนแสงของอนุภาคนาโนที่ได้จากการบดแร่ธรรมชาติรูไทล์ (Rutile)	37
---	----

4.4 การสอบความแม่นยำของการสลักด้วยเลเซอร์บนแผ่นนำแสงที่ได้	38
--	----

4.5 การวัดความสามารถในการกระเจิงแสงของตัวอย่างแผ่นนำแสงที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂) ที่ได้จากการบดแร่ธรรมชาติรูไทล์ (Rutile)	41
---	----

4.6 การวัดความสม่ำเสมอของแสงที่ได้จากการทดลองกับตัวอย่างแผ่นนำแสงที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนที่ได้จากการบดแร่ธรรมชาติรูไทล์ (Rutile) Luminance meter	45
--	----

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง	46
--------------------------------	----

5.1 สรุปผลการทดลอง	46
--------------------------	----

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปศึกษาต่อในอนาคต	48
--	----

บรรณานุกรม	49
------------------	----

ประวัติผู้เขียน.....	56
----------------------	----

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
2.1 สรุปหัวข้องานวิจัยที่นำมาใช้อ้างอิง	25
3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบแผ่นนำแสง	28
3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการผสมสารเคลือบ	29
3.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการปาดเคลือบ	30
4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ที่รอบที่ 1-5	46
4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ที่รอบที่ 6-10	46

สารบัญรูป

รูปที่	หน้าที่
2.1 ภาพแสดงโครงสร้างของระบบส่องสว่าง	4
2.2 ภาพแสดงจุดนำแสงหรือจุดสะท้อนแสงที่พื้นผิวของแผ่นนำแสง	5
2.3 การเคลื่อนที่ของแสงตาหลักการหักเห.....	6
2.4 ภาพการเคลื่อนที่ของแผ่นที่ผ่านตัวกลาง 2 ชนิด (Snell's law)	7
2.5 การหักเหและการกระเจิงของแสงในตัวกลางโปร่งใส.....	7
2.6 การเคลื่อนที่ของแสงภายในแผ่นนำแสงที่มีอนุภาคเคลือบอยู่ด้านบน	8
2.7 การกระเจิงแสงแต่ละชนิดที่เปลี่ยนตามขนาดของอนุภาค	8
2.8 ภาพแสดงเครื่อง DAJA-A6 Laser-High cost-effective dual laser all material engraving small laser engraving machine	10
2.9 ภาพแสงตัวอย่างแผ่นอะคริลิก	11
2.10 ภาพไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	12
2.11 ภาพแร่ธรรมชาติรูไทล์ (Rutile)	13
2.12 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	14
2.13 รูปเครื่อง (X-Ray Diffractometer, XRD)	16
2.14 เครื่องมือวัดการกระเจิงแสง	17
2.15 รูปเครื่องวัดความเข้มแสง (Lux Light Meter)	18
2.16 ตัวอย่างการออกแบบแผ่นนำแสงด้วยโปรแกรมโปรแกรมอัตโนมัติ แคด (AutoCAD)	20
2.17 ตัวอย่างการออกแบบด้วยโปรแกรมสเก็ตอัพ (SketchUp)	21
2.18 ตัวอย่างการตั้งค่ากำลังเลเซอร์ผ่านโปรแกรม (CutLabX)	21

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
2.19 3D micrographs and profiles of K9 glass and PMMA.....	22
2.20 Performance of various dot sizes	23
2.21 (a)A micro pattern on the stamper by laser ablation and a sample of graph for the measured cross-sectional profile, (b)Roll-stamped pattern formed on the LGP and a sample of graph for the measured cross-sectional profile	23
2.22 Absorbance spectra of heterogenous TiO_2	24
3.1 autodesk autocad 2025 3d licență permanentă/lifetime original software	26
3.2 ภาพแสดงเครื่อง DAJA-A6 Laser-High cost-effective dual laser all material engraving small laser engraving machine	27
3.3 ภาพแสดงเครื่อง NST Compact Tape Casting Coater	27
4.1 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการบดแร่รูไทล์ที่ใช้ระยะเวลาในการบด 120 นาทีและใช้ความเร็ว 600 รอบต่อนาทีที่กำลังขยายต่างกัน (a) 5000เท่า, (b) 10000เท่า, (c) 20000เท่า, (d) 50000เท่า	34
4.2 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์รูไทล์ (Rutile) ด้วยเทคนิค XRD	35
4.3 กราฟแสดงองค์ประกอบของแร่ธรรมชาติรูไทล์(Rutile)	37
4.4 ภาพขนาดของจุดกระเจิงแสงและระยะห่างระหว่างจุดที่ 1.25 mm., 1.50 mm., 2.00 mm. ตามลำดับ	38
4.5 ภาพเปรียบเทียบแผ่นนำแสงแบบไม่เคลือบ a) 1.25mm./uncoated, b) 1.50mm./uncoated, c) 2.00mm./uncoated และแบบเคลือบ d) 1.25mm./0.5%w/v, e) 1.50mm./0.5%w/v, f) 2.00mm./0.5%w/v, g) 1.25mm./1%w/v, h) 1.50mm./1%w/v, i) 2.00mm./1%w/v, j) 1.25mm./3%w/v, k) 1.50mm./3%w/v, l) 2.00mm./3%w/v	40
4.6 ค่ากระจายแสงที่มุม -90 องศาถึง 90 องศาที่มีการเคลือบอนุภาคนาโนด้วยปริมาณ 0 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร	41
4.7 ค่ากระจายแสงที่มุม -90 องศาถึง 90 องศาที่มีการเคลือบอนุภาคนาโนด้วยปริมาณ 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
4.6(ต่อ) ภาพการเปรียบเทียบการกระเจิงแสงของแผ่นอะคริลิกเปล่าที่ใช้(blank) กับแผ่นนำแสงแบบเปล่าและแบบเคลือบ a) 1.25mm./uncoated, b) 1.50mm./uncoated, c) 2.00mm./uncoated, d)1.25mm./0.5%w/v,e)1.50mm./0.5%w/v,f)2.00mm./0.5%w/v.....	43
4.7(ต่อ) ภาพการเปรียบเทียบการกระเจิงแสงของแผ่นอะคริลิกที่ใช้เปล่า(blank) กับแผ่นนำแสงแบบเคลือบ a) 1.25mm./1%w/v, b) 1.50mm./1%w/v, c) 2.00mm./1%w/v, d) 1.25mm./3%w/v, e) 1.50mm./3%w/v, f) 2.00mm./3%w/v.....	44
4.8 กราฟแท่งที่แสดงค่าความสว่าง (Lux) ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน	45

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในยุคปัจจุบัน ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี,ความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องสำหรับแสงสว่างและอุปกรณ์แสดงผลที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพสูงแผ่นนำแสง (Light Guide Plate, LGP) จึงกลายเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับอุปกรณ์เหล่านี้ เนื่องจากสมบัติในการกระจายแสงอย่างมีประสิทธิภาพและสม่ำเสมอของแผ่นนำแสง โดยใช้ทรัพยากรแสงเพียงน้อยนิด แต่สามารถสร้างความสว่างที่เหมาะสมได้อย่างน่าพึงพอใจ ด้วยเหตุนี้แผ่นนำแสงจึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในจอแสดงผล LED, ป้ายไฟ, เครื่องฉายโปรเจกเตอร์ และระบบแสงสว่างในอาคาร ตลอดจนรูปแบบการออกแบบที่ล้ำสมัยในระบบแสงสว่างที่ให้ความสำคัญกับความสวยงามและประสิทธิภาพ แม้ว่าในปัจจุบัน แผ่นนำแสงยังประสบปัญหาบางประการ อาทิเช่น การกระจายแสงที่ไม่ทั่วถึงหรือการสูญเสียพลังงานแสง ซึ่งอาจกระทบกับความคมชัดของภาพและประสิทธิภาพของแสงในระบบ การค้นคว้าและวิจัยจึงเกิดขึ้นเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของแผ่นนำแสง โดยหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงสุดในปัจจุบันคือ การสลักด้วยเลเซอร์ และการเคลือบด้วยอนุภาคนาโน ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างได้ผล การสลักด้วยเลเซอร์เป็นกระบวนการที่สามารถกำหนดลวดลายบนพื้นผิวของแผ่นนำแสง อย่างแม่นยำ ลวดลายนี้จะช่วยให้แสงกระจายออกจากแผ่นนำแสงอย่างสม่ำเสมอและมีความหนาแน่นมากขึ้น การปรับแต่งลวดลายด้วยเลเซอร์ยังสามารถเพิ่มศักยภาพในการควบคุมทิศทางของแสงเพื่อให้เกิดการกระจายแสงตามต้องการ อีกทั้ง การเคลือบด้วยอนุภาคนาโนที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น การสะท้อนและการกระเจิงของแสง ช่วยเสริมการกระจายแสงและลดการสูญเสียพลังงานในกระบวนการผลิตและใช้งาน ส่งผลให้แผ่นนำแสงมีคุณภาพสูงขึ้นและประหยัดพลังงาน การศึกษาการเตรียมแผ่นนำแสงผ่านเทคโนโลยีเลเซอร์และการเคลือบอนุภาคนาโนมีความสำคัญหลายด้าน ไม่เพียงแต่เพื่อปรับปรุงคุณภาพและประสิทธิภาพของแผ่นนำแสง แต่ยังช่วยให้การออกแบบอุปกรณ์แสดงผลและระบบแสงสว่างลดการใช้ทรัพยากรและพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ การใช้เทคโนโลยีเลเซอร์ช่วยลดความจำเป็นในการใช้วัสดุส่วนเกิน ในขณะที่การเคลือบอนุภาคนาโนเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานระยะยาว วิจัยและพัฒนาวิธีการเหล่านี้ย่อมมีคุณค่าต่ออุตสาหกรรมในการลดต้นทุนการผลิตและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและสมบัติของแผ่นนำแสง ให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของตลาดและภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการระบบแสดงผลที่มีคุณภาพสูงและทนทาน โดยเฉพาะในอุตสาหกรรม

อิเล็กทรอนิกส์และการแสดงผล ซึ่งเป็นตลาดที่มีความต้องการสูง การสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่ใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญอย่างยิ่ง การพัฒนานี้เพิ่มพูนทั้งด้านการใช้งานจริงและการส่งเสริมงานวิจัยทางวิชาการในอนาคต ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของเทคโนโลยีและความยั่งยืนในการผลิต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาแผ่นนำแสง (Light Guide Plate หรือ LGP) โดยการใช้เทคโนโลยีการแกะสลักด้วยเลเซอร์และเคลือบด้วยอนุภาคนาโนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายแสงของแผ่นนำแสง

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 0.5%, 1% และ 3% ว่ามีผลต่อประสิทธิภาพในการกระจายแสงและความเข้มของแสงที่ส่องผ่านแผ่นนำแสง

1.2.3 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นนำแสงในด้านความสว่าง และความสม่ำเสมอในการกระจายแสงด้วยอนุภาคนาโน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาและพัฒนาแผ่นนำแสง (LGP) โดยการใช้เทคโนโลยีและการแกะสลักด้วยเลเซอร์เพื่อให้ได้เลนส์ที่มีความเหมาะสมกับการใช้งาน

1.3.2 การทดลองด้วยการเคลือบแผ่นนำแสง ด้วยอนุภาคนาโนที่ได้จากแร่ธรรมชาติ ที่ผสมด้วย Polyvinyl Alcohol (PVA) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายแสง

1.3.3 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย: งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการใช้วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิต แผ่นนำแสงเช่น แผ่นอะคริลิกหรือแผ่นโพลีคาร์บอเนต โดยวัสดุเหล่านี้ต้อง มีสมบัติโปร่งแสงสูง และรองรับกระบวนการสลักด้วยเลเซอร์ได้ดี

1.3.4 การทดสอบประสิทธิภาพ: การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่น LGP ที่พัฒนาขึ้นจะรวมถึงการวัดความสว่าง ความคมชัด และการกระจายแสง โดยทดสอบกับอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อประเมินความสามารถในการใช้งานจริงในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และแหล่งกำเนิดแสง LED

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 พัฒนาแผ่นนำแสงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นการใช้กระบวนการสลักด้วยเลเซอร์ และการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนจะช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายแสงของแผ่นนำแสง

1.4.2 ลดต้นทุนการผลิตในระยะยาวแม้ว่าเทคโนโลยีเลเซอร์และอนุภาคนาโนอาจมีต้นทุนในการวิจัยและพัฒนา แต่การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นนำแสงจะช่วยให้ผู้ผลิตสามารถลดการใช้วัสดุและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต

1.4.3 ลดต้นทุนและของเสียในการผลิต: การสลักกลึงด้วยเลเซอร์ช่วยลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตและเพิ่มความแม่นยำ ทำให้สามารถผลิตแผ่นนำแสงได้ตรงตามข้อกำหนดและมีคุณภาพสูง ลดต้นทุนการผลิตและความสูญเสียทรัพยากร

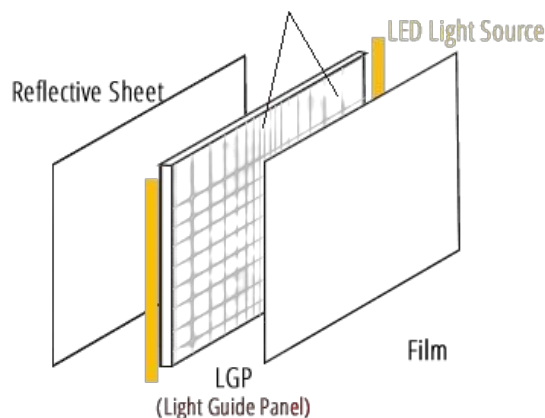
1.4.4 เป็นฐานข้อมูลสำหรับการวิจัยในอนาคต: ผลการวิจัยนี้จะเป็นแนวทางสำคัญสำหรับงานวิจัยเพิ่มเติมในด้านการพัฒนาแผ่นนำแสง เช่น การพัฒนาเทคโนโลยีสลักเลเซอร์ที่มีความละเอียดสูงขึ้น และการใช้วัสดุเคลือบที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติพิเศษอื่นๆ ของแผ่นนำแสง เช่น การป้องกันการสะสมฝุ่นหรือลดการสะท้อนแสง

บทที่ 2

การทบทวนเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีแผ่นนำแสง (LGP Technology)

แผ่นนำแสง (Light Guide Plate - LGP) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในระบบแสงสว่างที่ใช้ LED โดยเฉพาะในอุปกรณ์ที่ต้องแสดงผล เช่น หน้าจอ LCD, LED TV, ป้ายโฆษณา และอุปกรณ์แสงสว่างที่ต้องการความกระจายแสงที่สม่ำเสมอ แผ่นนำแสงจึงทำหน้าที่เป็นตัวกลางที่ช่วยนำแสงสะท้อนและกระจายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปสู่พื้นผิวของแผ่นกระจายแสงอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้หลักจากการสะท้อนและการกระจายแสงเพื่อให้แสงเกิดการกระจายตัวของแสงอย่างเหมาะสมกับการใช้งาน [21]



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงโครงสร้างของระบบส่องสว่าง [64]

จาก รูปที่ 2.1 จะแสดงให้เห็นส่วนประกอบส่วนต่างๆของระบบส่องสว่างซึ่งจะประกอบด้วย4ส่วนคือ แผ่นสะท้อนแสงแผ่นนำแสงไฟLEDและแผ่นฟิล์มที่มีหน้าที่ช่วยในการกระจายแสง[25]ซึ่งในแต่ละส่วนนั้นมีหน้าที่ช่วยในการกระจายแสงในมีความสม่ำเสมอและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของระบบ โดยแผ่นสะท้อนแสงจะทำหน้าที่สะท้อนแสงจากแหล่งกำเนิดแสงให้กระจายออกมาอย่างทั่วถึงทั้งแผ่นนำแสงและการออกแบบในแต่ละส่วนต้องคำนึงถึงสมบัติการกระจายแสงด้วย [26]



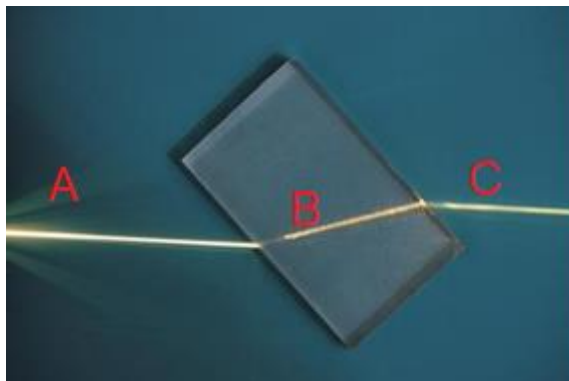
รูปที่ 2.2 ภาพแสดงจุดนำแสงหรือจุดสะท้อนแสงที่พื้นผิวของแผ่นนำแสง [62]

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าแผ่นนำแสงนั้นจะมีจุดเล็กๆที่เรียกว่า “จุดนำแสง” หรือ “จุดสะท้อนแสง” (Light Guide Dots หรือ Light Reflective Dot) โดยที่จุดเหล่านี้มีหน้าที่สำคัญในการกระจายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ขอบของแผ่นนำแสงให้กระจายออกไปอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น[22] ซึ่งการสร้างจุดนำแสงหรือจุดสะท้อนแสงสามารถสร้างได้หลายวิธีเช่น การใช้การบาก (Etching) การใช้ลายจุด (Dot Patterning) การใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3D [27]และการใช้เทคโนโลยีการแกะสลักด้วยเลเซอร์ ซึ่งวิธีการการแกะสลักด้วยเลเซอร์นั้นสามารถออกแบบรูปร่างรูปแบบของจุดนำแสงได้ง่ายผ่านการใช้งานโปรแกรม AutoCad จึงทำให้ได้แบบรูปแบบการจัดวางและขนาดของจุดนำแสงเป็นไปตามความต้องการได้ง่ายกว่าวิธีอื่น [28]

2.2 หลักการหักเหและการกระเจิงของแสง

จากการอธิบายหลักการของแผ่นนำแสง ที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นนั้น ในงานวิจัยนี้มีความสนใจที่ต้องการศึกษาหลักการทำงานต่างๆของแผ่นนำแสง ซึ่งแผ่นนำแสงนั้นจะมีวิธีการออกแบบและการใช้วัสดุที่หลากหลายแตกต่างกันไป โดยที่การทดลองนี้ได้เลือกการแกะสลักด้วยเลเซอร์และเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซึ่งอนุภาคนี้อาจจะเป็นตัวแปรสำคัญในการทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางแสงขึ้น แสดงดัง

รูป จะเป็นการอธิบายแบบจำลองการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงที่เดินทางจากจุดA ไปยังตัวกลางB เพื่อที่จะเดินทางไปยังจุดCจะแสดงให้เห็นถึงการหักเหของแสงที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางซึ่งเป็นไปตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law)



รูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของแสงตามหลักการหักเห[63]

ดังนั้นกฎของสเนลล์ (Snell's Law) จึงถูกนำมาใช้ในการออกแบบแผ่นนำแสง เพื่อควบคุมมุมของแสงที่สะท้อนและหักเหภายในแผ่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายแสงดังสมการที่ 2.2 โดยเงื่อนไขของการสะท้อนภายในทั้งหมด (TIR) จะเกิดขึ้นได้เมื่อมุมตกกระทบของแสงมีค่ามากกว่ามุมวิกฤต ($\theta_1 > \theta_c$) สามารถคำนวณได้จากสมการ [13]

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.1)$$

โดยที่

θ_c = มุมวิกฤต (Critical Angle)

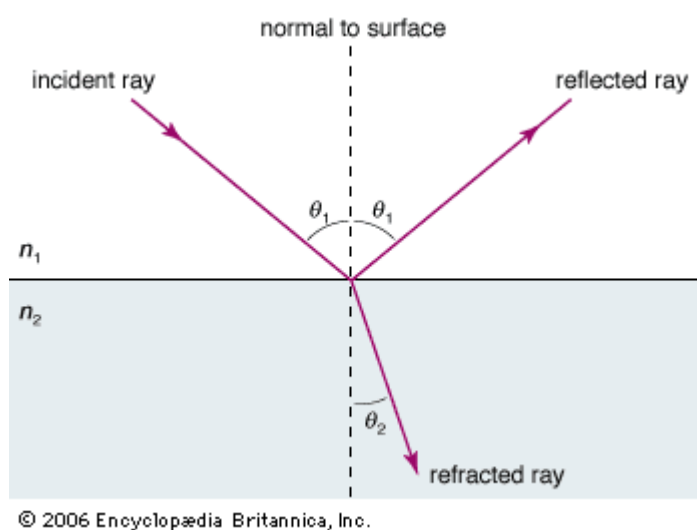
n_1 = ดัชนีหักเหของแผ่นLGP (PMMA, $n_1 \approx 1.49$)

n_2 = ดัชนีหักเหของอากาศ ($n_2 \approx 1.00$)

ซึ่งในกรณีของ PMMA ($n_1 \approx 1.49$) และอากาศ ($n_2 \approx 1.00$) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{1.00}{1.49}\right) \approx 42^\circ$$

หมายความว่า หากแสงตกกระทบภายในแผ่นนำแสง ที่มีมุมมากกว่า 42 องศา แสงจะสะท้อนกลับเข้าสู่แผ่นLGPและถูกนำทางไปยังบริเวณที่ต้องการโดยไม่มีการออกจากพื้นผิว ซึ่งช่วยให้แผ่นนำแสงสามารถกระจายแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการออกแบบหลอดลายควมควบคุมให้แสงมีมุมตกกระทบมากกว่า42° เพื่อให้เกิดการสะท้อนแสงภายในแผ่นในอย่างสมบูรณ์



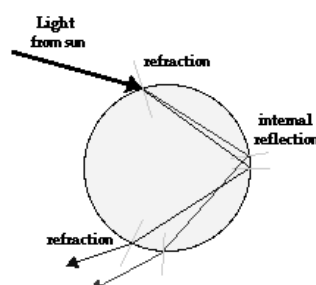
รูปที่ 2.4 ภาพการเคลื่อนที่ของแผ่นที่ผ่านตัวกลาง 2 ชนิด (Snell's law) [61]

จากสมการที่ 2.1 นั้นช่วยในการกำหนดเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดของแสงภายในแผ่นนำแสงนั้น การสะท้อนกลับหมด (Total Internal Reflection) เกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูง (n_1) ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่า (n_2) และมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤต [29]

จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงการสะท้อนของแสงเมื่อผ่านตัวกลางที่สมบัติการหักเหและสะท้อนแสงที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าแสงที่มีสีต่างกัน จะสะท้อนหรือหักเหในตำแหน่งที่ต่างกัน ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยกฎของสเนลล์ (Snell's law) ดังสมการที่ 2.2 [30]

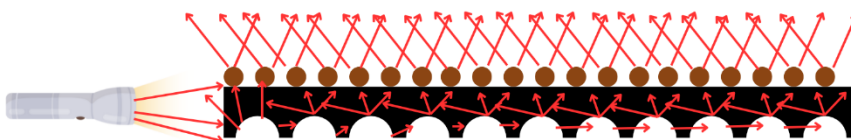
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.2)$$

โดยที่ n_1 และ n_2 เป็นดัชนีหักเหของตัวกลางเช่นอะคริลิก, θ_1 และ θ_2 เป็นมุมตกกระทบและมุมหักเห

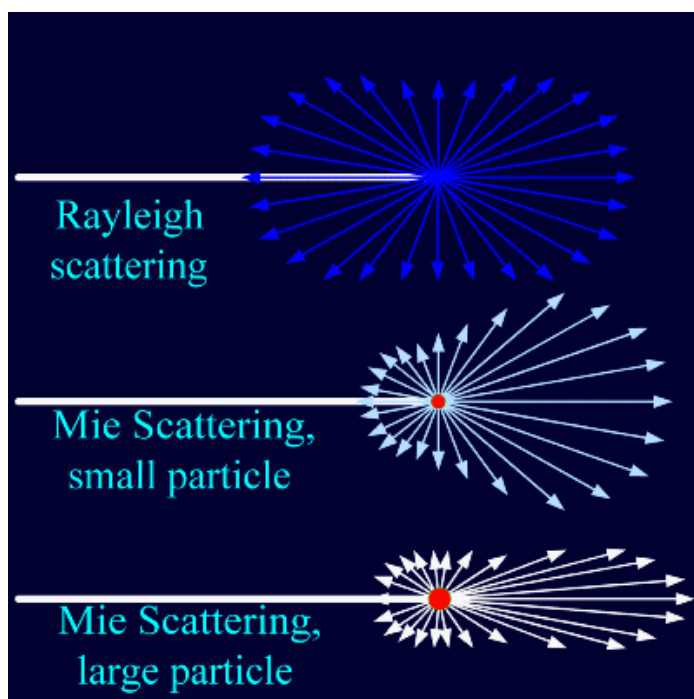


รูปที่ 2.5 การหักเหและการกระเจิงของแสงในตัวกลางโปร่งใส [60]

และเมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน จะเกิดการหักเหในมุมที่ต่างกัน จะเกิดปรากฏการณ์ทางแสงที่เรียกว่า “การกระจายแสง”(Dispersion) แสงขาวหรือแสงที่ตามองเห็นในย่านที่มองเห็น(visible region) มีความยาวคลื่นในช่วง400-700นาโนเมตร [31] แสงที่มีความยาวคลื่นน้อยที่สุด เช่น แสงสีม่วง จะหักเหได้มากที่สุดในขณะที่แสงที่มีความยาวคลื่นมากที่สุดเช่นสีแดงจะหักเหได้น้อยที่สุด[32]



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของแสงภายในแผ่นนำแสงที่มีอนุภาคเคลื่อนอยู่ด้านบน



รูปที่ 2.7 การกระเจิงแสงแต่ละชนิดที่เปลี่ยนตามขนาดของอนุภาค[59]

ในส่วนของการกระเจิงของแสงในแผ่นนำแสงสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักๆได้แก่ การกระเจิงแบบเรย์ลีห์ (Rayleigh Scattering) และหลักจากการกระเจิงแบบมี (Mie Scattering) การกระเจิงแบบเรย์ลีห์เกิดขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคที่ทำให้เกิดการกระเจิงมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสง (น้อยกว่า 0.1 เท่าของความยาวคลื่น) ในกรณีนี้ อัตราการกระเจิงจะแปรผกผันกับความยาวคลื่นยกกำลังสี่ หมายความว่า แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า เช่น แสงสีม่วง จะกระเจิงได้มากกว่าแสง

ที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า เช่น แสงสีแดง ในทางกลับกัน การกระเจิงแบบมีเกิดขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคที่ทำให้เกิดการกระเจิงมีขนาดใกล้เคียงหรือใหญ่กว่าความยาวคลื่นของแสง (ประมาณ 0.1 ถึง 10 เท่าของความยาวคลื่น) ในกรณีนี้ อัตราการกระเจิงจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นในรูปแบบที่ซับซ้อนกว่า อนุภาคในกลุ่มนี้ที่สำคัญ ได้แก่ ละอองน้ำหรือฝุ่นละออง [33]

ดังนั้น ขนาดของอนุภาคที่อยู่ในแผ่นนำแสงจะมีผลต่อรูปแบบการกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้น หากอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 0.1 เท่าของความยาวคลื่น แสงจะกระเจิงแบบเรย์ลีห์ แต่หากอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 0.1 เท่าของความยาวคลื่น แสงจะกระเจิงแบบมี ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการอธิบายได้อธิบายได้ด้วยสมการการกระเจิงแสงแบบ Rayleigh Scattering ซึ่งเป็นสมการที่สามารถหาค่าความเข้มของแสงที่มุมการกระเจิงของแสงแบบ Rayleigh Scattering ซึ่งเป็นสมการที่สามารถหาค่าความเข้มของแสงที่มุมการกระเจิงต่างๆได้ดังสมการที่ 2.3 [33]

$$I_s = \frac{I_0 8\pi^8 N a^6}{\lambda^4 r^2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2 (1 + \cos^2 \theta) \quad (2.3)$$

โดยที่

I_0 คือ ค่าความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสง

N คือ ปริมาณของอนุภาค

a คือ ขนาดของอนุภาค

λ คือ ความยาวคลื่นแสง

r คือ อัตราส่วนระหว่างจุดกระเจิงแสงกับจุดสังเกตการณ์

m คือ อัตราส่วนระหว่างค่าดัชนีหักเหของอนุภาคกับแผ่นนำแสง

θ คือ มุมการกระเจิงของแสง

2.3 การแกะสลักด้วยเลเซอร์ (Laser Etching Technology)

การแกะสลักด้วยเลเซอร์ เป็นเทคนิคที่ใช้ ลำแสงเลเซอร์พลังงานสูง ในการสร้างร่องหรือโครงสร้างบนพื้นผิววัสดุโดยการ เผาผลาญ หรือทำให้วัสดุระเหยบางส่วน ออกจากพื้นผิว[37]เทคนิคนี้สามารถใช้ได้กับวัสดุต่างๆ เช่น พลาสติก, โลหะ, เซรามิก และแก้ว โดยมีข้อดีคือความแม่นยำสูง การทำซ้ำได้ดี และสามารถสร้างลวดลายที่ซับซ้อนได้[38]

2.3.1 หลักการทำงานของเครื่องแกะสลักด้วยเลเซอร์ DAJA A6

ในการทดลองนี้ใช้เครื่อง DAJA A6 ซึ่งเป็น เลเซอร์ไดโอดแบบพลังงานต่ำ ที่สามารถแกะสลักบนวัสดุเช่น พลาสติก, ไม้, และอะคริลิกได้ [39]

คุณสมบัติของ DAJA A6:

- ประเภทเลเซอร์: ไดโอดเลเซอร์ (Diode Laser)
- กำลังไฟ: 3,000 - 5,500 mW
- ความยาวคลื่น: 450 nm (แสงสีน้ำเงิน)
- พื้นที่แกะสลัก: 80 × 80 mm
- วัสดุที่สามารถแกะสลักได้: อะคริลิก, พลาสติก, ไม้บาง, กระดาษ

การแกะสลักบนแผ่นนำแสง ด้วย DAJA A6 สามารถปรับ พลังงานเลเซอร์ และความเร็วของการแกะสลัก เพื่อควบคุม ความลึกของร่อง และลวดลายของพื้นผิว ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการกระจายแสงของแผ่นนำแสง [40]



รูปที่ 2.8 ภาพแสดงเครื่อง DAJA-A6 Laser-High cost-effective dual laser all material engraving small laser engraving machine [19]

โดยที่จะใช้งานผ่านโปรแกรม Cutlabx โดยจะสามารถค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นต่อการใช้งานได้ภายในโปรแกรม CutlabX

2.4 สมบัติของสารที่ใช้

2.4.1 อะคริลิก (Acrylic)

อะคริลิก (Acrylic) เป็นวัสดุพลาสติกที่มีสมบัติทางแสงที่โดดเด่นหลายอย่างทำให้สามารถใช้งานได้หลายประเภท ซึ่งอะคริลิกนั้นมีความโปร่งใสสูงมากโดยสามารถให้แสงส่องผ่านได้ 92% ซึ่งเทียบเท่าหรือดีกว่ากระจก และอะคริลิกมีการสะท้อนแสงที่ผิวประมาณ 4% และยังสามารถกระจายแสงได้ดีจึงเหมาะสำหรับการนำมาใช้ในการทำเป็นแผ่นนำแสง นอกจากนี้อะคริลิกยังมีความทนทานต่อแสงพลังงานสูงเช่นแสงอัลตราไวโอเล็ตได้นานทำให้เหมาะกับการใช้ในที่โล่งแจ้ง [34-35]



รูปที่ 2.9 ภาพแสงตัวอย่างแผ่นอะคริลิก [36]

2.4.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ได้จากการบดแร่ธรรมชาติรูไทล์ (Rutile)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นวัสดุที่มีดัชนีหักเหแสงที่สูงและมีความสามารถในการกระจายแสง (Scattering) ได้ดีซึ่งสามารถอธิบายการกระจายแสงได้โดยใช้ แบบจำลองการกระเจิงแสงของ Lambertian (Lambertian Scattering Model) ตามสมการนี้

$$I(\theta) = I_0 \cos\theta \quad (2.4)$$

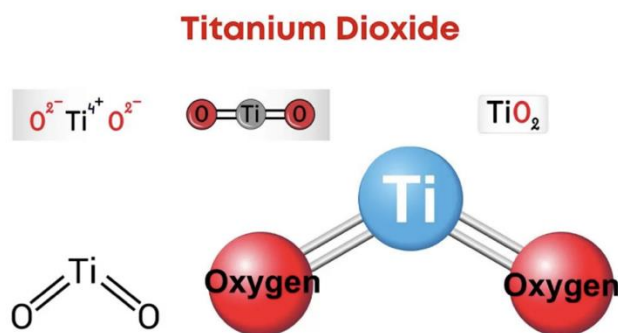
โดยที่

$$I(\theta) = \text{ความเข้มของแสงที่กระเจิงออกที่มุม } \theta$$

$$I_0 = \text{ความเข้มของแสงที่ตกกระทบโดยตรง}$$

สมการนี้แสดงให้เห็นว่า พื้นผิวที่มีการกระเจิงแสงแบบ Lambertian จะมีความเข้มของแสงลดลงตามมุมของแสงที่กระเจิงออกมา [14]

การเคลือบ TiO_2 บน LGP ทำให้พื้นผิวมีพฤติกรรมการกระเจิงแสงแบบ Lambertian ซึ่งช่วยให้แสงกระจายได้อย่างสม่ำเสมอมากขึ้น [15] ในการพัฒนาแผ่นนำแสง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายแสง วัสดุที่ใช้สำหรับเคลือบผิวมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมทิศทางและคุณภาพของแสงที่ออกจากแผ่นนำแสง โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้รูไทล์ (Rutile) เป็นวัสดุหลักในการเคลือบแผ่นนำแสง เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น มีค่าดัชนีหักเหสูง (High Refractive Index) ทำให้เมื่อเคลือบ TiO_2 ($n \approx 2.4 - 2.7$) บนพื้นผิวของแผ่นนำแสง ที่ทำจากอะคริลิก ($n \approx 1.49$) จะช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหระหว่างชั้นวัสดุ ทำให้แสงสามารถสะท้อนและกระจายตัวได้ดีขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการนำแสงและการกระจายแสงดีขึ้น อนุภาคนาโนของ TiO_2 สามารถทำให้เกิดการกระเจิงแสงแบบ Lambertian ซึ่งเป็นรูปแบบการกระเจิงที่ทำให้แสงกระจายออกไปทุกทิศทางอย่างสม่ำเสมอ [15] โดยไม่ขึ้นกับมุมของแสงที่ตกกระทบ ซึ่งมีส่วนช่วยทำให้ลดการเกิดจุดสว่าง (Hotspot) และเพิ่มความสม่ำเสมอของแสงที่ออกจากแผ่นนำแสง ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์จอแสดงผลลดการดูดกลืนแสง (Low Absorption Loss) TiO_2 มีอัตราการดูดกลืนแสงที่ต่ำมาก [18] ในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ (Visible Spectrum, 400-700 nm) เมื่อนำเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นที่นำมาใช้เคลือบลงบนแผ่นนำแสง ซึ่งช่วยทำให้ช่วยลดการสูญเสียพลังงานแสงและทำให้แผ่นนำแสง แสดงประสิทธิภาพได้เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.10 ภาพไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) [6]



รูปที่ 2.11 ภาพแร่ธรรมชาติรูไทล์ (Rutile) [58]

2.4.3 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA)

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol: PVA) เป็นโพลิเมอร์สังเคราะห์ที่ละลายน้ำได้ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่มีสารพิษ PVA มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น การก่อฟิล์มที่ดี ความสามารถในการยึดติดสูง และทนทานต่อน้ำมันและตัวทำละลาย นอกจากนี้ PVA ยังมีความแข็งแรงเชิงกลสูงและความยืดหยุ่นดี อย่างไรก็ตาม สมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับความชื้น เนื่องจากน้ำที่ถูกดูดซับจะทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้พลาสติกนิ่มลง ซึ่งจะลดความต้านทานแรงดึง แต่เพิ่มการยืดตัวและความแข็งแรงต่อการฉีกขาด[53] ในด้านสมบัติทางแสง โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ มีดัชนีการหักเหของแสง อยู่ที่ประมาณ 1.52 ค่าดัชนีการหักเหนี้ชี้ว่า PVA มีความโปร่งใสและสามารถส่งผ่านแสงได้ดี ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานในการทดลองนี้ [54]

2.5 เครื่องมือวิเคราะห์ (Characterization Instrument)

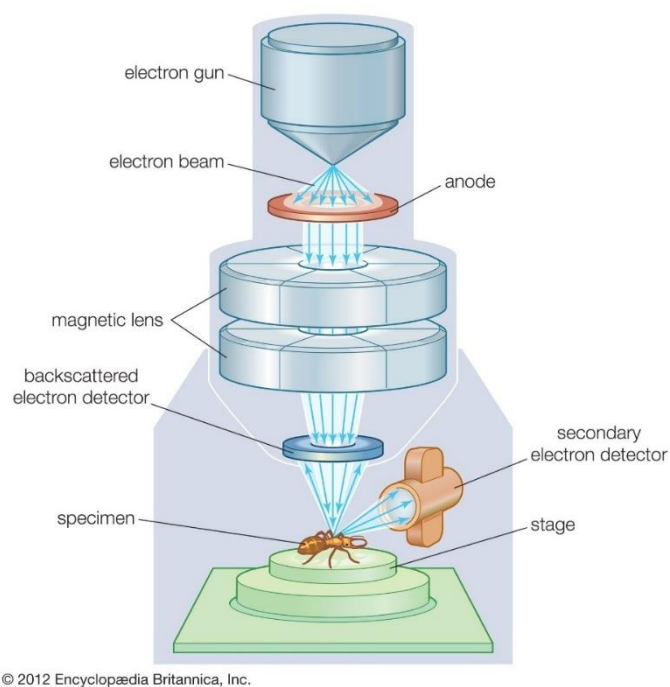
2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นเครื่องมือที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนพลังงานสูงสแกนพื้นผิวของตัวอย่าง และตรวจจับอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมา ได้แก่ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons) และอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (backscattered electrons) เพื่อนำมาสร้างภาพที่มีความละเอียดสูง ทำให้สามารถศึกษาลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างขนาดเล็กได้ [42]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning Electron Microscope, SEM) ใช้ปืนอิเล็กตรอนสร้างลำแสงอิเล็กตรอนที่ถูกโฟกัสผ่านเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวอย่าง เมื่ออิเล็กตรอนชนกับพื้นผิว จะเกิดปฏิกิริยากับอะตอมหรือโมเลกุล ทำให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิและอิเล็กตรอนสะท้อนกลับถูกปล่อยออกมา จากนั้นตัวตรวจจับจะรับสัญญาณและแปลงเป็นภาพที่ขยายใหญ่ขึ้น [43]

ข้อดีของ SEM

- ให้ภาพความละเอียดสูง กำลังขยายสูง และคอนทราสต์ดี
- ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิว งานไมโครแพบริเคชัน และวิจัยวัสดุ
- สามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น
 - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS): วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี
 - Cathodoluminescence (CL): ศึกษาการเปล่งแสงของวัสดุ
 - Electron Backscatter Diffraction (EBSD): วิเคราะห์โครงสร้างผลึก



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning Electron Microscope, SEM) [44]

2.5.2 เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

X-ray Diffraction (XRD) [46-47] หรือการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ไม่ทำลายตัวอย่าง ซึ่งใช้ในการระบุโครงสร้างผลึก องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ หลักการทำงานของ XRD อาศัยปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อกระทบกับโครงสร้างผลึกของวัสดุ โดยมีขั้นตอนดังนี้:

1. การสร้างรังสีเอกซ์ (X-ray generation): เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์จะสร้างลำรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเฉพาะ
2. การกระทบรังสีเอกซ์กับตัวอย่าง (X-ray interaction with sample): ลำรังสีเอกซ์จะถูกยิงไปยังตัวอย่างที่เป็นผลึก
3. การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction): รังสีเอกซ์จะเลี้ยวเบนออกจากอะตอมในโครงสร้างผลึกตามกฎของ Bragg: $n\lambda = 2d \sin\theta$
 - n คือจำนวนเต็ม (order of diffraction)
 - λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
 - d คือระยะห่างระหว่างระนาบอะตอม
 - θ คือมุมตกกระทบ
4. การตรวจจับรังสีเอกซ์ (X-ray detection): ตัวตรวจจับจะวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาที่มุมต่างๆ
5. การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis): ข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อระบุโครงสร้างผลึก องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติอื่นๆ ของวัสดุ



รูปที่ 2.13 รูปเครื่อง X-Ray Diffractometer, XRD [45]

2.5.3 เครื่องมือวัดการกระเจิงแสง

เครื่องมือวัดการกระเจิงแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบมาเพื่อศึกษาการกระจายแสงภายในแผ่นนำแสง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบนำแสง โดยอาศัยหลักการของการกระเจิงแสง (Light Scattering) ที่อธิบายโดยทฤษฎีของ Rayleigh และ Mie ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคกระจายแสงภายในฟิล์มบางที่นำมาเคลือบ โดยเครื่องมือนี้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ ฐานวางแผ่นนำแสง และเซ็นเซอร์วัดแสงที่สามารถปรับมุมการวัดได้ตั้งแต่ -90° องศา ถึง 90° องศา ตามภาพแสดงในรูปที่ 2.10 เพื่อบันทึกค่าความเข้มแสงที่กระเจิงออกในทิศทางต่างๆ



รูปที่ 2.14 เครื่องมือวัดการกระเจิงแสง

หลักการทำงานของเครื่องมือวัดการกระเจิงแสงอาศัยสมการการกระเจิงแสง ซึ่งอธิบายพฤติกรรมของแสงเมื่อเดินทางผ่านวัสดุที่มีอนุภาคขนาดเล็ก โดยพฤติกรรมนี้สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ Rayleigh Scattering สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสง ซึ่งใช้สมการที่ 2.3 ในการคำนวณความเข้มของแสงที่กระเจิงในทิศทางต่างๆ

แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในเครื่องมือวัดนี้เป็นแสงเลเซอร์สีแดงที่มีความยาวคลื่น 630 นาโนเมตร เมื่อแสงเดินทางเข้าสู่แผ่นนำแสง บางส่วนจะถูกส่งผ่านไปตามแนวเดิม ในขณะที่บางส่วนจะเกิดการกระเจิงในทิศทางอื่น ๆ เนื่องจากการชนกับอนุภาคที่อยู่ภายในแผ่นนำแสง ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการกระเจิงแสง ได้แก่ ขนาดและปริมาณของอนุภาคกระจายแสงที่ผสมอยู่ในฟิล์มบาง ซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปแบบของการกระเจิง นอกจากนี้ ค่าดัชนีหักเหของแผ่นนำแสงและของอนุภาคกระจายแสงก็มีผลต่อการหักเหและกระเจิงของแสง รวมถึงระยะห่างของเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดแสงที่ส่งผลต่อค่าความเข้มแสงที่ตรวจจับได้

2.5.4 เครื่องวัดความเข้มแสง (Luminance meter)

เครื่องวัดความเข้มแสง หรือลักซ์มิเตอร์ (Luminance meter) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณแสงที่ส่องสว่างในพื้นที่หนึ่งๆ โดยวัดค่าออกมาเป็นหน่วยลักซ์ (lux) หรือฟุตแคนเดิล (foot-candle) ซึ่งเป็นหน่วยวัดความสว่างที่ตกกระทบบนพื้นผิว

หลักการทำงานของเครื่องวัดความเข้มแสงทำงานโดยใช้เซ็นเซอร์รับแสง (photoelectric cell) ซึ่งจะแปลงพลังงานแสงที่ได้รับเป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นสัญญาณไฟฟ้าจะถูกประมวลผลและแสดงผลเป็นค่าความเข้มแสงบนหน้าจอ [48]



รูปที่ 2.15 รูปเครื่องวัดความเข้มแสง (Lux Light Meter) [49]

2.5.5 ฟลูออเรสเซนซ์เอกซ์เรย์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer)

เทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ไม่ทำลายตัวอย่าง ใช้สำหรับตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในวัสดุต่าง ๆ โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อวัสดุถูกกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray) ที่มีพลังงานสูง อิเล็กตรอนในชั้นพลังงานในของอะตอมอาจถูกขับออก ทำให้อะตอมอยู่ในสถานะไม่เสถียร เพื่อกลับสู่สถานะเสถียร อิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานนอกจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ตำแหน่งที่ว่าง ซึ่งกระบวนการนี้จะปลดปล่อยพลังงานในรูปของรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่มีพลังงานเฉพาะตัวของธาตุนั้น ๆ [57]

ขั้นตอนการทำงานของ XRF:

1. การกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ ตัวอย่างจะถูกฉายด้วยรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูง เพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในชั้นพลังงานในของอะตอมถูกขับออก
2. การปลดปล่อยรังสีฟลูออเรสเซนซ์: เมื่ออิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานนอกเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ตำแหน่งที่ว่าง จะมีการปลดปล่อยรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่มีพลังงานเฉพาะตัวของธาตุนั้น ๆ [57]

3. การตรวจจับและวิเคราะห์: เครื่องตรวจจับจะวัดพลังงานและความเข้มของรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่ปลดปล่อยออกมา จากนั้นข้อมูลจะถูกประมวลผลเพื่อระบุชนิดและปริมาณของธาตุที่อยู่ในตัวอย่าง

การใช้ XRF ในการตรวจสอบสารประกอบของธาตุในแร่รูไทล์ (Rutile):

แร่รูไทล์ (Rutile) เป็นรูปแบบหนึ่งของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่พบในธรรมชาติ การใช้เทคนิค XRF สามารถช่วยในการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุในแร่รูไทล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจาก XRF สามารถวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในแร่ เช่น ไทเทเนียม (Ti), เหล็ก (Fe), และธาตุอื่น ๆ ที่อาจปนเปื้อนอยู่

2.5.6 กล้องจุลทรรศน์ (Upright Microscope)

Upright microscopes เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสังเกตตัวอย่างโดยการมองจากด้านบน ซึ่งมีหลักการทำงานที่สำคัญดังนี้:

หลักการทำงานของ Upright Microscope

1. การจัดวางของเลนส์: ในกล้องจุลทรรศน์แบบ upright แหล่งกำเนิดแสงและคอนเดนเซอร์จะถูกวางอยู่ใต้แท่นวางตัวอย่าง ขณะที่เลนส์วัตถุจะอยู่ด้านบนของแท่นวาง โดยแสงจะถูกส่งผ่านตัวอย่างจากด้านล่างขึ้นไปยังเลนส์ที่อยู่ด้านบน ซึ่งผู้ใช้งานสามารถมองเห็นภาพได้จากด้านบน.
2. การมองเห็นตัวอย่าง: ตัวอย่างจะถูกวางระหว่างกระจกและฝาครอบ (coverslip) ซึ่งช่วยให้สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับตัวอย่างที่มีความหนา เช่น เนื้อเยื่อหรือเซลล์ที่ถูกตรึง.
3. การใช้งาน: กล้องจุลทรรศน์แบบ upright เหมาะสำหรับการใช้งานในสาขาชีววิทยาและการแพทย์ เช่น การตรวจสอบเซลล์ที่ตรึงแล้วหรือการวิเคราะห์เนื้อเยื่อ โดยสามารถใช้เทคนิคต่างๆ เช่น phase contrast, fluorescence, และ darkfield microscopy.
4. ข้อดีและข้อเสีย: ข้อดีของกล้องจุลทรรศน์แบบ upright คือสามารถใช้งานได้ง่ายและเหมาะสำหรับการสังเกตตัวอย่างที่มีความหนา ในขณะที่ข้อเสียคืออาจมีข้อจำกัดในการใช้งานกับเซลล์ที่มีชีวิต เนื่องจากตัวอย่างจะถูกบีบระหว่างกระจกและฝาครอบ [65-69]

2.6 โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ

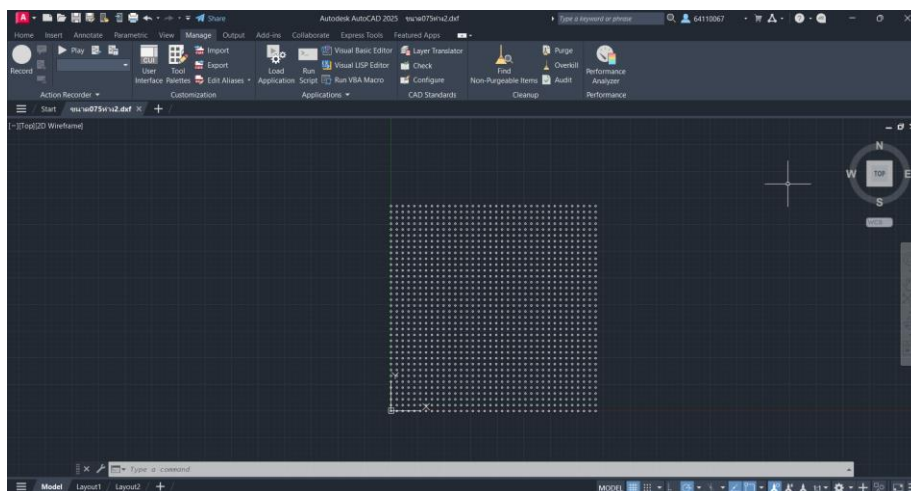
ในการทดลองนี้ได้มีการใช้โปรแกรมในการออกแบบแผ่นนำแสงเพื่อให้ขนาดและรูปแบบตามที่ต้องการแบบแม่นยำในการออกแบบแผ่นนำแสงซึ่งโปรแกรมที่ใช้มีดังนี้

2.6.1 โปรแกรมออโต้ แคด (autocad)

AutoCAD เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการออกแบบและเขียนแบบที่มีความสามารถทั้งในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ สำหรับการออกแบบแผ่นนำแสง ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์แสดงผลและป้ายไฟ AutoCAD มีสมบัติที่ช่วยในการสร้างแบบจำลองและการออกแบบที่แม่นยำ ดังนี้: [55]

2.6.1.1 การออกแบบ 2 มิติและ 3 มิติ: AutoCAD ช่วยให้ผู้ใช้สามารถสร้างแบบจำลองของแผ่น LGP ทั้งในรูปแบบ 2 มิติและ 3 มิติ ทำให้สามารถมองเห็นและปรับแต่งรายละเอียดของแผ่นได้อย่างชัดเจน

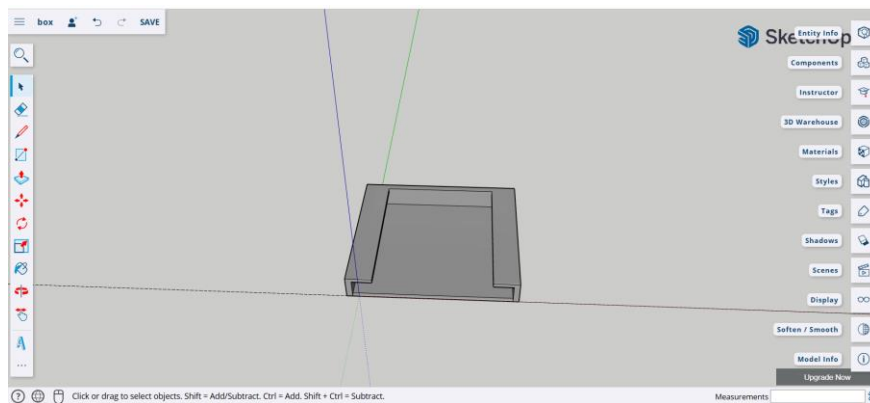
2.6.1.2 การปรับแต่งด้วยภาษา AutoLISP: สำหรับผู้ใช้ที่ต้องการปรับแต่งก็สามารถใช้ภาษา AutoLISP เพื่อช่วยในการออกแบบหรือการตั้งค่าต่างๆ [56]



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างการออกแบบแผ่นนำแสงด้วยโปรแกรมโปรแกรมออโต้ แคด (AutoCAD)

2.6.2 โปรแกรมสเก็ตช์อัพ (SketchUp)

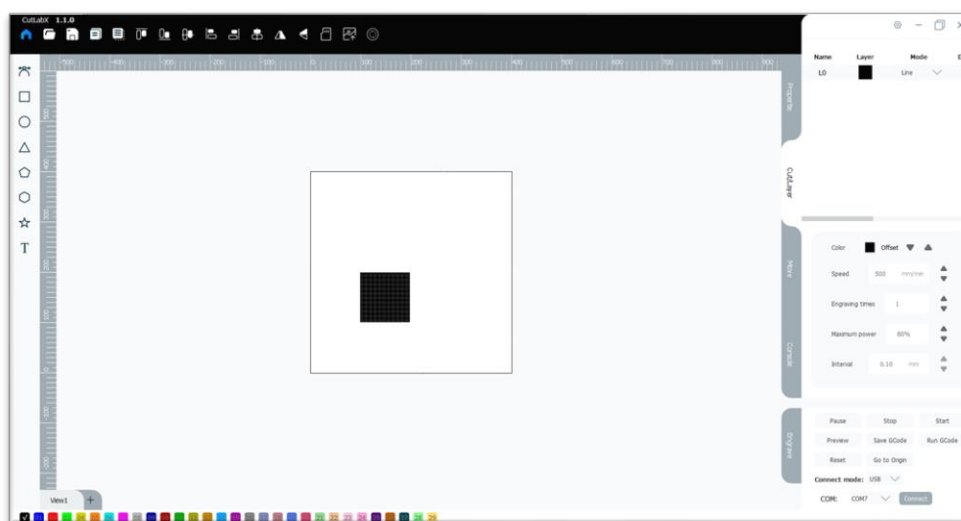
โดยในการทดลองนี้เราได้ใช้โปรแกรมสเก็ตช์อัพ SketchUp เพื่อใช้ในการออกแบบกล่อง สำหรับการทดสอบความเข้มแสงของแผ่นนำแสงโดยโปรแกรมสเก็ตช์อัพ SketchUp สามารถออกแบบโมเดลแบบสามมิติได้จึงเลือกใช้ในการทดลองในครั้งนี้เพื่อให้งานต่อการนำไปปรี้นโมเดล



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการออกแบบด้วยโปรแกรมสเก็ตช์อัพ SketchUp

2.6.3 โปรแกรมคัตแลบเอ็กซ์ (CutLabX)

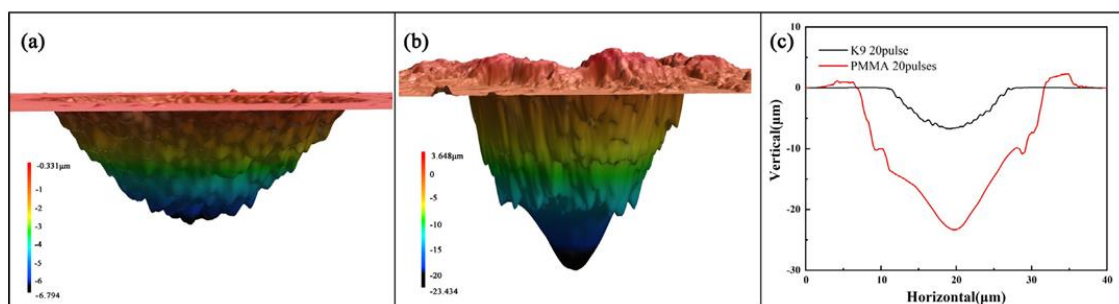
CutLabX เป็นโปรแกรมที่ใช้ทำงานร่วมกับเครื่องสลักกลดลายด้วยเลเซอร์ DAJA-A6 Laser Engraver โดยการนำลวดลายที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม AutoCAD มาทำการตั้งค่ากำลังเลเซอร์แล้วจึงสลักกลดลายลงบนแผ่นอคริลิกที่จะนำมาเลเซอร์



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างการตั้งค่ากำลังเลเซอร์ผ่านโปรแกรม CutLabX

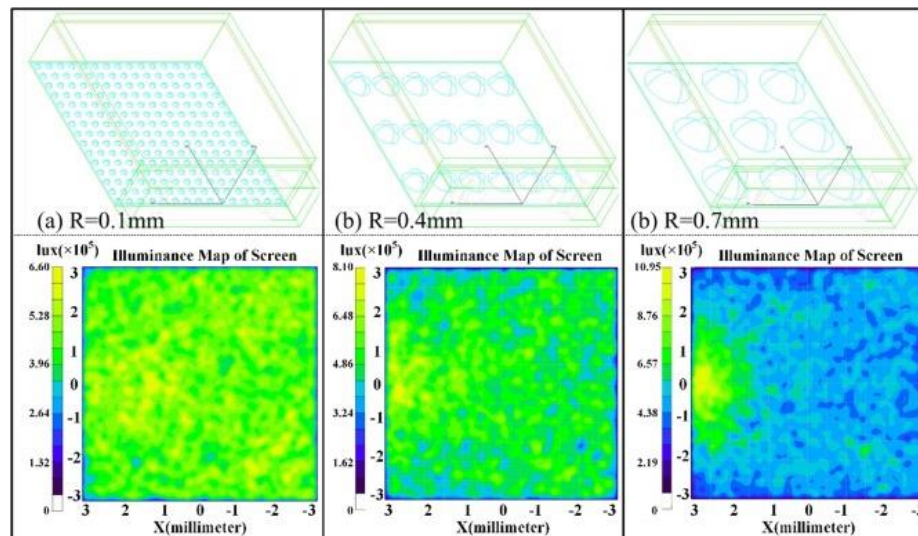
2.7 ทบทวนวรรณกรรม

การพัฒนาแผ่นนำแสง (Light Guide Plate: LGP) ที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมแสงสว่างและจอแสดงผล เทคโนโลยีการแกะสลักด้วยเลเซอร์ (Laser Etching) ได้รับความสนใจอย่างมากในการสร้างโครงสร้างจุลภาค (Microstructures) ที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายแสงของแผ่นนำแสง งานวิจัยในอดีตได้ศึกษาวัสดุต่างๆ เช่น กระเจก K9 และพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นนำแสง รวมถึงแนวทางการออกแบบและปรับปรุงระบบนำแสงแบบยืดหยุ่นที่สามารถประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลาย

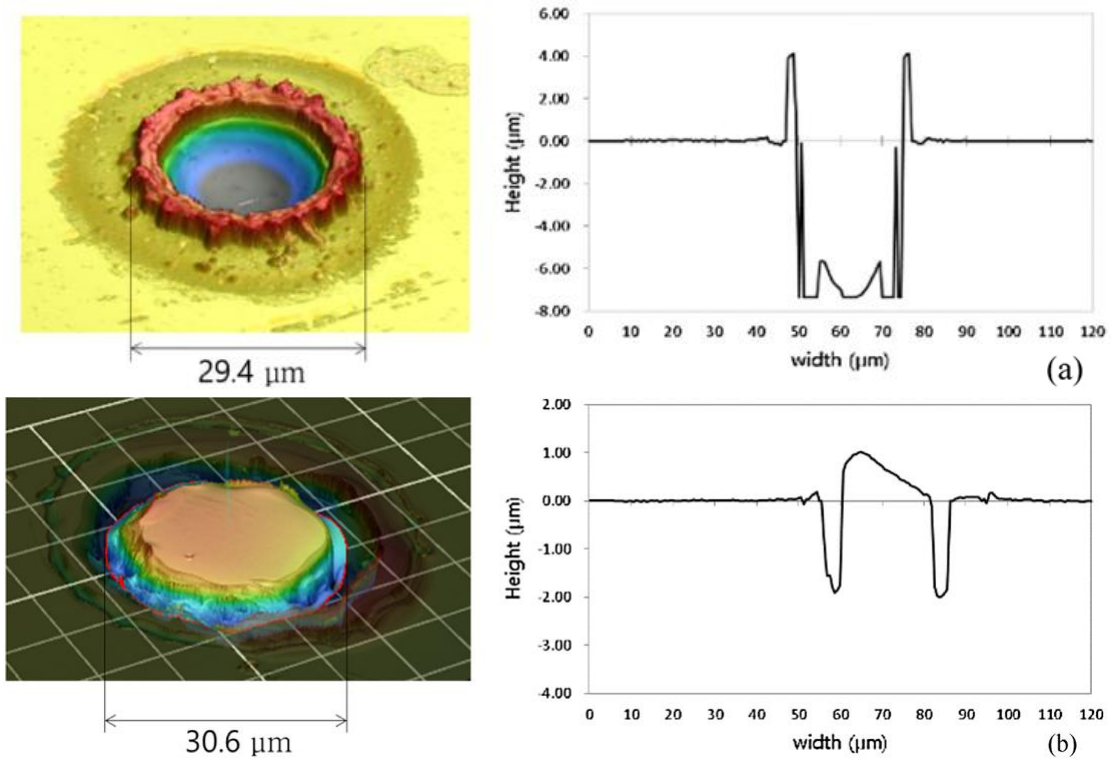


รูปที่ 2.19 3D micrographs and profiles of K9 glass and PMMA [8]

งานวิจัยของคุณ Li Liu และทีม ได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของโครงสร้างจุลภาคที่ถูกแกะสลักด้วยเลเซอร์บนกระเจก K9 และ PMMA ดังรูปที่ 2.19 โดยศึกษาสมบัติด้านการกระจายแสงและประสิทธิภาพการสะท้อน ผลการศึกษาพบว่า วัสดุทั้งสองประเภทมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยกระเจก K9 มีดัชนีหักเหที่สูงกว่า PMMA ทำให้สามารถควบคุมการสะท้อนและกระจายแสงได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม PMMA มีความยืดหยุ่นในการผลิตและมีน้ำหนักเบากว่า ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความคล่องตัว ในขณะเดียวกัน งานวิจัยของคุณ Tianfeng Zhou และทีม ได้นำเสนอแนวทางในการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นนำแสงที่ใช้เส้นใยนำแสง (Fiber-Optic Conducted Light Guide Plate System) ซึ่งช่วยให้สามารถปรับปรุงการกระจายแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการโครงสร้างยืดหยุ่น เช่น จอแสดงผลแบบพกพาหรือระบบแสงสว่างอัจฉริยะ

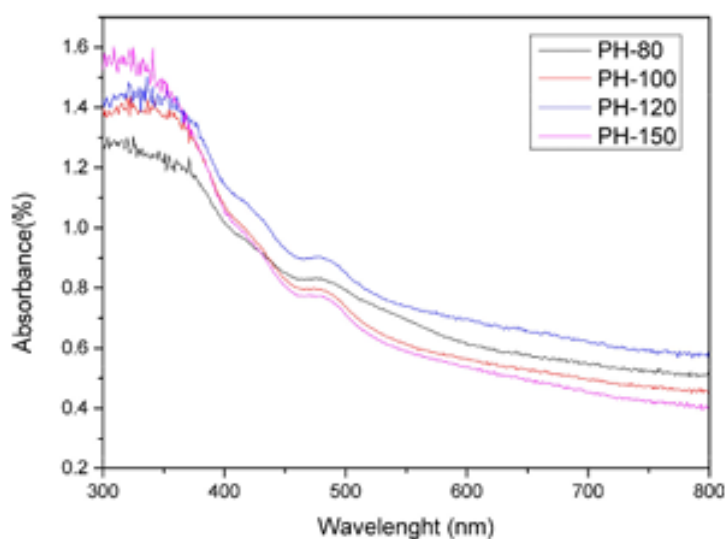


รูปที่ 2.20 Performance of various dot sizes [2]



รูปที่ 2.21 (a)A micro pattern on the stamper by laser ablation and a sample of graph for the measured cross-sectional profile ,(b)Roll-stamped pattern formed on the LGP and a sample of graph for the measured cross-sectional profile [9]

การศึกษาของคุณ Jin Wang และทีม ได้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาแผ่นนำแสงที่มีโครงสร้างจุลภาคแบบกระจายแสงแปรผัน โดยใช้เลเซอร์ในการสร้างจุดกระจายแสงที่สามารถออกแบบให้มีลักษณะเฉพาะได้ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การจัดเรียงและรูปทรงของจุดกระจายแสงมีผลต่อรูปแบบการแพร่กระจายของแสงดังรูปที่ 2.20 และสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์ที่ต้องการการกระจายแสงแบบเฉพาะเจาะจง นอกจากนี้ การวิจัยของคุณ Hyunjun Na และทีม ได้ทำการวิเคราะห์กระบวนการผลิตแผ่นนำแสงโดยใช้แม่พิมพ์ที่ถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการเลเซอร์ (Laser-Ablated Stamper) โดยใช้เทคนิค Roll Stamping ดังรูปที่ 2.21 ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแม่พิมพ์ที่ถูกแกะสลักด้วยเลเซอร์สามารถใช้ในการผลิตแผ่นนำแสงที่มีสมบัติสม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 2.22 Absorbance spectra of heterogenous TiO_2 [1]

ในอีกแง่มุมหนึ่ง งานวิจัยของคุณ Ahmad Fauzi และทีม ได้ศึกษาแหล่งที่มาของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จากแร่ Ilmenite และการนำไปใช้ในงานด้านพลังงาน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์และวัสดุสะท้อนแสง ความสามารถของ TiO_2 ในการกระจายและสะท้อนแสงดังรูปที่ 2.22 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมแสงสว่างได้ ในขณะที่งานวิจัยของคุณ Kanyawee Sinmongkolkul และทีม ได้ทำการสังเคราะห์ TiO_2 ที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์จาก Leucoxene ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาแผ่นนำแสงที่ต้องการสมบัติสะท้อนแสงเฉพาะทาง อีกทั้งงานวิจัยของคุณ Jin-Wook Choi และคุณ Jun Hyup Lee ได้ศึกษาการพัฒนาฟิล์มกาวที่สามารถป้องกันรังสียูวีแต่ยังคงความโปร่งใสในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ โดยฝังอนุภาค TiO_2 /PMMA แบบไฮบริด ฟิล์มชนิดนี้สามารถนำไปใช้กับจอแสดงผลและอุปกรณ์ที่ต้องการการป้องกันรังสียูวีโดยไม่ลดทอนคุณภาพของภาพ

ตารางที่ 2.1 สรุปหัวข้องานวิจัยที่นำมาใช้อ้างอิงในการศึกษา

อ้างอิงหัวข้องานวิจัย	ปี	วารสาร	ข้อมูลที่น่าสนใจ
Performance comparison of laser-etched microstructures on K9 glass and PMMA light guide plate [8]	2021	Optik Volume 242, 16721	<ul style="list-style-type: none"> ● การเลือกวัสดุ PMMA มาใช้ทำแผ่นนำแสง
Design and optimization of a flexible fiber-conducted laser light guide plate system [3]	2024	Optik Volume 307, 171833	<ul style="list-style-type: none"> ● การออกแบบรูปแบบเลนส์
Variable scattering dots: Laser processing light guide plate microstructures with arbitrary features and arrangements [2]	2021	Optics & Laser Technology Volume 136, 106732	<ul style="list-style-type: none"> ● ความกว้างเลนส์ ● ระยะห่างระหว่างเลนส์
Analysis of roll-stamped light guide plate fabricated with laser-ablated stamper [9]	2017	Optics & Laser Technology Volume 97, Pages 346-353	
Exploring heterogenous TiO ₂ nanocrystals from natural ilmenite mineral extraction for energy application [1]	2023	Materials Science for Energy Technologies Volume 7, Pages 216-227	<ul style="list-style-type: none"> ● วิธีการสังเคราะห์ TiO₂
Purification of TiO ₂ from Leucoxene for the Synthesis of NIR-Reflective Cr-doped CaTiO ₃ Pigment [20]	2021	Chiang Mai J. Sci. ; 49(1): 93-104.	
Selectively UV-Blocking and Visibly Transparent Adhesive Films Embedded with TiO ₂ /PMMA Hybrid Nanoparticles for Displays [10]	2020	Materials, 13, 5273	<ul style="list-style-type: none"> ● การประยุกต์ TiO₂ เพื่อใช้งานกับอุปกรณ์จอแสดงผล

บทที่ 3

รายละเอียดการปฏิบัติงาน

การดำเนินงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการวิเคราะห์ผลการทดลองจากวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงประสิทธิภาพ การกระจายแสงของแผ่นนำแสง ซึ่งโดยส่วนใหญ่เราจะเน้นไปที่เทคโนโลยีการแกะสลักด้วยเลเซอร์ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงผลที่ดีในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายแสงของ LGP การทดลองนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาปรับปรุงและพัฒนา ต่อรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงานมีดังนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 ซอฟต์แวร์ที่ใช้

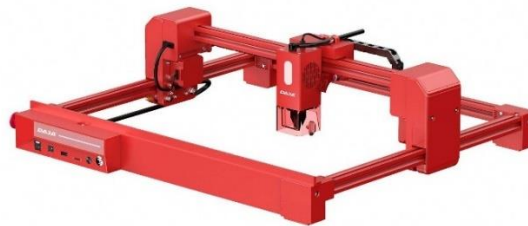
- ชื่อโปรแกรม : AutoCAD 2025



รูปที่ 3.1 autodesk autocad 2025 3d licence permanent/lifetime original software. [4]

3.1.2 เครื่องมือการแกะสลักด้วยเลเซอร์

ชื่อเครื่อง: DAJA-A6 Laser-High cost-effective dual laser all material engraving small laser engraving machine



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงเครื่อง DAJA-A6 Laser-High cost-effective dual laser all material engraving small laser engraving machine [19]

3.1.3 เครื่องมือการปาดเคลือบ

○ ชื่อเครื่อง: NST Compact Tape Casting Coater w/ Vacuum Chuck



รูปที่ 3.3 ภาพแสดงเครื่อง NST Compact Tape Casting Coater [5]

3.1.4 วัสดุเคลือบ

- ชื่อวัสดุ : รูไทล์ (Rutile)
- อนุภาคที่ได้ : ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)
- การผสม : ผสมกับ Polyvinyl Alcohol
- ความเข้มข้น : 0.1%, 0.3% และ 0.5%

3.1.5 วัสดุที่ใช้ทำแผ่นนำแสง

- แผ่นนำแสงในการศึกษานี้ทำจากวัสดุอะคริลิก (Acrylic) ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้:
 - ความโปร่งใส : อะคริลิกมีความโปร่งใสงสูง ทำให้สามารถนำแสงได้ดี
 - น้ำหนักเบา : วัสดุนี้มีน้ำหนักเบา ทำให้สะดวกในการใช้งานและติดตั้ง
 - ความคงทนต่อสภาพแวดล้อม : อะคริลิกมีความทนทานต่อรังสี UV และสามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นได้

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบแผ่นนำแสง

- การวิเคราะห์ : เริ่มโดยการวิเคราะห์ความต้องการของแผ่นนำแสง รวมถึงการศึกษาผลกระทบของรูปแบบและโครงสร้างต่อประสิทธิภาพการกระจายแสง
- การออกแบบใน AutoCAD:
 - กำหนดขนาด: ออกแบบขนาดของแผ่นนำแสง เป็น 100x100 มม.
 - รูปแบบเลนส์: กำหนดขนาดของเลนส์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.75 มม. และระยะห่างระหว่างเลนส์ที่ 1.25, 1.50 และ 2.00 มม.

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบแผ่นนำแสง

เส้นผ่านศูนย์กลางเลนส์ (mm)	ระยะห่างระหว่างเลนส์ (mm)
0.75	1.25, 1.50, 2.00

3.2.2 กระบวนการแกะสลักด้วยเลเซอร์

- การตั้งค่าเครื่อง
 - เริ่มต้นด้วยการตั้งค่าที่จำเป็นสำหรับเครื่องเลเซอร์ ซึ่งรวมถึงการปรับความเร็วและพลังงานของเลเซอร์ให้เหมาะสมกับวัสดุที่ใช้
 - ตรวจสอบให้แน่ใจว่าการตั้งค่าเข้ากันได้กับรูปแบบและขนาด ที่ออกแบบไว้ในขั้นตอนก่อนหน้า

- การเตรียมแผ่นแผ่นนำแสง
 - วางแผ่นแผ่นนำแสง ที่เตรียมไว้ลงในเครื่องเลเซอร์อย่างถูกต้อง เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- การดำเนินการแกะสลัก
 - เริ่มกระบวนการแกะสลักโดยให้เลเซอร์ทำงานตามแบบที่ออกแบบไว้
 - หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการแกะสลัก ควรตรวจสอบผลลัพธ์เพื่อประเมินว่าการแกะสลักเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่
- การปรับปรุงและตรวจสอบ
 - หากผลลัพธ์ไม่ตรงตามความคาดหวัง อาจต้องกลับไปปรับการตั้งค่าเครื่องหรือตรวจสอบวัสดุอีกครั้ง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

3.2.3 การเคลือบอนุภาคนาโน

- การเตรียม PVA
 - เตรียมสารที่ความเข้มข้น 10% โดยการผสม PVA จำนวน 5 กรัม เข้ากับน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- การเตรียมสารเคลือบ
 - เตรียมสารที่ความเข้มข้น 0.5%, 1% และ 3% โดยการผสม TiO_2 เข้ากับ PVA ที่อัตราส่วน 0.05:10, 0.1:10 และ 0.3:10 (กรัม/มล.) ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการผสมสารเคลือบ

Rutile 0.5% (g)	Rutile 1% (g)	Rutile 3% (g)	PVA (mL)
0.05	0.1	0.3	10

- การผสม
 - ใช้เครื่องปั่นกวนด้วยแม่เหล็กผสมเพื่อให้สารเคลือบผสมกันได้อย่างทั่วถึง
 - ตรวจสอบความเข้มข้นและคุณสมบัติของสารเคลือบก่อนการลงเคลือบ
- การลงเคลือบ
 - ใช้เครื่องมือการพาดเคลือบที่ตั้งค่าความสูงของใบมีดที่ 3.50 มม. และความเร็วการพาดเคลือบที่ 5 มม./วินาที
 - พาดสารเคลือบลงบนแผ่นแผ่นนำแสงให้เรียบและสม่ำเสมอ

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการปาดเคลือบ

Coating speed (mm/s)	Trip (mm)	Delay (s)	Heat time (min)	Blade height (mm)
5	150	2	10	3.50

- การทำให้แห้ง
 - วางบนเตาไฟฟ้าแผ่นร้อนที่อุณหภูมิ 60-80 °C จนแห้ง

3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพในการนำแสง

- จะมีการทดสอบประสิทธิภาพการนำแสงของแผ่นนำแสง หลังการแกะสลัก และการเคลือบอนุภาคนาโน โดยการวัดความเข้มของแสงที่ส่งผ่านแผ่นนำแสง
- การใช้เครื่องมือวัดแสงที่เหมาะสม เช่น โฟโตมิเตอร์ หรือเซ็นเซอร์แสง เพื่อวัดค่าความเข้มของแสงและประเมินการกระจายแสง

3.3.2 การวัดการกระจายแสง

- จะมีการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายแสงที่เกิดขึ้นจากแผ่นนำแสง โดยการบันทึกภาพหรือการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอและคุณภาพของแสงที่ออกมา

3.3.3 การประเมินประสิทธิภาพการสะท้อนแสง

- มีแผนที่จะวัดและประเมินประสิทธิภาพการสะท้อนแสงจากแผ่นนำแสง เพื่อตรวจสอบว่าการเคลือบที่ใช้มีผลต่อการสะท้อนแสงหรือไม่

3.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

- หลังจากเก็บข้อมูลทั้งหมด จะทำการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการกระจายแสง
- ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติ เช่น การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อดูความแตกต่างระหว่างกลุ่มตัวอย่างที่มีการเคลือบและไม่มีการเคลือบ

3.3.5 การสรุปผลและอภิปราย

- สุดท้ายจะมีการสรุปผลการวิเคราะห์ว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้หรือไม่ พร้อมอภิปรายถึงปัจจัยที่อาจมีผลต่อผลลัพธ์

3.4 ข้อจำกัดในการวิจัย

3.4.1 ข้อจำกัดด้านเวลา

- ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยมีจำกัด ทำให้การจัดหาเครื่องเลเซอร์ที่จำเป็นสำหรับการแกะสลักแผ่นนำแสง ไม่สามารถทำได้ทันตามกรอบเวลาที่กำหนดไว้ ส่งผลให้ไม่สามารถดำเนินการทดลองทั้งหมดได้อย่างครบถ้วนตามแผนที่วางไว้ การขาดเครื่องมือดังกล่าวทำให้ไม่สามารถทำแผ่นนำแสงได้ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย

3.4.2 ความแม่นยำของเครื่องมือ

- เนื่องจากเครื่องมือแกะสลักด้วยเลเซอร์เป็นเครื่องมือที่ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้ใช้งานในสเกลระดับเล็ก ทำให้ความกว้างและระยะห่างของเลนส์บนแผ่นนำแสง (LGP) เกิดความผิดพลาด ซึ่งส่งผลให้ของความสม่ำเสมอไม่ตรงกับที่ออกแบบไว้ตามที่กำหนดในงานวิจัย
- เนื่องจากการตั้งค่าเครื่องปาดเคลือบอาจมีความคลาดเคลื่อนในการกำหนดความหนาของชั้นเคลือบ ทำให้ความหนาของสารเคลือบที่ได้อาจบางหรือหนากว่าที่กำหนดไว้ในงานวิจัย ซึ่งส่งผลให้ชั้นเคลือบไม่สม่ำเสมอและอาจลดทอนประสิทธิภาพการกระจายแสงของแผ่นนำแสง (LGP)

3.4.3 การเลือกความเข้มข้นของสารเคลือบ

- ในการทดลองนี้มีการเลือกความเข้มข้นของรูไทล์ ที่ 0.5%, 1% และ 3% แต่การเลือกความเข้มข้นนี้อาจมีผลต่อประสิทธิภาพการกระจายแสง ถ้ามีการทดลองด้วยความเข้มข้นที่แตกต่างกัน อาจจะได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างออกไป

3.4.4 คุณภาพของวัสดุ

- คุณภาพของวัสดุที่ใช้ทำแผ่น LGP อาจแตกต่างกันในแต่ละล็อตการผลิต ซึ่งอาจส่งผลต่อความสม่ำเสมอและคุณภาพของแผ่น LGP ที่ได้

3.4.5 เงื่อนไขการทดลอง

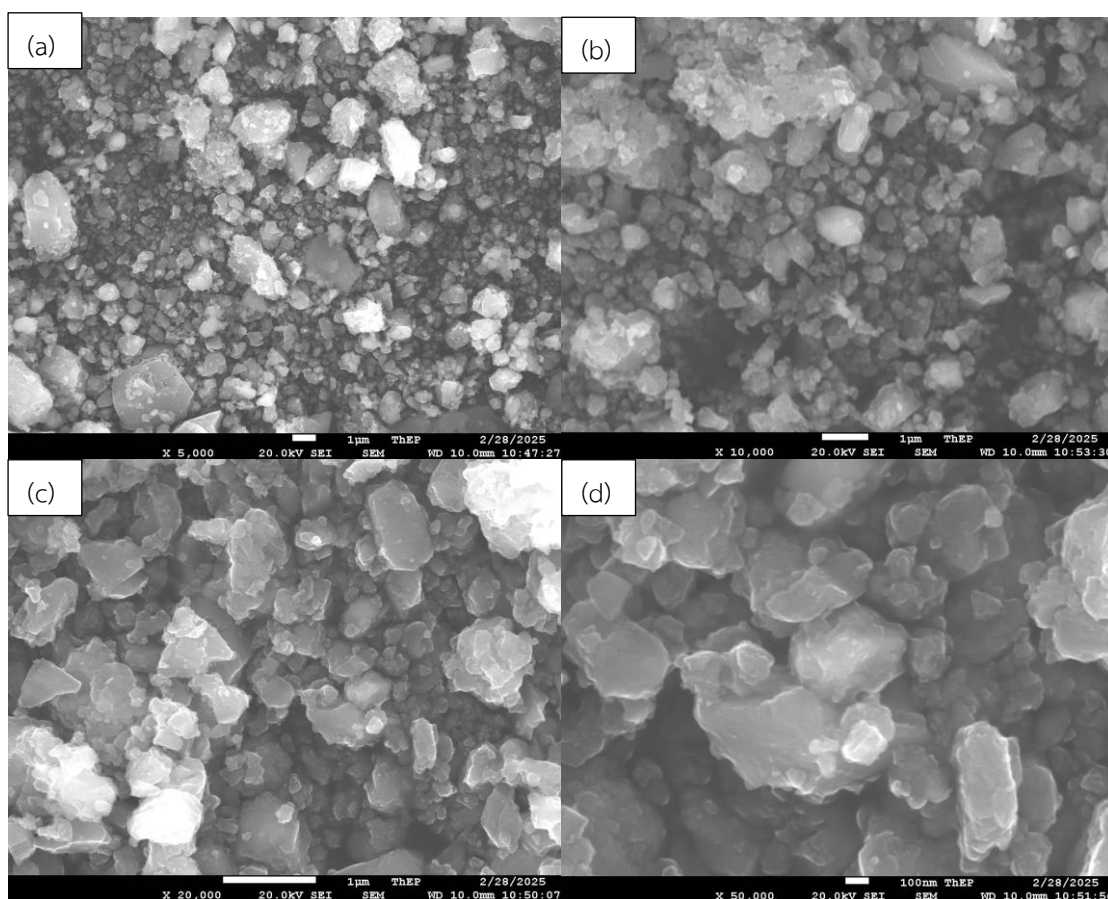
- ในการทดลองนี้ได้ตั้งเงื่อนไขของขนาดเลนส์ของแผ่นนำแสงไว้ที่ 0.75 mm เพียงขนาดเดียวจึงทำให้ไม่สามารถหาความแตกต่างจากเลนส์ขนาดอื่นๆได้

ผลการทดลอง

4.1 การวัดขนาดอนุภาคนาโนที่ได้จากการบดแร่ธรรมชาติรูไทล์ (Rutile) โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

จากรูปที่ 4.1 ภาพ SEM ที่ได้จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงลักษณะของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เกิดจากการบดแร่รูไทล์เป็นเวลา 120 นาที ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที โดยอนุภาคที่สังเกตพบในภาพมีรูปร่างที่ไม่เป็นระเบียบ ขอบคม และมีการแตกตัวออกเป็นอนุภาคนาโนขนาดเล็กซึ่งเป็นผลมาจากแรงเฉือนและแรงกระทบระหว่างกระบวนการบด ส่งผลให้อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอนุภาคเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติทางแสงและทางเคมีของวัสดุ นอกจากนี้ ยังพบว่าอนุภาคบางส่วนมีแนวโน้มที่จะเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนเล็กๆ ซึ่งอาจเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค เช่น แรงไฟฟ้าสถิตหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการรวมตัวกันของบางอนุภาค แต่ยังสามารถสังเกตเห็นอนุภาคนาโนขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งภาพ พื้นผิวของอนุภาคมีลักษณะที่ขรุขระและไม่เรียบ ซึ่งอาจมีผลโดยตรงต่อสมบัติทางแสง โดยเฉพาะในกรณีที่น่าไปใช้เป็นวัสดุเคลือบผิวสำหรับการกระเจิงแสงจากลักษณะของอนุภาคที่ได้ เมื่อนำไปเคลือบบนแผ่นนำแสง ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กและมีลักษณะพื้นผิวขรุขระนี้สามารถช่วยเพิ่มการกระเจิงของแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเมื่อแสงตกกระทบบนพื้นผิวของแผ่นนำแสงที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคเหล่านี้ แสงจะถูกกระเจิงออกไปในหลายทิศทาง ทำให้การกระจายของแสงมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ลดการเกิดจุดมืด (dark spots) และช่วยให้แผ่นนำแสงสามารถกระจายแสงได้ทั่วทั้งพื้นที่ นอกจากนี้ ไททาเนียมไดออกไซด์ยังเป็นวัสดุที่มีดัชนีหักเหสูง ซึ่งหมายความว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสะท้อนและกระจายแสงได้ดีขึ้น ลดการสูญเสียแสงที่อาจเกิดขึ้นในบางทิศทาง ทำให้สามารถใช้พลังงานแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นอีกทั้งการที่อนุภาคมีขนาดเล็กและมีรูปร่างไม่เป็นระเบียบและมีขนาดอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 160 นาโนเมตรถึง 8000 นาโนเมตร ทำให้เกิดช่องว่างและโพรงระหว่างอนุภาคเมื่อถูกเคลือบบนแผ่นนำแสง ซึ่งสามารถช่วยในการควบคุมมุมกระจายของแสง ทำให้สามารถออกแบบทิศทางของแสงให้เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการได้ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น ในอุตสาหกรรมจอแสดงผล LED หรือระบบแสงสว่างที่ต้องการการกระจายแสงที่มีประสิทธิภาพสูงและลดการสูญเสียพลังงาน การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการบดมาเคลือบบนแผ่นนำแสงอาจเป็นวิธีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแสงสว่างได้อย่างมากนอกจากนี้สมบัติของอนุภาค

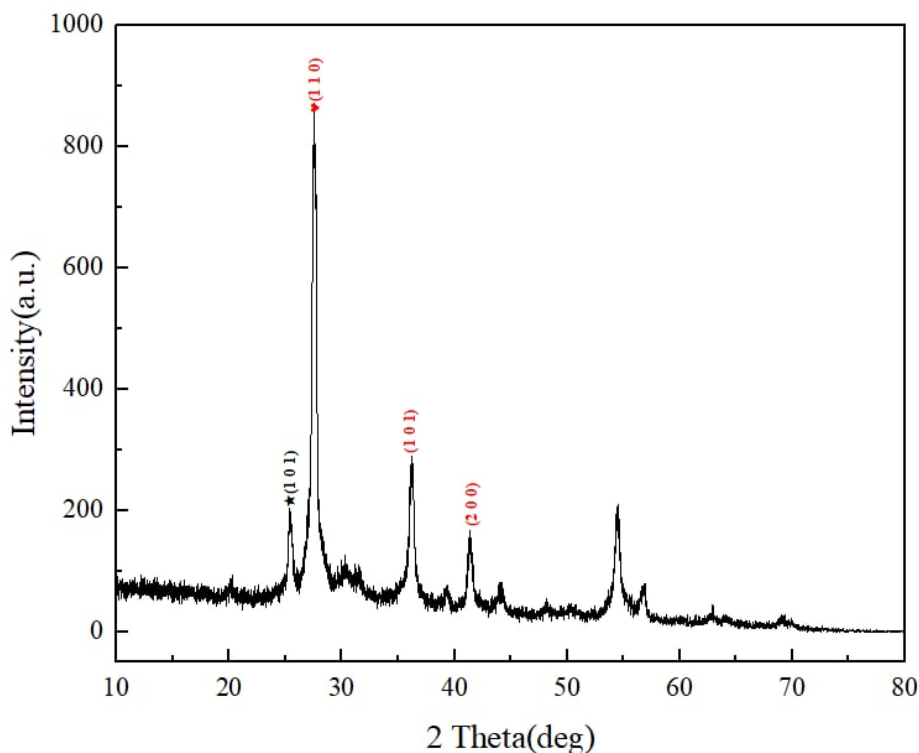
ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการบด อาจส่งผลดีต่อการเกาะติดของสารเคลือบผิวบนแผ่นนำแสง เนื่องจากพื้นผิวที่ขรุขระของอนุภาคอาจช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคกับพื้นผิวของแผ่นนำแสง ทำให้สารเคลือบสามารถยึดติดกับพื้นผิวได้ดีขึ้นและมีความทนทานต่อการหลุดลอก ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการใช้งานระยะยาว สามารถวิเคราะห์ได้จากภาพ Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 10,000 20,000 50,000 เท่า ของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการบด อาจส่งผลดีต่อการเกาะติดของสารเคลือบผิวบนแผ่นนำแสง เนื่องจากพื้นผิวที่ขรุขระของอนุภาคอาจช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคกับพื้นผิวของแผ่นนำแสง ทำให้สารเคลือบสามารถยึดติดกับพื้นผิวได้ดีขึ้นและมีความทนทานต่อการหลุดลอก



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการบดแร่รูไทล์ที่ใช้ระยะเวลาในการบด 120 นาทีและใช้ความเร็ว 600 รอบต่อนาทีที่กำลังขยายต่างกัน (a) 5000เท่า, (b) 10000เท่า, (c) 20000เท่า, (d) 50000เท่า

4.2 การตรวจสอบไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ได้จากการบดแร่ธรรมชาติรูไทล์ (Rutile) ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)

จากรูปที่ 4.2 ได้ทำการตรวจสอบองค์ประกอบของอนุภาคนาโนที่ได้จากการบดแร่ธรรมชาติ Rutile โดยใช้เทคนิค X-ray Diffraction (XRD) เพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพของอนุภาคที่ได้ พบว่าพีคมีความเข้มมากที่สุดที่ $2\theta \sim 28^\circ$ ซึ่งสามารถระบุได้ว่าเป็นระนาบผลึก (110) ซึ่งเป็นโครงสร้างของผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ตรงกับเฟสรูไทล์ (Rutile) ตามฐานข้อมูล JCPDS 21-1272



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์รูไทล์(Rutile) ด้วยเทคนิค XRD

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2 พบว่ามีพีคหลักปรากฏที่ตำแหน่ง $2\theta = 27.54^\circ$ ซึ่งเป็นพีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุด (Rel. int. I = 100%) บ่งบอกถึงระนาบผลึกที่เด่นชัดที่สุด นอกจากนี้ยังพบพีคอื่นๆ ที่มีค่าความเข้มสัมพัทธ์แตกต่างกันในช่วง $2\theta = 25.42^\circ$ ถึง 69.13° ซึ่งแสดงถึงลักษณะของโครงสร้างผลึกหลายระนาบ โดยค่าระยะระนาบผลึก (d-spacing) อยู่ในช่วง 1.35885 – 3.50397 Å ค่าความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (Full Width at Half Maximum, FWHM) มีค่าตั้งแต่ 0.4069° ถึง 2.1825° ซึ่งสามารถนำมาใช้คำนวณขนาดผลึกโดยใช้สมการของ Scherrer โดยผลการคำนวณขนาดผลึกพบว่าอยู่ในช่วง 3.77 – 20.01 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่วิเคราะห์มีลักษณะเป็นวัสดุนาโนโครงสร้าง ซึ่งพีคที่มีค่า FWHM สูงกว่ามักสัมพันธ์กับขนาดผลึกที่เล็กลง ความไม่สมมาตรของพีคถูกวิเคราะห์โดยใช้ค่าตัวประกอบสมมาตร (Asymmetry factor) ซึ่งพบว่ามีค่าตั้งแต่ 0.4594 ถึง 4.9794 บ่งบอกถึงลักษณะการกระจายตัวของ

อนุภาคที่อาจมีการแปรผันของขนาดอนุภาคภายในตัวอย่าง นอกจากนี้ ค่าพารามิเตอร์ η L/mL และ η H/mH ซึ่งเกี่ยวข้องกับการฟิตฟังก์ชันแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของพีคมีความแตกต่างกันในแต่ละช่วงของการวัด

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ที่รอบที่ 1-5

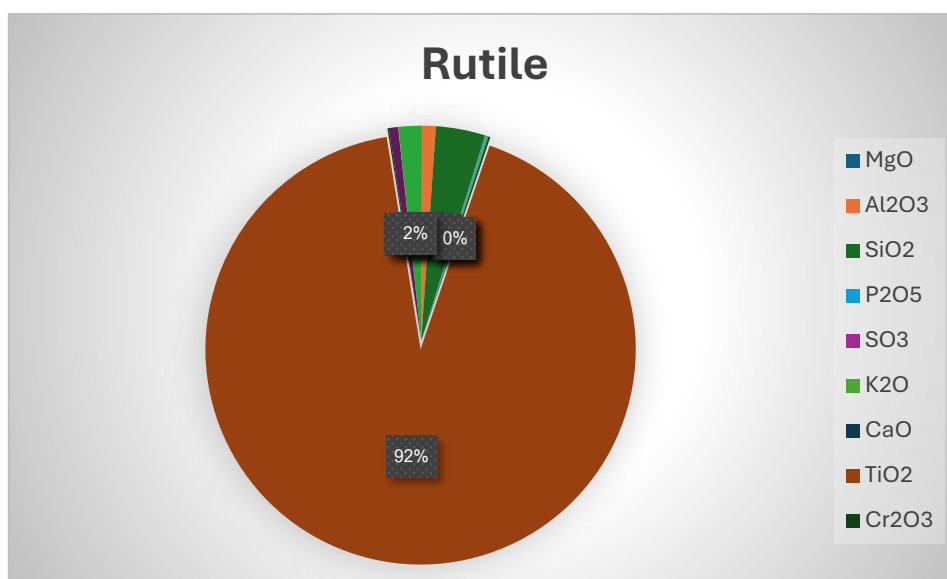
No.	1	2	3	4	5
2-theta(deg)	25.42	27.54	30.44	36.22	41.36
d(ang.)	3.50397	3.23887	2.93659	2.48013	2.18302
Height(cps)	2262.06	14025.2	688.35	3998.67	1881.49
FWHM(deg)	0.4069	0.4192	2.1825	0.4734	0.4563
Int. I(cps deg)	993.42	6482.87	1793.47	2200	844.41
Int. W(deg)	0.643	0.6749	3.8949	0.7987	0.644
Asym. factor	1.0204	0.9483	0.6361	1.4145	0.9384
η L/mL	1.0982	1.0893	1.4837	1.1806	0.5255
η H/mH	0.9171	1.0138	1.0664	1.0921	0.9482
Size(ang.)	132.27	126.58	22.08	109.29	137.7
Rel. int. I	15.32	100	27.66	33.94	13.03
Rel. height	16.13	100	4.91	28.51	13.42
Crystallite Size (nm)	20.01	19.51	3.77	17.65	18.61

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ที่รอบที่ 6-10

No.	6	7	8	9	10
2-theta(deg)	50.45	54.45	56.76	62.89	69.13
d(ang.)	1.80896	1.68515	1.62193	1.47779	1.35885
Height(cps)	168.11	2884.39	795.03	185.81	173.7
FWHM(deg)	0.8105	0.5076	0.5351	0.7895	1.2085
Int. I(cps deg)	168.2	1884.84	423.33	149.59	151.99
Int. W(deg)	1.4769	0.9	0.7511	1.1728	1.2864
Asym. factor	4.9794	0.758	1.222	1.4976	0.4594
η L/mL	1.2287	1.2874	1.1111	0.0014	0.0001
η H/mH	1.5436	1.2017	0.0792	1.541	0.0001
Size(ang.)	62.1	103.65	125.53	82.92	78.26
Rel. int. I	2.59	29.07	6.53	2.31	2.34
Rel. height	1.2	20.57	5.67	1.32	1.24
Crystallite Size (nm)	10.83	17.60	16.87	11.79	7.98

เมื่อพิจารณาค่าความเข้มเชิงสัมพัทธ์ของพีค (Rel. int. I) พบว่ามีค่าตั้งแต่ 2.31% ถึง 100% โดยพีคที่สำคัญ ได้แก่ พีคที่ 30.44° และ 36.22° ซึ่งมีความเข้มสัมพัทธ์ 27.66% และ 33.94% ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่วิเคราะห์มีโครงสร้างผลึกขนาดนาโนเมตร โดยมีการกระจายตัวของพีคและค่าความเข้มสัมพัทธ์บ่งบอกว่าตัวอย่างมีลักษณะเป็นวัสดุที่มีเฟสผลึกชัดเจน โดยอาจมีข้อบกพร่องผลึกหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบางส่วนที่ส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้รับการวิเคราะห์ XRD

4.3 วิเคราะห์สารประกอบของแร่ธรรมชาติรูไทล์ (Rutile)

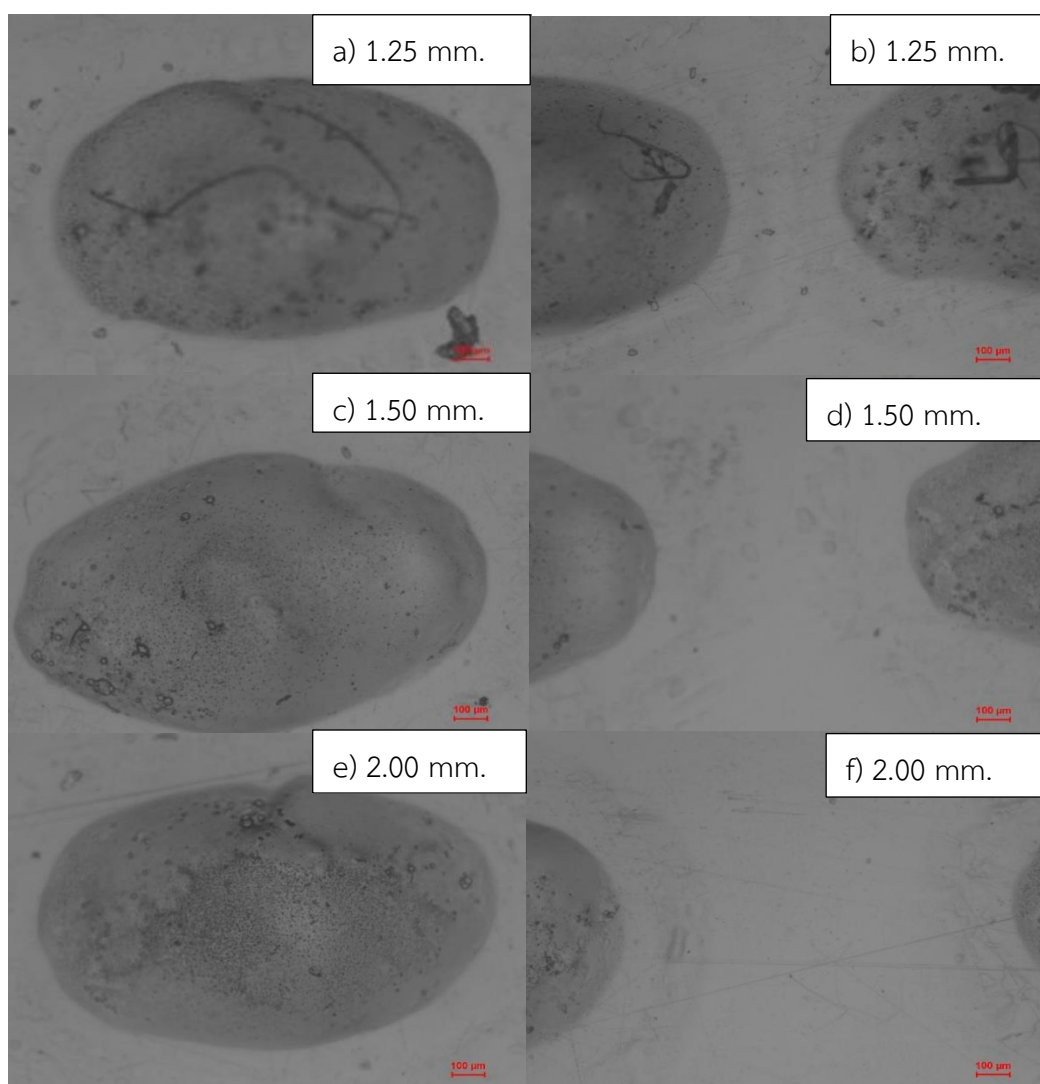


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงองค์ประกอบของแร่ธรรมชาติรูไทล์(Rutile)

จากรูปที่ 4.3 กราฟวงกลมที่แสดงผลการวิเคราะห์ XRF ของแร่รูไทล์สามารถสรุปองค์ประกอบทางเคมีหลักได้ว่า TiO₂ (ไททาเนียมไดออกไซด์) เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ที่ประมาณ 92% ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูงมากและบ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ของแร่โดย TiO₂ เป็นสารสำคัญที่ใช้ในการผลิตเม็ดสีไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมสี เคลือบผิว พลาสติก เซรามิก และออปติคอลโค้ตติ้ง ซึ่งต้องการวัสดุที่มีค่าการสะท้อนแสงสูงและการกระจายแสงที่ดีนอกจากนี้ยังสามารถใช้ในกระบวนการผลิตโลหะไททาเนียมสำหรับอุตสาหกรรมการบินและอวกาศเนื่องจากมีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบาสำหรับองค์ประกอบที่พบในปริมาณรวมกันประมาณ 2% ได้แก่ MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, SO₃, K₂O, CaO และ Cr₂O₃ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารเจือปนจากแหล่งแร่ธรรมชาติที่อาจมีผลต่อคุณสมบัติของแร่ในบางแอปพลิเคชันเช่น Al₂O₃ และ SiO₂ อาจเป็นสิ่งสกปรกที่มาจากแหล่งกำเนิดของแร่ขณะที่ CaO และ MgO อาจเกิดจากการปะปนของแร่คาร์บอเนตปริมาณสิ่งเจือปนที่ต่ำแสดงให้เห็นว่าแร่รูไทล์ตัวอย่างนี้มีความบริสุทธิ์สูงและเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการไททาเนียมไดออกไซด์เกรดสูงโดยสรุปผล XRF แสดงให้เห็นว่าแร่รูไทล์ตัวอย่างนี้มี TiO₂ สูง

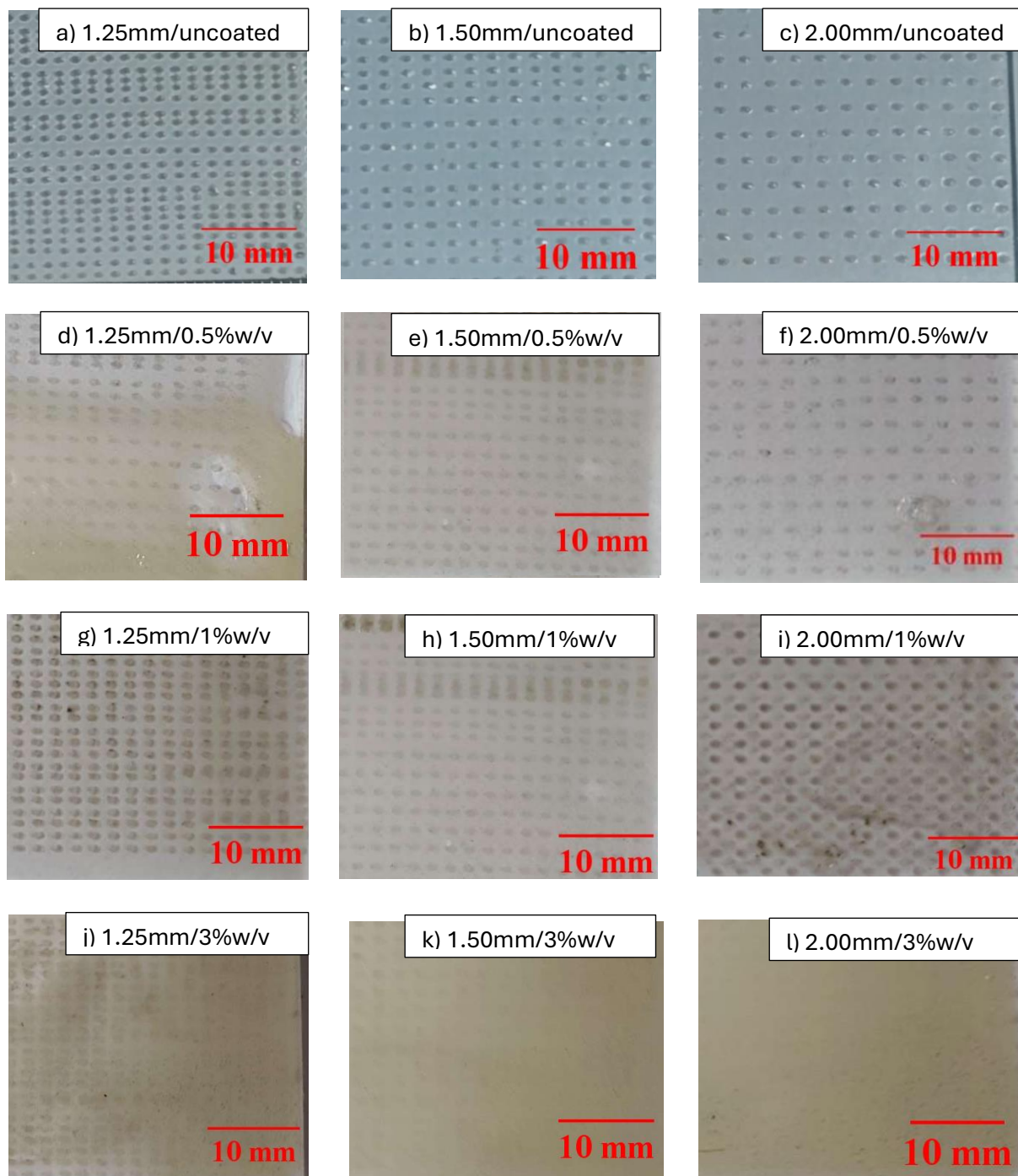
ถึง 92% ซึ่งเป็นเกรดที่ดีมากเหมาะสำหรับการผลิตวัสดุที่ต้องการคุณภาพสูงโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการแยกสิ่งเจือปนมากนักและยังสามารถนำไปใช้เป็นสารเคลือบแผ่นนำแสงเพื่อช่วยเพิ่มการกระจายแสงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์สามารถช่วยเพิ่มการสะท้อนแสงและลดการสูญเสียแสงภายในแผ่นนำแสงทำให้แสงกระจายตัวได้ดีขึ้นและช่วยให้ความสว่างของแผ่นนำแสงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเหมาะสำหรับการใช้งานในจอแสดงผล LED ระบบแสงสว่างและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการการกระจายแสงที่มีคุณภาพสูงนอกจากนี้ด้วยปริมาณ TiO_2 ที่สูงทำให้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการนำมาบดให้มีขนาดเล็กลงเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุเคลือบบนแผ่นนำแสงเนื่องจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสะท้อนและการกระจายแสงได้ดีขึ้นลดการสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดกลืนและช่วยให้แสงกระจายทั่วทั้งแผ่นนำแสงได้อย่างสม่ำเสมอมากขึ้นซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้การใช้งานแผ่นนำแสง

4.4 การทดสอบความแม่นยำของการสลักด้วยเลเซอร์บนแผ่นนำแสงที่ได้



รูปที่ 4.4 ภาพขนาดของจุดกระเจิงแสงและระยะห่างระหว่างจุดที่ 1.25 mm., 1.50 mm., 2.00 mm. ตามลำดับ

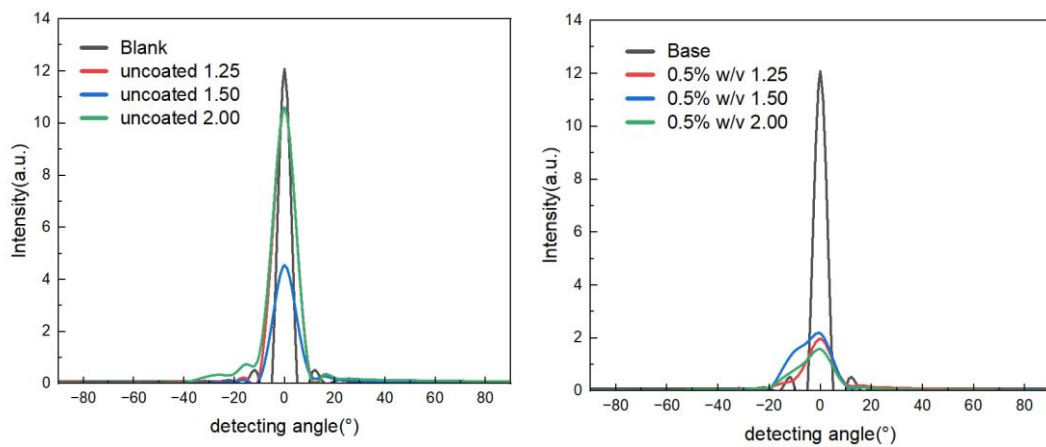
จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงขนาดและระยะห่างที่แท้จริงของจุดกระเจิงแสงบนแผ่นนำแสง ซึ่งตามการออกแบบ จุดกระเจิงแสงควรมีลักษณะเป็นวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มิลลิเมตร และมีระยะห่างระหว่างจุดเท่ากับ 1.25, 1.50 และ 2.00 มิลลิเมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม จากผลการวัดจริงพบว่าจุดกระเจิงแสงที่ได้มีลักษณะเป็นรูปวงรี โดยมีขนาดเฉลี่ยของจุดเท่ากับ 1.22 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างจุดกระเจิงแสงที่วัดได้คือ 0.31, 0.71 และ 1.12 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ออกแบบไว้ โดยขนาดของจุดกระเจิงแสงมีความคลาดเคลื่อน 62.38% และระยะห่างของแต่ละจุดมีความคลาดเคลื่อน 75.78%, 52.43% และ 44.14% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความเบี่ยงเบนค่อนข้างมากจากค่าที่ออกแบบไว้ โดยอาจมีสาเหตุจากสมบัติของวัสดุ พฤติกรรมการกระเจิงของแสงภายในแผ่นนำแสง หรือความไม่แม่นยำในกระบวนการผลิต ซึ่งส่งผลต่อรูปทรงและการกระจายตัวของแสงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจะสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของแผ่นนำแสงที่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนแล้วและยังไม่ได้เคลือบได้จากรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นการนำแผ่นนำแสงทั้งสองประเภทมาแสดงผลลัพธ์เพื่อเปรียบเทียบกันอย่างชัดเจน โดยสามารถสังเกตได้ว่าแผ่นนำแสงที่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนนั้นมีลักษณะของการกระจายแสงที่แตกต่างจากแผ่นที่ไม่ได้เคลือบ กล่าวคือ แผ่นที่เคลือบแล้วมีแนวโน้มที่จะควบคุมทิศทางและความเข้มของแสงได้ดีกว่า ทำให้จุดกระเจิงแสงมีความสม่ำเสมอและมีความคมชัดมากยิ่งขึ้น ในขณะที่แผ่นที่ไม่ได้เคลือบมีการกระเจิงแสงที่กระจายออกอย่างไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้แสงมีความฟุ้งและไม่สามารถควบคุมทิศทางได้ดีเท่าที่ควร นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นที่ผ่านการเคลือบมีประสิทธิภาพในการสะท้อนและส่งผ่านแสงสูงกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของอนุภาคนาโนที่สามารถเปลี่ยนพฤติกรรมของแสงที่ตกกระทบให้เกิดการกระเจิงในมุมที่เหมาะสม และยังช่วยลดการสูญเสียของแสงที่ไม่ต้องการออกไปจากระบบนำแสง ส่งผลให้ระบบโดยรวมมีประสิทธิภาพมากขึ้น



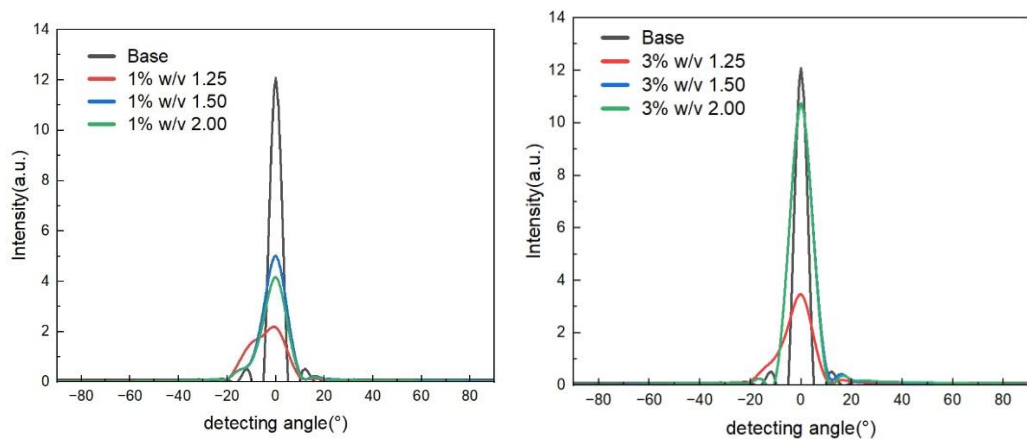
รูปที่ 4.5 ภาพเปรียบเทียบแผ่นน้ำแสงแบบไม่เคลือบ a) 1.25mm./uncoated,

b) 1.50mm./uncoated, c) 2.00mm./uncoated และแบบเคลือบ d) 1.25mm./0.5%w/v,
 e) 1.50mm./0.5%w/v, f) 2.00mm./0.5%w/v, g) 1.25mm./1%w/v, h) 1.50mm./1%w/v,
 i) 2.00mm./1%w/v, j) 1.25mm./3%w/v, k) 1.50mm./3%w/v, l) 2.00mm./3%w/v

4.5 การวัดความสามารถในการกระเจิงแสงของตัวอย่างแผ่นนำแสงที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ได้จากการบดแร่ธรรมชาติรูไทล์ (Rutile)



รูปที่ 4.6 ค่ากระจายแสงที่มุม -90 องศาถึง 90 องศาที่มีการเคลือบอนุภาคนาโนด้วย 0 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร



รูปที่ 4.7 ค่ากระจายแสงที่มุม -90 องศาถึง 90 องศาที่มีการเคลือบอนุภาคนาโนด้วย 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร

จากรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 นั้นเป็นกราฟแสดงพฤติกรรมการกระเจิงแสงของแผ่นนำแสง (Light Guide Plate, LGP) โดยมีแกน X แทนมุมกระเจิงของแสง (Scattering Angle) ในหน่วยองศา (°) และในแนวแกน Y แทนความเข้มของแสง (Intensity) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกความสามารถในการกระจายแสงของแผ่นนำแสงแต่ละประเภทที่ใช้ทดสอบซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าเส้นแต่ละเส้นมีลักษณะที่แตกต่างกันทั้งในด้านความเข้มสูงสุด และ ความกว้างของช่วงการกระเจิงแสง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

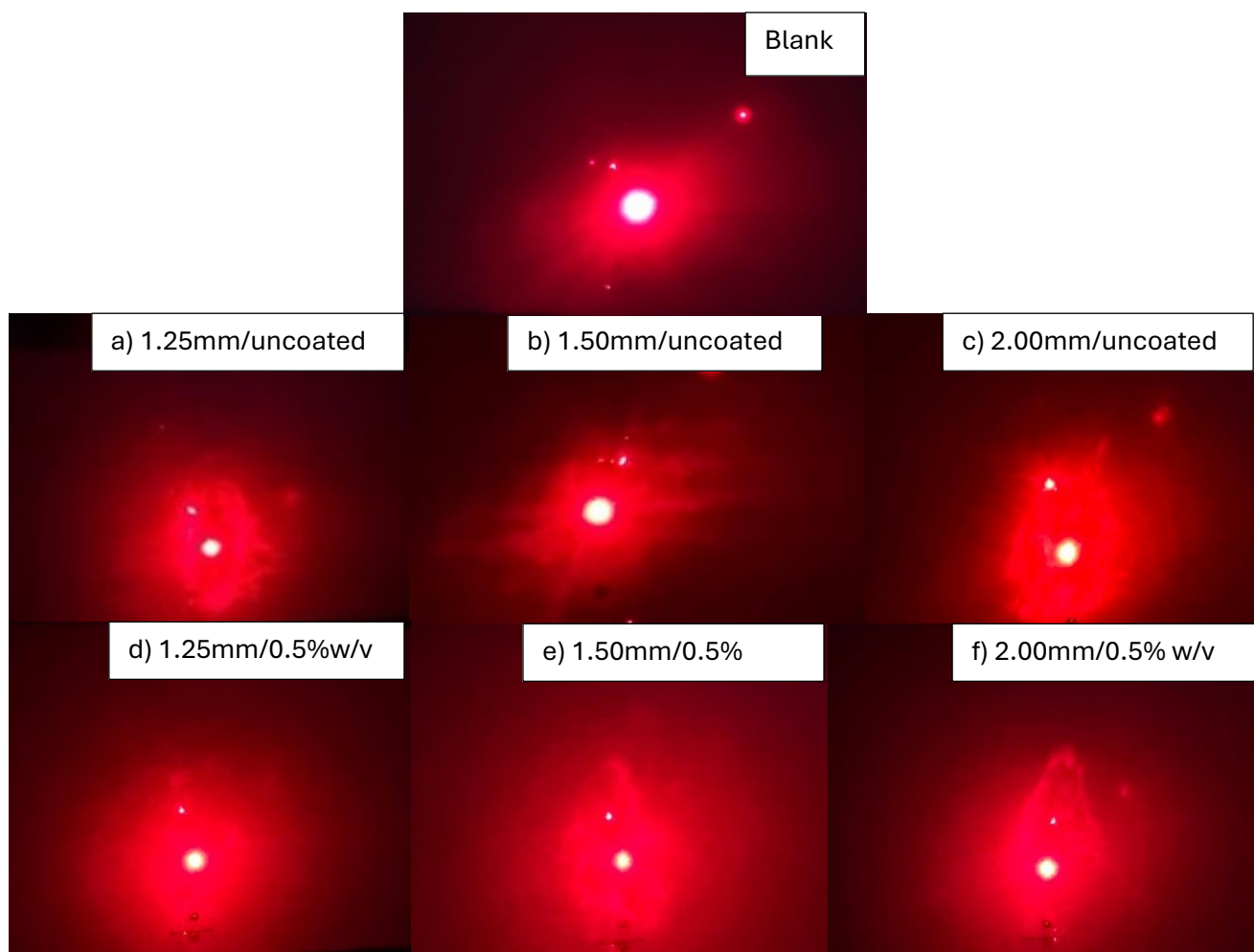
1) ค่าความเข้มของแสงสูงสุด(Peak Intensity)

- a. เส้น 0% ที่มีระยะห่าง 2.00 มิลลิเมตร (สีน้ำเงิน) มีค่าความเข้มสูงสุด ซึ่งหมายความว่าแสงมีการรวมศูนย์มากที่สุดและมีการกระเจิงน้อยที่สุด
- b. เส้นที่มีค่าความเข้มรองลงมา คือ เส้นของ 0% ที่มีระยะห่าง 1.50 มิลลิเมตร (สีแดง) และเส้นของ 0% ที่มีระยะห่าง 1.25 มิลลิเมตรซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าเมื่อไม่มีอนุภาคนาโนเคลือบอยู่แต่มีระยะห่างระหว่างเลนส์ที่แตกต่างกัน ค่าความเข้มสูงสุดของแสงก็จะลดลงตามลำดับ

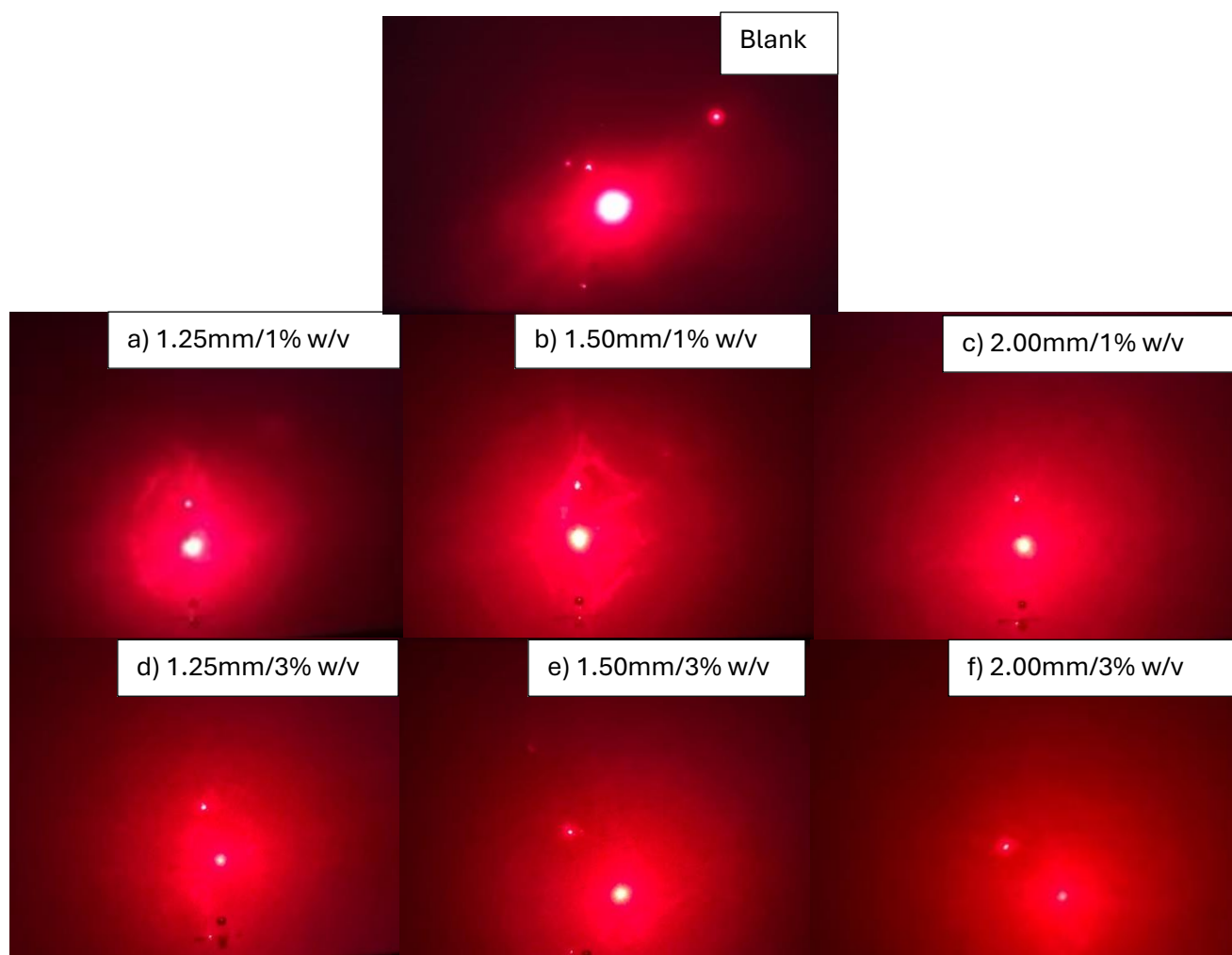
2) ความกว้างของการกระเจิงแสงเส้นที่มีการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนที่มีความเข้มข้น

1.0% เคลือบอยู่นั้นแนวโน้มจะมีช่วงกระจายตัวที่กว้างขึ้นโดยเฉพาะเส้น 1.0 % ที่มีระยะห่าง ประมาณ 1.50-2.00 มิลลิเมตร มีการกระเจิงแสงมีการกระเจิงออกไปในมุมที่กว้างขึ้นไม่ได้มีการกระจุกตัวอยู่ที่จุดเดียว

โดยสรุปแล้วแผ่นนำแสงที่มีการกระจายตัวของแสงที่ดีที่สุดคือ 1.0% ที่มีระยะห่างระหว่างจุดกระเจิง 1.50-2.00 มิลลิเมตร โดยสามารถสังเกตได้จาก**รูปที่ 4.7**



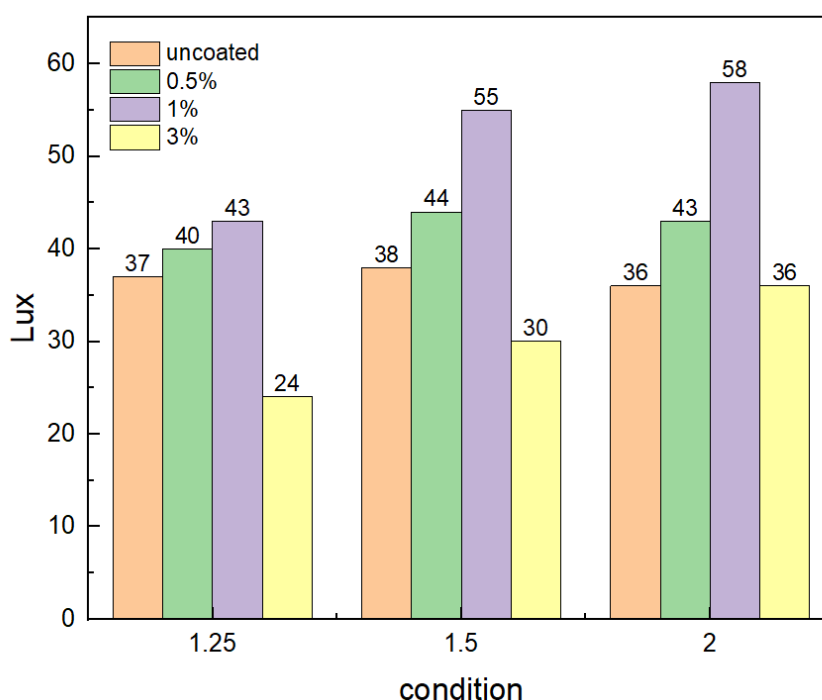
รูปที่ 4.6(ต่อ) ภาพการเปรียบเทียบการกระเจิงแสงของแผ่นอะคริลิคเปล่าที่ใช้(blank) กับแผ่นน้ำ
 แสงแบบไม่เคลือบและแบบเคลือบ a) 1.25mm./uncoated, b) 1.50mm./uncoated, c)
 2.00mm./uncoated, d) 1.25mm./0.5%w/v, e) 1.50mm./0.5%w/v, f) 2.00mm./0.5%w/v



รูปที่ 4.7(ต่อ) ภาพการเปรียบเทียบการกระเจิงแสงของแผ่นอะคริลิกที่ใช้เปล่า(blank) กับแผ่นน้ำ
 แสงแบบเคลือบ a) 1.25mm./1%w/v, b) 1.50mm./1%w/v, c) 2.00mm./1%w/v, d)
 1.25mm./3%w/v, e) 1.50mm./3%w/v, f) 2.00mm./3%w/v

4.6 การวัดความสม่ำเสมอของแสงที่ได้จากการทดลองกับตัวอย่างแผ่นนำแสงที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ได้จากการบดแร่ธรรมชาติรูไทล์ (Rutile)

จากรูปที่ 4.9 รูปนี้เป็นกราฟแท่งแสดงค่าความสว่าง ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกันโดยมีแกน X เป็น Condition ซึ่งเป็นระยะห่างของจุดกระเจิงแสงในแผ่นนำแสงโดยมีขนาด 1.25, 1.5 และ 2.00 มิลลิเมตรและแกน Y เป็นค่าความสว่างที่วัดได้ในหน่วย Lux โดยแผ่นนำแสงทุกแผ่นที่เคลือบอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 1% (สีม่วง) ให้ค่าความสว่างสูงสุดซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนที่เคลือบอยู่นั้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายแสงได้ โดยมีความสว่างของแผ่นนำแสงเพิ่มขึ้นมากถึง 52% เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นที่ไม่มีการเคลือบด้วยอนุภาคนาโน ซึ่งในจากกราฟนั้นจะเห็นได้ว่าแผ่นที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 3% (สีเหลือง) จะให้ค่าความสว่างต่ำที่สุดในทุกเงื่อนไขแสดงให้เห็นว่าการเคลือบสารในปริมาณที่มากเกินไปอาจลดความสามารถในการส่งผ่านของแสงได้ส่วนแผ่นที่ไม่ได้มีการเคลือบอนุภาคนาโน (สีส้ม) และแผ่นที่ 9 เคลือบด้วยอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 0.5% (สีเขียว) นั้นให้ค่าความสว่างที่ใกล้เคียงกันโดยแผ่นที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 0.5% (สีเขียว) ช่วยเพิ่มค่าความสว่างได้เล็กน้อยถ้าเทียบกับแผ่นที่ไม่มีการเคลือบ



รูปที่ 4.8 กราฟแท่งที่แสดงค่าความสว่าง (Lux) ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผล

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาการออกแบบและพัฒนาแผ่นนำแสง โดยพิจารณาปัจจัยระยะห่างของจุดกระเจิงและปริมาณของอนุภาคนาโนที่เติมเข้าไปในแผ่นนำแสง พบว่าทั้งสองปัจจัยมีผลโดยตรงและสัมพันธ์กันต่อประสิทธิภาพการกระจายแสงและความสม่ำเสมอของความสว่างที่เกิดขึ้นในแผ่น โดยเริ่มจากการปรับระยะห่างของจุดกระเจิงแสงให้มีค่าที่แตกต่างกัน คือ 1.25, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร พบว่าระยะห่างของเลนส์ที่ลดลง เช่น ที่ 1.25 มิลลิเมตร ทำให้เลนส์ภายในแผ่นมีความหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการสะท้อนกลับและการกระเจิงของแสงภายในแผ่นมากขึ้น จึงสามารถเพิ่มความเข้มของแสงที่ออกจากแผ่นได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะได้ความเข้มของแสงที่สูงขึ้น แต่กลับพบว่าการกระจายแสงในแนวราบยังคงค่อนข้างจำกัด เนื่องจากแสงมีการสูญเสียพลังงานแสงมากขึ้น เนื่องจากการกระเจิงแสงที่รอยต่อของตัวกลาง ซึ่งอาจทำให้เกิดบริเวณจุดสว่างสูงเกินไปและบริเวณมืดในบางจุดที่แสงกระจายไปไม่ถึงในทางกลับกัน เมื่อเพิ่มระยะห่างของจุดกระเจิงแสงเป็น 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร แม้ความหนาแน่นของเลนส์จะลดลงทำให้ความเข้มของแสงลดลงเล็กน้อย แต่กลับช่วยให้แสงสามารถกระจายตัวได้กว้างขึ้น ทำให้ความสม่ำเสมอของแสงบนแผ่นดีขึ้น ซึ่งประเด็นนี้สะท้อนให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงและการกระจายของแสงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาร่วมกัน ไม่สามารถเลือกเน้นด้านใดด้านหนึ่งเพียงอย่างเดียวได้ และเพื่อเสริมประสิทธิภาพด้านการกระเจิงแสง จึงได้มีการเติมสารเคลือบที่ประกอบด้วยอนุภาคนาโนเข้าไปในแผ่นนำแสง โดยมีค่าความเข้มข้นที่แตกต่างกัน คือ 0.5%, 1% และ 3% เพื่อตรวจสอบผลต่อการกระเจิงและการส่งผ่านแสงภายในแผ่นจากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นของสารเคลือบ 0.5% การกระเจิงของแสงยังอยู่ในระดับต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแผ่นที่มีระยะห่างของเลนส์มาก ซึ่งทำให้เกิดบริเวณที่แสงไม่กระจายเท่ากันหรือเกิดจุดเงามืดชัดเจน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเคลือบเป็น 1% ซึ่งถือว่าเป็นค่ากลางพบว่าประสิทธิภาพในการกระเจิงของแสงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยแสงสามารถกระจายตัวได้สม่ำเสมอมากขึ้นในทุกช่วงระยะห่างของจุดกระเจิงแสง โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ระยะห่าง 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการออกแบบที่ใช้ระยะห่างของจุดกระเจิงแสงที่เหมาะสมร่วมกับการเติมสารเคลือบในระดับที่พอดี สามารถสร้างแผ่นนำแสงที่กระจายแสงได้ทั้งกว้างและสม่ำเสมอ ในขณะที่ยังคงรักษาความเข้มของแสงให้อยู่ในระดับที่เพียงพอต่อการใช้งาน หากเพิ่มความเข้มข้นของสารเคลือบเป็น 3% แม้ว่าการกระเจิงจะสูงขึ้น แต่กลับพบว่าแสงบางส่วนถูกกระเจิงออกนอกทิศทางมาก

เกินไป ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานแสงและลดทอนความเข้มของแสงที่ออกจากแผ่นในภาพรวมการวิเคราะห์กราฟของฟิสิกส์สัญญาณที่ได้จากการวัดค่าความเข้มแสงตามมุมตรวจจับแสงแสดงให้เห็นแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลจากการทดลองทางกายภาพ โดยกรณีที่ไม่เติมสารเคลือบ (Base) พบว่าลำแสงมีความเข้มสูงสุดแต่แคบที่สุด โดยมีช่วงมุมการกระเจิงจำกัดอยู่ที่ประมาณ -10° ถึง $+10^{\circ}$ เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าการกระจายแสงจำกัดอยู่เฉพาะศูนย์กลางของแผ่นนำแสง ซึ่งอาจไม่เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความสม่ำเสมอของแสงทั่วทั้งพื้นผิว ในขณะที่การเติมสารเคลือบที่ความเข้มข้น 1% ร่วมกับการใช้ระยะห่างของจุดกระเจิงแสงที่ 1.50 มิลลิเมตร ส่งผลให้ช่วงการกระเจิงของแสงกว้างขึ้นเป็น -20° ถึง $+20^{\circ}$ ซึ่งเป็นช่วงที่กว้างที่สุดในบรรดาเงื่อนไขทั้งหมด สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกระจายแสงที่ดีขึ้น และช่วยลดปัญหาจุดสว่างเกินหรือเงามืดที่อาจเกิดขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นนำแสง นอกจากนี้ การตรวจสอบลักษณะเชิงผลึกของวัสดุด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ผลึกศาสตร์ยังแสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาคนาโนมีผลต่อโครงสร้างภายในของวัสดุ ทำให้เกิดรอยกระเจิงจุลภาคที่ช่วยให้แสงกระเจิงในทิศทางต่าง ๆ มากขึ้นโดยไม่สูญเสียความเข้มแสงมากนัก ส่งผลให้แสงสามารถกระจายได้ทั่วแผ่นอย่างสม่ำเสมอและมีคุณภาพสูง โดยไม่เกิดแสงรวมเป็นจุดหรือมืดเป็นหย่อม ๆ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบแผ่นนำแสงที่มีประสิทธิภาพสูงควรพิจารณาระยะห่างของเลนส์ในระดับ 1.5–2.0 มิลลิเมตรควบคู่ไปกับการเติมสารเคลือบอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 1% ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ให้สมดุลดีที่สุดระหว่างการกระเจิงและการส่งผ่านแสง โดยเหมาะสมต่อการพัฒนาไปใช้ในงานด้านแสงสว่างอุปกรณ์แสดงผล

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปศึกษาต่อในอนาคต

แม้ผลจากการวิจัยจะพบว่า TiO_2 เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบแผ่นนำแสง เพื่อนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการกระจายแสง แต่ยังสามารถพัฒนาเพิ่มเติมได้อีก ผ่านการปรับแต่งโครงสร้างของ TiO_2 และการศึกษากระบวนการเคลือบที่เหมาะสมเพื่อรองรับกับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] วิจิตร ว่องวัฒนาการ, “วัสดุนาโนในงานอุตสาหกรรม,” วารสารวิชาการเทคโนโลยีวัสดุ, ปีที่ 15, ฉบับที่ 3, หน้า 45-52, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 31 October 2024.
- [2] ปริญญา รัตนสุบรรณ, “การประยุกต์ใช้วัสดุนาโนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์,” วารสารวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย, ปีที่ 10, ฉบับที่ 2, หน้า 123-130, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 08 December 2024.
- [3] ศิริินภา ชินวงศ์, “แสงและพลังงาน: เทคโนโลยีในอนาคต,” เข้าถึงจาก <https://www.futureenergytech.or.th/article/5678>, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 31 January 2025.
- [4] Nanomaterials and Their Applications, NanoTech Research Group, เข้าถึงจาก <https://www.nanotech.org/research/applications>, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 01 April 2025.
- [5] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, “การพัฒนาเทคโนโลยีแสงในประเทศไทย,” <https://www.chula.ac.th/research/optic2024>, เข้าถึงเมื่อ 2567. เข้าถึงเมื่อ: 14 March 2025.
- [6] กมลวรรณ ทองสม, “การศึกษาโครงสร้างของวัสดุนาโนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน,” วารสารนาโนเทคโนโลยีไทย, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 10-17, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 29 December 2024.
- [7] สถาบันวิจัยแสงและวัสดุ, “รายงานประจำปี 2567,” เข้าถึงจาก <https://www.lightmaterials.or.th/report2567>. เข้าถึงเมื่อ: 11 January 2025.
- [8] รุ่งทิวา โพธิ์ทอง, “การใช้วัสดุนาโนในพลังงานแสงอาทิตย์,” วารสารพลังงานและสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 22, ฉบับที่ 4, หน้า 201-210, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 03 January 2025.
- [9] ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, “คู่มือเทคโนโลยีแสงและวัสดุ,” พิมพ์ครั้งที่ 2, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 29 December 2024.
- [10] วศิน เตชะไพฑูรย์, “นาโนเทคโนโลยีกับการพัฒนาประเทศ,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 30, ฉบับที่ 2, หน้า 85-92, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 27 March 2025.
- [11] วิจิตร ว่องวัฒนาการ, “วัสดุนาโนในงานอุตสาหกรรม,” วารสารวิชาการเทคโนโลยีวัสดุ, ปีที่ 15, ฉบับที่ 3, หน้า 45-52, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 07 March 2025.
- [12] ปริญญา รัตนสุบรรณ, “การประยุกต์ใช้วัสดุนาโนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์,” วารสารวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย, ปีที่ 10, ฉบับที่ 2, หน้า 123-130, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 05 January 2025

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [13] ศิริินภา ชินวงศ์, “แสงและพลังงาน: เทคโนโลยีในอนาคต,” เข้าถึงจาก <https://www.futureenergytech.or.th/article/5678>, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 06 October 2024.
- [14] Nanomaterials and Their Applications, NanoTech Research Group, เข้าถึงจาก <https://www.nanotech.org/research/applications>, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 12 November 2024.
- [15] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, “การพัฒนาเทคโนโลยีแสงในประเทศไทย,” <https://www.chula.ac.th/research/optic2024>, เข้าถึงเมื่อ 2567. เข้าถึงเมื่อ: 02 March 2025.
- [16] กมลวรรณ ทองสม, “การศึกษาโครงสร้างของวัสดุนาโนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน,” วารสารนาโนเทคโนโลยีไทย, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 10-17, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 06 March 2025.
- [17] สถาบันวิจัยแสงและวัสดุ, “รายงานประจำปี 2567,” เข้าถึงจาก <https://www.lightmaterials.or.th/report2567>. เข้าถึงเมื่อ: 17 October 2024.
- [18] รุ่งทิศา โพธิ์ทอง, “การใช้วัสดุนาโนในพลังงานแสงอาทิตย์,” วารสารพลังงานและสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 22, ฉบับที่ 4, หน้า 201-210, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 06 October 2024.
- [19] ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, “คู่มือเทคโนโลยีแสงและวัสดุ,” พิมพ์ครั้งที่ 2, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 29 December 2024.
- [20] วศิน เตชะไพฑูรย์, “นาโนเทคโนโลยีกับการพัฒนาประเทศ,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 30, ฉบับที่ 2, หน้า 85-92, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 14 November 2024.
- [21] วิจิตร ว่องวัฒนาการ, “วัสดุนาโนในงานอุตสาหกรรม,” วารสารวิชาการเทคโนโลยีวัสดุ, ปีที่ 15, ฉบับที่ 3, หน้า 45-52, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 01 December 2024.
- [22] ปริญญะ รัตนสุบรรณ, “การประยุกต์ใช้วัสดุนาโนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์,” วารสารวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย, ปีที่ 10, ฉบับที่ 2, หน้า 123-130, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 15 February 2025.
- [23] ศิริินภา ชินวงศ์, “แสงและพลังงาน: เทคโนโลยีในอนาคต,” เข้าถึงจาก <https://www.futureenergytech.or.th/article/5678>, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 24 October 2024.
- [24] Nanomaterials and Their Applications, NanoTech Research Group, เข้าถึงจาก <https://www.nanotech.org/research/applications>, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 18 February 2025.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [25] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, “การพัฒนาเทคโนโลยีแสงในประเทศไทย,” <https://www.chula.ac.th/research/optic2024>, เข้าถึงเมื่อ 2567. เข้าถึงเมื่อ: 14 October 2024.
- [26] กมลวรรณ ทองสม, “การศึกษาโครงสร้างของวัสดุนาโนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน,” วารสารนาโนเทคโนโลยีไทย, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 10-17, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 20 March 2025.
- [27] สถาบันวิจัยแสงและวัสดุ, “รายงานประจำปี 2567,” เข้าถึงจาก <https://www.lightmaterials.or.th/report2567>. เข้าถึงเมื่อ: 15 March 2025.
- [28] รุ่งทิพา โพธิ์ทอง, “การใช้วัสดุนาโนในพลังงานแสงอาทิตย์,” วารสารพลังงานและสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 22, ฉบับที่ 4, หน้า 201-210, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 17 December 2024.
- [29] ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, “คู่มือเทคโนโลยีแสงและวัสดุ,” พิมพ์ครั้งที่ 2, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 05 April 2025.
- [30] วศิน เตชะไพฑูรย์, “นาโนเทคโนโลยีกับการพัฒนาประเทศ,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 30, ฉบับที่ 2, หน้า 85-92, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 21 March 2025.
- [31] วิจิตร ว่องวัฒนาการ, “วัสดุนาโนในงานอุตสาหกรรม,” วารสารวิชาการเทคโนโลยีวัสดุ, ปีที่ 15, ฉบับที่ 3, หน้า 45-52, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 16 March 2025.
- [32] ปริญญารัตนสุบรรณ, “การประยุกต์ใช้วัสดุนาโนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์,” วารสารวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย, ปีที่ 10, ฉบับที่ 2, หน้า 123-130, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 27 October 2024.
- [33] ศิริินภา ชินวงศ์, “แสงและพลังงาน: เทคโนโลยีในอนาคต,” เข้าถึงจาก <https://www.futureenergytech.or.th/article/5678>, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 18 October 2024.
- [34] Nanomaterials and Their Applications, NanoTech Research Group, เข้าถึงจาก <https://www.nanotech.org/research/applications>, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 24 March 2025.
- [35] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, “การพัฒนาเทคโนโลยีแสงในประเทศไทย,” <https://www.chula.ac.th/research/optic2024>, เข้าถึงเมื่อ 2567. เข้าถึงเมื่อ: 27 November 2024.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [36] กมลวรรณ ทองสม, “การศึกษาโครงสร้างของวัสดุนาโนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน,” วารสารนาโนเทคโนโลยีไทย, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 10-17, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 31 March 2025.
- [37] สถาบันวิจัยแสงและวัสดุ, “รายงานประจำปี 2567,” เข้าถึงจาก <https://www.lightmaterials.or.th/report2567>. เข้าถึงเมื่อ: 13 November 2024.
- [38] รุ่งทิพา โพธิ์ทอง, “การใช้วัสดุนาโนในพลังงานแสงอาทิตย์,” วารสารพลังงานและสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 22, ฉบับที่ 4, หน้า 201-210, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 20 February 2025.
- [39] ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, “คู่มือเทคโนโลยีแสงและวัสดุ,” พิมพ์ครั้งที่ 2, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 21 January 2025.
- [40] วศิน เตชะไพบุลย์, “นาโนเทคโนโลยีกับการพัฒนาประเทศ,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 30, ฉบับที่ 2, หน้า 85-92, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 17 October 2024.
- [41] วิจิตร ว่องวัฒนาการ, “วัสดุนาโนในงานอุตสาหกรรม,” วารสารวิชาการเทคโนโลยีวัสดุ, ปีที่ 15, ฉบับที่ 3, หน้า 45-52, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 08 December 2024.
- [42] ปริญญา รัตนสุบรรณ, “การประยุกต์ใช้วัสดุนาโนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์,” วารสารวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย, ปีที่ 10, ฉบับที่ 2, หน้า 123-130, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 05 December 2024.
- [43] ศิริินภา ชินวงศ์, “แสงและพลังงาน: เทคโนโลยีในอนาคต,” เข้าถึงจาก <https://www.futureenergytech.or.th/article/5678>, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 15 December 2024.
- [44] Nanomaterials and Their Applications, NanoTech Research Group, เข้าถึงจาก <https://www.nanotech.org/research/applications>, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 20 October 2024.
- [45] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, “การพัฒนาเทคโนโลยีแสงในประเทศไทย,” <https://www.chula.ac.th/research/optic2024>, เข้าถึงเมื่อ 2567. เข้าถึงเมื่อ: 10 December 2024.
- [46] กมลวรรณ ทองสม, “การศึกษาโครงสร้างของวัสดุนาโนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน,” วารสารนาโนเทคโนโลยีไทย, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 10-17, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 23 December 2024.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [47] สถาบันวิจัยแสงและวัสดุ, “รายงานประจำปี 2567,” เข้าถึงจาก <https://www.lightmaterials.or.th/report2567>. เข้าถึงเมื่อ: 19 December 2024.
- [48] รุ่งทิวา โพธิ์ทอง, “การใช้วัสดุนาโนในพลังงานแสงอาทิตย์,” วารสารพลังงานและสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 22, ฉบับที่ 4, หน้า 201-210, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 17 March 2025.
- [49] ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, “คู่มือเทคโนโลยีแสงและวัสดุ,” พิมพ์ครั้งที่ 2, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 01 December 2024.
- [50] วศิน เตชะไพบุลย์, “นาโนเทคโนโลยีกับการพัฒนาประเทศ,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 30, ฉบับที่ 2, หน้า 85-92, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 12 February 2025.
- [51] วิจิตร ว่องวัฒนาการ, “วัสดุนาโนในงานอุตสาหกรรม,” วารสารวิชาการเทคโนโลยีวัสดุ, ปีที่ 15, ฉบับที่ 3, หน้า 45-52, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 23 February 2025.
- [52] ปริญา รัตนสุบรรณ, “การประยุกต์ใช้วัสดุนาโนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์,” วารสารวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย, ปีที่ 10, ฉบับที่ 2, หน้า 123-130, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 14 December 2024.
- [53] ศิริินภา ชินวงศ์, “แสงและพลังงาน: เทคโนโลยีในอนาคต,” เข้าถึงจาก <https://www.futureenergytech.or.th/article/5678>, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 11 December 2024.
- [54] Nanomaterials and Their Applications, NanoTech Research Group, เข้าถึงจาก <https://www.nanotech.org/research/applications>, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 01 January 2025.
- [55] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, “การพัฒนาเทคโนโลยีแสงในประเทศไทย,” <https://www.chula.ac.th/research/optic2024>, เข้าถึงเมื่อ 2567. เข้าถึงเมื่อ: 29 October 2024.
- [56] กมลวรรณ ทองสม, “การศึกษาโครงสร้างของวัสดุนาโนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน,” วารสารนาโนเทคโนโลยีไทย, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 10-17, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 28 February 2025.
- [57] สถาบันวิจัยแสงและวัสดุ, “รายงานประจำปี 2567,” เข้าถึงจาก <https://www.lightmaterials.or.th/report2567>. เข้าถึงเมื่อ: 05 November 2024.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [58] รุ่งทิวา โพธิ์ทอง, “การใช้วัสดุนาโนในพลังงานแสงอาทิตย์,” วารสารพลังงานและสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 22, ฉบับที่ 4, หน้า 201-210, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 18 March 2025.
- [59] ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, “คู่มือเทคโนโลยีแสงและวัสดุ,” พิมพ์ครั้งที่ 2, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 15 March 2025.
- [60] วศิน เตชะไพบุลย์, “นาโนเทคโนโลยีกับการพัฒนาประเทศ,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 30, ฉบับที่ 2, หน้า 85-92, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 15 January 2025.
- [61] วิจิตร ว่องวัฒนาการ, “วัสดุนาโนในงานอุตสาหกรรม,” วารสารวิชาการเทคโนโลยีวัสดุ, ปีที่ 15, ฉบับที่ 3, หน้า 45-52, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 30 November 2024.
- [62] ปริญญา รัตนสุบรรณ, “การประยุกต์ใช้วัสดุนาโนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์,” วารสารวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย, ปีที่ 10, ฉบับที่ 2, หน้า 123-130, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 07 January 2025.
- [63] ศิริินภา ชินวงศ์, “แสงและพลังงาน: เทคโนโลยีในอนาคต,” เข้าถึงจาก <https://www.futureenergytech.or.th/article/5678>, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 03 April 2025.
- [64] Nanomaterials and Their Applications, NanoTech Research Group, เข้าถึงจาก <https://www.nanotech.org/research/applications>, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 21 December 2024.
- [65] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, “การพัฒนาเทคโนโลยีแสงในประเทศไทย,” <https://www.chula.ac.th/research/optic2024>, เข้าถึงเมื่อ 2567. เข้าถึงเมื่อ: 06 November 2024.
- [66] กมลวรรณ ทองสม, “การศึกษาโครงสร้างของวัสดุนาโนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน,” วารสารนาโนเทคโนโลยีไทย, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 10-17, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 10 March 2025.
- [67] สถาบันวิจัยแสงและวัสดุ, “รายงานประจำปี 2567,” เข้าถึงจาก <https://www.lightmaterials.or.th/report2567>. เข้าถึงเมื่อ: 01 November 2024.
- [68] รุ่งทิวา โพธิ์ทอง, “การใช้วัสดุนาโนในพลังงานแสงอาทิตย์,” วารสารพลังงานและสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 22, ฉบับที่ 4, หน้า 201-210, 2567. เข้าถึงเมื่อ: 24 November 2024.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [69] ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, “คู่มือเทคโนโลยีแสงและวัสดุ,” พิมพ์ครั้งที่ 2, 2567.
เข้าถึงเมื่อ: 18 February 2025.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นาย พลกฤษฎ์เลิศรุ่งวิเชียร
วัน เดือน ปี	30 สิงหาคม พ.ศ. 2545
ที่อยู่	686 ซอยบางแค แขวงบางแค เขตบางแค กรุงเทพมหานคร 10160
การศึกษา	ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมวัสดุ นาโน วิทยาลัยเทคโนโลยีและ นวัตกรรมวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อ – นามสกุล	นายพาณพงค์ สิทธิเมธารักษ์
วัน เดือน ปี	6 มิถุนายน พ.ศ.2545
ที่อยู่	18/25 หมู่9 ซอยมิตรไมตรี16 ตำบลบางเมือง ใหม่ อำเภอมืองสมุทรปราการ จังหวัด สมุทรปราการ 10270
การศึกษา	ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมวัสดุ นาโน วิทยาลัยเทคโนโลยีและ นวัตกรรมวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง