

การศึกษาความแตกต่างชนิดของสีบนภาพวาด  
โดยใช้เทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟี  
EXPLORING THE DIFFERENT KINDS OF COLORS USING  
DIGITAL HOLOGRAPHY TECHNIQUE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาความแตกต่างชนิดของสีบนภาพวาด  
โดยใช้เทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟี

EXPLORING THE DIFFERENT KINDS OF COLORS USING  
DIGITAL HOLOGRAPHY TECHNIQUE



T149290

ธิดิมา เรื่องทองดี  
นุชตินันท์ ต่อवास

ธิดิมา  
ธ5887  
ธ559

เลขหมู่.....149290  
เลขทะเบียน.....  
วันเดือนปี..30..ธ.ค..2561



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในห้องสมุด ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPLORING THE DIFFERENT KINDS OF COLORS  
USING DIGITAL HOLOGRAPHY TECHNIQUE



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **ACADEMIC YEAR 2016** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาความแตกต่างชนิดของสีบนภาพวาดโดยใช้เทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟี  
Exploring The Different Kinds of Colors Using Digital Holography Technique

ชื่อนักศึกษา นางสาวธิดิมา เรืองทองดี รหัสนักศึกษา 56051154  
นางสาวนุชตินันท์ ต่อवास รหัสนักศึกษา 56051160

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชา ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2559  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. วิฑูรย์ ยินดีสุข ประธานกรรมการ	
อ. สุรชาติ กมลดีลก กรรมการ	
อ. ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง กรรมการ	
ผศ.ดร. ประธาน บุรณศิริ อาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาความแตกต่างชนิดของสีบนภาพวาดโดยใช้เทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟี	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวธิติมา เรืองทองดี	รหัสนักศึกษา 56051154
	นางสาวนุชตินันท์ ต่อवास	รหัสนักศึกษา 56051160
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2559	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษเล่มนี้เป็นการศึกษาความแตกต่างของเนื้อสีชนิดต่าง ๆ บนภาพวาดโดยสังเกตลักษณะของสีจากภาพโฮโลแกรมด้วยวิธีเทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบออนไลน์ โดยในการทดลองใช้แสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดยิงเข้าไปในปริซึมด้วยมุมตกกระทบที่เหมาะสมเพื่อให้แสงตกกระทบบนตัวอย่างที่สัมผัสอยู่บนปริซึม และแสงเกิดการสะท้อนกลับหมดภายในปริซึม จากนั้นถ่ายภาพโฮโลแกรมโดยใช้กล้อง CCD และใช้โปรแกรม Matlab ในการสร้างภาพขึ้นมาใหม่จากภาพเดิม ส่งผลให้ภาพมีความคมชัด และสังเกตเห็นความลึก ต้นของภาพชัดเจนกว่าภาพถ่ายทั่ว ๆ ไป จากผลการทดลองพบว่าภาพโฮโลแกรมของสีแต่ละชนิดที่ถูกระบายลงบนกระดาษ 100 ปอนด์ทั้งสีดำและสีขาว แบบเรียบสามารถสังเกตการจัดเรียงตัวของเนื้อสีได้ดีกว่า ภาพบนกระดาษ 100 ปอนด์แบบหยายนอกจากนี้ ลักษณะการจัดเรียงตัว ความเรียบ ความหยายน และการจับตัวเป็นเนื้อเดียวกันของสีแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด สามารถนำความรู้ทางด้านเทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟีไปประยุกต์ใช้งานทางด้านชีววิทยาได้ในการศึกษาการเคลื่อนของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ๆ และยังสามารถนำไปใช้ในการพิสูจน์หลักฐานเพื่อตรวจสอบรอยนิ้วบนผิวกระจกได้

**คำสำคัญ :** ภาพโฮโลแกรม ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบออนไลน์ การสะท้อนกลับหมดภายใน การสร้างภาพขึ้นมาใหม่

Title	Exploring The Different Kinds of Colors Using Digital Holography Technique	
Students	Miss Thitima Rueangthorngdi	Student ID 56051154
	Miss Nuttinant Towas	Student ID 56051160
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2016	
Advisor	Asst. Dr. Prathan Buranasiri	

### Abstract

The special project is a study of the different type of colors on the drawing, by observing the color of the holograms mean of in-line digital holography technique. Experimenting with laser from a light source into the prism with a flare angle of incidence. The light incident on a sample on the prism interface on the prism. And the total internal reflection in the prism. The holographic imaging using a CCD camera and use Matlab to create a new image from the original image. As a result, image are resolution and noted the deepness of the picture of the general. The result of the experiment showed that each hologram of colors on the 100 pound of paper of black and white. Smooth texture can be observed better than the image on rough 100 pounds of paper. In addition, the arrangement smoothness, roughness and homogeneity of different colors. Obviously digital holography can be applied to biological applications in the study of small organism and can be also used to prove fingerprint on the glass surfaces.

**Keyword :** hologram image, digital in-line holography, the total internal reflection to create new ones.

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้านางสาวธิดิมา เรืองทองดี และนางสาวนุชตินันท์ ต่อवास นักศึกษาศาสาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ ได้จัดทำโครงการพิเศษในหัวข้อเรื่องการศึกษาความแตกต่างชนิดของสีบนภาพวาดโดยใช้เทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟี และโครงการพิเศษเล่มนี้ได้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่คอยให้ คำปรึกษาและคอยดูแลอย่างใกล้ชิดในขณะการทำวิจัยนี้มาโดยตลอดจนงานวิจัยนี้สำเร็จบรรลุ เป้าหมาย

ขอขอบคุณ พี่ๆ และเพื่อนๆ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกคนที่ให้คำปรึกษา และให้ความ ช่วยเหลือในการทำงานงานพิเศษนี้มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยดูแล ให้คำปรึกษา เป็นกำลังใจและ กำลังสำคัญในการผลักดันให้ข้าพเจ้าทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ธิดิมา เรืองทองดี  
นุชตินันท์ ต่อवास



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญ (ต่อ)	จ
สารบัญ (ต่อ)	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
สารบัญรูป (ต่อ)	ฌ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 สมบัติของคลื่นแสง	5
2.1.1 การสะท้อนแสง	5
2.1.2 การหักเหของแสง	5
2.1.3 การสะท้อนกลับหมดของแสง	6
2.1.4 การแทรกสอดของแสง	7
2.1.5 การเลี้ยวเบนของคลื่น	9
2.2 โฮโลแกรม	9
2.2.1 ประวัติการค้นพบโฮโลแกรม	10
2.2.2 ประเภทของโฮโลแกรม	10
2.2.3 วิธีการทำงานของโฮโลกราฟีและโฮโลแกรม	10
2.3 ดิจิตอลโฮโลกราฟี	11
2.3.1 หลักการทำงานของดิจิตอลโฮโลกราฟี	12
2.3.2 หลักการอ่านภาพ(Reconstruction)ของโฮโลแกรม โดยวิธี Angular spectrum	12
2.4 อินไลน์ดิจิตอลโฮโลกราฟี (Digital in-line holography)	15
2.5 เลเซอร์ไดโอด	16
2.5.1 คุณสมบัติทั่วไปของเลเซอร์ไดโอดรุ่น CPS635R	17
2.6 สีคืออะไร	17
2.7 ฟิสิกส์ของสี	18
2.8 แม่สี	20
2.8.1 แม่สีของแสง	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.8.2 แม่สีของธาตุ	20
2.9 การผสมกันของสี	20
2.9.1 การผสมสีแบบบวก (Additive color mixing)	20
2.9.2 การผสมสีแบบลบ (Subtractive color mixing)	20
2.10 ประเภทของสี	21
2.10.1 สีน้ำ (water colour)	21
2.10.2 สีโปสเตอร์ (Poster colour)	22
2.10.3 สีชอล์ก (Pastel)	22
2.10.4 สีฝุ่น (Tempera)	22
2.10.5 ดินสอสี (Caryon)	23
2.10.6 สีเทียนหรือสีเทียนน้ำมัน (Oil pastel)	24
2.10.7 สีอะคริลิก (Acrylic colour)	24
2.10.8 สีน้ำมัน (Oil colour)	25
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	26
3.1.1 เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode - LD)	26
3.1.2 เลนส์นูน (Convex lens)	26
3.1.3 ปริซึม (Prism)	27
3.1.4 กล้อง CCD	27
3.1.5 Optical mounting post	28
3.1.6 คอมพิวเตอร์ (Computer)	28
3.1.7 กระจกที่ใช้ในการทดลอง	29
3.1.8 สีไม้	29
3.1.9 สีอะคริลิก	29
3.1.10 สีเทียน	30
3.1.11 สีชอล์ก	30
3.1.12 ไตร่เป่าผม	31
3.2 วิธีการทำงานวิจัย	31
3.2.1 การเตรียมตัวอย่างในการทดลอง	31
3.2.2 การจัดระบบแสงในการทดลอง	33
3.3.3 การดำเนินการทดลอง	34
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	
4.1 ผลจากการทดลองโดยใช้กระจก 100 ปอนด์สีขาว	37
4.2 ผลจากการทดลองโดยใช้กระจก 100 ปอนด์สีดำ	41

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 การเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อสีแต่ละชนิดบนกระดาษ 100 ปอนด์ จากภาพ Reconstruction ของกระดาษ 4 ลักษณะคือกระดาษสีขาวแบบเรียบและแบบหยาบกระดาษสีดำแบบเรียบและแบบหยาบ	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	49
เอกสารอ้างอิง	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณลักษณะทั่วไปของเลเซอร์ไดโอดรุ่น CPS635R	17
2.2 คุณลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของเลเซอร์ไดโอด	17
2.3 แสดงค่าความถี่และค่าพลังงานแสงของสเปกตรัมของแสงแต่ละสี	19
4.1 ภาพถ่ายตัวอย่าง ภาพถ่ายผลการทดลอง และภาพ Reconstruction ของตัวอย่างชุดที่ 1 กระจก 100 ปอนด์สีชาวด้านเรียบ	37
4.2 ภาพถ่ายตัวอย่าง รูปถ่ายผลการทดลอง และภาพ Reconstruction ของตัวอย่างชุดที่ 2 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียนและสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระจก 100 ปอนด์สีชาวด้านหยาบ	39
4.3 ภาพถ่ายตัวอย่าง ภาพถ่ายผลการทดลอง และภาพ Reconstruction ของตัวอย่างชุดที่ 2 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระจก 100 ปอนด์สีดำด้านเรียบ	41
4.4 ภาพถ่ายตัวอย่าง ภาพถ่ายผลการทดลอง และภาพ Reconstruction ของตัวอย่างชุดที่ 4 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระจก 100 ปอนด์สีดำด้านหยาบ	43
4.5 การเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อสีไม้บนกระจกทั้ง 4 ลักษณะ โดยใช้ตัวอย่างสีแดง	45
4.6 การเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อสีอะคริลิกบนกระจกทั้ง 4 ลักษณะ โดยใช้ตัวอย่างสีแดง	46
4.7 การเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อสีเทียนบนกระจกทั้ง 4 ลักษณะ โดยใช้ตัวอย่างสีแดง	47
4.8 การเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อสีชอล์กบนกระจกทั้ง 4 ลักษณะ โดยใช้ตัวอย่างสีแดง	48

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การสะท้อนของแสงบนผิวกระจกเรียบ	5
2.2 การหักเหของแสงเมื่อผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน	6
2.3 แสดงการเปรียบเทียบการเดินทางของแสงผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน และมุมตกกระทบของแสงต่างกัน ( $\theta_1$ )	7
2.4 แสดงการแทรกสอดของคลื่นแสงผ่านช่องสลิต 2 ช่องที่มีขนาดเท่ากัน	7
2.5 แสดงไดอะแกรมการคำนวณหาสมการการเกิดการแทรกสอดของแสง เพื่อคำนวณหาค่าความยาวคลื่นของแสง	8
2.6 การเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นแสงผ่านช่องว่างเล็ก ๆ ที่มีขนาดเท่ากัน	9
2.7 การเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นแสงเมื่อผ่านช่องขนาดต่างกัน	9
2.8 แสดงกระบวนการสร้างภาพโฮโลแกรม	11
2.9 แสดงกระบวนการอ่านภาพโฮโลแกรม	11
2.10 แสดงไดอะแกรมวิธีการดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์	12
2.11 ระบบการทำงานสำหรับการสร้างภาพใหม่	13
2.12 แผนผังแสดงขั้นตอนการ Reconstruction	15
2.13 แสดงการจัดระบบแสงแบบอินไลน์ดิจิทัลโฮโลกราฟี	16
2.14 แสดงการจัดระบบแบบกาบอร์ดิจิทัลโฮโลกราฟี	16
2.15 แสดงสเปกตรัมของแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สายตามองเห็น	18
2.16 แสดงสเปกตรัมของแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สายตามองเห็น	19
2.17 แสดงสเปกตรัมของแสงบนจอคอมพิวเตอร์ (Red-Green-Blue : RGB)	19
2.18 แสดงภาพวาดโดยใช้สีน้ำ	21
2.19 แสดงภาพวาดโดยใช้สีโปสเตอร์	22
2.20 แสดงภาพวาดโดยใช้สีชอล์ก	22
2.21 แสดงภาพวาดโดยใช้สีฝุ่น	23
2.22 แสดงภาพวาดโดยใช้ดินสอสี	23
2.23 แสดงภาพวาดโดยใช้สีเทียน	24
2.24 แสดงภาพวาดโดยใช้สีอะคริลิก	24
2.25 แสดงภาพวาดโดยใช้สีน้ำมัน	25
3.1 เลเซอร์ไดโอดสีแดงความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร และกำลังของแสง 0.9 มิลลิวัตต์	26
3.2 เลนส์นูนที่ใช้ในการรวมแสงเลเซอร์ และขยายลำแสงในการบันทึกภาพโฮโลแกรม	27
3.3 ปริซึมสามเหลี่ยม มุม $45^\circ \times 45^\circ \times 90^\circ$	27
3.4 กล้องดิจิทัล ยี่ห้อ Cannon รุ่น EOS-700D	28
3.5 ชุด Optical mounting post	28
3.6 คอมพิวเตอร์ใช้ในการ Reconstruction	28
3.7 กระจกที่ใช้ในการทดลอง	29
3.8 สีไม้ ยี่ห้อมาสเตอร์อาร์ต	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
3.9 สีอะคริลิก ยี่ห้อซากุระ	30
3.10 สีเทียน ยี่ห้อมาสเตอร์อาร์ต	30
3.11 สีชอล์ก ยี่ห้อเพนเทล	30
3.12 ไดรเป่าผม	31
3.13 ตัวอย่างชุดที่ 1 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบน กระดาษ 100 ปอนด์สีขาวด้านเรียบ	32
3.14 ชุดตัวอย่างที่ 2 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบน กระดาษ 100 ปอนด์สีขาวด้านหยาบ	32
3.15 ตัวอย่างชุดที่ 3 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบน กระดาษ 100 ปอนด์สีดำด้านเรียบ	32
3.16 ตัวอย่างชุดที่ 4 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบน กระดาษ 100 ปอนด์สีดำด้านหยาบ	33
3.17 ไดอะแกรมแสดงระบบการสะท้อนกลับหมดของแสงภายในปริซึม โดยใช้ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์ (Total internal reflection by digital in-lined holography)	33
3.18 แสดงระบบการสะท้อนกลับหมดของแสงภายในปริซึมโดยใช้ระบบ ดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์ (Total internal reflection by digital in-lined holography) ที่ใช้ในการทดลอง	33
3.19 แสดงการเกิดการสะท้อนกลับหมดภายในปริซึม	34
3.20 แสดงเส้นทางการเดินของแสงเมื่อตกกระทบปริซึมแล้วเกิดการหักเหภายในปริซึม	35
3.21 แสดงรูปสามเหลี่ยม ABC ที่เกิดจากเส้นทางการเดินของแสง เมื่อตกกระทบปริซึมแล้วเกิดการหักเหภายในปริซึมและเส้นปกติ (Normal line) ที่ตั้งฉากกับระนาบผิวของปริซึม	35
3.22 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในการทดลอง	36

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทในด้านต่าง ๆ มากขึ้น เช่น ทางด้านอุตสาหกรรม ทางการแพทย์ ทางการเกษตร ตลอดจนทั้งการประยุกต์ใช้ทางด้านศิลปะอีกด้วย ซึ่งศิลปะเป็นงานที่เน้นทางด้านความสวยงาม และองค์ประกอบของภาพนั้นๆสามารถสื่อความหมายได้เป็นอย่างดี โดยในการวิจัยทางด้านนี้นักวิทยาศาสตร์หรือนักวิจัยยังจำเป็นต้องอาศัยหลักการพื้นฐานมาประยุกต์ใช้และปรับปรุงเครื่องมือที่สร้างขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการการใช้งานสำหรับการวิเคราะห์ภาพวาดส่วนมากจะเป็นการวิเคราะห์และการประเมินคุณค่าของงานศิลปะโดยทั่วไป ซึ่งพิจารณาจาก 3 ด้านคือ ด้านความงามเป็นการวิเคราะห์และประเมินคุณค่าทางด้านฝีมือ ด้านการใช้ทัศนธาตุทางศิลปะ และด้านการจัดองค์ประกอบศิลป์ว่าผลงานชิ้นนี้แสดงออกทางความงามของศิลปะได้อย่างเหมาะสมสวยงาม และส่งผลต่อผู้ดูให้เกิดความชื่นชมในสุนทรียภาพมากน้อยเพียงใด ซึ่งลักษณะการแสดงออกทางความงามของศิลปะจะมีหลากหลายแตกต่างกันออกไปตามรูปแบบ ของยุคสมัย ผู้วิเคราะห์และผู้ประเมินจึงต้องศึกษาให้เกิดความรู้ความเข้าใจด้วย ในด้านสาระจะเป็นการวิเคราะห์และประเมินคุณค่าของผลงานศิลปะแต่ละชิ้นว่ามีลักษณะส่งเสริมคุณธรรม และจริยธรรม ตลอดจนจุดประสงค์ต่างๆ ทางจิตวิทยาว่าให้สาระอะไรกับผู้ชมบ้าง ซึ่งอาจเป็นสาระเกี่ยวกับธรรมชาติ สังคม ศาสนา การเมือง ปัญญา ความคิด จินตนาการ และความฝัน และทางด้านอารมณ์ความรู้สึกเป็นการคิดวิเคราะห์และประเมินคุณค่าในด้านคุณสมบัติที่สามารถกระตุ้นอารมณ์ความรู้สึกและสื่อความหมายได้อย่างลึกซึ้งของวัสดุ ซึ่งเป็นผลของการใช้เทคนิคแสดงออกถึงความคิดพลัง ความรู้สึกที่ปรากฏอยู่ในผลงาน สำหรับสิ่งที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์งานศิลปะคือ การพิจารณาแยกแยะศึกษาองค์รวมของงานศิลปะ โดยที่องค์รวมของงานศิลปะนั้นมีทั้งในด้านทัศนธาตุ องค์ประกอบศิลป์ และความสัมพันธ์ต่างๆ ในด้านเทคนิคกรรมวิธีการแสดงออกเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประเมินผลงานว่ามีคุณค่าทางด้านความงาม ด้านสาระ และด้านอารมณ์ความรู้สึกขณะที่ได้มองเห็น และในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีความสนใจในการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเนื้อสีแต่ละชนิดที่ถูกระบายลงบนกระดาษโดยวิเคราะห์ลักษณะของภาพโฮโลแกรม (Hologram) ที่ถูกสร้างด้วยวิธีดิจิตอลโฮโลกราฟี (Digital Holography: DH) ด้วยเหตุที่ว่าสีแต่ละชนิดที่ใช้ในการสร้างสรรค์งานศิลปะจะให้ความสวยงาม ความรู้สึกที่แตกต่างกัน ซึ่งงานวิจัยประเภทนี้ยังไม่เคยมีนักวิจัยเคยศึกษามาก่อน จะมีเพียงแค่ศึกษาอายุของสีที่ระบายลงบนภาพวาด ซึ่งเป็นการบ่งบอกอายุของภาพวาดได้ แต่ก็ไม่ได้ระบุเป็นที่ชัดเจน

เทคนิคดิจิตอลโฮโลกราฟี เป็นอีกเทคนิคที่สามารถใช้แทนกล้องจุลทรรศน์ทั่วไปได้ ซึ่งจุดเด่นของเทคนิคนี้คือ ภาพที่ได้มีลักษณะเป็นแบบสามมิติ มีความลึกของโฟกัสและความเข้มสีของเฟส ซึ่งหลักการโฮโลกราฟี (Holography) คือ กระบวนการสร้างภาพโฮโลแกรมเป็นการบันทึกภาพลงบนฟิล์มหรือแผ่นเคลือบด้วยสารสำหรับบันทึกแสง ซึ่งผ่านเทคนิคการบันทึกด้วยการใช้แสงที่มีหน้าคลื่นสอดคล้องกันหรือที่เรียกว่าแสงโคฮีเรนซ์ (Coherence) เช่น แสงเลเซอร์ เป็นต้น โดยหลักการของโฮโลกราฟีเป็นเทคนิคที่ช่วยให้แสงกระจายจากวัตถุที่จะบันทึกและได้ถูกสร้างขึ้นใหม่ เพื่อให้ปรากฏเป็นวัตถุอยู่ในตำแหน่งเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับกรบันทึก โดยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบตำแหน่งและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางของระบบการมองเห็นช่วยให้แสงกระจายจากวัตถุที่จะบันทึกและได้ถูกสร้างขึ้นใหม่ เพื่อให้ปรากฏเป็นวัตถุอยู่ในตำแหน่งเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับกรบันทึก โดยหลักการพื้นฐานของการสร้างภาพโฮโลแกรมด้วยวิธีโฮโลกราฟีคือ การบันทึกรูปแบบการแทรกสอดของลำแสง 2 ลำที่มีหน้าคลื่นสอดคล้องกัน ซึ่งภาพที่ถูกสร้างขึ้นมาจากการบันทึกแสงเลเซอร์ โดยจะบันทึกริ้วรอยของการแทรกสอด (Interference Pattern) ของแสงเลเซอร์ ทำให้เราสามารถมองเห็นภาพที่แตกต่างจากภาพทั่วไป ซึ่งไม่มีความลึกทางมิติของภาพ โดยภาพที่ได้จะเป็นภาพแบน ๆ เรียบ ๆ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกันจะพบว่าภาพที่มาจากกรบันทึกโดยเทคนิคโฮโลกราฟีนั้นจะดูสวยงามมากขึ้นและยังมีประโยชน์ในด้านอื่นๆ อีกด้วย และการนำเทคนิคนี้ไปใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ การหาค่าดัชนีหักเห การหาค่าความหนาของวัตถุ นอกจากนี้เทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟี ยังสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเซลล์ในทางชีววิทยาได้อีกด้วย

สำหรับในงานวิจัยผู้วิจัยใช้สี 4 ชนิด ได้แก่ สีอะคลิก สีไม้ สีซอล์ก และสีเทียนที่ใช้ในงานศิลปะ โดยทั่วไป โดยในการวิเคราะห์จะใช้หลักการเปรียบเทียบภาพโฮโลแกรมที่ถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์ (In-lined Digital Holography) ซึ่งภาพโฮโลแกรมถูกสร้างขึ้นใหม่ (Reconstruction) ผ่านโปรแกรม Matlab และสามารถบันทึกทั้งเฟส และความเข้มของแสง ทำให้เราสามารถศึกษาความละเอียดของเนื้อสีได้ โดยสีแต่ละชนิดถูกระบายลงบนกระดาษ 100 ปอนด์ 2 ชนิด คือ ชนิดเรียบ และชนิดหยาบ เพื่อนำมาวิเคราะห์ว่าลักษณะของเนื้อสีแต่ละชนิดแตกต่างกันอย่างไร และสีแต่ละประเภทมีความเรียบ ความหยาบต่างกันมากน้อยแค่ไหน ตลอดจนเราสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยไปใช้ในการประยุกต์กับงานวิจัย หรือการศึกษางานทางด้านอื่น ๆ ได้ในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการจัดระบบทางแสงด้วยวิธีดิจิทัลโฮโลกราฟีและหลักการสร้างภาพโฮโลแกรมด้วยระบบทางแสงแบบอินไลน์
- 2) ศึกษาการวิเคราะห์ภาพถ่ายโฮโลแกรมของสีแต่ละชนิดที่ได้จากการจัดระบบทางแสงแบบดิจิทัลโฮโลกราฟีด้วยวิธีการสร้างภาพขึ้นใหม่ด้วยวิธี Reconstruction ผ่านโปรแกรม Matlab
- 3) เพื่อศึกษาลักษณะของสี 4 ชนิด ได้แก่ สีอะคลิก สีไม้ สีซอล์ก และสีเทียน ที่ถูกระบายลงบนกระดาษและถ่ายภาพโฮโลแกรมของสีแต่ละชนิด
- 4) เพื่อศึกษาการจัดเรียงตัวของเนื้อสีแต่ละชนิดที่ถูกระบายลงบนกระดาษ 100 ปอนด์สีขาว และสีดำทั้งแบบเรียบและแบบหยาบ เพื่อนำมาเปรียบเทียบความเหมือน ความแตกต่าง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) จัดระบบแสงด้วยวิธีดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์ (In-Lined Digital Holography)
- 2) ศึกษาภาพโฮโลแกรมของภาพถ่ายของการจัดเรียงตัวของเนื้อสี 4 ชนิด ได้แก่ สีอะคลิก สีไม้ สีซอล์ก และสีเทียน ที่ถูกระบายลงบนกระดาษ 100 ปอนด์
- 3) ศึกษาการ Reconstruction ภาพด้วยกระบวนการประมวลผลด้วยโปรแกรม Matlab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจหลักการทำงานของระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์
- 2) ได้รู้ถึงลักษณะของสีแต่ละประเภทที่ถูกระบายบนภาพวาด
- 3) สามารถประยุกต์ใช้ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีในการวิเคราะห์งานด้านอื่น ๆ ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทัศนวิสัยและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การที่มนุษย์มองเห็นสีต่างๆ ได้ เกิดจากการรับรู้ผ่านทางดวงตาที่สามารถทำให้รับรู้ถึงแสงที่เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่แผ่รังสีออกมาในรูปของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) โดยที่ตาของมนุษย์สามารถมองเห็นแสงในช่วงความยาวคลื่นที่อยู่ระหว่าง 390-700 นาโนเมตร และแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet light) เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นคือ ต่ำกว่า 390 นาโนเมตร ซึ่งตาของมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ และแสงอินฟราเรดเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นยาวคือ สูงกว่า 700 นาโนเมตร ซึ่งตาของมนุษย์ก็ไม่สามารถมองเห็นได้เช่นกัน การที่เราสามารถมองเห็นแสงเป็นสีต่างๆ ได้นั้น เกิดจากการที่วัตถุดูดกลืนช่วงความยาวคลื่นของสีนั้นไว้และสะท้อนสีตรงข้ามเข้ามาที่ตาของเราให้มองเห็น อาทิเช่นพืชมีรงควัตถุสีเขียวที่เรียกว่า คลอโรฟิลล์ สามารถดูดกลืนแสงสีแดงได้ดีที่สุดและสะท้อนแสงสีเขียวออกมา การที่มนุษย์มองเห็นใบไม้เป็นสีเขียวได้ต้องอยู่ในที่สว่างเท่านั้นเพราะถ้าบริเวณที่ไม่มีแสงสว่างก็จะทำให้มองเห็นใบไม้เป็นสีดำเท่านั้น ในการสร้างสรรค์เกี่ยวกับสีตาของมนุษย์พบว่ามีความเกี่ยวข้องในการแก้ไขโดยใช้ระบบแสงหรือที่เรียกว่า สีฟิลิกส์ ซึ่งเกิดจากการทดลองของเซอร์ไอแซค นิวตัน ในปี ค.ศ. 1660 โดยทำการทดลองที่ใช้แสงจากดวงอาทิตย์ส่องผ่านช่องและผ่านแท่งแก้วสามเหลี่ยมหรือปริซึมซึ่งเป็นตัวกลางโปร่งใส เมื่อแสงตกกระทบและผ่านเข้าไปที่ตัวกลางโปร่งใสแสงที่ทะลุผ่านออกมาจะเกิดเป็นสีรุ้ง

แสง คือการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นที่ตาของมนุษย์มองเห็น หรือบางครั้งอาจรวมถึงการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดและรังสีอัลตราไวโอเล็ตซึ่งตาของมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ สมบัติพื้นฐานของแสงที่แผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าทุกช่วงความยาวคลื่นได้แก่ ความเข้มแสงหรือที่เรียกกันว่าแอมพลิจูด ซึ่งจะปรากฏให้เห็นในรูปของความสว่างของแสง ความถี่หรือความยาวคลื่นจะปรากฏให้เห็นในรูปของสีต่างๆ ของแสง และการโพลาไรเซชันหรือมุมการสั่นของคลื่นโดยปกติแล้วสายตาของมนุษย์จะไม่สามารถมองเห็นและรับรู้ได้ แสงจะแสดงคุณสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาคกล่าวคือ เมื่อแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยที่ระนาบการสั่นของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับระนาบการสั่นของสนามไฟฟ้า และจะตั้งฉากกับทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นโดยที่แสงมีคุณสมบัติของการเลี้ยวเบน และเมื่อแสงเป็นอนุภาคโดยที่แสงเป็นพลังงานที่มีค่าพลังงาน  $E=hf$  โดยที่  $h$  คือค่าคงที่ของพลังค์ และ  $f$  คือค่าความถี่ของแสง จึงเรียกอนุภาคของแสงว่าโฟตอน แสงเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่เดินทางในรูปของคลื่นด้วยอัตราเร็วสูง 300,000 กิโลเมตรต่อวินาที ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงมีทั้งแหล่งกำเนิดแสงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ได้แก่ แสงจากดวงอาทิตย์ที่เป็นแหล่งพลังงานของสิ่งมีชีวิต และแหล่งกำเนิดแสงที่มนุษย์สร้างขึ้น ได้แก่ แสงสว่างจากหลอดไฟ เป็นต้น เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มควินหรือฝุ่นละอองจะสามารถมองเห็นลำแสงเป็นเส้นตรง และสามารถทะลุผ่านวัตถุได้วัตถุที่ยอมให้แสงเคลื่อนที่ผ่านเป็นเส้นตรงได้นั้นเรียกวัตถุนิวาวัตถุโปร่งใส เช่น แก้ว น้ำ อากาศ เป็นต้น ถ้าแสงเคลื่อนที่ผ่านวัตถุบางชนิดแล้วเกิดการกระจายของแสงออกไปรอบๆ ทำให้แสงเคลื่อนที่ไม่เป็นเส้นตรงจะเรียกว่า วัตถุโปร่งแสง เช่น กระจกฝ้า กระจาดาชไข พลาสติกฝ้า เป็นต้น ส่วนวัตถุที่ไม่ยอมให้แสงเคลื่อนที่ผ่านได้นั้นเรียกว่า วัตถุทึบแสง เช่น ผงคองกรีต กระจาดาชแข็งหนา เป็นต้น

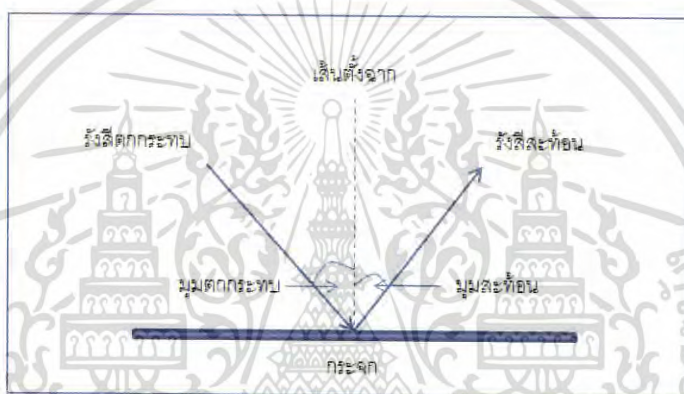
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1 สมบัติของคลื่นแสง

ทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับแสงในกระบวนการถ่ายภาพโดยใช้เทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟี ที่เกิดจากการแพร่ของสนามทางแสงจากระนาบของวัตถุไปยังระนาบของโฮโลแกรม และสร้างภาพขึ้นมาใหม่โดยจะใช้หลักการทางคลื่นแสงมาอธิบายในทฤษฎีนี้

### 2.1.1 การสะท้อนของแสง (Reflection)

เป็นปรากฏการณ์ที่แสงเดินทางจากแหล่งกำเนิดมาตกกระทบบัวกลางที่มีความหนาแน่นค่าหนึ่งมายังตัวกลางที่มีความหนาแน่นอีกค่าหนึ่ง จะทำให้แสงที่ตกกระทบบัวกับตัวกลางใหม่ สะท้อนกลับสู่ตัวกลางเดิม เช่น การสะท้อนของแสงจากอากาศกับผิวหน้าของกระจกเงาจะเกิดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าของกระจกเงาราบแล้วจะกลับสู่อากาศดังเดิม เมื่อแสงตกกระทบบัวที่พื้นผิวของตัวกลางใดๆ โดยที่ปริมาณและทิศทางของการสะท้อนของแสงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพื้นผิวของตัวกลางที่แสงตกกระทบบัว



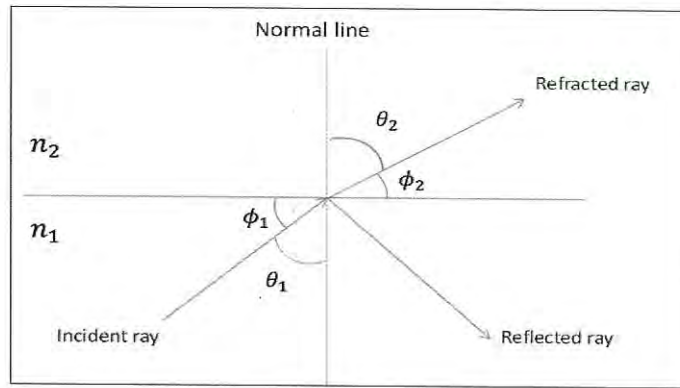
รูปที่ 2.1 การสะท้อนของแสงบนผิวกระจกเรียบ

จากรูปที่ 2.1 เมื่อลำแสงตกกระทบบัวพื้นผิวหน้าวัตถุที่มีความเรียบ แสงสะท้อนที่ออกมาจากบริเวณที่ตกกระทบบัวนั้นจะเป็นลำแสงขนานเหมือนกันกับลำแสงที่ตกกระทบบัว การสะท้อนบนพื้นผิวเรียบนั้นเรียกว่า การสะท้อนแบบสมำเสมอ การสะท้อนของลำแสงทำให้เกิดมุมตกกระทบบัวคือมุมที่แสงตกกระทบบัวทำมุมกับเส้นตั้งฉากหรือเส้นปกติและกระจก และมุมสะท้อนคือมุมที่แสงสะท้อนทำมุมกับเส้นตั้งฉากและกระจก จากกฎของการสะท้อนกล่าวว่าเมื่อเกิดการสะท้อนแสงทุกครั้งมุมตกกระทบบัวจะเท่ากับมุมสะท้อนเสมอ แต่พื้นผิวที่ขรุขระเมื่อแสงตกกระทบบัวจะทำให้แสงสะท้อนกลับไปคนละทิศทาง โดยที่แสงตกกระทบบัวคือลำแสงที่พุ่งเข้าหาวัตถุ ส่วนลำแสงสะท้อนคือลำแสงที่พุ่งออกจากวัตถุ

### 2.1.2 การหักเหของแสง (Refraction)

การหักเหของแสงเกิดจากการที่แสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน เป็นผลทำให้ทิศทางของแสงเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งในขณะที่แสงเกิดการหักเหก็จะเกิดการสะท้อนของแสงขึ้นพร้อมๆ กันด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การหักเหของแสงเมื่อผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน

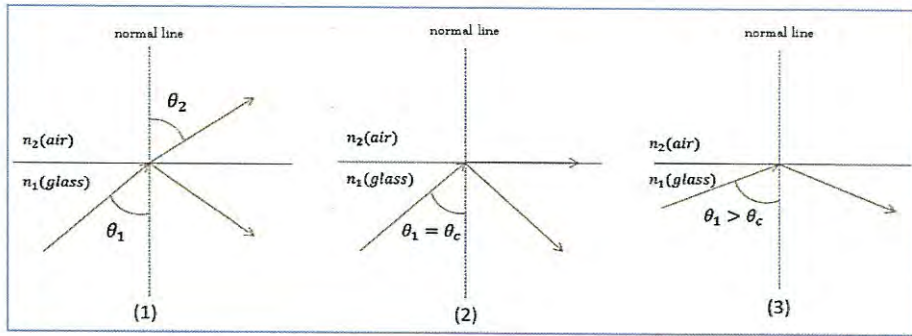
จากรูปที่ 2.2 เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่ 1 มีค่าดัชนีหักเห  $n_1$  ไปยังตัวกลางที่ 2 มีค่าดัชนีหักเห  $n_2$  จะเห็นได้ว่ารังสีของแสงที่เข้าไปในตัวกลางที่ 2 มีแนวทางเปลี่ยนไปจากแนวรังสีตกกระทบเดิม แสงจะเกิดการหักเห โดยถ้าให้  $\theta_1$  คือมุมที่รังสีตกกระทบทำกับเส้นปกติ และ  $\theta_2$  คือมุมที่รังสีหักเหทำกับเส้นปกติ เรียกว่ามุมหักเห (Angle of refraction) จากกฎของสเนลล์จะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบ ( $\theta_1$ ) และมุมหักเห ( $\theta_2$ ) และค่าดัชนีหักเหในตัวกลางทั้งสอง  $n_1$  และ  $n_2$  ดังสมการด้านล่าง

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.1)$$

### 2.1.3 การสะท้อนกลับหมดของแสง (Total Reflection of Light)

เมื่อแสงที่เดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหมาก ( $n_1$ ) ไปสู่อีกตัวกลางหนึ่งที่มีค่าดัชนีหักเหน้อย ( $n_2$ ) ถ้าให้แสงตกกระทบทำมุมกับเส้นปกติจะทำให้เกิดมุมหักเหของแสงเบนออกจากเส้นปกติ (ดังรูปที่ 2.3 (1)) แต่ถ้าให้แสงตกกระทบจนทำให้มุมหักเหมีค่าเท่ากับ มุมตกกระทบนี้จะเรียกว่า มุมวิกฤต (Critical Angle,  $\theta_c$ ) (ดังรูปที่ 2.3 (2)) และถ้ามุมตกกระทบโตกว่ามุมวิกฤต จะเกิดการสะท้อนเพียงอย่างเดียวเราเรียกว่า การสะท้อนกลับหมด (Total internal reflection) (ดังรูปที่ 2.3 (3)) โดยการหาค่ามุมวิกฤตสามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง

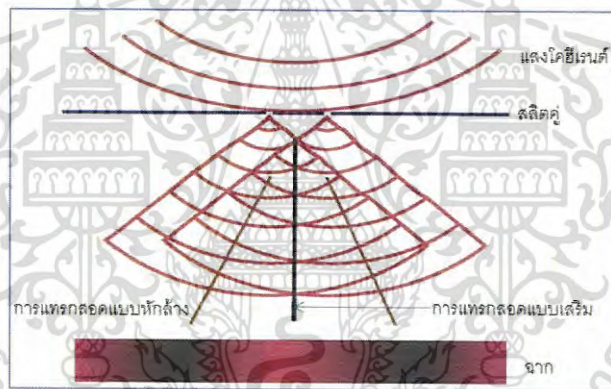
$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบการเดินทางของแสงผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกันและมุมตกกระทบของแสงต่างกัน ( $\theta_1$ )

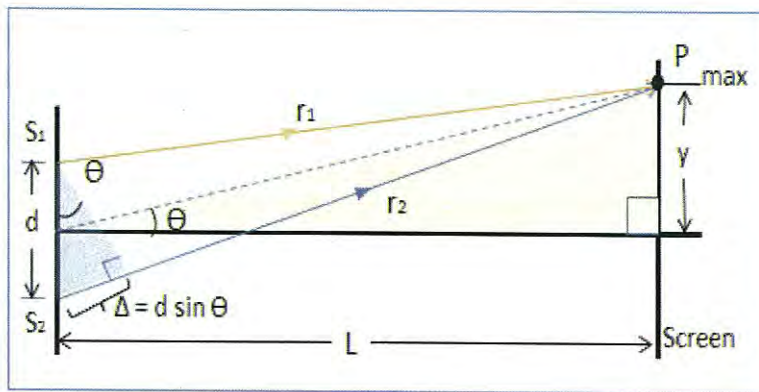
#### 2.1.4 การแทรกสอดของแสง (Interference)

การแทรกสอดเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อคลื่นแสง 2 ขบวนเคลื่อนที่มาพบกัน จะเกิดการรวมตัวกัน และแทรกสอดกันเกิดเป็นแถบมืดและแถบสว่างขึ้นบนฉาก ที่เรียกว่า ริ้วการแทรกสอด (Interference fringes)



รูปที่ 2.4 แสดงการแทรกสอดของคลื่นแสงผ่านช่องสลิต 2 ช่องที่มีขนาดเท่ากัน

การแทรกสอดของคลื่นจะเกิดขึ้นได้เมื่อคลื่นที่รวมกันจะต้องมีความยาวคลื่นเท่ากัน และการแทรกสอดจะดำรงอยู่ได้อย่างเท่ากันนั้น คลื่นที่รวมกันจะต้องมีความสัมพันธ์กันทางเฟสคงที่ คลื่นที่มีความสัมพันธ์กันทางเฟสคงที่นี้ เรียกว่า โคฮีเรนต์ (Coherence) ถ้าคลื่นจากสองแหล่งไม่มีเฟสที่สัมพันธ์กัน เรียกว่า อินโคฮีเรนต์ (Incoherence)



รูปที่ 2.5 แสดงไดอะแกรมการคำนวณหาสมการการเกิดการแทรกสอดของแสงเพื่อคำนวณหาค่าความยาวคลื่นของแสง

จากรูป 2.5 ถ้าให้ช่องแคบ  $S_1$  และ  $S_2$  เป็นแหล่งกำเนิดแสงห่างกันเป็นระยะ  $d$  เมื่อแสงเดินทางจากช่องแคบมาถึงฉากด้วยระยะทางที่ต่างกัน และแสงมาพบกันบนจุดเดียวกันที่จุด  $P$  ซึ่งจะได้ผลต่าง  $S_1P$  กับ  $S_2P$  ดังสมการ (2.3)

$$S_2P - S_1P = \Delta = d \sin \theta \quad (2.3)$$

เนื่องจากมุม  $\theta$  เป็นมุมที่มีค่าน้อยๆ จะได้

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{L} \quad (2.4)$$

การแทรกสอดแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. การแทรกสอดแบบเสริมกัน บริเวณที่เป็นแถบสว่างที่เกิดขึ้นจะได้

$$\Delta = d \sin \theta = d \frac{y}{L} = m\lambda \quad (2.5)$$

โดยที่  $m$  คือลำดับของแถบสว่างซึ่ง  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$  ถ้า  $m = 0$  แสดงว่าเป็นแถบสว่างกลาง และถ้า  $m = 1$ ,  $\Delta = \lambda$  แสดงว่าเป็นแถบสว่างลำดับที่ 1 ซึ่งอยู่ถัดออกไป 2 ข้างของแถบมืดที่ 1

2. การแทรกสอดแบบหักล้างกัน บริเวณที่เป็นแถบมืดที่เกิดขึ้นจะได้

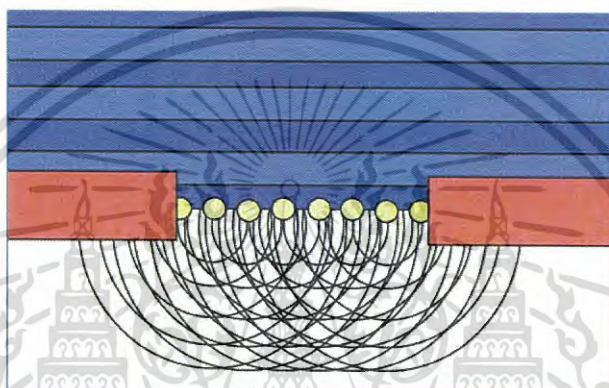
$$\Delta = d \sin \theta = d \frac{y}{L} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $m$  คือลำดับที่ของแถบมืดซึ่ง  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$  ถ้า  $m = 0$ ,  $\Delta = \frac{\lambda}{2}$  แสดงว่าเป็นแถบมืดที่ 1 ซึ่งอยู่ถัดออกไป 2 ข้างของแถบสว่างกลาง และถ้า  $m = 1$ ,  $\Delta = \frac{3\lambda}{2}$  แสดงว่าเป็นแถบมืดลำดับที่ 2 ซึ่งอยู่ถัดออกไป 2 ข้างของแถบสว่างที่ 1 เป็นต้น

### 2.1.5 การเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction of wave)

การที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านขอบหรือช่องเล็กๆ ก็จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นผ่านขอบหรือช่องนั้นได้โดยใช้หลักของฮอยเกนส์ ซึ่งกล่าวไว้ว่า ทุก ๆ จุดบนหน้าคลื่นอาจถือได้ว่าเป็นจุดกำเนิดคลื่นใหม่ที่ให้คลื่นความยาวคลื่นเดิมและเฟสเดียวกัน



รูปที่ 2.6 การเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นแสงผ่านช่องว่างเล็กๆ ๆ ที่มีขนาดเท่ากัน



รูปที่ 2.7 การเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นแสงเมื่อผ่านช่องขนาดต่างกัน (1) ขนาดของช่องมีค่ามากกว่าค่าความยาวคลื่นแสง (2) ขนาดของช่องมีค่าเท่า ๆ กันกับค่าความยาวคลื่นแสง (3) ขนาดของช่องมีค่าน้อยกว่าค่าความยาวคลื่นแสง

## 2.2 โฮโลแกรม (Hologram)

โฮโลแกรมคือภาพที่มีลักษณะเป็นสามมิติที่ถูกสร้างด้วยกระบวนการที่เรียกว่า โฮโลกราฟี (Holography) โดยโฮโลกราฟี เป็นเทคนิคที่ช่วยให้แสงกระจายจากวัตถุที่จะบันทึกและได้ถูกสร้างขึ้นใหม่ต่อมา เพื่อให้ปรากฏเป็นวัตถุอยู่ในตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับการบันทึก ซึ่งความแตกต่างของภาพ

โฮโลแกรมที่มีลักษณะเป็นสามมิติกับภาพฉายธรรมดาในลักษณะสองมิติ เกิดจากการที่ภาพถ่ายเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าดีเกินไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธรรมดาในลักษณะสองมิตินั้นจะมีการบันทึกแค่ ค่าความเข้มของแสง (intensity) และค่าของสี (wavelength) แต่ในโฮโลแกรมนั้นนอกจากการบันทึกค่าความเข้มแสงและค่าของสีแล้วยังมีการบันทึกตำแหน่งของเฟส (phase) อีกด้วย และค่าของเฟสนี้แหละที่เป็นตัวที่ทำให้ภาพโฮโลแกรมมีลักษณะเป็นสามมิติต่างจากภาพถ่ายธรรมดา

### 2.2.1 ประวัติการค้นพบโฮโลแกรม

โฮโลแกรมถูกค้นพบโดยเดนนิส กาบอร์ (Dennis Gabor, 1900-1979) วิศวกรไฟฟ้าชาวฮังการี ในวันอีสเตอร์ ปี ค.ศ. 1947 โดยกาบอร์ได้ค้นพบหลักการของโฮโลกราฟีโดยบังเอิญ ในระหว่างที่ทำการพัฒนาปรับปรุงคุณภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่บริษัท British Thomson-Houston ที่เมือง Rugby ประเทศอังกฤษ จากการค้นพบในครั้งนี้ทำให้กาบอร์ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ในปี ค.ศ. 1971 เทคนิคที่คิดค้นเดิมยังใช้อยู่ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่เป็นที่ยุติกันในเรื่องภาพสามมิติอิเล็กตรอน แต่ภาพสามมิติเป็นเทคนิคแสงซึ่งไม่ได้มีการพัฒนาอย่างจริงจัง จนกระทั่งมีการพัฒนาของเลเซอร์ในปี 1960 โฮโลแกรมแสงที่ใช้ได้จริงชิ้นแรกนั้นบันทึกอยู่ในรูปของวัตถุ 3D ซึ่งถูกสร้างขึ้นในปี 1962 โดย Yuri Denisyuk ในสหภาพโซเวียต และโดย Emmett Leith และ Juris Upatnieks ที่ University of Michigan ประเทศ USA ความก้าวหน้าในเทคนิคการประมวลผลโฟโตเคมีคัลเป็นการผลิต เพื่อแสดงภาพโฮโลแกรมที่มีคุณภาพสูง ซึ่งทำได้สำเร็จโดย Nicholas J. Phillips

ปัจจุบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนั้นมีการพัฒนาไปเป็นอย่างมาก ทำให้มีการพัฒนาโฮโลแกรมอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน ซึ่งเราสามารถพบเห็นโฮโลแกรมได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน ดังเช่น แถบสีโฮโลแกรมบน ธนบัตร หรือ บัตรเครดิต ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านความปลอดภัย และในการบรรจุสินค้า เป็นต้น

### 2.2.2 ประเภทของโฮโลแกรม

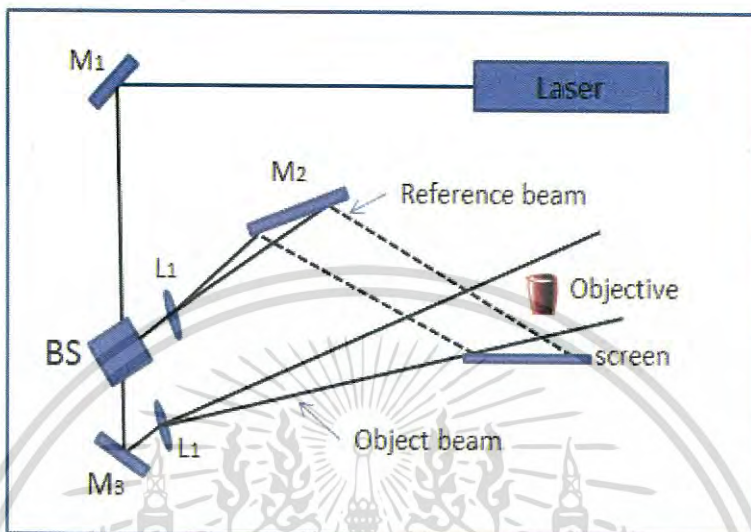
โฮโลแกรมสามารถแบ่งได้เป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท คือ White-light hologram ซึ่งภาพโฮโลแกรมที่บันทึกนั้น สามารถมองเห็นได้ด้วยการส่องสว่างด้วยแสงสว่างจากธรรมชาติและอีกประเภทหนึ่งคือ ภาพโฮโลแกรมที่ต้องถูกส่องสว่างด้วยแสงเลเซอร์หรือแสงที่มีสภาพหน้าคลื่นสอดคล้องกันในระดับหนึ่ง ถึงจะมองเห็นภาพ 3 มิติได้ นอกจากนี้ยังโฮโลแกรมอาจแบ่งออกได้เป็น Transmission hologram Reflection hologram และ Image-plane hologram เป็นต้น

### 2.2.3 วิธีการทำงานของโฮโลกราฟีและโฮโลแกรม

ภาพโฮโลแกรมจะใช้หลักการโฮโลกราฟีในการสร้างภาพ โดยให้มีการแทรกสอดของแสงที่มากกระทบรูปภาพโดยการฉายแสงเลเซอร์จากแหล่งเดียวกัน และแยกออกเป็น 2 ลำแสง โดยให้ลำแสงหนึ่งเป็นลำแสงอ้างอิง (Reference beam) ยิงตรงไปที่แผ่นฟิล์มโดยไม่โดยวัตถุ และให้อีกลำแสงหนึ่งยิงไปที่วัตถุ (Object beam) และเกิดลำแสงสะท้อนออกมาจากวัตถุแล้วตรงไปยังแผ่นฟิล์ม และแสงทั้งสองลำจะถูกบันทึกไว้บนฟิล์มในรูปแบบของการแทรกสอด (Interference Pattern) ก่อให้เกิดภาพเสมือน (Virtual image) ขึ้นมาตามมุมของแสงที่มากกระทบ ทำให้ตาของเรารับแสงอีกด้านหนึ่งของแผ่น Hologram เกิดเห็นภาพ 3 มิติขึ้น การสร้างโฮโลแกรมแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

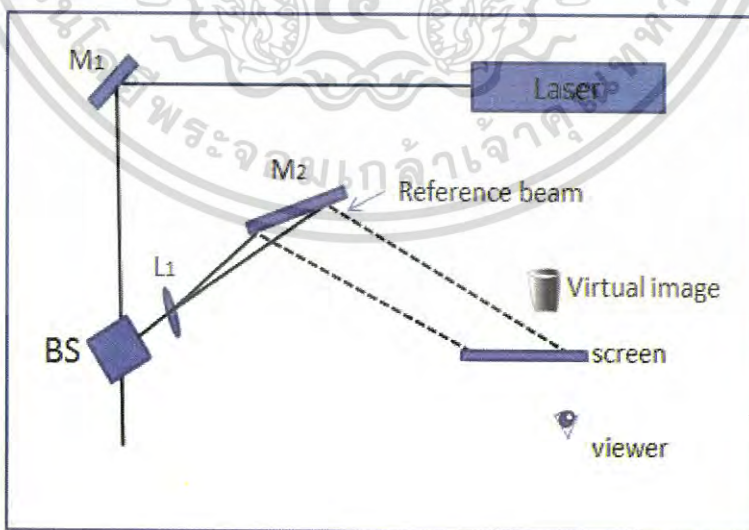
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 1 การบันทึกภาพ (Recording of image) เป็นการบันทึกแถบการสอดแทรกเชิงซ้อน (Complex interference patterns) ซึ่งเกิดจาก Reference beam และ Object beam 2 ลำแสงซ้อนทับกันอยู่ (Superposition) แถบการสอดแทรกเชิงซ้อนนี้จะถูกบันทึกไว้บนฟิล์มถ่ายรูป (Photographicfilm) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการสร้างภาพโฮโลแกรม

ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์ภาพโฮโลแกรม (Reconstruction of image) เป็นการสร้างภาพ 3 มิติขึ้นจากแผ่นฟิล์ม การอ่านภาพโฮโลแกรมจะใช้หลักการเดียวกันกับการสร้างภาพโฮโลแกรม โดยต้องใช้แสงที่มีค่าความยาวदैวกันกับที่ได้ทำการบันทึก และมุมมองที่บันทึกเพื่ออ่านภาพที่บันทึกมา ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงกระบวนการอ่านภาพโฮโลแกรม

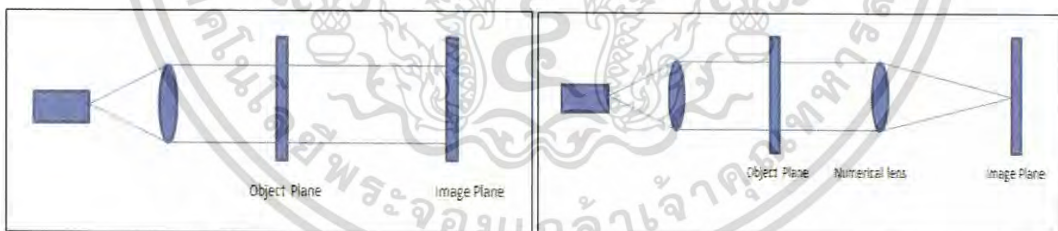
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ดิจิตอลโฮโลกราฟี (Digital holography)

Digital Holography คือเทคโนโลยีที่ได้ทำการพัฒนามาจากโฮโลกราฟี จากการที่ทำการถ่ายภาพแล้วบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มเพื่อที่จะได้ภาพเป็นสามมิติ แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยีได้ก้าวหน้ามากขึ้นและคอมพิวเตอร์ก็เข้ามามีบทบาทในการใช้ชีวิตประจำวันมากขึ้น จึงได้เกิดความคิดที่จะทำการบันทึกข้อมูลรูปภาพโดยใช้เซนเซอร์ในอิเล็กทรอนิกส์ เช่น CCD CMOS หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติในการรับสัญญาณได้คล้ายคลึงกันมาใช้ แทนที่จากเดิมที่จะต้องทำการบันทึกบนแผ่นฟิล์มถ่ายภาพ เป็นการบันทึกด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โฮโลแกรมแบบดิจิตอลจะถูกนำมาเก็บข้อมูลไว้ในไฟล์ดิจิตอล ซึ่งสามารถเปิดได้โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดิจิตอลหรือคอมพิวเตอร์ โดยข้อดีสำหรับการบันทึกภาพแบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การบันทึกดิจิตอลโฮโลแกรมสามารถเก็บข้อมูลไว้นานเพราะสามารถเก็บไว้ในตัวเก็บข้อมูลดิจิตอลได้ เช่น ฮาร์ดดิสก์ แฟลชไดร์ และอีกมากมายรูปภาพดิจิตอลนั้นสามารถนำไปทำซ้ำแล้วบันทึกภาพไว้ใช้ได้ และเวลาที่มีเครื่องรับข้อมูลดิจิตอลหรือการบันทึกภาพแบบดิจิตอลจะใช้เซนเซอร์บันทึกภาพเท่านั้นทำให้ลดค่าใช้จ่ายจากการใช้ผ่านฟิล์มที่มีราคาแพงในการบันทึกภาพ

### 2.3.1 หลักการทำงานของดิจิตอลโฮโลกราฟี

การบันทึกดิจิตอลโฮโลแกรม โดยคลื่นอ้างอิงและคลื่นที่สะท้อนมาจากวัตถุ จะเกิดการแทรกสอดกันที่ระนาบของหน้าตัวเซนเซอร์ Charged Couple Device (CCD) ผลของโฮโลแกรมที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกและเก็บไว้ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ วัตถุคือรูปสามมิติทั่วไปที่มีพื้นผิวที่สะท้อนให้เห็นกระจายอยู่ที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ จาก CCD ภาพจะแสดงอยู่ในระนาบที่บันทึกในรูปแบบที่ไม่ชัดเจนเหมือนไม่ได้โฟกัสภาพ เนื่องจากการเลี้ยวเบนไปตามระยะทางที่แพร่ไปดังรูปที่ (2.10) แต่เมื่อใส่ Numerical lens แทนที่ภาพที่บันทึกบนระนาบภาพจะเกิดการโฟกัสขึ้นดังรูปที่ (2.11)



(ก) แบบไม่มี Numerical lens

(ข) แบบมี Numerical lens

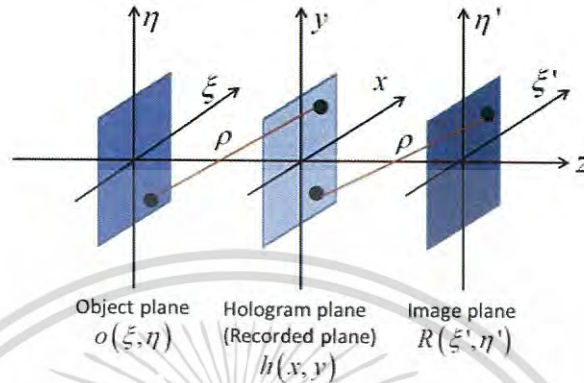
รูปที่ 2.10 แสดงไดอะแกรมวิธีการดิจิตอลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์ 2 แบบ (ก) แบบไม่มี Numerical lens (ข) แบบมี Numerical lens

### 2.3.2 หลักการอ่านภาพ (Reconstruction) ของโฮโลแกรมโดยวิธี Angular spectrum

หลักการอ่านภาพ หรือวิธีการสร้างภาพใหม่ (Reconstruction) เป็นวิธีการที่ใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เข้ามาอธิบายสนามทางแสงของระนาบการแพร่ของแสง รวมทั้งยังใช้ในการสร้างภาพขึ้นใหม่ในดิจิตอลโฮโลกราฟี หลักการอ่านภาพ หรือวิธีการสร้างภาพใหม่ ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมได้แก่ วิธี Huygens convolution และวิธี Angular Spectrum โดยทั้งสองวิธีนั้นจะใช้หลักการ Fourier transform และ Inverse Fourier transform เพื่อสร้างภาพดิจิตอลโฮโลแกรม แต่สำหรับวิธีการ Angular Spectrum จะมีข้อดีกว่าในระยะทางของการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่สามารถสร้างภาพขึ้นใหม่ได้อย่างถูกต้องในระยะทางที่วัตถุอยู่ใกล้ๆ เมื่อเทียบกับวิธีการของ Huygens convolution โดยระบบการทำงานสำหรับการสร้างภาพใหม่ (Coordinating systems for numerical reconstruction) แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 เมื่อ  $z$  คือแนวเส้นทางการเคลื่อนที่ของแสง และ  $\rho$  คือระยะจากจุดใด ๆ บนระนาบหนึ่งไปยังระนาบถัดไป



รูปที่ 2.11 ระบบการทำงานสำหรับการสร้างภาพใหม่ (Coordinating systems for numerical reconstruction)

สำหรับการสร้างภาพดิจิทัลโฮโลแกรมด้วยวิธีการ Angular Spectrum หรือ ASM มีหลักการดังต่อไปนี้ สมมติว่าให้  $z = 0$  ที่ระนาบของสนามวัตถุ  $O(\xi, \eta)$  ดังรูปที่ 2.11 และ ใช้ Fourier transform แบบ 2 มิติ จะได้ว่า

$$O'(f_\xi, f_\eta; 0) = F\{O(\xi, \eta, 0)\} \quad (2.7)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta, 0) \exp[-j2\pi(f_\xi \xi + f_\eta \eta)] d\xi d\eta \quad (2.8)$$

และสามารถเขียน Inverse Fourier transform ของ angular spectrum ได้เป็น

$$O(f_\xi, f_\eta; 0) = F^{-1}\{O'(f_\xi, f_\eta, 0)\} \quad (2.9)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O'(f_\xi, f_\eta, 0) \exp[-j2\pi(f_\xi \xi + f_\eta \eta)] df_\xi df_\eta \quad (2.10)$$

โดยที่  $f_\xi$  และ  $f_\eta$  เป็นส่วนประกอบของความถี่เชิงพื้นที่ (Spatial frequency) โดยพิจารณาที่ทิศของระนาบคลื่นที่แพร่ไปด้วยทิศแบบโคไซน์ (Cosines) และส่วนประกอบของความถี่เชิงพื้นที่สามารถแสดงได้โดยสมการที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \lambda f_\xi \beta = \lambda f_\eta \gamma = \sqrt{1 - (\lambda f_\xi)^2 - (\lambda f_\eta)^2} \quad (2.11)$$

ดังนั้น จากสมการที่ 2.10 จะได้

$$O'\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right) = \iint_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta, 0) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}\xi + \frac{\beta}{\lambda}\eta\right)\right] d\xi d\eta \quad (2.12)$$

หลังจากที่แพร่ไประยะทาง z จะทำให้ angular spectrum ของสนามวัตถุได้เป็น

$$O'\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; z\right) = \iint_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta, 0) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}\xi + \frac{\beta}{\lambda}\eta\right)\right] \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z\right) d\xi d\eta \quad (2.13)$$

$$= F\left\{O(\xi, \eta, 0) \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z\right)\right\} \quad (2.14)$$

และสามารถเขียน Inverse Fourier transform ได้เป็น

$$O(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} O'\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0\right) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}\xi + \frac{\beta}{\lambda}\eta\right)\right] \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z\right) d\frac{\alpha}{\lambda} d\frac{\beta}{\lambda} \quad (2.15)$$

$$= F^{-1}\left\{O'\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right) \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z\right)\right\} \quad (2.16)$$

เนื่องจากการแพร่ของคลื่นจากระนาบวัตถุ  $O(\xi, \eta)$  ไปยังระนาบของโฮโลแกรม  $h(x, y)$  ด้วยระยะ z ดังนั้นสนามทางแสงบนระนาบโฮโลแกรมสามารถแสดงได้ดังนี้ ให้  $h(x, y, z) = O(x, y, z)$

$$= \iint_{-\infty}^{\infty} O'\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0\right) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}\xi + \frac{\beta}{\lambda}\eta\right)\right] \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z\right) d\frac{\alpha}{\lambda} d\frac{\beta}{\lambda} \quad (2.17)$$

$$= F^{-1}\left\{O'\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0\right) \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z\right)\right\} \quad (2.18)$$

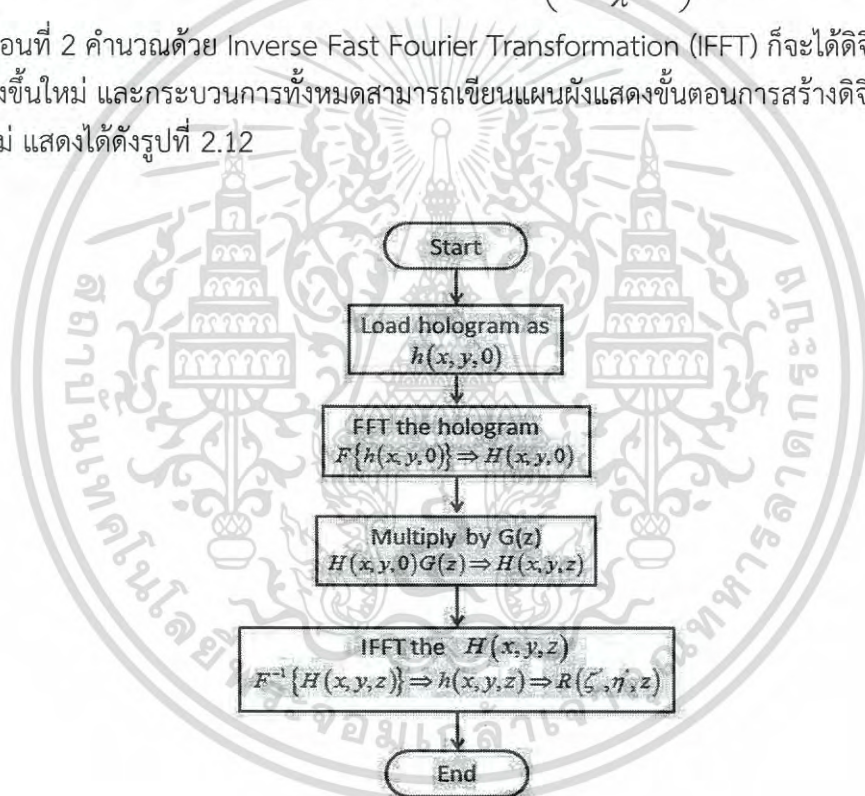
$$= F^{-1}\left\{F\{O(x, y, 0)\} \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\gamma z\right)\right\} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกันสนามของแสงบนระนาบของการสร้างภาพชั้นใหม่  $R(\xi', \eta')$  สามารถเขียนได้ในรูป Inverse Fourier transform จากสนามของโฮโลแกรม

$$R(\xi', \eta', z) = F^{-1} \left\{ F \{ h(x, y, 0) \} \exp \left( -j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z \right) \right\} \quad (2.20)$$

การสร้างภาพดิจิทัลโฮโลแกรมด้วยวิธีการ Angular Spectrum โดยอาศัยหลักการ Fourier transform และ Inverse Fourier transform ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปเป็นกระบวนการที่สำคัญได้ 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนที่แรกการคำนวณ Fast Fourier Transformation (FFT) ของโฮโลแกรม โดยที่ Fast Fourier Transformation เป็นฟังก์ชันหนึ่งในโปรแกรม Matlab ขั้นตอนที่ 2 ทำการคูณผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนแรกด้วย  $g(z) = \exp \left( -j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z \right)$  ขั้นตอนที่ 3 นำผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 คำนวณด้วย Inverse Fast Fourier Transformation (IFFT) ก็จะได้ดิจิทัลโฮโลแกรมที่สร้างชั้นใหม่ และกระบวนการทั้งหมดสามารถเขียนแผนผังแสดงขั้นตอนการสร้างดิจิทัลโฮโลแกรมชั้นใหม่ แสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนผังแสดงขั้นตอนการ Reconstruction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 อินไลน์ดิจิทัลโฮโลกราฟี (Digital in-line holography)

ในการบันทึกภาพด้วยเทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟีนั้นมุมที่ใช้ในการบันทึกภาพคือ 0 องศา ซึ่งเรียกว่า เทคนิคอินไลน์ดิจิทัลโฮโลกราฟีแสดงรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการจัดระบบแสงแบบอินไลน์ดิจิทัลโฮโลกราฟี

และนอกจากนี้ยังมีอีกเทคนิคหนึ่งซึ่งเรียกว่า กาบอร์ ซึ่งเทคนิคนี้คือเกตเตอร์กาบอร์เป็นผู้คิดค้นเทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟีนี้เป็นคนแรกดังที่แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงการจัดระบบแบบกาบอร์ดิจิทัลโฮโลกราฟี

จากรูปที่ 2.14 กำหนดให้แสงเดินทางผ่านวัตถุและทำให้เกิดลำแสงขึ้น 2 ลำ คือ ลำแสงแรกเป็นลำแสงที่เกิดจากการเลี้ยวเบนผ่านวัตถุซึ่งเรียกว่า ลำแสงจากวัตถุ (Object wave) และส่วนลำแสงที่สองเป็นลำแสงที่ไม่เกิดการกระเจิงออกจากวัตถุซึ่งเรียกว่า ลำแสงอ้างอิง (Reference wave) โดยที่ลำแสงสองลำนี้แทรกสอดกันที่บริเวณด้านหน้าของเซ็นเซอร์รับแสงหรือกล้อง CCD

## 2.5 เลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอด รุ่น CPS635R มีลักษณะเป็นรังสีขนาน โดยทั่วไปแล้วมีความยาวคลื่นอยู่ที่ 635 นาโนเมตร และรังสีที่ปล่อยออกมาเป็นทรงกลมโดยที่รูปทรงของลำแสงที่ออกมานั้นถูกกำหนดด้วยรูรับแสงที่วางอยู่หน้าแหล่งกำเนิดของแสง ซึ่งรูรับแสงนี้เกิดจากการสร้างการรบกวนของสนามอิเล็กตรอนใกล้เคียงเพื่อให้เกิดการสะท้อนของลำแสงไปยังไดโอดเลเซอร์เมื่อเปรียบเทียบกับรูรับแสงทั่วไป

### 2.5.1 คุณสมบัติทั่วไปของเลเซอร์ไดโอดรุ่น CPS635R

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของเลเซอร์ไดโอดรุ่น CPS635R

General specifications	
Housing material	Aluminum
Housing dimensions	Ø11.0 mm × 58.0 mm
Beam dimensions	Round, Ø2.9 mm
Operating temperature	-10 to 50°C
Storage temperature	-30 to 70°C
Operating voltage	4.9 V to 5.2 V
Laser safety class	3R

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของเลเซอร์ไดโอด

Optical and electrical specification *			
	Minimum	Typical	Maximum
Wavelength	630 nm	635 nm	645 nm
Power	1.0 mW	1.2 mW	1.4 mW
Polarization extinction ratio	-	20 dB	-
Power stability (8 hours)	-	-	2%
Power stability (1 minute)	-	-	1%
Axis deviation **	-	-	5 mrad
Beam divergence	-	0.6 mrad	-
Operating current	-	50 mA	70 mA

หมายเหตุ : \* Case temperature = 25°C

\*\* Parallelism between the housing and output beam

## 2.6 สีคืออะไร

สีคือการรับรู้ความถี่หรือความยาวคลื่นของแสงในทำนองเดียวกันกับที่ระดับเสียง มนุษย์สามารถรับรู้สีได้เนื่องจากโครงสร้างอันละเอียดอ่อนของดวงตา ซึ่งมีความสามารถในการรับรู้แสงในช่วงความถี่ที่ต่างกัน การรับรู้สีนั้นขึ้นกับปัจจัยทางชีวภาพ เช่น คนบางคนตาบอดสี ซึ่งหมายถึงคนคนนั้นเห็นสีบางค่าต่างจากคนอื่นหรือไม่สามารถแยกแยะสีที่มีค่าความถี่ใกล้เคียงกันได้ หรือแม้กระทั่งไม่สามารถเห็นสีได้เลยมาแต่กำเนิด ความทรงจำระยะยาวของบุคคลผู้นั้น และผลกระทบระยะสั้น เช่น สีที่อยู่ข้างเคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข หรืออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

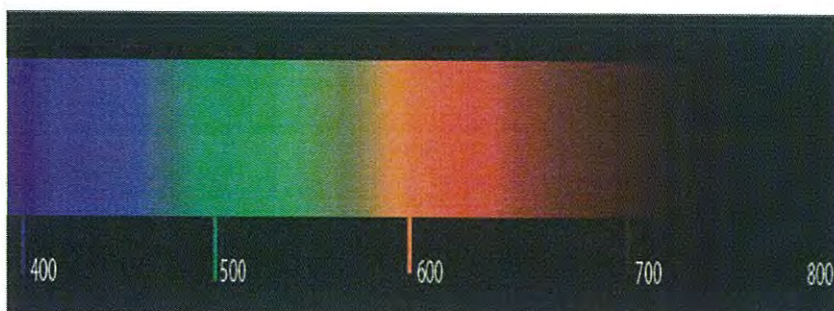
## 2.7 ฟิสิกส์ของสี

สีเป็นการรับรู้ทางดวงตาเมื่อมีแสงสีนั้นมากระทบ การอธิบายเรื่องสีสามารถอธิบายได้มากมาย ไม่ว่าจะเป็นทางด้านอารมณ์และความรู้สึก ซึ่งมีทั้งที่เป็นวิทยาศาสตร์และไม่ใช่วิทยาศาสตร์ ที่จะกล่าวถึงคือการอธิบายเรื่องราวที่เป็นทางวิทยาศาสตร์และเน้นไปที่มิติของฟิสิกส์ โดยเริ่มต้นจากสมัยของนิวตัน ในศตวรรษที่ 17 โดยที่ความเข้าใจเรื่องสีเป็นไปในอีกลักษณะหนึ่ง ซึ่งจะเข้าใจว่าสีขาวคือสีบริสุทธิ์ ส่วนสีอื่นๆเป็นสีที่ได้มาจากการใช้ทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์มาใช้ในการแยกสีจากสีขาว ซึ่งเราจะสังเกตได้ว่าเมื่อผ่านแสงแดดไปยังแท่งแก้วสามเหลี่ยมที่เรียกว่าปริซึม (Prism) จะทำให้เกิดแสงสีต่างๆได้ ซึ่งนิวตันเองได้ทำการทดลองเรื่องนี้ การทดลองของนิวตันได้เผยให้เห็นชัดเจนแล้วว่า “แสงขาว” คือแสงที่มากระทบมากขาวแล้วเกิดเป็นสีขาว ไม่ใช่สีเดียวหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือไม่ใช่สีบริสุทธิ์ เพราะเฉดสีของแสงต่างๆที่หักเหออกจากปริซึมนั้นแยกเป็นสีต่างๆคือ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด แดง เหมือนที่เห็นในแถบสีของรุ้งกินน้ำ นิวตันได้ทำการทดลองนำปริซึมมาอีกอันหนึ่งแล้วทำการผ่านแสงบางส่วนที่มีจำนวนสีน้อยลงมาผ่านปริซึมอีกครั้ง ซึ่งครั้งนี้นิวตันได้สังเกตเห็นสีที่มีแถบสีที่ใกล้เคียงกันจำนวนน้อยลงหากพูดด้วยภาษาแบบฟิสิกส์ก็คือ สีที่หักเหได้ในครั้งที่สองนี้มีลักษณะเป็นแสงเดี่ยว (Monochromatic) มากขึ้น ความเข้าใจเกี่ยวกับสีต่างๆที่รวมเป็นแสงขาวนี้เองที่นิวตันนำมาอธิบายการมองเห็นเนื้อสี (Hue) ว่าการที่เราเห็นสีต่างๆจากวัตถุได้นั้นเกิดจากการที่วัตถุนั้นสะท้อนหรือดูดกลืนสีต่างๆ ได้แตกต่างกัน เรามองเห็นวัตถุนั้นสีเหลืองก็เพราะว่าวัตถุนั้นสะท้อนสีเหลืองได้มากกว่าสีอื่นๆ และนิวตันได้แสดงให้เห็นด้วยว่าถ้าเอาแสงสีต่างๆเหล่านี้มาผสมกัน ก็จะทำให้เกิดเป็นสีอื่นๆ ได้ เช่น ถ้าเอาแสงสีแดงมาผสมกับแสงสีเหลืองบนฉากสีขาวเราจะมองเห็นเป็นสีส้ม และถ้าเอาแสงสีทั้งหมดมาผสมกันมันก็จะได้สีขาวซึ่งจะเรียกว่า ความเข้าใจเกี่ยวกับเรื่องแสงสี (Color) และเนื้อสีของวัตถุ (Hue) นั้นมีมากขึ้น จากคำอธิบายของนิวตันถึงแม้จะมีบางข้อสรุปที่มีข้อผิดพลาดอยู่บ้าง เช่น นิวตันคิดว่าจะต้องมีสีมากกว่า 2 สีมาผสมกันจึงจะทำให้เกิดเป็นแสงสีขาวได้ แต่ฮอยเกนส์ก็ได้แสดงให้เห็นว่าคู่สีบางคู่ก็สามารถทำให้เกิดแสงสีขาวได้ เช่น สีเหลือง (Yellow) และสีน้ำเงิน (Blue) เป็นต้น ซึ่งภายหลังจากนิวตันก็ได้ยอมรับแนวความคิดที่ว่า มีคู่สีหรือจำนวนสีไม่มากที่สามารถทำให้เกิดแสงสีขาวได้ ซึ่งปรากฏในหนังสืออธิบายเกี่ยวกับแนวคิดของแสงสี ซึ่งเป็นรากฐานของวิชา OPTICS ในยุคต่อมา

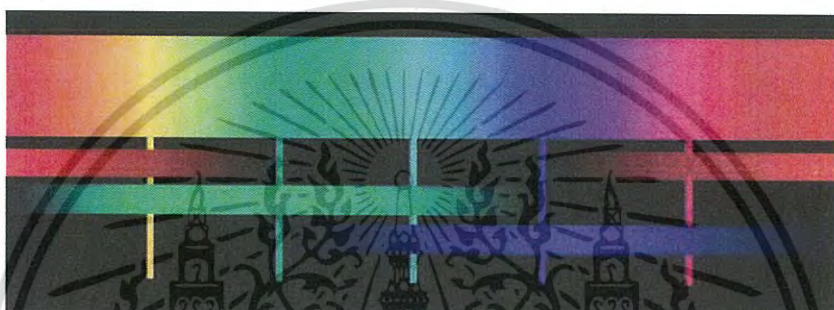
สี	ช่วงความยาวคลื่น	ช่วงความถี่
สีแดง	~ 625-740 nm	~ 480-405 THz
สีส้ม	~ 590-626 nm	~ 510-480 THz
สีเหลือง	~ 565-590 nm	~ 530-510 THz
สีเขียว	~ 500-565 nm	~ 600-530 THz
สีน้ำเงิน	~ 485-500 nm	~ 620-600 THz
สีคราม	~ 440-485 nm	~ 680-620 THz
สีม่วง	~ 380-440 nm	~ 780-680 THz

รูปที่ 2.15 แสดงสเปกตรัมของแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สายตามองเห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติเนาไปไซประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงสเปกตรัมของแสงแบบต่อเนื่องในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 700 นาโนเมตร



รูปที่ 2.17 แสดงสเปกตรัมของแสงบนจอกอมพิวเตอร์ (Red-Green-Blue : RGB) ซึ่งแถบสีด้านล่าง แสดงความเข้มของแสงที่สัมพันธ์ของสีทั้งสาม เมื่อนำมาผสมกันจึงทำให้เกิดเป็นแถบสี

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความถี่และค่าพลังงานแสงของสเปกตรัมของแสงแต่ละสี

แสงสี	ความถี่ของแสง		ค่าพลังงานของแสง	
	$\lambda / nm (\nu / 10^{14})$	$Hz (\nu_b / 10^4)$	$E / eV$	$E / kJ$
อินฟราเรด	>1000	<3.00	<1.24	<120
แดง	700	4.28	1.77	171
ส้ม	620	4.84	2.00	193
เหลือง	580	5.17	2.14	206
เขียว	530	5.66	2.34	226
น้ำเงิน	470	6.38	2.64	254
ม่วง	420	7.14	2.95	285
Near ultraviolet	300	10.0	4.15	400
Far ultraviolet	<200	>15.00	>6.20	>598

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 แม่สี

แม่สี คือ สีที่นำมาผสมกันแล้วทำให้เกิดสีใหม่ ที่มีลักษณะแตกต่างไปจากสีเดิม แม่สีมีอยู่ 2 ชนิด คือ

### 2.8.1 แม่สีของแสง

จะเกิดจากการหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วปริซึมมี 3 สี คือ สีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน จัดอยู่ในรูปร่างสีของแสง ซึ่งเป็นพลังงานชนิดเดียวที่มีสีและคุณสมบัติของแสงสามารถนำมาใช้ในการถ่ายภาพ ภาพโทรทัศน์ การจัดแสงสี ในการแสดงต่าง ๆ เป็นต้น

### 2.8.2 แม่สีวัตถุธาตุ

เป็นสีที่ได้มาจากธรรมชาติ และจากการสังเคราะห์โดยกระบวนการทางเคมี มี 3 สี คือ สีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน แม่สีวัตถุธาตุเป็นแม่สีที่นำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ในวงการศิลปะ การอุตสาหกรรม และอื่น ๆ อีกมากมาย

## 2.9 การผสมกันของสี

สีต่าง ๆ ที่เราเห็นสามารถเกิดจากการผสมกันของแม่สีเพียง 3 สีคือ สีแดง สีน้ำเงิน และสีเหลือง โดยการผสมกันของสีนั้นมีได้ 2 แบบคือ การผสมสีแบบบวก (Additive color mixing) และการผสมสีแบบลบ (Subtractive color mixing) ซึ่งเจมส์ เคลิร์ก แมกซ์เวลล์ ได้เสนอทฤษฎีการผสมสีแบบบวกโดยได้ฉายภาพจากฟิล์มโพสิทีฟขาวดำ 3 แผ่นที่ได้จากการถ่ายภาพโดยใช้แผ่นกรองแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน มาบังหน้ากล้องถ่ายภาพ ซึ่งการถ่ายภาพดังกล่าวทำให้ฟิล์มแต่ละแผ่นบันทึกเฉพาะแม่สีของแสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุเป็นน้ำหนักรสีต่างๆ บนฟิล์มตามความเข้มแสงที่สะท้อนจากวัตถุ จากนั้นนำฟิล์มแต่ละแผ่นไปฉายด้วยเครื่องฉายที่มีแผ่นกรองแสง สีแดง เขียว และน้ำเงินบังอยู่ เมื่อแสงสามสีนี้ไปรวมกันบนจอภาพจะเกิดเป็นสีต่าง ๆ ขึ้นมาใหม่อีกมากมายจากการผสมสีของแสงทั้งสามในความเข้มต่าง ๆ กัน

### 2.9.1 การผสมสีแบบบวก (Additive color mixing)

เป็นการผสมกันของสีของแสง ซึ่งมีแม่สีหลัก (Primary color) คือแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ซึ่งเราจะพบเห็นการผสมสีแบบบวกได้จากจอโทรทัศน์ หรือจอคอมพิวเตอร์และเราจะเรียกสีที่เกิดจากการผสมกันของแม่สีบวกว่าแม่สีรอง (Secondary color) ได้แก่ สีน้ำเงินเขียว (Cyan) สีม่วงแดง (Magenta) และสีเหลือง (Yellow)

### 2.9.2 การผสมสีแบบลบ (Subtractive color mixing)

เป็นการผสมกันของแม่สี สีน้ำเงินเขียว ม่วงแดงและเหลือง เราจะพบเห็นการผสมสีแบบลบได้จากสิ่งพิมพ์ต่าง ๆ เช่น สีทาบ้าน เป็นต้น เมื่อพิจารณาการผสมสีทั้งแบบบวกและแบบลบ เราจะสังเกตเห็นว่าการผสมกันของแม่สีบวกคู่หนึ่งจะให้แม่สีลบ และการผสมของแม่สีลบคู่หนึ่งจะให้แม่สีบวก ซึ่งแม่สีบวกสีแดงอยู่ตรงข้ามกับสีน้ำเงินเขียว สีเขียวอยู่ตรงข้ามกับสีม่วงแดง และสีน้ำเงินอยู่ตรงข้ามกับสีเหลือง เราเรียกคู่สีที่อยู่ตรงข้ามกันนี้ว่า สีเติมเต็ม (Complementary color) กล่าวคือ การผสมกันของสีที่เติมเต็มกันของแม่สีบวกจะทำให้ได้สีขาว แต่สำหรับการผสมสีแบบลบจะให้สีดำ หรือพูดอีกนัยหนึ่งว่าการผสมกันของสีเติมเต็มคู่ใดคู่หนึ่ง เพื่อเปรียบเสมือนการผสมสีของแม่สีทั้งสาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 ประเภทของสี

สีสามารถแยกออกเป็น 2 ประเภทคือ สีธรรมชาติ และสีที่มนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งสีธรรมชาตินั้นเป็นสีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สีของแสงอาทิตย์ สีท้องฟ้าในยามเช้าและยามเย็น สีของรุ่งกึนน้ำที่เกิดขึ้นหลังจากฝนตกเสร็จ และสีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติรวมไปถึงสีของดอกไม้ ต้นไม้ พื้นดิน ท้องฟ้า และน้ำทะเล ซึ่งเมื่อเทียบกับสีที่มนุษย์สร้างขึ้นนั้นจะได้มาจากการสังเคราะห์ขึ้นมา เช่น สีวิทยาศาสตร์เกิดจากการที่มนุษย์ได้ทำการทดลองจากแสงต่าง ๆ เช่น ไฟฟ้าเมื่อนำมาผสมกันโดยการทอแสงประสานกันและนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการละคร การจัดฉากเวที โทรทัศน์ การตกแต่งสถานที่ต่าง ๆ และสีที่มนุษย์ได้สังเคราะห์ขึ้นมานั้นก็ประกอบไปด้วย

### 2.10.1 สีน้ำ (water colour)

เป็นสีที่ใช้กันมาตั้งแต่โบราณทั้งในแถบยุโรปและเอเชีย โดยเฉพาะจีนและญี่ปุ่นแต่ในอดีตการระบายสีน้ำมักใช้เพียงสีเดียวคือ สีดำ ผู้ที่จะระบายได้อย่างสวยงามจะต้องมีทักษะการใช้พู่กันที่สูงมาก ซึ่งการระบายสีน้ำจะใช้น้ำเป็นส่วนผสมและทำละลายให้เจือจาง ในการใช้สีน้ำไม่นิยมใช้สีขาวผสมเพื่อให้มีน้ำหนักอ่อนลง และไม่นิยมใช้สีดำผสมให้มีน้ำหนักเข้มข้น เพราะจะทำให้เกิดน้ำหนักมืดเกินไปแต่จะใช้สีกลางหรือสีตรงข้ามผสมแทน ลักษณะของภาพวาดสีน้ำจะมีลักษณะใส บาง และสะอาด การระบายสีน้ำต้องใช้ความชำนาญสูงเพราะผิดพลาดแล้วจะแก้ไขยากจะระบายซ้ำ ๆ ทับกันมาก ๆ ไม่ได้จะทำให้ภาพออกมามีสีขุ่น ๆ ไม่น่าดู หรือที่เรียกว่า สีเนา สีน้ำที่มีจำหน่ายในปัจจุบันจะบรรจุในหลอด เป็นเนื้อสีฝุ่นที่ผสมกับกาวอะราบิก ซึ่งเป็นกาวที่สามารถละลายน้ำได้ มีทั้งลักษณะที่โปร่งแสง (Transparent) และกึ่งทึบแสง (Semi-Opaque) ซึ่งจะมีระบุไว้ข้างหลอด สีน้ำนิยมระบายบนกระดาษที่มีผิวขรุขระ หยาบ เป็นต้น

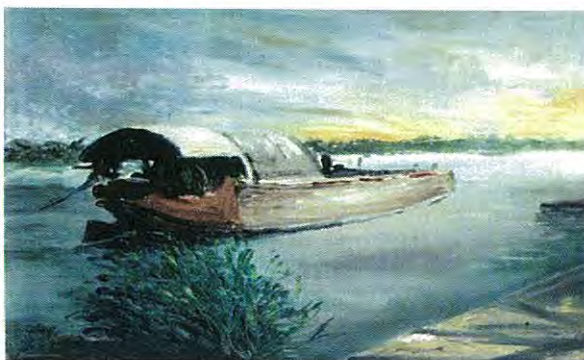


รูปที่ 2.18 แสดงภาพวาดโดยใช้สีน้ำ

### 2.10.2 สีโปสเตอร์ (Poster colour)

เป็นสีชนิดสีฝุ่น (Tempera) ที่ผสมกาวน้ำบรรจุเป็นขวด การใช้งานเหมือนกับสีน้ำคือใช้น้ำเป็นตัวผสมให้เจือจาง สีโปสเตอร์เป็นสีทึบแสงและมีเนื้อสีขุ่น สามารถระบายให้มีเนื้อเรียบได้ และผสมสีขาวให้มีน้ำหนักอ่อนลงได้เหมือนกับสีน้ำมันหรือสีอะคริลิก สามารถระบายสีทับกันได้ มักใช้ในการวาดภาพ และภาพประกอบเรื่องในงานออกแบบต่าง ๆ ได้สะดวก และในขวดสีโปสเตอร์มีส่วนผสมของกลีเซอรินเพื่อให้สีแห้งเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงภาพวาดโดยใช้สีโปสเตอร์

### 2.10.3 สีชอล์ก (Pastel)

เป็นสีฝุ่นผงละเอียดบริสุทธิ์นำมาอัดเป็นแท่ง ใช้ในการวาดภาพมากกว่า 250 ปีแล้ว ในปัจจุบันมีการผสมขี้ผึ้งหรือกาวยางไม้เข้าไปด้วยแล้วอัดเป็นแท่งในลักษณะของดินสอสี แต่มีเนื้อละเอียดกว่า แท่งใหญ่กว่า และมีราคาแพงกว่ามากมักใช้ในการวาดภาพเหมือน



รูปที่ 2.20 แสดงภาพวาดโดยใช้สีชอล์ก

### 2.10.4 สีฝุ่น (Tempera)

เป็นสีเริ่มแรกของมนุษย์ได้มาจากธรรมชาติ ดิน หิน แร่ธาตุ พืช สัตว์ นำมาทำให้ละเอียดเป็นผง ผสมกาวและน้ำกาวทำมาจากหนังสัตว์กระดูกสัตว์ สำหรับช่างจิตรกรรมไทยใช้ ยางมะขวิดหรือกาวกระถิน ซึ่งเป็นตัวช่วยให้สีเกาะติดพื้นผิวหน้าวัตถุไม่หลุดได้โดยง่าย ในยุโรปนิยมเขียนสีฝุ่นโดยผสมกับกาวยางกาวน้ำหรือไข่ขาว สีฝุ่นเป็นสีที่มีลักษณะทึบแสงและมีเนื้อสีค่อนข้างหนาสามารถเขียนสีทับกันได้ สีฝุ่นมักใช้ในการเขียนภาพทั่วไปโดยเฉพาะภาพฝาผนัง ในสมัยหนึ่งนิยมเขียนภาพฝาผนังที่เรียกว่า สีปูนเปียก (Fresco) โดยใช้สีฝุ่นเขียนในขณะที่ปูนที่ฉาบผนังยังไม่แห้งดี เนื้อสีจะซึมเข้าไปในเนื้อปูนทำให้ภาพไม่หลุดลอกง่าย ซึ่งสีฝุ่นในปัจจุบันมีลักษณะเป็นผง เมื่อจะใช้งานนำมาผสมกับน้ำโดยไม่ต้องผสมกาว เนื่องจากในกระบวนการผลิตได้ทำการผสมมาแล้ว และการใช้งานจะเหมือนกับสีโปสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แสดงภาพวาดโดยใช้สีฝุ่น

### 2.10.5 ดินสอสี (Cayon)

เป็นสีผงละเอียด ผสมกับขี้ผึ้งหรือไขสัตว์ นำมาอัดให้เป็นแท่งอยู่ในลักษณะของดินสอ เพื่อให้เหมาะสำหรับเด็กใช้งานซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสีชอล์ก แต่เป็นสีที่มีราคาถูกเนื่องจากมีส่วนผสมอื่น ๆ ปะปนอยู่มากและมีเนื้อสีน้อย ปัจจุบันมีการพัฒนาให้สามารถละลายน้ำหรือน้ำมันได้ โดยเมื่อใช้ดินสอสีระบายสีแล้วนำพู่กันจุ่มน้ำมาระบายต่อจะทำให้มีลักษณะคล้ายกับภาพสีน้ำ (Aquarelle) บางชนิดสามารถละลายได้ในน้ำมันซึ่งทำให้กันน้ำได้



รูปที่ 2.22 แสดงภาพวาดโดยใช้ดินสอสี

### 2.10.6 สีเทียนหรือสีเทียนน้ำมัน (Oil pastel)

เป็นสีฝุ่นผงละเอียดผสมกับไขมันสัตว์หรือขี้ผึ้ง แล้วนำมาอัดเป็นแท่งมีลักษณะทึบแสง สามารถเขียนทับกันได้ การใช้สีอ่อนทับสีเข้มจะมองเห็นพื้นสีเดิมอยู่บ้าง การผสมสีอื่นๆ ใช้การเขียนทับกัน สีเทียนน้ำมันมักไม่เกาะติดพื้น สามารถขูดสีออกได้ และกันน้ำ ถ้าต้องการให้สีติดแน่นทนนานจะมีสารพ่นเคลือบผิวหน้าสี สีเทียนหรือสีเทียนน้ำมันมักใช้เป็นสีฝึกหัดสำหรับเด็กเนื่องจากใช้ง่ายไม่เกิดความยุ่งยากและไม่เลอะเทอะเปรอะเปื้อน อีกอย่างหนึ่งคือมีราคาถูก



รูปที่ 2.23 แสดงภาพวาดโดยใช้สีเทียน

### 2.10.7 สีอะคริลิก (Acrylic colour)

เป็นสีที่มีส่วนผสมของสารพลาสติกโพลีเมอร์ (Polymer) สีจำพวกอะคริลิก (Acrylic) หรือไวนิล (Vinyl) เป็นสีที่มีการผลิตขึ้นมาใหม่ล่าสุดเวลาจะใช้นำมาผสมกับน้ำใช้งานได้เหมือนกับสีน้ำและสีน้ำมัน ซึ่งมีทั้งแบบโปร่งแสงและทึบแสงแต่จะแห้งเร็วกว่าสีน้ำมัน 1 - 6 ชั่วโมง เมื่อแห้งแล้วจะมีคุณสมบัติกันน้ำได้และเป็นสีที่ติดแน่นทนนาน คงทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ สามารถเก็บไว้ได้นาน ๆ และยัดเกาะติดผิวหน้าวัตถุได้ดี เมื่อระบายสีแล้วอาจใช้น้ำยาวานิช (Vanish) เคลือบผิวหน้าเพื่อป้องกันการขีดข่วนและให้คงทนมากยิ่งขึ้น สีอะคริลิกที่ใช้วาดภาพบรรจุในหลอดจะมีราคาค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.24 แสดงภาพวาดโดยใช้สีอะคริลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.8 สีน้ำมัน (Oil colour)

เป็นสีที่ผลิตจากการผสมของสีฝุ่นกับน้ำมันซึ่งเป็นน้ำมันจากพืช เช่น น้ำมันลินสีด (Linseed) ซึ่งกลั่นมาจากต้นแฟลกซ์หรือน้ำมันจากเมล็ดป๊อบบี้ สีน้ำมันเป็นสีที่บดแสงเวลาระบายสี มักใช้สีขาวผสมให้ได้น้ำหนักสีอ่อนและสีแก่ งานวาดภาพสีน้ำมันมักเขียนลงบนผ้าใบ (Canvas) จะมีความคงทนมากและกันน้ำ ศิลปินรู้จักใช้สีน้ำมันวาดภาพมาหลายร้อยปีแล้ว และการวาดภาพสีน้ำมันอาจใช้เวลาเป็นเดือนหรือเป็นปีก็ได้เนื่องจากสีน้ำมันจะแห้งช้ามาก ทำให้ไม่ต้องรีบร้อนสามารถวาดภาพสีน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ ๆ และสามารถแก้ไขงานด้วยการเขียนทับงานเดิม สีน้ำมันสำหรับเขียนภาพจะบรรจุในหลอดซึ่งมีราคาสูงต่ำขึ้นอยู่กับคุณภาพ และการใช้งานจะผสมด้วยน้ำมันลินสีดซึ่งจะทำให้เหนียวและเป็นมัน แต่ถ้าใช้น้ำมันสนจะทำให้แห้งเร็วขึ้นและสีด้าน และพู่กันที่ใช้ระบายสีน้ำมันเป็นพู่กันลักษณะแบนที่มีขนแข็ง ๆ สีน้ำมันเป็นสีที่ศิลปินส่วนใหญ่นิยมใช้วาดภาพ มาตั้งแต่สมัยเรอเนซองส์ในยุคปลาย



รูปที่ 2.25 แสดงภาพวาดโดยใช้สีน้ำมัน

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

สำหรับเนื้อหาในบทนี้ จะอธิบายเกี่ยวกับวิธีดำเนินงานวิจัย ซึ่งงานวิจัยในหัวข้อนี้เป็นการทดลองที่มีการประยุกต์ใช้หลักการดิจิทัลโฮโลกราฟีเพื่อใช้ในการศึกษาลักษณะของเนื้อสีแต่ละประเภทที่ใช้ในการเขียนภาพ โดยในการทดลองนั้นจำเป็นต้องมีการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง และการจัดระบบทางแสง โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยและวิธีการทำงานวิจัย ดังนี้

### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.1.1 เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode - LD)

เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์ที่เกิดขึ้นจากรอยต่อ p-n ของสารกึ่งตัวนำ โดยในการทดลองใช้เลเซอร์ไดโอดสีแดงที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร และกำลังของเลเซอร์อยู่ที่ 0.9 มิลลิวัตต์



รูปที่ 3.1 เลเซอร์ไดโอดสีแดงความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร และกำลังของแสง 0.9 มิลลิวัตต์

#### 3.1.2 เลนส์นูน (Convex lens)

เลนส์นูนเป็นเลนส์ที่มีลักษณะตรงกลางหนากว่าส่วนขอบ เลนส์นูนทำหน้าที่รวมแสงหรือลู่แสงให้เข้ามารวมกันที่จุดจุดหนึ่งเรียกว่า จุดรวมแสง หรือ จุดโฟกัส ในการทดลองจะใช้เลนส์นูนแกมระนาบ 2 อัน (Plana-convex lens) โดยเลนส์นูนอันแรกทำหน้าที่รวมแสงจากเลเซอร์ให้เป็นลำแสงขนาด ( $L_1$ ) ซึ่งมีความยาวโฟกัสเท่ากับ 200 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร ส่วนเลนส์นูนอันที่สองทำหน้าที่ขยายลำแสงที่มาจากวัตถุ เพื่อให้ขนาดของลำแสงเท่ากับขนาดของเซนเซอร์รับแสงของกล้องบันทึกภาพ ( $L_2$ ) มีความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 เลนส์นูนที่ใช้ในการรวมแสงเลเซอร์ และขยายลำแสงในการบันทึกภาพโฮโลแกรม

### 3.1.3 ปริซึม (Prism)

ปริซึมคือแท่งแก้วสามเหลี่ยม โดยคุณสมบัติของปริซึมสามารถทำให้แสงที่เดินทางผ่านเข้ามาจะเกิดการหักเห 2 ครั้ง โดยการหักเหครั้งแรกแสงจะเกิดการหักจากอากาศสู่แก้ว ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำสู่ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหสูง ( $n_1 < n_2$ ) ส่วนครั้งที่ 2 เป็นการหักเหของแสงจากแก้วสู่อากาศ ( $n_1 > n_2$ )



รูปที่ 3.3 ปริซึมสามเหลี่ยม มุม  $45^\circ \times 45^\circ \times 90^\circ$

### 3.1.4 กล้อง CCD

กล้องดิจิทัลที่ใช้ในการทดลองคือ กล้องยี่ห้อ Canon รุ่น EOS-700D ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดย CCD ย่อมาจาก Charge Coupled Device ซึ่งเป็นเซนเซอร์ชนิดหนึ่ง (Sensor) ที่ทำงานโดยแต่ละพิกเซลบนตัวเซนเซอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับแสงและเปลี่ยนค่าแสงที่ได้เป็นสัญญาณอนาล็อก และสัญญาณอนาล็อกจะถูกส่งเข้าสู่วงจรเปลี่ยนค่าอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital convertor) เพื่อนำสัญญาณดิจิทัลมาใช้ในการประมวลผลต่อไป



รูปที่ 3.4 กล้องดิจิทัลยี่ห้อ Canon รุ่น EOS-700D

### 3.1.5 Optical mounting post

ในการจัดระบบทางแสง จำเป็นต้องให้เส้นทางการเดินของแสงมีระนาบเท่ากัน โดยชุด Optical mounting post เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ยึดอุปกรณ์ทางแสงกับฐาน ซึ่งสามารถปรับระดับความสูงได้เพื่อให้แสงมีระดับความสูงเท่ากันรูปที่ 3.5 ชุด Optical mounting post



รูปที่ 3.5 ชุด Optical mounting post

### 3.1.6 คอมพิวเตอร์ (Computer)

คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ในการสร้างภาพโฮโลแกรม เพื่อให้ได้ภาพ 3D ที่มีความคมชัดทั้งเฟส และความเข้มของแสงบนรูปภาพ (Reconstruction process) ซึ่งจำเป็นต้องลงโปรแกรม Matlab เพื่อใช้ในการประมวลผลภาพโฮโลแกรมที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 3.6 คอมพิวเตอร์ใช้ในการ Reconstruction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.7 กระดาษที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองจะใช้กระดาษ 100 ปอนด์สีขาวและสีดำ โดยกระดาษทั้งสองด้านจะมีความละเอียดต่างกัน คือ ด้านที่ละเอียดและด้านที่หยาบ

รูปที่ 3.7 กระดาษที่ใช้ในการทดลอง

### 3.1.8 สีไม้

สีไม้เป็นที่ที่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นแท่งคล้ายกับดินสอ โดยที่เนื้อสีจะถูกอัดเป็นแท่งอยู่ภายในไม้ ซึ่งมีความสะดวกในการใช้งาน เช่นวาดภาพ หรือระบายสีลงบนวัสดุต่างๆ



รูปที่ 3.8 สีไม้ ยี่ห้อมาสเตอร์อาร์ต

### 3.1.9 สีอะคริลิก

สีอะคริลิก เป็นสีที่ถูกผสมกับพลาสติก ซึ่งเนื้อสีจะมีความหนืด แต่ไม่แข็ง โดยในการใช้งานจำเป็นต้องใช้พู่กันในการระบายลงบนกระดาษ เมื่อสีแห้ง เราจะสังเกตเห็นสีมีความมันวาวติดอยู่บนกระดาษ จะทำให้ภาพวาดนั้นๆมีความโดดเด่นมากขึ้น



รูปที่ 3.9 สีอะคริลิก ยี่ห้อซากุระ

### 3.1.10 สีเทียน

สีเทียนจะมีลักษณะคล้ายกับสีไม้ แต่เนื้อสี และความละเอียดของเนื้อสีความแตกต่างกัน ซึ่งเมื่อระบายสีเทียนลงบนกระดาษเนื้อของสีจะไม่ค่อยเรียบ จะสังเกตเนื้อสีเป็นก้อน ๆ เหมาะสำหรับเด็กฝึกในการใช้



รูปที่ 3.10 สีเทียน ยี่ห้อมาสเตอร์อาร์ต

### 3.1.11 สีชอล์ก

สีชนิดนี้จะมีลักษณะคล้าย ๆ กับสีเทียน แต่เนื้อสีจะมีความละเอียด และนุ่มมากกว่า ซึ่งทำให้สีชอล์กมีราคาแพงกว่าสีเทียน



รูปที่ 3.11 สีชอล์ก ยี่ห้อเพนเทล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.12 ไตร่เป่าผม

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเป่ากระดาษที่ถูกระบายสีไว้ให้ติดแนบกับตัวปริซึมได้ดี และเร็วขึ้น เพื่อลดระยะเวลาในการทดลอง



รูปที่ 3.12 ไตร่เป่าผม

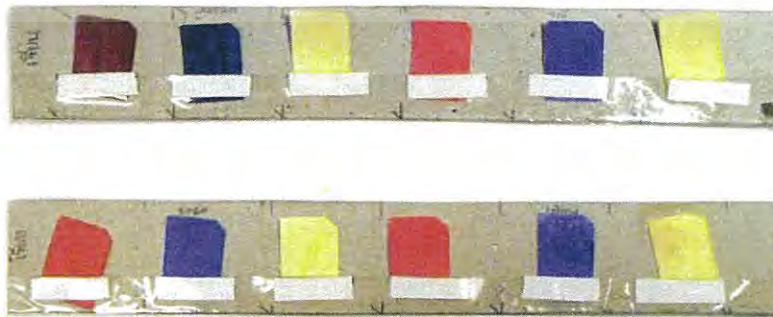
## 3.2 วิธีการทำงานวิจัย

ในการทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษาลักษณะของเนื้อสีแต่ละประเภทที่ใช้ในการเขียนภาพ ด้วยวิธีการสะท้อนกลับหมดของแสงภายในปริซึมโดยใช้ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์ (Total internal reflection by digital in-lined holography) ซึ่งประเภทของสีที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ สีอะคริลิก สีเทียน สีชอล์ก และสีไม้ โดยในการทดลองได้ทำการศึกษาแม่สีทั้ง 3 สี ได้แก่ แดง น้ำเงิน และเหลือง ที่ถูกระบายบนกระดาษร้อยปอนด์สีขาวทั้งด้านเรียบและด้านหยาบ และกระดาษร้อยปอนด์สีดำทั้งด้านเรียบและด้านหยาบ

### 3.2.1 การเตรียมตัวอย่างในการทดลอง

ตัวอย่างที่จะต้องเตรียมในการทดลองนั้นเราได้แบ่งตัวอย่างที่ใช้ออกเป็น 4 ชุด โดยทำการระบายสีทั้งสามสีแต่ละประเภทบนกระดาษที่เตรียมไว้จนครบดังนี้

ตัวอย่างชุดที่ 1 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียนและสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษร้อยปอนด์สีขาวด้านเรียบ

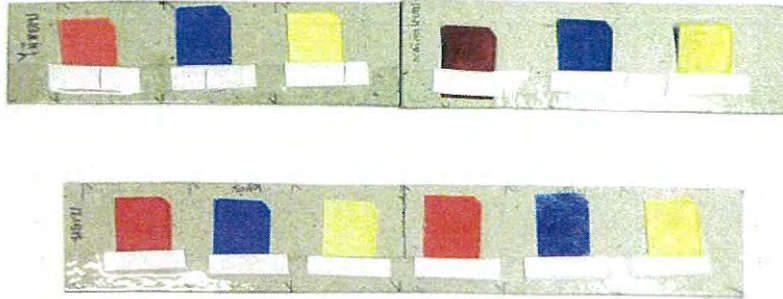


รูปที่ 3.13 ตัวอย่างชุดที่ 1 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียนและสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษร้อยปอนด์สี

ขาวด้านเรียบ

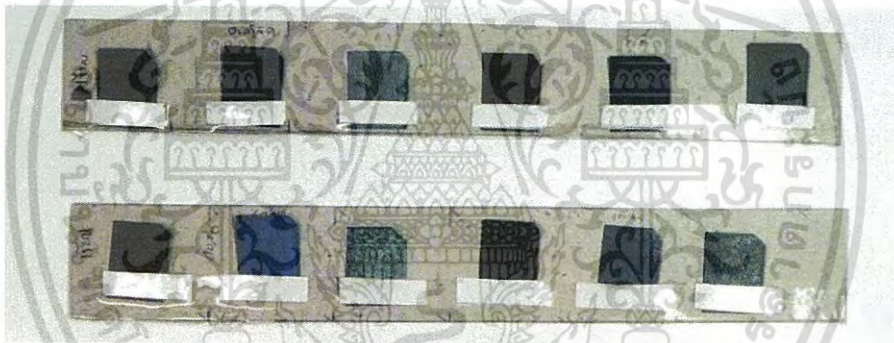
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างชุดที่ 2 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียนและสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษ 100 ปอนด์สี  
ขาวด้านหยาบ



รูปที่ 3.14 ชุดตัวอย่างที่ 2 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียนและสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษร้อยปอนด์สี  
ขาวด้านหยาบ

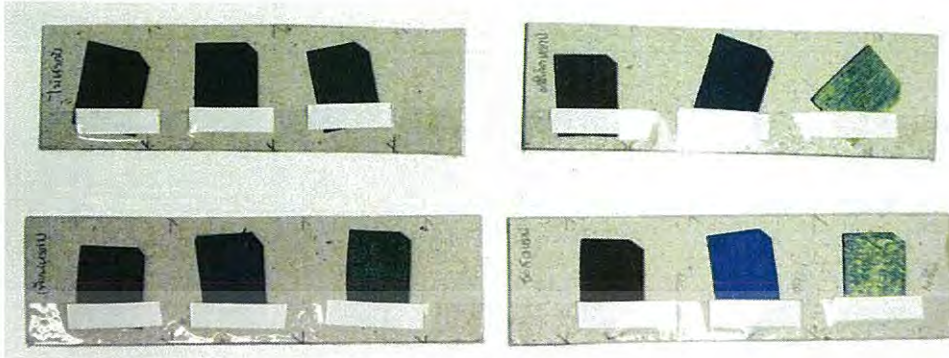
ตัวอย่างชุดที่ 3 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษ 100 ปอนด์สีดำ  
ด้านเรียบ



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างชุดที่ 3 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษ 100 ปอนด์  
สีดำด้านเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างชุดที่ 4 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษ 100 ปอนด์สีดำด้านหยาบ



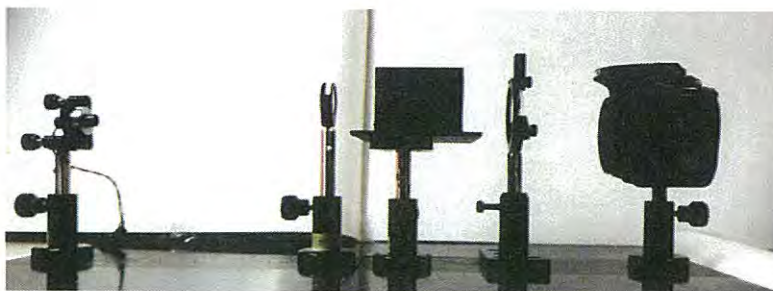
รูปที่ 3.16 ตัวอย่างชุดที่ 4 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษ 100 ปอนด์สีดำด้านหยาบ

### 3.2.2 การจัตระบบแสงในการทดลอง

โดยในการทดลองจะทำการจัตระบบการสะท้อนกลับหมดของแสงภายในปริซึมโดยใช้ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์ (Total internal reflection digital in-line holography) โดยการนำเลเซอร์ที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการทดลองยิงเข้าเลนส์นูนเพื่อทำให้ลำแสงขนาน แล้ววางปริซึมโดยให้ลำแสงผ่านไปยังเลนส์นูนตัวที่สองเพื่อทำหน้าที่ขยายลำแสงที่ผ่านมาจากปริซึมเพื่อให้แสงผ่านไปยังตัวเซนเซอร์รับภาพ และวางกล้อง CCD โดยให้ลำแสงเข้าที่บริเวณเซ็นเซอร์รับภาพพอดี ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และ 3.19



รูปที่ 3.17 ไดอะแกรมแสดงระบบการสะท้อนกลับหมดของแสงภายในปริซึมโดยใช้ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์ (Total internal reflection by digital in-lined holography)



รูปที่ 3.18 แสดงการจัตระบบการสะท้อนกลับหมดของแสงภายในปริซึมโดยใช้ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์ (Total internal reflection by digital in-lined holography)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์ของนักศึกษาในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การดำเนินการทดลอง

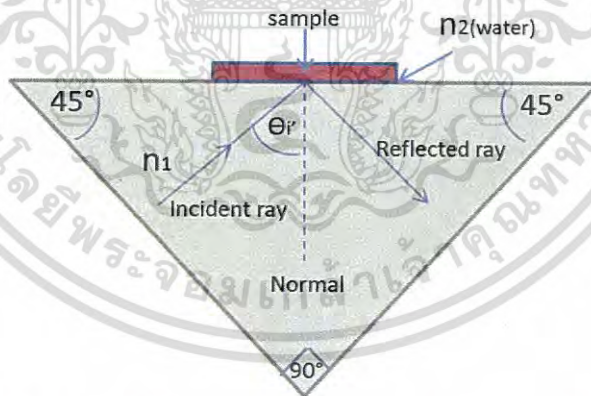
ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหามุมในการวางปริซึมเพื่อทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายใน โดยเริ่มคิดจากมุมตกกระทบภายใน ( $\theta_i$ ) ที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายใน หรือมุมวิกฤตภายในปริซึมก่อน แล้วจึงคิดออกมาหามุมตกกระทบภายนอก ( $\theta_e$ ) ที่จะทำให้แสงเกิดการหักเหเข้าปริซึมแล้วเกิดมุมตกกระทบภายใน ( $\theta_i$ ) ที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายใน ซึ่งวิธีการคำนวณแสดงดังต่อไปนี้

1. หามุมวิกฤต ( $\theta_c$ ) ของแสงที่เดินทางจากตัวกลางที่ 1 ปริซึม ( $n_{glass} = 1.5$ ) ไปยังน้ำซึ่งเป็นตัวกลางที่ 2 ( $n_{water} = 1.33$ ) และมุมตกกระทบภายใน ( $\theta_i$ ) ที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดหรือมุมวิกฤต

จาก 
$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3.1)$$

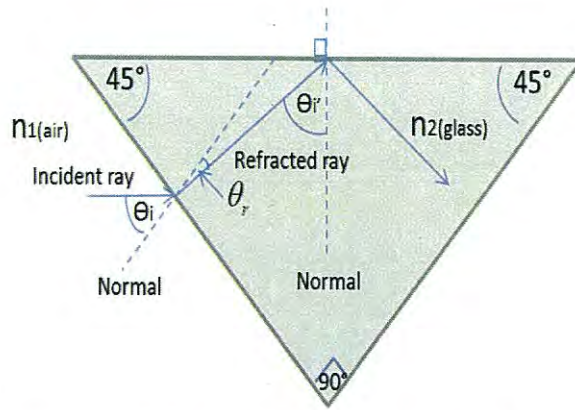
จะได้ 
$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{1.33}{1.5}\right) = 62.45732485^\circ$$

ซึ่งการที่แสงจะเกิดการสะท้อนกลับหมดได้ มุมตกกระทบหรือมุมระหว่างรังสีตกกระทบ (Incident ray) กับเส้นปกติ (Normal line) จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับมุมวิกฤต ( $\theta_i \geq \theta_c$ ) ดังนั้นมุมตกกระทบภายใน ที่ทำให้เกิดมุมวิกฤตจะต้องมีค่ามากกว่า  $62.45732485^\circ$



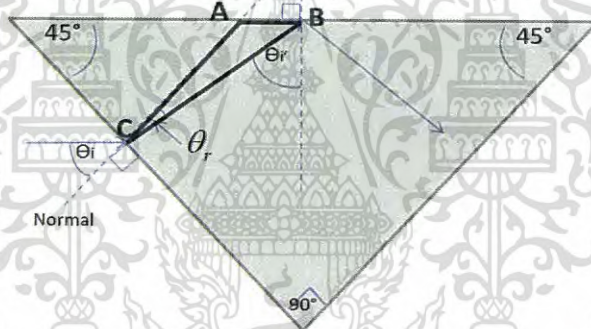
รูปที่ 3.19 แสดงการเกิดการสะท้อนกลับหมดภายในปริซึม

2. การคำนวณหามุมตกกระทบภายนอก ( $\theta_e$ ) ที่ทำให้แสงเกิดการหักเหเข้าสู่ปริซึมแล้ว ยังคงทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายใน



รูปที่ 3.20 แสดงเส้นทางการเดินของแสงเมื่อตกกระทบปริซึมแล้วเกิดการหักเหภายในปริซึม

ซึ่งจากการคำนวณหามุมตกกระทบภายใน ( $\theta_i$ ) เท่ากับ  $62.45732485^\circ$  เมื่อ  $\theta_i \geq \theta_c$  สามารถหามุมหักเห ( $\theta_r$ ) ได้จากการหามุมภายในของรูปสามเหลี่ยม ABC ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 แสดงรูปสามเหลี่ยม ABC ที่เกิดจากเส้นทางการเดินของแสงเมื่อตกกระทบปริซึมแล้วเกิดการหักเหภายในปริซึมและเส้นปกติ (Normal line) ที่ตั้งฉากกับระนาบผิวของปริซึม

จากรูปที่ 3.22 สามารถหามุม B มุม A และมุม C ได้ดังนี้

หา มุม B จาก  $90^\circ - \theta_r$

$$\text{ได้มุม B เท่ากับ } 90^\circ - 62.45732485^\circ = 27.54267515^\circ$$

หา มุม A จาก  $180^\circ - 45^\circ$

$$\text{ได้มุม A เท่ากับ } 135^\circ$$

หา มุม C จากมุมภายในรูปสามเหลี่ยมเท่ากับ  $180^\circ$  โดยที่มุม  $A+B+C = 180$

$$\text{ได้มุม C เท่ากับ } 180^\circ - 135^\circ - 27.54267515^\circ = 17.45732485^\circ$$

เมื่อ  $C = \theta_r$

ดังนั้น มุมหักเห ( $\theta_r$ ) เท่ากับ  $17.45732485^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หามุมตกกระทบภายนอก ( $\theta_i$ ) จาก กฎของสเนลล์ (Snell's law)

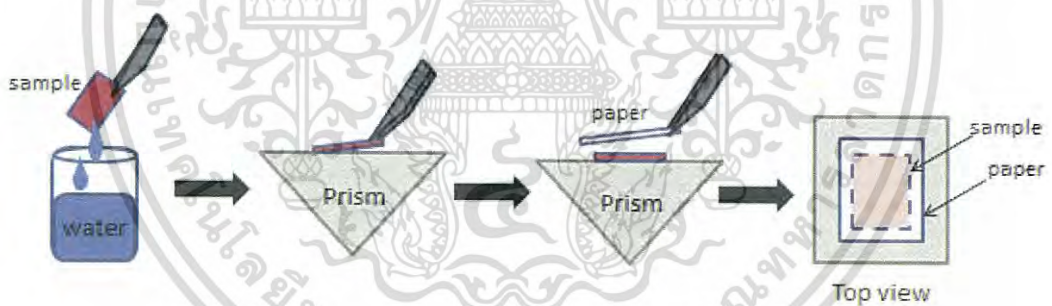
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (3.2)$$

โดยที่  $n_1$  คืออากาศ ( $n_{air} = 1$ )  $n_2$  คือปริซึม ( $n_{glass} = 1.5$ )  $\theta_1 = \theta_i$  และ  $\theta_2 = \theta_r$  ดังรูปที่ 3.21

$$\frac{1.5}{1} = \frac{\sin \theta_i}{\sin(17.4573248^\circ)}$$

จะได้ มุมตกกระทบภายนอก ( $\theta_i$ ) เท่ากับ 26.74323807 พบว่า ถ้ามุมตกกระทบภายนอก ( $\theta_i$ ) มีค่ามากขึ้น จะทำให้  $\theta_i > \theta_c$  ดังนั้น สามารถจัดเส้นทางเดินของแสงให้มุมตกกระทบภายนอก ( $\theta_i$ ) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับมุม 26.74323807 เพื่อให้แสงเกิดการหักเหเข้าสู่ปริซึมแล้วยังคงทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายใน โดยในการทดลองได้จัดเส้นทางเดินของแสงให้มีมุมตกกระทบภายนอก ( $\theta_i$ ) เท่ากับ  $45^\circ$

ขั้นตอนที่ 2 นำตัวอย่างที่เตรียมมาไปจุ่มน้ำสะอาดแล้วนำมาวางบนปริซึม แล้วนำแผ่นกระดาษเปล่าที่เปียกและมีขนาดใหญ่กว่าตัวอย่างเล็กน้อยมาวางทับตัวอย่างดังรูป



รูปที่ 3.22 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในการทดลอง

ขั้นตอนที่ 3 ใช้โดร์เป่าลมเป่าจนตัวอย่างแห้งติดกับปริซึมแล้วทำการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล CCD ของตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจนครบ

ขั้นตอนที่ 4 ทำการ Reconstruction ของภาพที่ถ่ายได้จากการทดลอง โดยใช้โปรแกรมแมทแลป

ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์ภาพที่ได้จากการทดลองโดยเปรียบเทียบกระดาษแต่ละประเภทและความแตกต่างของสีแต่ละประเภทในการทดลอง

ขั้นตอนที่ 6 สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้








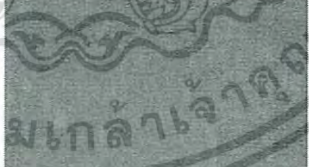







## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ เป็นการทดลองทางแสงเพื่อศึกษาลักษณะของเนื้อสีแต่ละประเภทบนกระดาษ ที่ใช้ในการเขียนภาพ โดยในการทดลองจะใช้แม่สีทั้ง 3 สี ได้แก่ สีแดง สีน้ำเงิน และสีเหลือง ของสีแต่ละประเภทดังนี้ สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษ 100 ปอนด์สีขาวทั้งด้านเรียบและด้านหยาบ และกระดาษ 100 ปอนด์สีดำทั้งด้านเรียบและด้านหยาบ



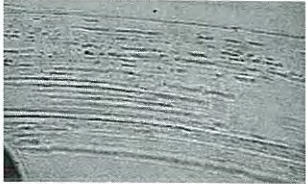

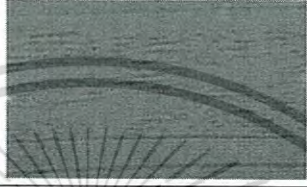








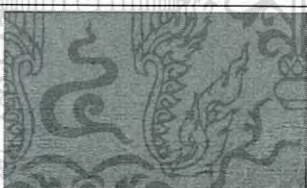


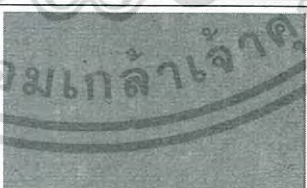


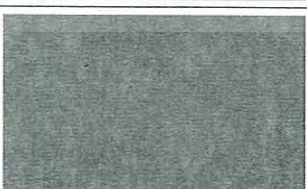

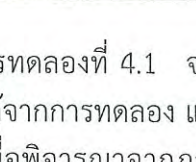
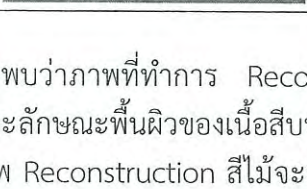
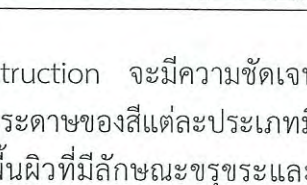
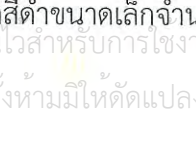
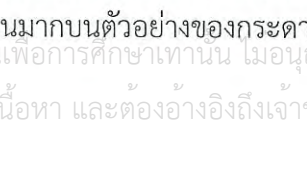

#### 4.1 ผลจากการทดลองโดยใช้กระดาษ 100 ปอนด์สีขาว

ตารางที่ 4.1 ภาพถ่ายตัวอย่าง ภาพถ่ายผลการทดลอง และภาพ Reconstruction ของตัวอย่างชุดที่ 1 กระดาษ 100 ปอนด์สีขาวด้านเรียบ

ประเภทของสี	สี	ภาพถ่ายตัวอย่าง	ภาพถ่ายจากการทดลอง	ภาพ Reconstruction
ไม้	แดง			
	น้ำเงิน			
	เหลือง			
อะคริลิก	แดง			
	น้ำเงิน			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


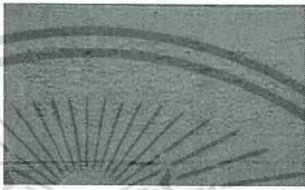



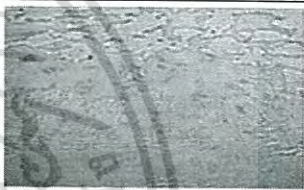







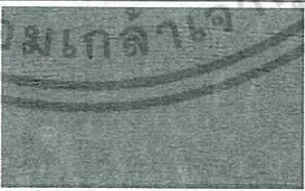


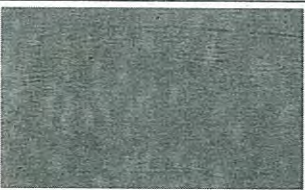

ตารางที่ 4.1 ภาพถ่ายตัวอย่าง ภาพถ่ายผลการทดลอง และภาพ Reconstruction ของตัวอย่างชุดที่ 1 กระดาษ 100 ปอนด์สีขาวด้านเรียบ (ต่อ)

ประเภทของสี	สี	ภาพถ่ายตัวอย่าง	ภาพถ่ายจากการทดลอง	ภาพ Reconstruction
อะคริลิก	เหลือง			
	แดง			
	น้ำเงิน			
เทียน	เหลือง			
	แดง			
	น้ำเงิน			
ชอล์ก	เหลือง			
	แดง			
	น้ำเงิน			

จากตารางการทดลองที่ 4.1 จะพบว่าภาพที่ทำการ Reconstruction จะมีความชัดเจนมากกว่าภาพที่ถ่ายได้จากการทดลอง และลักษณะพื้นผิวของเนื้อสีบนกระดาษของสีแต่ละประเภทมีความแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาจากภาพ Reconstruction สีไม้จะมีพื้นผิวที่มีลักษณะขรุขระและสามารถสังเกตเห็นจุดสีดำขนาดเล็กจำนวนมากบนตัวอย่างของกระดาษที่ระบายด้วยสีแดงและน้ำเงิน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





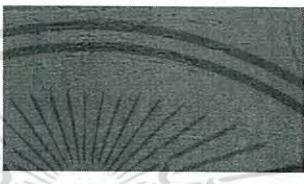









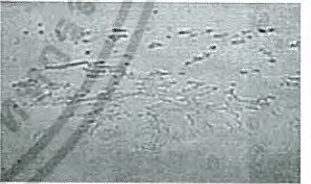

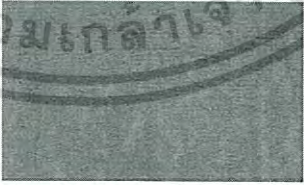

แต่ไม่ชัดเจนมากในสีเหลือง ส่วนสีอะคริลิกจะพบว่ามึลักษณะพื้นผิวของเนื้อสีเป็นเส้นคล้ายกับภาพถ่ายรูปตัวอย่าง ส่วนลักษณะพื้นผิวของเนื้อสีบนกระดาษของสีเทียนและสีชอล์กจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันคือมีความเป็นคราบ แต่จะพบว่าสีชอล์กมีความเรียบมากกว่าสีเทียนและในสีเทียนจะสามารถสังเกตเห็นจุดสีดำขนาดเล็กบนพื้นผิวของเนื้อสีได้

ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายตัวอย่าง รูปถ่ายผลการทดลอง และภาพReconstruction ของตัวอย่างชุดที่ 2 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียนและสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษร้อยปอนด์สีขาวด้านหยาบ

ประเภทของสี	สี	ภาพถ่ายตัวอย่าง	ภาพถ่ายจากการทดลอง	ภาพ Reconstruction
ไม้	แดง			
	น้ำเงิน			
	เหลือง			
อะคริลิก	แดง			
	น้ำเงิน			
	เหลือง			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายตัวอย่าง รูปถ่ายผลการทดลอง และภาพReconstruction ของตัวอย่างชุดที่ 2 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียนและสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษร้อยปอนด์สีขาวด้านหยาบ (ต่อ)





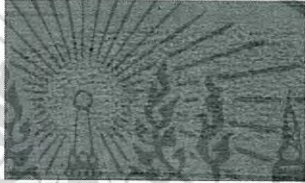
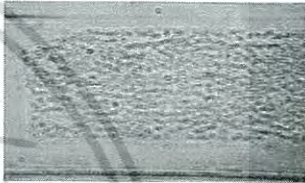


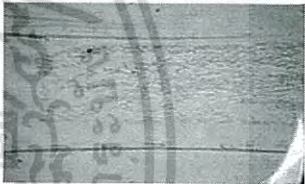









ประเภทของสี	สี	ภาพถ่ายตัวอย่าง	ภาพถ่ายจากการทดลอง	ภาพ Reconstruction
เทียน	แดง			
	น้ำเงิน			
	เหลือง			
ชอล์ก	แดง			
	น้ำเงิน			
	เหลือง			

จากตารางที่ 4.2 จะพบว่าภาพที่ทำการ Reconstruction จะมีความชัดเจนมากกว่าภาพที่ถ่ายได้จากการทดลอง และภาพถ่ายตัวอย่างของสีแต่ละประเภทยังสามารถเห็นได้ถึงความหยาบของเนื้อกระดาษ เมื่อพิจารณาจากภาพ Reconstruction ลักษณะพื้นผิวของเนื้อสีบนกระดาษของสีแต่ละประเภทมีความคล้ายคลึงกันโดยสามารถที่จะสังเกตเห็นลักษณะของจุดสีดำได้จากภาพที่ทำการ Reconstruction ของสีแต่ละประเภท แต่ส่วนลักษณะพื้นผิวของเนื้อสีบนกระดาษของสีอะคริลิกจะยังสามารถสังเกตเห็นลักษณะความเป็นเส้นที่คล้ายกับภาพถ่ายตัวอย่างได้เล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





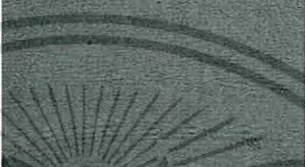











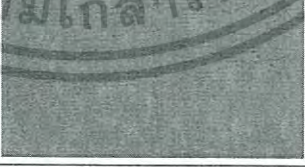

## 4.2 ผลจากการทดลองโดยใช้กระดาษ 100 ปอนด์สีดำ

ตารางที่ 4.3 ภาพถ่ายตัวอย่าง ภาพถ่ายผลการทดลอง และภาพ Reconstruction ของตัวอย่างชุดที่ 3 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษร้อยปอนด์สีดำด้านเรียบ

ประเภทของ	สี	ภาพถ่ายตัวอย่าง	ภาพถ่ายจากการทดลอง	ภาพ Reconstruction
ไม้	แดง			
	น้ำเงิน			
	เหลือง			
อะคริลิก	แดง			
	น้ำเงิน			
	เหลือง			


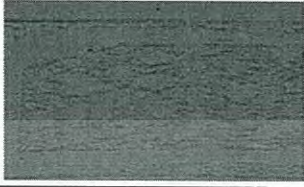


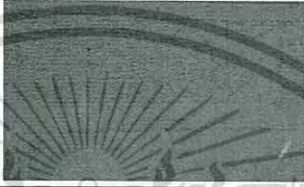













เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ภาพถ่ายตัวอย่าง ภาพถ่ายผลการทดลอง และภาพ Reconstruction ของตัวอย่างชุดที่ 3 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษร้อยปอนด์สีดำด้าน เรียบ (ต่อ)

ประเภทของสี	สี	ภาพถ่ายตัวอย่าง	ภาพถ่ายจากการทดลอง	ภาพ Reconstruction
เทียน	แดง			
	น้ำเงิน			
	เหลือง			
ชอล์ก	แดง			
	น้ำเงิน			
	เหลือง			





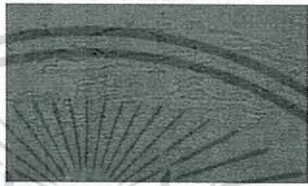





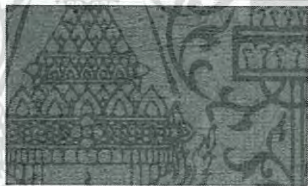



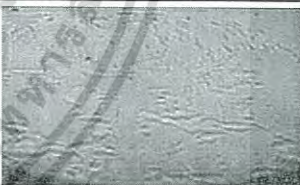

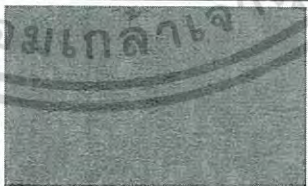

จากตารางที่ 4.3 จะพบว่าภาพที่ทำการ Reconstruction จะมีความชัดเจนมากกว่าภาพที่ถ่ายได้จากการทดลอง และลักษณะพื้นผิวของเนื้อสีบนกระดาษของสีแต่ละประเภทมีความแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาจากภาพ Reconstruction สีไม้จะมีพื้นผิวที่มีลักษณะขรุขระมากกว่าสีประเภทอื่น และสามารถสังเกตเห็นจุดสีดำขนาดเล็กจำนวนมากบนตัวอย่างของกระดาษที่ระบายด้วยสีแดงและน้ำเงินแต่ไม่ชัดเจนมากในสีเหลือง สีอะคริลิกจะพบว่ายังสามารถสังเกตเห็นลักษณะความเป็นเส้นที่คล้ายกับภาพถ่ายตัวอย่างได้เล็กน้อย ส่วนลักษณะพื้นผิวของเนื้อสีบนกระดาษของสีเทียนและสีชอล์ก จะมีความคล้ายคลึงกันคือมีความเป็นคราบการศึกษานั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ภาพถ่ายตัวอย่าง ภาพถ่ายผลการทดลอง และภาพReconstruction ของตัวอย่างชุดที่ 4 สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษร้อยปอนด์สีดำด้าน หยาบ

ประเภทของสี	สี	ภาพถ่ายตัวอย่าง	ภาพถ่ายจากการทดลอง	ภาพ Reconstruction
ไม้	แดง			
	น้ำเงิน			
	เหลือง			
อะคริลิก	แดง			
	น้ำเงิน			
	เหลือง			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ภาพถ่ายตัวอย่าง ภาพถ่ายผลการทดลอง และภาพReconstruction ของตัวอย่างชุดที่ 4 สี ไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก ที่ถูกระบายบนกระดาษร้อยปอนด์สีดำด้านหยาบ (ต่อ)

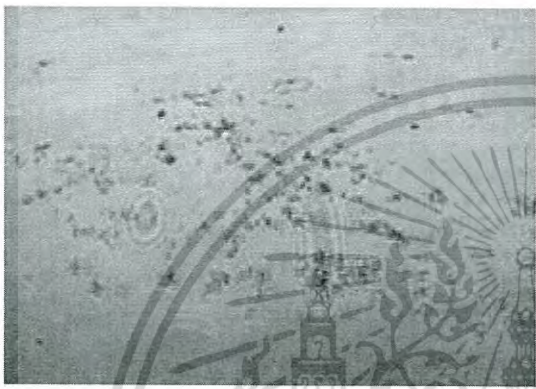
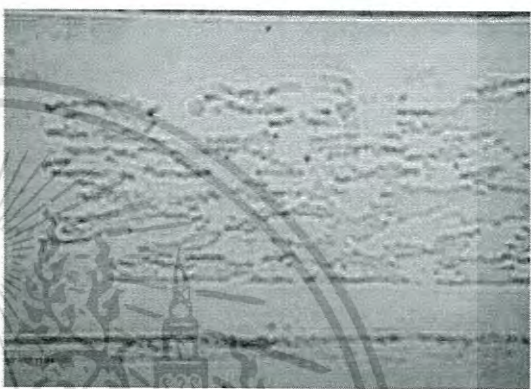

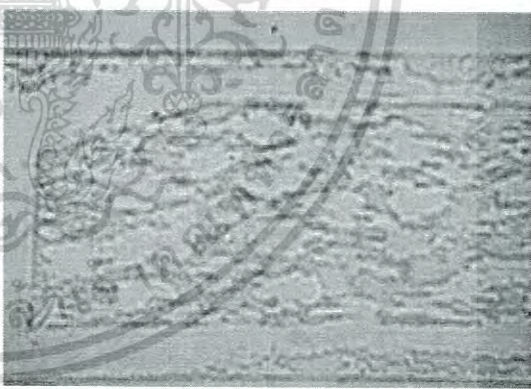
ประเภทของสี	สี	ภาพถ่ายตัวอย่าง	ภาพถ่ายจากการทดลอง	ภาพ Reconstruction
เทียน	แดง			
	น้ำเงิน			
	เหลือง			
ชอล์ก	แดง			
	น้ำเงิน			
	เหลือง			

จากตารางที่ 4.4 จะพบว่าภาพที่ทำการ Reconstruction จะมีความชัดเจนมากกว่าภาพที่ถ่ายได้จากการทดลอง และภาพถ่ายตัวอย่างของสีแต่ละประเภทยังสามารถเห็นได้ถึงความหยาบของเนื้อกระดาษ เมื่อพิจารณาจากภาพ Reconstruction ลักษณะพื้นผิวของเนื้อสีบนกระดาษของสีแต่ละประเภทมีความคล้ายคลึงกันของสีไม้ สีอะคริลิก และสีเทียน แต่สีชอล์กจะมีความเรียบมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3 การเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อสีแต่ละชนิดบนกระดาษ 100 ปอนด์ จากภาพ Reconstruction ของกระดาษ 4 ลักษณะ คือกระดาษสีขาวแบบเรียบและแบบหยาบ กระดาษสีดำแบบเรียบและแบบหยาบ

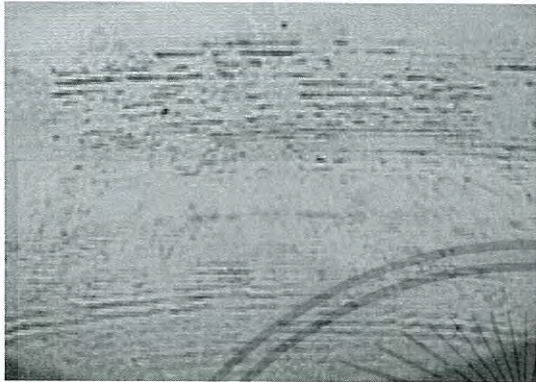
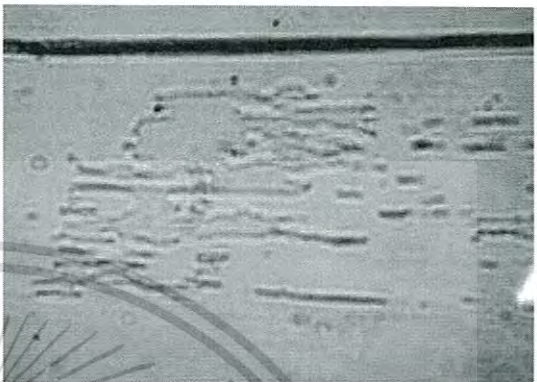


ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อสีไม้บนกระดาษทั้ง 4 ลักษณะ โดยใช้ตัวอย่างสีแดง

ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีขาวแบบเรียบ	ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีขาวแบบหยาบ
	
ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีดำแบบเรียบ	ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีดำแบบหยาบ
	

จากตารางที่ 4.5 จะพบว่าลักษณะพื้นผิวของเนื้อสีไม้บนกระดาษ 100 ปอนด์แบบเรียบทั้งสีขาวแล้วสีดำ จะได้รูปที่มีลักษณะคล้ายกันโดยมีลักษณะเป็นจุดสีดำจำนวนมาก แต่ลักษณะพื้นผิวของเนื้อสีไม้บนกระดาษ 100 ปอนด์แบบหยาบทั้งสีขาวแล้วสีดำจะพบว่า มีลักษณะคล้ายกับผิวของกระดาษ

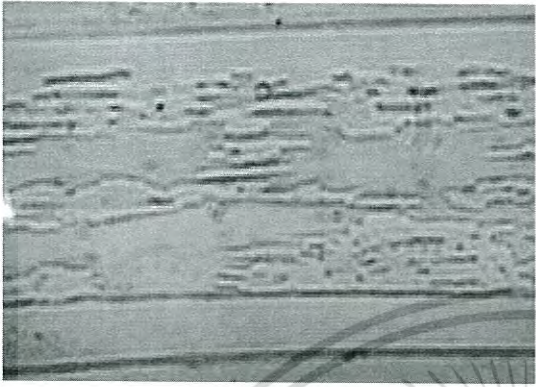
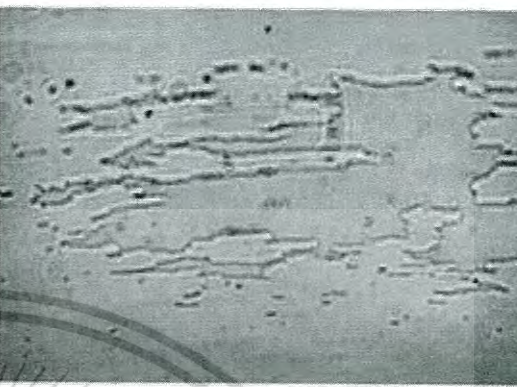

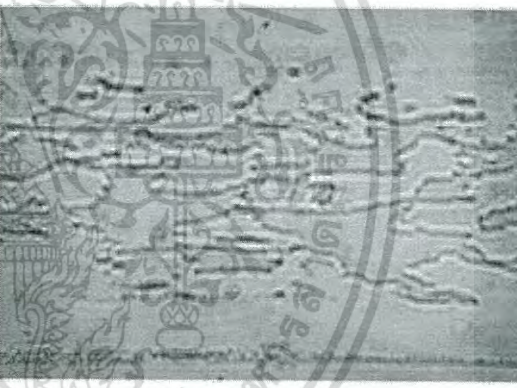
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อสีอะคริลิกบนกระดาษทั้ง 4 ลักษณะ โดยใช้ตัวอย่างสีแดง

ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีขาแบบเรียบ	ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีขาแบบหยาบ
	
ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีดำแบบเรียบ	ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีดำแบบหยาบ
	

จากตารางที่ 4.6 จะพบว่าลักษณะพื้นผิวของเนื้อสีอะคริลิกบนกระดาษ 100 ปอนด์แบบเรียบ ทั้งสีขาและสีดำ จะพบว่ารูปมีลักษณะเป็นเส้นคล้ายกับลักษณะของพื้นผิวของเนื้อสีในภาพถ่าย ตัวอย่าง แต่บนกระดาษ 100 ปอนด์สีขาแบบหยาบจะพบว่า มีลักษณะเป็นคราบแต่ยังสามารถสังเกตเห็นลักษณะที่มีความเป็นเส้นเล็กน้อย ส่วนกระดาษสีดำแบบหยาบจะไม่พบลักษณะที่เป็นเส้นแต่กลับพบว่า มีลักษณะคล้ายกับพื้นผิวของกระดาษ

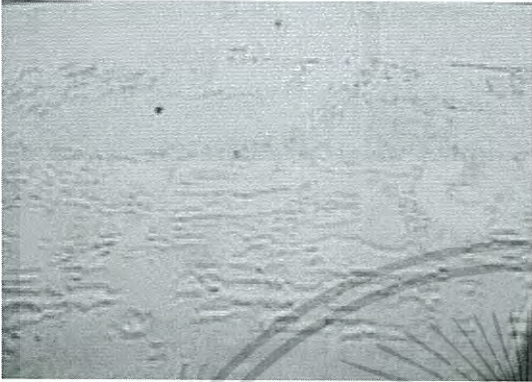
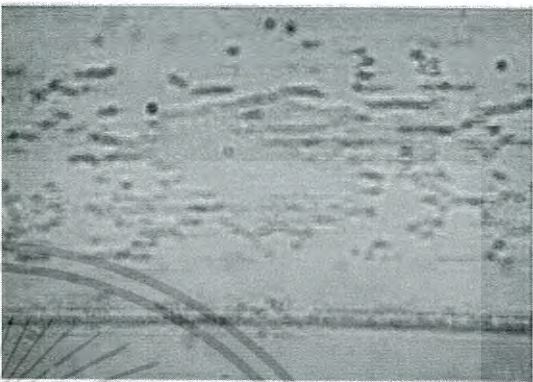


ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อสีเทียนบนกระดาษทั้ง 4 ลักษณะ โดยใช้ตัวอย่างสีแดง

ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีขาวแบบเรียบ	ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีขาวแบบหยาบ
	
ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีดำแบบเรียบ	ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีดำแบบหยาบ
	

จากตารางที่ 4.7 จะพบว่าลักษณะพื้นผิวของเนื้อสีอะคริลิกบนกระดาษ 100 ปอนด์แบบเรียบและหยาบทั้งสีขาวและสีดำจะมีลักษณะคล้ายกันคือ มีลักษณะเป็นคราบแต่ภาพบนกระดาษ 100 ปอนด์สีดำแบบเรียบจะพบว่าคราบมีขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อสีซอล์กบนกระดาษทั้ง 4 ลักษณะ โดยใช้ตัวอย่างสีแดง

ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีขาแบบเรียบ	ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีขาแบบหยาบ
	
ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีดำแบบเรียบ	ภาพ Reconstruction ของกระดาษ 100 ปอนด์สีดำแบบหยาบ
	

จากตารางที่ 4.8 จะพบว่าลักษณะพื้นผิวของเนื้อสีซอล์กบนกระดาษ 100 ปอนด์แบบหยาบทั้งสีขาและสีดำจะมีลักษณะคล้ายกันคือ มีลักษณะเป็นคราบขนาดใหญ่ แต่ภาพบนกระดาษ 100 ปอนด์สีขาแบบเรียบจะพบว่าเป็นคราบขนาดเล็ก ส่วนภาพบนกระดาษ 100 ปอนด์สีดำแบบเรียบจะพบว่ามี ความขรุขระและเป็นคราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความแตกต่างชนิดของสีบนภาพวาดโดยใช้เทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ภาพวาดที่จำลองขึ้นมาจากระตาช 100 ปอนด์ 4 แบบ คือ กระตาช 100 ปอนด์สีขาวแบบเรียบ กระตาช 100 ปอนด์สีขาวแบบหยาบ กระตาช 100 ปอนด์สีดำแบบเรียบ และ กระตาช 100 ปอนด์สีดำแบบหยาบ โดยเราจะใช้ตัวอย่างของสี 4 ประเภท คือ สีไม้ สีอะคริลิก สีเทียน และสีชอล์ก จากนั้นจะใช้เทคนิคการถ่ายภาพโดยใช้เทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟีกับตัวอย่างแต่ละชนิด โดยระบบทางแสงที่ใช้ในการถ่ายภาพคือ Reflected in-line digital holography จะสังเกตเห็นว่าภาพที่ได้มีความไม่ชัดเจน เราจึงได้นำภาพที่ได้นั้นมาทำการ Reconstruction เพื่อให้ภาพมีความคมชัดขึ้น และจากผลการทดลองพบว่าสีไม้ พื้นผิวของเนื้อสีมีลักษณะเป็นจุดเล็กๆ และมีความขรุขระ สีอะคริลิก พื้นผิวของเนื้อสีมีลักษณะเป็นเส้น คล้ายกับลักษณะของเส้นพู่กัน สีเทียน พื้นผิวของเนื้อสีมีลักษณะเป็นคราบ รูปร่างไม่แน่นอน และสีชอล์ก จะพบว่าพื้นผิวของเนื้อสีมีลักษณะเป็นคราบคล้ายกับสีเทียนแต่มีความเรียบมากกว่า และจะพบว่าแม่สีทั้งสามสีที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีผลต่อลักษณะของพื้นผิวกระตาชที่ใช้ในการทดลอง

การเปรียบเทียบความแตกต่างของกระตาช 100 ปอนด์แบบเรียบและแบบหยาบ นั้นจะสังเกตเห็นได้ว่ากระตาช 100 ปอนด์สีขาวและสีดำแบบเรียบจะสามารถมองเห็นลักษณะของเนื้อสีได้ชัดเจนตามลักษณะของสีที่ถูกระบายลงบนกระตาช ส่วนกระตาช 100 ปอนด์สีขาวและสีดำแบบหยาบจะมองเห็นเป็นรอยกระตาชมากกว่าเนื้อสีซึ่งจะมีลักษณะเป็นคราบตามลักษณะพื้นผิวของของกระตาช

สำหรับในส่วนของการพัฒนาโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เพื่อมาใช้งานทางการประมวลผลของภาพหรือ Reconstruction สังเกตเห็นว่าภาพที่ได้นั้นยังไม่มีคมชัดและความมืดสว่างของภาพที่ได้ยังไม่ชัดเจนเท่าที่ควร จำเป็นต้องพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลภาพสำหรับการทดลองต่อไปในอนาคต ซึ่งอาจพัฒนาโดยการเขียนฟังก์ชันเพิ่มเติมขึ้นมาได้ก็จะสามารถทำให้การ Reconstruction ของภาพนั้นมีความชัดแจ้งขึ้น นอกจากนี้การจัดระบบทางจำเป็นต้องมีความชำนาญในการใช้อุปกรณ์ทางแสง และในการจัดระบบแสงนั้นต้องใช้พื้นที่มาก หากจะนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่น ๆ ควรลดขนาดของการติดตั้งเครื่องมือเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน และปัญหาที่พบในงานวิจัยคือเกิดปัญหาในเรื่องของการจัดระบบทางแสง เนื่องจากต้องมีการคำนวณมุมตกกระทบของแสงที่ตกกระทบลงบนปริซึมเพื่อให้เกิดการสะท้อนที่ผิวด้านบนของปริซึม และอีกหนึ่งปัญหาที่พบก็คือการที่จะสามารถถ่ายภาพตัวอย่างบนผิวปริซึมได้นั้นเราต้องทำให้เกิดการสัมผัสกันของตัวอย่างและผิวปริซึมในการทำการทดลองโดยในการทดลองจะทำการชุบน้ำให้ตัวอย่างเปียกและใช้อุปกรณ์เครื่องเป่าลมร้อนมาช่วยทำให้ตัวอย่างแห้งติดกับปริซึม โดยวิธีการดังกล่าวจะเป็นการตรวจสอบแบบทำลายตัวอย่าง ซึ่งเป็นปัญหาที่ต้องแก้ไขในอนาคตโดยต้องศึกษาวิธีการที่สามารถตรวจสอบได้โดยไม่ทำลาย

## เอกสารอ้างอิง

- ทวีพล ประกอบแสง, วัสดุพื้ทึม เพ็ชรสันทัด. 2557. การตรวจสอบคุณสมบัติการพิมพ์ของสารเชื่อมผสานที่มีส่วนผสมของกราฟีนและกราฟีนออกไซด์โดยใช้เทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟี. วิทยาศาสตร์บัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 8-13.
- ปรียา อนุพงษ์อองจ. 2015. การแทรกสอด. [Online]. Available : [http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh\\_21.htm](http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_21.htm). เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย. 2559
- ปรียา อนุพงษ์อองจ. 2558. การหักเหของแสง. [Online]. Available : [http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh\\_6.htm](http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_6.htm). เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย. 2559
- แสง. (2016, มีนาคม 23). วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. สืบค้นเมื่อ 14:48, มีนาคม 28, 2016 จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%81%E0%B8%AA%E0%B8%87>
- สี. (2015, กรกฎาคม 29). วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. สืบค้นเมื่อ 23:34, เมษายน 10, 2016 จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%AA%E0%B8%B5>
- โฮโลกราฟี. (2015, พฤศจิกายน 4). วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. สืบค้นเมื่อ 10:35, มีนาคม 22, 2016 จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%AE%E0%B8%AD%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%9F%E0%B8%B5>



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Optical Engineering

OpticalEngineering.SPIEDigitalLibrary.org

## Moisture effect of fingerprint using total internal reflection digital in-line holography

Suwan Plaipichit  
Prathan Buranasiri

**SPIE.**

Downloaded From: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/> on 04/27/2015 Terms of Use: <http://spiedigitallibrary.org/terms>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Moisture effect of fingerprint using total internal reflection digital in-line holography

Suwan Plaipichit and Prathan Buranasiri\*

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Faculty of Science, Department of Physics, Chalongkrung Road, Bangkok 10520, Thailand

**Abstract.** Total internal reflection (TIR) is normally important in an optical fingerprint scanner. The moisture effect in a fingerprint scanner based on TIR has been explored by using digital in-line holography (DIH). First, the reflection and the transmission technique set up for DIH have been explored by using a positive resolution test target with a line width of 200  $\mu\text{m}$ . From experimental results, the reconstructed image of the reflected DIH is perfect as the image of the transmitted DIH. Due to the advantage for opaque object imaging of the reflected DIH, reflected DIH based on TIR has been selected to investigate the moisture effect of the fingerprint. Fingerprints with moistures of 39%, 54%, 69%, and a soaked finger have been observed. A laser diode of 635 nm and a complementary metal oxide semiconductor camera were used in all of the experimental setups in this research. The reconstructed image of the fingerprint gives a sharper image than the directed recorded image. The fingerprint with higher moisture provided a darker fingerprint image, while the optimum amount of moisture that gives the most complete finger pattern is 54%. © 2014 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) [DOI: 10.1117/1.OE.53.11.112315]

Keywords: digital in-line holography; fingerprint; skin moisture; low coherence.

Paper 140193SS received Feb. 1, 2014; revised manuscript received Jun. 3, 2014; accepted for publication Jun. 5, 2014; published online Jun. 25, 2014.

## 1 Introduction

Holography, the imaging technique of a recorded and reconstructed image in three dimensions was invented by Gabor.<sup>1</sup> The recording process requires the interference of the object beam and reference beam on photographic film. Then it uses the reading beam shining on the photographic film to see the image in three dimensions. This process is called reconstruction. Due to the conventional holography waste photographic film, digital holography was developed. The image, which consists of the phase and amplitude, is recorded on electronic devices such as charge couple devices (CCDs) or complementary metal oxide semiconductors (CMOS). The three-dimensional image is numerically reconstructed using a computer.<sup>2</sup> Digital holography would be typically classified into two types, i.e., off-axis and in-line configurations. The digital in-line holography (DIH) is the simplest configuration with which to record a hologram. There are various configurations of DIH, such as transmission, reflection, and total internal reflection (TIR). Transmitted DIH (TDIH) configuration could record and reconstruct the interferogram, which is placed at different plane.<sup>3</sup> An example of this is particle characterization.<sup>4-7</sup> Since TDIH may not be used in investigation of an opaque object, reflected DIH (RDIH) has been developed. As with normal holography, RDIH needs the interference of an object beam and a reference beam to complete the recording process. By using the reference-delayed technique, however, the system could record a hologram with only one input beam. In this configuration, a twice-reflected beam from an object, which consists of the phase difference, was interfered and recorded with a CCD camera.<sup>8</sup> By using the technique of TIR holographic microscopy some properties of biology

cells have recently been explored.<sup>9,10</sup> In addition, the basic concept of TIR was widely applied in fingerprint scanner applications.<sup>11,12</sup> The early system, however, provided unsharp patterns. A number of methods have been invented for resolving this problem. For example, the holographic plate which when placed on the prism was used to correct the distortion of the pattern.<sup>13,14</sup> Another example, an asymmetrical aspheric lens, was invented to get better contrast for the fingerprint pattern.<sup>15</sup> Recently, the fingerprint patterns were explored using a digital holography technique based on the angular spectrum method,<sup>16</sup> which is based on the Michelson interferometer. In our previous work, the digital hologram patterns of a fingerprint pattern were obtained by using the reflection from a glass slide.<sup>17</sup> Interference patterns from the top and bottom occurred and were distributed in the recorded images.

However, from our point of view, the imaging technique of fingerprinting still has value for continuing exploration. In this paper, a digital holographic fingerprint scanner based on a combination of RDIH and TIR has been presented. In our configuration, instead of using two input beams as with previous systems, only one input beam is used so the system may be cheaper and more compact. The reflected field, which is diffracted at the edge of the fingerprint pattern, is interfered with the undiffracted field. We also show that the reconstruction of RDIH provide the same results as TDIH in Sec. 4. By using our technique, the results of various moistures on a fingerprint have been explored and shown.

## 2 Imaging Method

### 2.1 Transmitted Digital In-Line Holography

The experimental configuration of TDIH that was used in this paper is shown in Fig. 1(a). An expanded beam

\*Address all correspondence to: Prathan Buranasiri, E-mail: kbpratha@kmitl.ac.th

propagates through the positive pattern test target. Then, it is separated into two beams, i.e., object and reference beams, by the thin opaque line of the target. The object beam was diffracted by the object pattern; the other one is a reference beam, since it is just transmitted through the target without any distortion. The holographic interference pattern is obtained by the superposition of these two beams and recorded on a CMOS camera. The holograms from data sets that are presented in this paper are reconstructed using the numerical method based on Huygens–Fresnel filtering described by Fugal et al.<sup>18</sup> Suppose  $[h(x, y)]$  represents the two-dimensional (2-D) diffracted optical field which propagated along the  $z$  direction to the CMOS plane. It can be expressed by using the Huygens–Fresnel principle<sup>19</sup> as the following

$$h(x, y) = \frac{z}{j\lambda} \iint O(\xi, \eta) \frac{\exp(jk\rho)}{\rho^2} d\xi d\eta, \tag{1}$$

where  $O(\xi, \eta)$  is a 2-D optical field at the object plane,  $\rho = [z^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]^{1/2}$  is the distance from any point on the object plane  $(\xi, \eta)$  to the CMOS plane  $(x, y)$ ,  $z$  is the

propagation distance, and  $k = 2\pi/\lambda$  is the wavenumber of the light. By using the convolution method, the hologram function can be rewritten as

$$h(x, y) = F^{-1}\{F[O(\xi, \eta)] \cdot F[g(\xi, \eta, x, y)]\}, \tag{2}$$

where the impulse response  $g(\xi, \eta, x, y)$  is given by

$$g(\xi, \eta, x, y) = \frac{z \exp[jk\rho]}{j\lambda \rho^2}, \tag{3}$$

The optical field at the image plane  $(\xi', \eta')$  can be reconstructed by using the inverse Fourier transform of the filtered Huygens–Fresnel as

$$R(\xi', \eta') = F^{-1}\{F[h(x, y)] \cdot F[g(\xi, \eta, x, y)]\}. \tag{4}$$

### 2.2 Reflected Digital In-Line Holography

The concept of RDIH is illustrated in Fig. 1(b). The expanded beam is incident on the target, which has a thin opaque line, and then it reflects back because of the polished surface. There are two different beams reflected at this surface. The first one reflects with diffraction at the edge of the opaque pattern; the other one reflects on the clear surface of the target without any diffraction. The interference of these two beams is recorded on a CMOS camera and then is numerically reconstructed in the same way as in basic DIH. The results have been shown in Sec. 4

### 2.3 Total Internal Reflection for Reflected Digital In-Line Holography

The concept of TIR has been widely used in fingerprint scanners. Figure 2 depicts the geometry of TIR, which is used to image the fingerprint pattern. TIR has occurred when the incident angle is larger than the critical angle between the prism and air boundary. There are two areas from which you can obtain the pattern in fingerprint imaging based on TIR. Here, the light reflects with TIR at the valley of the fingerprint providing, a bright pattern, and scatters at the ridge of the fingerprint, providing a dark pattern. Then they are interfered on the CMOS plane. This principle

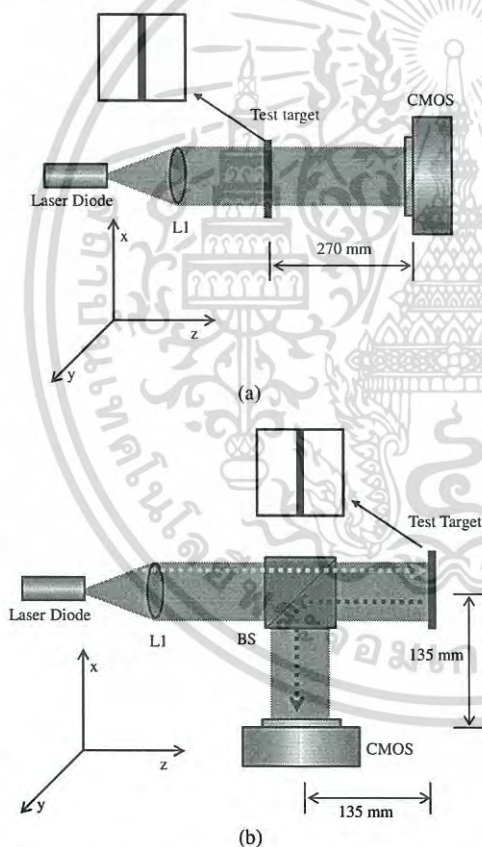


Fig. 1 Experimental setup for recording a digital in-line holography (DIH) and reflected DIH (RDIH) of resolution test target: (a) Transmission DIH (TDIH) and (b) RDIH.

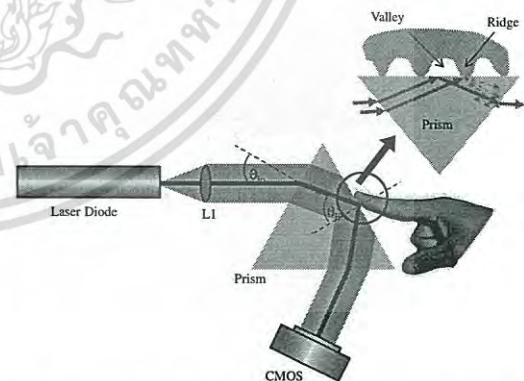


Fig. 2 The schematic of digital holographic fingerprint scanner using total internal reflection.

will be applied to RDIH for imaging a fingerprint in the next section. Here we call this method total internal reflection DIH (TIRDIH).

### 3 Experimental Setup

First, our experimental setup has been done in the cases of both TDIH and RDIH as described in Sec. 2, which shows that the RDIH can be used instead of the TDIH in the case of an opaque object as described in Sec. 1. In our experiment, the distance between the camera and test target is 270 mm in both cases. Then, the RDIH has been applied to fingerprint imaging using the TIRDIH as described in Sec. 2.3. The experimental setup TIRDIH has been shown in Fig. 2. In the setup, a laser diode (LDM115G/633/1, 1 mW, 635 nm) was used as the light source. The expanded beam from the laser diode was collimated by lens  $L_1$  ( $f_1 = 175$  mm and

25.4 mm diameter) and then incident on an equilateral glass prism (N-BK7 with a refractive index:  $n = 1.52$ ) with angle  $\theta_{io}$ . The refracted beam transmitted through the prism and then reflected at the boundary between the prism and air with angle  $\theta_{ii}$ . In the experiment, the TIR between the boundary of the prism and air was obtained when  $\theta_{io}$  was equal to 29.0 deg, (i.e.,  $\theta_{ii} = 41.14$ ). Then, the interference patterns of various moistures of fingerprints were recorded with a CMOS camera (Canon EOS 350D, Japan,  $3456 \times 2304$  pixels,  $6.41\text{-}\mu\text{m}$  pixel pitch).

Four samples of different moistures of fingerprints, i.e., 39%, 54%, 69% and wet fingerprint, were used in the experiment. Since the maximum measurable range of the skin moisture checker (Scalar model MY808s) is only about 70%, we have used 69% of moisture as the highest one to avoid the saturated value of the instrument. Each reconstructed image is shown and compared in Sec. 4.

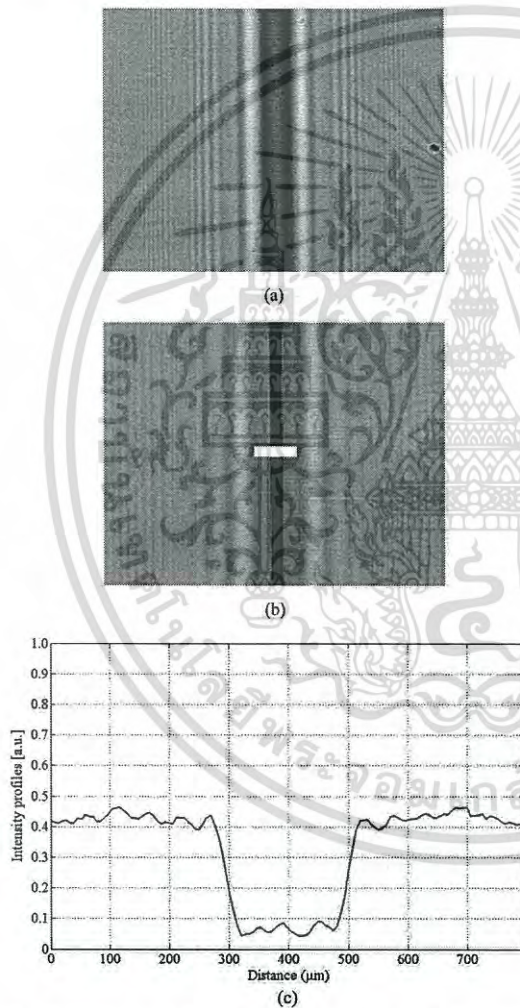


Fig. 3 Hologram and its profile from TDIH: (a) recorded hologram, (b) reconstructed hologram, and (c) transverse intensity profile of (b).

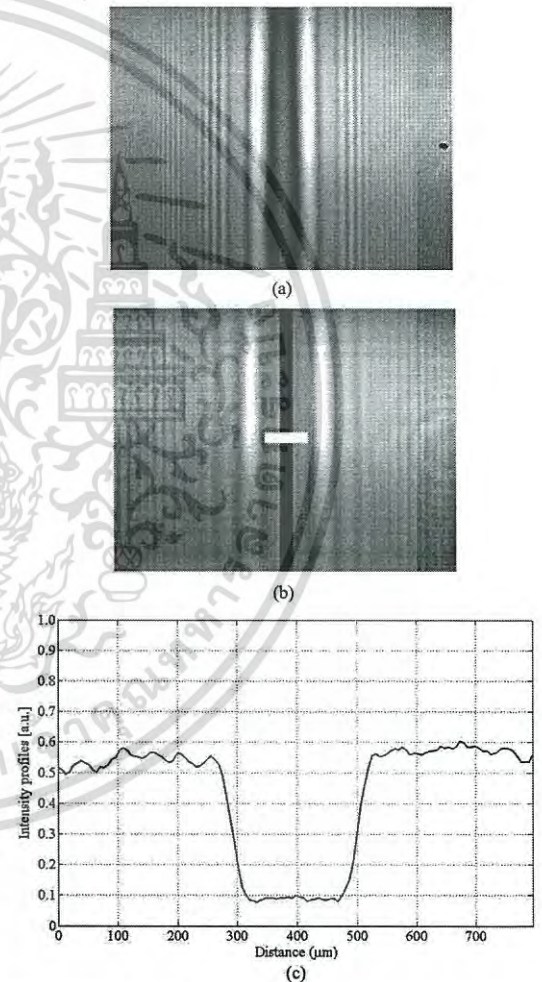


Fig. 4 Hologram and its profile from RDIH: (a) recorded hologram, (b) reconstructed hologram, and (c) transverse intensity profile of (b).

## 4 Experimental Results

### 4.1 Test Target Hologram

In this section, the experimental results of the TDIH and the RDIH have been shown. Figure 3(a) shows the transmitted hologram patterns, which were recorded in the experimental setup from Fig. 1(a). The image recorded on the CMOS plane appeared as a defocused pattern. The numerical reconstruction of Fig. 3(a) at the plane of  $z = 270$  mm from the CMOS is shown in Fig. 3(b). At this plane, the pattern of the test target was focused. The transverse intensity profile of Fig. 3(b) is illustrated in Fig. 3(c). The cross-section plots have been found corresponding to the standard value of the width of the resolution of the test target ( $200 \mu\text{m}$ ).

Figures 4(a)–4(c) represent the recorded hologram pattern, reconstructed hologram pattern, and the transverse intensity profile of the RDIH in Fig. 1(b). From our RDIH results, the image can be reconstructed as in the case of TDIH. The pattern of these test target is focused at the plane of  $z = 270$  mm as in the TDIH case. Moreover, the pattern width is the same as that of the TDIH case.

### 4.2 Fingerprint Hologram

The hologram pattern of a fingerprint with a moisture of 54.0% and its best numerically reconstructed image are shown in Figs. 5(a) and 5(c), respectively. The reconstructed image was a better profile than the recorded image. Figures 5(b)–5(e) represent the best reconstructed fingerprint holograms of different moistures. From our observation, the



Fig. 5 Recorded hologram: (a) with moisture of 54.0%. Reconstructed holograms: (b) with moisture of 39.0%, (c) with moisture of 54.0%, (d) with moisture of 69.0%, and (e) wet fingerprint.

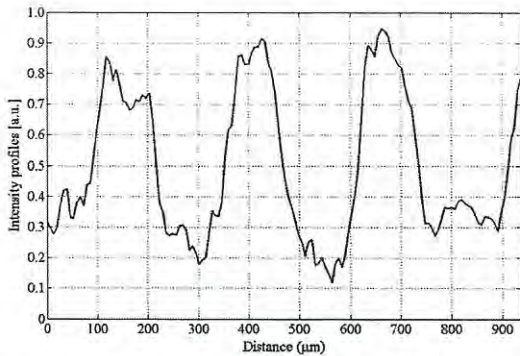


Fig. 6 Transverse intensity profiles of fingerprint with moisture of 54.0%.

image of the fingerprint with a moisture of 39.0% [Fig. 5(b)] was incomplete because the ridge of the fingerprint was not completely close to the glass prism. When the fingerprint had enough moisture for coupling the fingerprint to the prism, the fingerprint pattern image would be perfect as illustrated in Fig. 5(c). We observed the ridge of the fingerprint was the dark pattern which is obtained from the scattering of light, and the valley of the fingerprint was the bright pattern which is obtained from the TIR of the light inside the prism, as described in Sec. 2. However, the fingerprint with too much moisture may give a worse image pattern as shown in Fig. 5(d). Since the gaps between fingerprint valleys and the prism are full of moisture the TIR cannot occur. However, the ridge patterns still occurred while the valley patterns were darker than the image of the fingerprint with a moisture of 54.0%. The wet fingerprint gives the worst pattern because there is a lot of water between the fingerprint and the prism. In this case, the ridge and valley of the fingerprint cannot be distinguished, as is presented in Fig. 5(e). Moreover, the intensity of the image will be decreased when the moisture of the fingerprint increases. The transverse intensity profile of the fingerprint pattern from Fig. 5(c) is shown in Fig. 6. The width of the fingerprint had been measured and it is about 150  $\mu\text{m}$ .

## 5 Conclusion

In this study, we have proposed and demonstrated the moisture effect on fingerprint recording by the RDIH based on TIR. By using the interference of diffracted and undiffracted beams from the target in the recording process, only one input beam has been used in our scheme. So the setup is more compact than the previous systems. The reconstructed images of the RDIH also found that they are the same as the result images from the TDIH. The result images of different moistures for fingers have been shown and it was found that they look different. Perfect fingerprint patterns have been observed when the moisture percentages of fingerprint are in the range of 50% to 60%, which are measured with a skin moisture checker.

## Acknowledgments

This research has been supported reconstructed tool from Physics Department, Michigan Technological University.

## References

1. D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature* **161**, 777–778 (1948).
2. U. Schnars and W. Jüptner, "Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction," *Appl. Opt.* **33**(2), 179–181 (1994).
3. G. Situ et al., "Generalized in-line digital holographic technique based on intensity measurements at two different planes," *Appl. Opt.* **47**(5), 711–717 (2008).
4. W. Xu et al., "Digital in-line holography of microspheres," *Appl. Opt.* **41**(25), 5367–5375 (2002).
5. G. Pan and H. Meng, "Digital holography of particle fields: reconstruction by use of complex amplitude," *Appl. Opt.* **42**(5), 827–833 (2003).
6. F. Soulez et al., "Inverse-problem approach for particle digital holography: accurate location based on local optimization," *J. Opt. Soc. Am. A* **24**(4), 1164–1171 (2007).
7. Y. Yang et al., "Integrated gray-level gradient method applied for the extraction of three-dimensional velocity fields of sprays in in-line digital holography," *Appl. Opt.* **51**(2), 255–267 (2012).
8. A. S. G. Singh et al., "In-line reference-delayed digital holography using a low-coherence light source," *Opt. Lett.* **37**(13), 2631–2633 (2012).
9. W. M. Ash and M. K. Kim, "Digital holography of total internal reflection," *Opt. Express* **16**(13), 9811–9820 (2008).
10. W. M. Ash, L. Krzewina, and M. K. Kim, "Quantitative imaging of cellular adhesion by total internal reflection holographic microscopy," *Appl. Opt.* **48**(34), H144–H152 (2009).
11. S. Sumriddetchkajorn and S. Phojaruenchanachai, "Geometrical optics analysis for reduction of trapezoidal image distortion in a single prism-based optical fingerprint scanner," *Opt. Laser. Eng.* **45**(1), 229–239 (2007).
12. M. Kawakoe and A. Tojo, "Fingerprint pattern classification," *Pattern Recognit.* **17**(3), 295–303 (1984).
13. R. D. Bahuguna and T. Corboline, "TECHNICAL NOTE Prism fingerprint sensor that uses a holographic optical element," *Appl. Opt.* **35**(26), 5242–5245 (1996).
14. Y. Jie and Z. Jihong, "Fingerprint sensor using a polymer dispersed liquid crystal holographic lens," *Appl. Opt.* **49**(25), 4763–4766 (2010).
15. H.-F. Lin et al., "Optical design for enhanced prism type fingerprint scanner image contrast with asymmetrical aspheric lens," *Optik* **121**(24), 2250–2253 (2010).
16. M. C. Potcoava and M. K. Kim, "Fingerprint biometry applications of digital holography and low-coherence interferography," *Appl. Opt.* **48**(34), H9–H15 (2009).
17. S. Plaipichit et al., "Fingerprint verification by using low coherence digital holography," *Proc. SPIE* **8883**, 888315 (2013).
18. J. P. Fugal, T. J. Schulz, and R. A. Shaw, "Practical methods for automated reconstruction and characterization of particles in digital inline holograms," *Meas. Sci. Technol.* **20**(7), 075501 (2009).
19. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, Chapter 4, McGraw Hill, Singapore (1996).

Suwan Plaipichit is a PhD candidate at the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. He received his BS and MS degrees in applied physics from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang in 2008 and 2010, respectively. His current research interests include nonlinear optics, photorefractive effect, and digital holography. He is a member of SPIE.

Prathan Buranasiri received his BS degree in physics from Ramkhamhaeng University, Thailand. Then he went to the United States to pursue his graduate degree and received his MSc in physics and a PhD in electrical engineering from the University of Alabama in Huntsville and the University of Dayton, respectively. He is currently an instructor at the Department of Physics of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. During his Ms and PhD degree work, he specialized in the nonlinear photorefractive effect. His recent research interests include photonic bandgap structure and their applications, optical properties in nanocarbon materials, photorefractive materials, and fiber optic communication system. He is a member of SPIE.

# Digital holography of total internal reflection

William M. Ash III\* and Myung K. Kim

Digital Holography and Microscopy Laboratory, Dept. of Physics, University of South Florida, Tampa, FL 33620  
Corresponding author: [wash@mail.usf.edu](mailto:wash@mail.usf.edu)

**Abstract:** We introduce a new microscopy technique termed total internal reflection holographic microscopy (TIRHM). Quantitative phase microscopy by digital holography is used to image the phase profile of light in total internal reflection, which is modulated by the materials present on or near the surface of internal reflection. The imaging characteristics are theoretically modeled and imaging capabilities are experimentally demonstrated.

©2008 Optical Society of America

OCIS codes: (090.1995) Digital holography; (180.3170) Interference microscopy; (170.0180) Microscopy; (090.5694) Real-time holography; (110.0180) Microscopy; (170.1530) Cell Analysis; (260.6970) Total Internal Reflection

## References and links

1. W. Jueptner and U. Schnars, *Digital Holography*, (Springer Verlag, 2004).
2. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed (New York, McGraw-Hill, 1996).
3. U. Schnars and W.P. Jueptner, "Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction," *Appl. Opt.* **33**, 179-81 (1994).
4. S. Grilli, P. Ferraro, S. De Nicola, A. Finizio, G. Pierattini and R. Meucci, "Whole optical wavefields reconstruction by digital holography," *Opt. Express* **9**, 294-302 (2001).
5. I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.* **22**, 1268 (1997).
6. T.-C. Poon, "Three-dimensional image processing and optical scanning holography," *Adv. Imaging and Electron Phys.* **126**, 329-350 (2003).
7. E. Cuche, F. Bevilacqua and C. Depeursinge, "Digital holography for quantitative phase-contrast imaging," *Opt. Lett.* **24**, 291 (1999).
8. F. Dubois, C. Schockaert, N. Callens, and C. Yourassowsky, "Focus plane detection criteria in digital holography microscopy by amplitude analysis," *Opt. Express* **14**, 5895-5908 (2006).
9. P. Ferraro, S. De Nicola, A. Finizio, G. Coppola, S. Grilli, C. Magro and G. Pierattini, "Compensation of the inherent wave front curvature in digital holographic coherent microscopy for quantitative phase-contrast imaging," *Appl. Opt.* **42**, 1938-46 (2003).
10. M. L. Xu, X. Peng, J. Miao, and A. Asundi, "Studies of digital microscopic holography with applications to microstructure testing," *Appl. Opt.* **40**, 5046-5051 (2001).
11. G. Pedrini and H. J. Tiziani, "Quantitative evaluation of two-dimensional dynamic deformations using digital holography," *Opt. Laser Technol.* **29**, 249-256 (1997).
12. W. Xu, M. H. Jericho, I. A. Meinertzhagen, and H. J. Kreuzer, "Digital in-line holography for biological applications," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **98**, 11301-05 (2001).
13. K. J. Chalut, W. J. Brown, and A. Wax, "Quantitative phase microscopy with asynchronous digital holography," *Opt. Express* **15**, 3047-3052 (2007).
14. D. Carl, B. Kemper, G. Wernicke, and G. von Bally, "Parameter-optimized digital holographic microscope for high-resolution living-cell analysis," *Appl. Opt.* **43**, 6536-6544 (2004).
15. K. Jeong, J. J. Turek, and D. D. Nolte, "Fourier-domain digital holographic optical coherence imaging of living tissue," *Appl. Opt.* **46**, 4999-5008 (2007).
16. M. K. Kim, "Tomographic three-dimensional imaging of a biological specimen using wavelength-scanning digital interference holography," *Opt. Express* **7**, 305-10 (2000).
17. L. Yu and M. K. Kim, "Wavelength-scanning digital interference holography for tomographic 3D imaging using the angular spectrum method," *Opt. Lett.* **30**, 2092-2094 (2005).
18. J. Gass, A. Dakoff and M. K. Kim, "Phase imaging without 2-pi ambiguity by multiwavelength digital holography," *Opt. Lett.* **28**, 1141-3 (2003).
19. C. J. Mann, L. Yu, C. M. Lo, and M. K. Kim, "High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography," *Opt. Express* **13**, 8693-8698 (2005).
20. C. Mann, L. Yu, and M. K. Kim, "Movies of cellular and sub-cellular motion by digital holographic microscopy," *Biomed. Eng. Online*, **5**, 21 (2006).

#96189 - \$15.00 USD  
(C) 2008 OSA

Received 13 May 2008; revised 9 Jun 2008; accepted 15 Jun 2008; published 19 Jun 2008  
23 June 2008 / Vol. 16, No. 13 / OPTICS EXPRESS 9811

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21. D. Axelrod, "Cell-substrate contacts illuminated by total internal reflection fluorescence," *J Cell Biol* **89**, 141-145 (1981).
22. D. Axelrod, N. L. Thompson, and T. P. Burghardt, "Total internal reflection fluorescent microscopy," *J Microsc* **129**, 19-28 (1983).
23. A. S. G. Curtis, "The mechanism of adhesion of cells to glass – a study by interference reflection microscopy," *J Cell Biol.* **20**, 199-215 (1964).
24. H. Verschueren, "Interference reflection microscopy in cell biology: methodology and applications," *J Cell Sci.* **75**, 279-301 (1985).
25. W. M. Ash III and M. K. Kim, "A demonstration of total internal reflection holographic microscopy for the study of cellular motion," in *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, Opt. Soc. Am. Topical Meeting (St. Petersburg, FL, March 2008) Technical Digest.
26. S. De Nicola, A. Finizio, G. Pierattini, P. Ferraro, and D. Alfieri, "Angular spectrum method with correction of anamorphism for numerical reconstruction of digital holograms on tilted planes," *Opt. Express* **13**, 9935-9940 (2005).

## 1. Introduction

In digital holography [1], the holographic interference pattern is optically generated by the superposition of object and reference waves. But, instead of a photographic plate, the hologram is digitally sampled by a CCD camera and transferred to a computer as an array of numbers. The propagation of optical field is completely and accurately described by diffraction theory, which allows for numerical reconstruction of the image as an array of complex numbers representing the amplitude and phase of the optical field [2]. Digital holography offers a number of important advantages such as the ability to acquire images rapidly, the availability of both amplitude and phase information of the optical field, and versatility of the image processing techniques that can be applied to the complex field data. Indeed, digital holography by numerical diffraction of optical fields allows for imaging and image processing techniques that are not feasible in real space holography. Schnars and Jueptner, in 1994, were the first to use a CCD camera connected to a computer as the input, in what is now referred to as digital holography [3]. Since then, developments of digital holographic techniques and applications have been gaining pace ever more rapidly. A number of different methods have been considered for numerical reconstruction including the Fresnel transform, the Huygens convolution, and angular spectrum analysis [4]. Various useful and special techniques have been developed to enhance the capabilities and to extend the range of applications. Phase-shifting digital holography allows the elimination of zero-order and twin-image components even in an on-axis arrangement [5]. Optical scanning holography can generate holographic images of fluorescence [6]. Application of digital holography in microscopy is especially important, because of the very narrow depth of focus of high-magnification systems [7]. Numerical focusing of holographic images can be accomplished from a single hologram [8]. Direct access to the phase information facilitates numerical correction of various aberrations of the optical system, such as field curvature and anamorphism [9]. Digital holography has been particularly useful in metrology, deformation measurement, particle analysis, and vibrational analysis [10,11]. Applications of digital holography for biological microscopy are being actively pursued [12-14]. Low-coherence digital holography allows tomographic imaging [15]. Our laboratory has developed digital interference holography for optical tomographic imaging [16,17] as well as multiwavelength phase contrast digital holography for high resolution microscopy [18-20].

In 1981, D. Axelrod [21, 22] demonstrated total internal reflection fluorescence microscopy (TIRFM) to be an effective technique to study cell-substrate contact. When light is incident from inside of a higher-index medium  $n_1$  into a lower-index one  $n_2$ , with the angle of incidence greater than the critical angle  $\theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1)$ , all of the incident light is reflected back to the first medium. There is no propagating field in the second medium, except for the evanescent wave, whose amplitude decays exponentially over a distance of a fraction of a wavelength. Although the evanescent field is non-propagating, it can be made to give off propagating, and therefore detectable, radiation through a number of processes: i) If another

$n_2 / n_1$  interface is brought close to the first  $n_1 / n_2$  interface, then part of the evanescent wave couples into the second  $n_1$  medium and propagates, a process known as frustrated TIR (fTIR). ii) Inhomogeneity in the index  $n_2$  of the second medium can cause scattering of the evanescent field. iii) Suitable dye molecules placed in the evanescent field can absorb energy from the field and give off fluorescence. The process i) is the basis of the near-field scanning optical microscopy, while the process ii) can be used for TIR microscopy of unstained samples and iii) is the TIRFM. In cellular biology, there are many compelling questions involving processes that take place at the cell surface or plasma membrane and it has long been recognized that TIR microscopy can be a powerful tool in answering such questions. Recent technical advances have greatly facilitated a wider range of applications of TIR microscopy. TIRFM imagery reveals localization of fusion protein in cell focal adhesions at the substrate interface in dramatic contrast to the blur produced by out-of-plane fluorescence in the epi-illumination image. Information on the morphology of the cellular membrane surface, however, is largely absent in TIRFM. On the other hand, in interference reflection microscopy (IRM), light waves reflected from two surfaces of the cell-substrate interface produces interference fringes, thus allowing estimation of the interface thickness profile [23,24]. However, with IRM the interference image of the interface is usually complicated by the reflection image of the cell body and its contents, thus allowing only a qualitative interpretation of the surface profile. Confocal adaptation of IRM can reduce the spurious reflection signal, but raster scanning of such a system imposes significant speed limitations.

In this paper, quantitative phase microscopy by digital holography is applied in the imaging of phase profile of light in total internal reflection [25]. The technique, termed total internal reflection holographic microscopy (TIRHM), is based on the realization that the presence of materials on the interface modulates the phase profile of light in total internal reflection. TIRHM imaging makes use of the ‘total’ internal reflection, meaning that essentially all of the input photons participate in the formation of the image signals, and therefore the input optical power can be kept at minimal level. One can obtain phase images of prism-cell interface with an optical thickness resolution of a few nanometers. We have demonstrated these imaging principles of TIRHM using model objects of liquid droplets and spherical surface of known material and shape, and the results indicate distinct capabilities and potential strengths in biomedical cellular microscopy and other applications.

## 2. Theory

Consider reflection of light, of vacuum wavelength  $\lambda_0$ , across a boundary between two dielectric media with indices  $n_1$  and  $n_2$ . The reflection coefficients are given by the familiar Fresnel equations:

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}; \quad r_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (1)$$

for the s-polarization ( $r_{\perp}$ ) and the p-polarization ( $r_{\parallel}$ ), respectively. For internal reflection,  $n_1 > n_2$ , if the angle of incidence  $\theta_1$  is larger than the critical angle  $\theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1)$ , then the reflectance  $R = |r|^2$  becomes unity in total internal reflection (TIR) and  $\cos \theta_2$  is imaginary. Defining

$$h_2 = n_2 \cos \theta_2 = i\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2} = i\eta_2, \quad (2)$$

the reflection coefficients become complex:

$$r_{\perp} = \exp(-2i\varphi_{\perp}); \quad \varphi_{\perp} = \tan^{-1} \frac{\eta_2}{n_1 \cos \theta_1} = \tan^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2}}{n_1 \cos \theta_1} \quad (3)$$

$$r_{\parallel} = \exp(-2i\varphi_{\parallel}); \quad \varphi_{\parallel} = \tan^{-1} \frac{n_1 \eta_2}{n_2^2 \cos \theta_1} = \tan^{-1} \frac{n_1 \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2}}{n_2^2 \cos \theta_1} \quad (4)$$

There is no propagating wave in transmission, but a thin layer of evanescent wave exists that decays exponentially,  $E_t \propto \exp(-k_0 \eta_2 z)$ , where  $k_0 = 2\pi / \lambda_0$  and  $z$  is the distance from the interface.

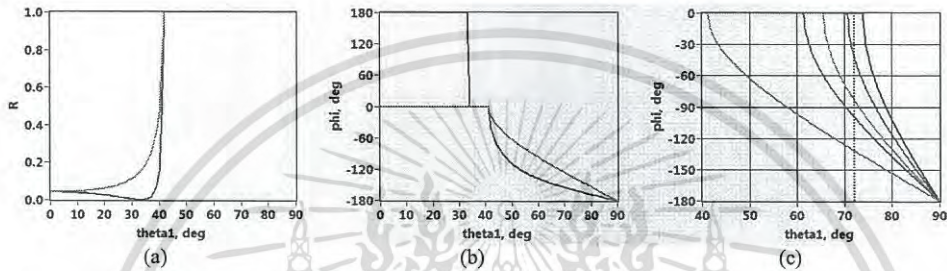


Fig. 1. (a). Reflectance  $R$  and (b) reflection phase,  $\varphi$  ( $\phi$  in text) vs. angle of incidence,  $\theta_1$  ( $\theta$  in text) for the relative index,  $n_1/n_2 = 1.517$ . [red: s-polarization; blue: p-polarization] (c) Reflection phase of s-polarization vs. angle of incidence for various relative indices:  $n_1 = 1.517$ ;  $n_2 = 1.000$  (red), 1.333 (blue), 1.382 (green), 1.432 (purple), 1.458 (black).

Figure 1(a) shows the reflectance  $R = |r|^2$  vs. angle of incidence  $\theta_1$ , while Fig. 1(b) is the reflection phase  $\varphi$  vs.  $\theta_1$  for the relative index  $n_1/n_2 = 1.517$ . One notes the Brewster angle at  $33^\circ$  and the critical angle at  $41^\circ$ . While the reflection phase is only zero or  $180^\circ$  for non-TIR Fresnel reflection, beyond the critical angle the reflection phase decreases continuously and monotonically from 0 to  $-180^\circ$  for both cases of polarization. Figure 1(c) illustrates the reflection phase of s-polarization for a few values of the relative index, with  $n_1 = 1.517$  and  $n_2 = 1.000, 1.333, 1.382, 1.432,$  and  $1.458$ . Here the  $n_1$  value represents the BK7 glass prism and the  $n_2$  values are for air, water, 50/50 mixture of water and ethylene glycol, pure ethylene glycol, and fused quartz, respectively, which are the materials used in the measurements below. For a given angle of incidence, for example  $72^\circ$  shown as dotted line in Fig. 1(c), the phase of TIR-reflected light will vary with  $n_2$  the index of refraction of the second medium. This suggests one possible mode of TIR imaging, where the phase profile of the TIR-reflected light reveals the variation of index of refraction of material in contact with the prism. Another imaging mode makes use of the frustrated TIR (fTIR) that occurs when a third layer of index  $n_3$  is brought close to the interface within the thickness of the evanescent wave. (Here we use the term frustrated TIR in a general sense that includes any disturbance, in amplitude or phase, of TIR by the presence of another interface within the evanescent field.) Referring to the geometry of Fig. 2, light is incident from the  $n_1$  medium and undergoes

reflection at the two interfaces  $n_1/n_2$  and  $n_2/n_3$ . The reflection coefficient, for s-polarization, is found to be

$$r_{\perp} = \left( \frac{E'_1}{E_1} \right)_{\perp} = \frac{(h_1 - h_2)(h_2 + h_3) + (h_1 + h_2)(h_2 - h_3) \exp(2i\varphi_0 h_2)}{(h_1 + h_2)(h_2 + h_3) + (h_1 - h_2)(h_2 - h_3) \exp(2i\varphi_0 h_2)}, \quad (5)$$

where  $h_i = n_i \cos \theta_i = \sqrt{n_i^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}$  and  $\varphi_0 = k_0 z_0$ . For illustration, if we take  $n_1 = 1.517$  (glass),  $n_2 = 1.000$  (air), and  $n_3 = 1.458$  (quartz), then the critical angles for the  $n_1/n_2$  and  $n_1/n_3$  interfaces are  $\theta_{c,12} = 41^\circ$  and  $\theta_{c,13} = 74^\circ$ , respectively.

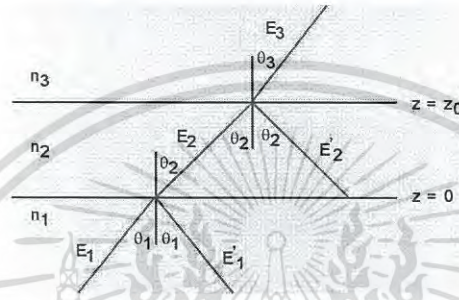


Fig. 2. Geometry of frustrated TIR (fTIR).

The reflectance  $R = |r|^2$  and reflection phase  $\varphi$  are graphed in Figs. 3(a) and 3(b), respectively, as two-dimensional functions of the angle of incidence  $\theta_1$  and the  $n_2$ -layer thickness  $z_0$ . Figure 3(c) is an expanded view of the dotted-box area of Fig. 3(b), showing details of the subtle and rapid variation of phase over a short distance of  $z_0$ . Figures 3(d) and 3(e) are graphs of  $R(z_0)$  and  $\varphi(z_0)$ , respectively, for several values of  $\theta_1$ . Figure 3(f) is an expanded view of the dotted-box area of Fig. 3(e). As indicated in Fig. 3, there are three distinct ranges of  $\theta_1$  for consideration:

**Case I:** When  $\theta_1 < \theta_{c,12}, \theta_{c,13}$ ,  $r$  is real and both the reflectance and reflection phase display the oscillatory characteristics of thin film interference, as shown in Fig. 3 for  $\theta_1 < 41^\circ$ .

**Case II:** When  $\theta_{c,12} < \theta_1 < \theta_{c,13}$ , the  $n_1/n_2$  interface is in TIR ( $h_2 = i\eta_2$  becomes imaginary), but the  $n_1/n_3$  interface is not, and the overall reflection coefficient becomes

$$r_{\perp} = \left( \frac{E'_1}{E_1} \right)_{\perp} = \frac{(h_1 - i\eta_2)(i\eta_2 + h_3) + (h_1 + i\eta_2)(i\eta_2 - h_3) \exp(-2\varphi_0 \eta_2)}{(h_1 + i\eta_2)(i\eta_2 + h_3) + (h_1 - i\eta_2)(i\eta_2 - h_3) \exp(-2\varphi_0 \eta_2)}. \quad (6)$$

This is the conventional narrow definition of fTIR, where the evanescent field couples into the third medium and becomes a propagating field. For sufficiently short  $z_0$ , a fraction of wavelength, the reflectance is substantially reduced and the reflection phase varies monotonically with  $z_0$ , as shown in Fig. 3 for  $41^\circ < \theta_1 < 74^\circ$ . This is the regime where

‘conventional’ TIR imaging methods operate, such as TIR fluorescence microscopy, making use of the amplitude changes in FTIR. Amplitude images can also be obtained using digital holography such that outlines of an object in contact on the surface appear as dark areas against bright background, and the darkness would be a measure of the layer thickness  $z_0$ . **Case III:** It is possible to make use of phase-only changes in FTIR if the angle of incidence is large enough for TIR of both  $n_1/n_2$  and  $n_1/n_3$  interfaces,  $\theta_{c,12}, \theta_{c,13} < \theta_1$ . Then  $h_3 = i\eta_3$  also becomes imaginary and

$$r_{\perp} = \left( \frac{E'_1}{E_1} \right)_{\perp} = \frac{(h_1 - i\eta_2)(\eta_2 + \eta_3) + (h_1 + i\eta_2)(\eta_2 - \eta_3) \exp(-2\phi_0 \eta_2)}{(h_1 + i\eta_2)(\eta_2 + \eta_3) + (h_1 - i\eta_2)(\eta_2 - \eta_3) \exp(-2\phi_0 \eta_2)} \quad (7)$$

Then the reflectance  $R$  is identically unity. But in this case, the phase varies with  $\theta_1$  and  $z_0$ , as seen in Fig. 3 for  $74^\circ < \theta_1$ , where for  $z_0$  less than a fraction of wavelength, the phase varies monotonically and rapidly. This can be used to provide a sensitive measure of the thickness of the  $n_2$ -layer over a range of 100 nm or less.

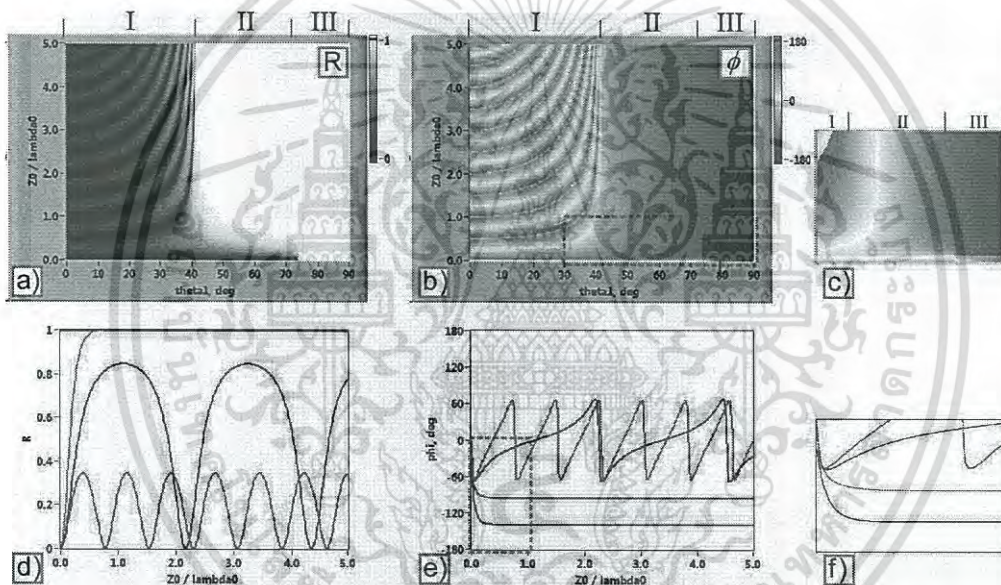


Fig. 3. Reflectance and reflection phase in FTIR, for s-polarization with  $n_1 = 1.517$ ,  $n_2 = 1.000$ , and  $n_3 = 1.458$ . a) Reflectance  $R$  vs. the angle of incidence,  $\theta_1$  ( $\theta$  in text) and the  $n_2$ -layer thickness  $z_0$ . b) Reflection phase,  $\phi$  ( $\phi$  in text) vs.  $\theta_1$  ( $\theta$  in text) and  $z_0$ . c) Expanded view of the dotted-box area of b). d) Cross-sections of a) at  $\theta_1 = 30^\circ$  (red),  $40^\circ$  (blue),  $60^\circ$  (green), and  $75^\circ$  (purple). e) Cross-sections of b) at several values of  $\theta_1$  ( $\theta$  in text) as in d). f) Expanded view of the dotted-box area of e).

### 3. Experiment

Figure 4 shows a basic configuration of the interferometer for digital holographic microscopy of total internal reflection. A yellow HeNe laser ( $\lambda = 594$  nm, 2 mW) input beam is split into two parts, object (obj) and reference (ref), by a beam splitter BS1 and recombined at BS2 for superposition, forming a Mach-Zehnder interferometer. The object beam enters the prism and undergoes total internal reflection at the hypotenuse  $A$  of the right-angle prism. S-polarization is used in the imaging experiments. The presence of a specimen on the prism surface

modulates the phase front of the reflected light. A objective lens  $L_{\text{obj}}$  ( $f = 15$  mm,  $\text{NA} = 0.4$ ) placed next to the prism projects a magnified image of the hologram plane H on to the CCD camera, through an imaging optics  $L_{\text{img}}$ . Another lens  $L_{\text{ref}}$  is placed in the reference arm so that the two beams have matching wavefront curvatures. The CCD camera (SONY XCD-X710CR,  $1034 \times 779$  pixels,  $4.65 \times 4.65 \mu\text{m}^2$  per pixel) acquires an image of the hologram plane H (which is usually taken in close vicinity of the object plane A) in superposition with the reference beam. A set of programs developed in-house using LabVIEW<sup>®</sup> calculates propagation of the optical field back to the object plane A. Because of the presence of the prism, the object plane A optically appears to the camera, or to the plane H, at about  $72^\circ$  angle of inclination, which causes large difference (about 1:3) in the x- and y-scales of images presented below. (This angle is only coincidentally of same numerical value as  $\theta_1$  below.) The anamorphism can be compensated for by using an algorithm for numerical diffraction on to an inclined plane [26], but we have not yet implemented it in this proof-of-principle demonstration of TIRHM.

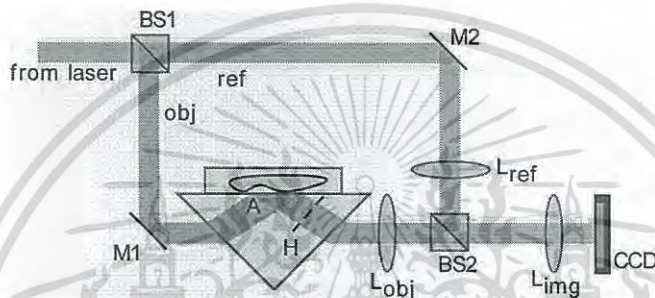


Fig. 4. Apparatus for digital holography of total internal reflection. BS: beam-splitters; M: mirrors; L: lenses; A: object plane; H: hologram plane.

First, we demonstrate the imaging of the reflected phase profile due to variations of refractive index of materials in contact with the prism. As shown in Fig. 5(a), water droplets of index  $n_2 = 1.333$  are placed on the prism of BK7 glass,  $n_1 = 1.517$ . Figure 5(b) is the amplitude image of the reflected optical field, while Fig. 5(c) is the phase image, at the object plane A, calculated from a hologram image at H. The field of view is  $300 \times 900 \mu\text{m}^2$  and the presumably circular water droplets, of about  $100 \mu\text{m}$  in diameter, appear highly elliptical because of the relatively large angle of the plane A relative to H. Given the angle of incidence  $\theta_1 = 72^\circ$ , TIR is in effect for both glass-air and glass-water interfaces. The amplitude image of Fig. 5(b) does show variations in intensity due to diffraction from phase discontinuities and other spurious interference. We note that when the angle of incidence is not large enough for TIR at the glass-water interface, the water droplets appear as black spots because of the diminished reflectance. On the other hand, the phase image of Fig. 5(c) has significantly less noise or spurious signal and displays the profile of water droplets with good fidelity. Referring to Fig. 1(c), the reflection phase shift is  $\varphi = -131^\circ$  for the glass/air interface, while it is  $\varphi = -97^\circ$  for the glass/water interface, so that the phase difference between the two areas is expected to be  $\Delta\varphi = 34^\circ$ . Figure 5(d) is a cross-section through one of the droplets of Fig. 5(c), where the phase step is measured to be about  $\Delta\varphi = 40^\circ \pm 5^\circ$ . A similar measurement is made using 50/50 mixture of water (1.333) and ethylene glycol (1.432) in Fig. 5(e). With presumed index of 1.382 for the mixture, the expected phase step is  $\Delta\varphi = 85^\circ$ , while the measured value is  $\Delta\varphi = 60^\circ \pm 10^\circ$ . Although these numerical values have significant uncertainties, the trend is consistent with expectation, i.e., the larger the index difference, the larger the phase difference.

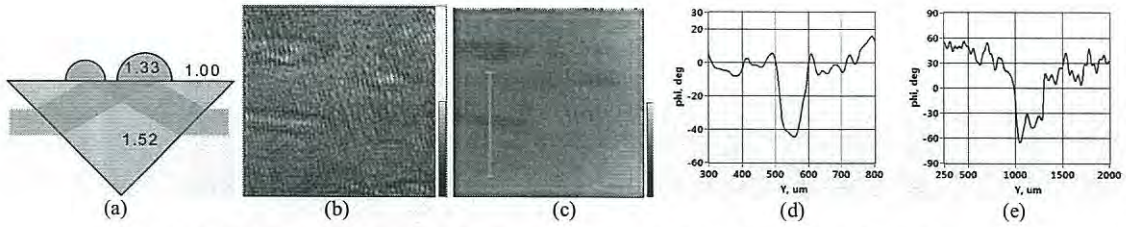


Fig. 5. (a). General configuration of water droplets placed on prism. b) Amplitude and c) phase images of light reflected from the prism detailing cross-section cut line. Field of view is approximately  $300 \times 900 \mu\text{m}^2$  with  $256 \times 256$  pixels. Gray scale for b) is  $0 \sim 1$  in arbitrary unit, while for c) it is  $-180^\circ \sim +180^\circ$ . d) Graph of cross-section along a vertical line through a water drop in c). e) A similar graph for a droplet of 50/50 mixture of water and ethylene glycol.

The next experiment demonstrates imaging of phase profile resulting from variation of thickness of the gap between two layers of materials. As depicted in Fig. 6(a), a fused quartz plano-convex lens ( $n_3 = 1.458$ ) of UV focal length 250 mm is placed on the glass ( $n_1 = 1.517$ ) prism. Note that only the index of refraction (at visible wavelength) and the surface curvature of the sample lens are the pertinent parameters for this experiment, while the UV focal length is not. The angle of incidence was  $75^\circ$ , just beyond the critical angle of glass-quartz interface ( $\theta_{c,13} = 74^\circ$ ). The relatively uniform amplitude image in Fig. 6(b) indicates TIR, whereas the phase image in Fig. 6(c) shows a clear profile of the contact area (which again has about 3:1 anamorphism). The field of view is  $260 \mu\text{m}$  horizontal by  $780 \mu\text{m}$  vertical. The radius of curvature of the convex surface is 115 mm, so that the air gap ( $n_2 = 1.000$ ) goes from zero at the point of contact to  $660 \text{ nm}$  at the edge of the  $780 \mu\text{m}$  vertical field of view.

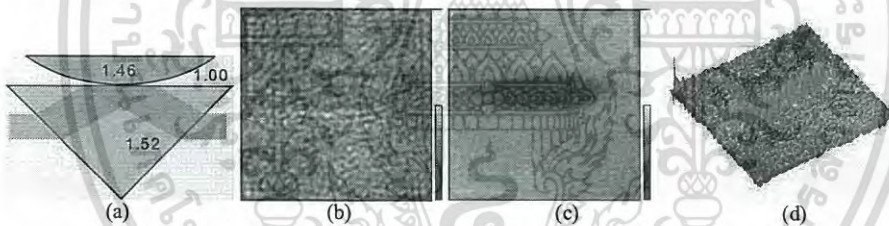


Fig. 6. (a). General configuration of quartz lens placed on prism. b) Amplitude and c) phase images of light reflected from the prism. d) Pseudo-color perspective rendering of c). Field of view is approximately  $260 \times 780 \mu\text{m}^2$  with  $256 \times 256$  pixels. Gray scale for b) is  $0 \sim 1$  in arbitrary units, while for c) it is  $-180^\circ \sim +180^\circ$ .

A cross-section of Fig. 6(c) along a vertical line through the center of the spot is shown in Fig. 7(a), while Fig. 7(d) shows such cross-section calculated from the given indices and curvature. The measured phase dip through the spot is  $130^\circ \pm 15^\circ$ , while the modeled value is  $100^\circ$ . The discrepancy is attributed to spurious diffraction and other interference. The spot in the phase image Fig. 6(c), or its pseudo-color perspective rendering in Fig. 6(d), represents the area of contact, circular shape of about  $140 \mu\text{m}$  diameter and within  $20 \text{ nm}$  between the prism and lens surfaces. That is, the thickness of the evanescent field is about  $20 \text{ nm}$  and the profile of the lens surface within the evanescent field can be imaged. The measurements are repeated by filling the glass-quartz gap with 50/50 mixture of water and ethylene glycol ( $n_2 = 1.382$ , Figs. 7(b) and 7(e)), and with pure ethylene glycol ( $n_2 = 1.432$ , Figs. 7(c) and 7(f)).

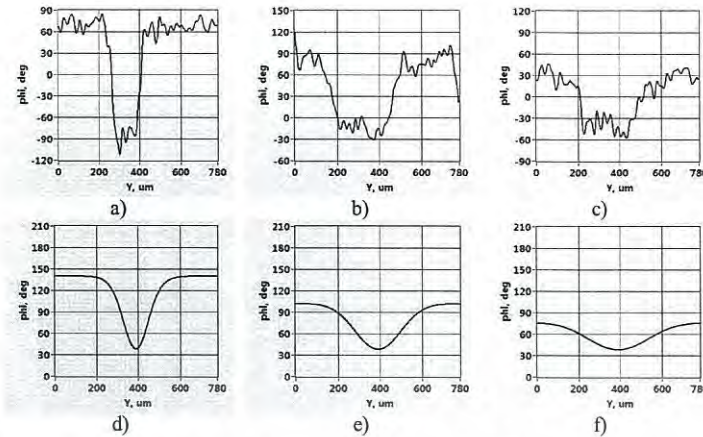


Fig. 7. Cross-section of phase profile across the contact spot of quartz lens on glass prism, when the gap is filled with a) air, b) 50/50 mixture of water and ethylene glycol, and c) pure ethylene glycol. Panels d), e), and f) are the corresponding theoretical graphs.

The expected phase dips for these cases are  $60^\circ \pm 15^\circ$  and  $35^\circ \pm 15^\circ$ , while the measured values are  $80^\circ$  and  $50^\circ$ , respectively. These measured values of phase dips as well as the width of the spots show trends consistent with the model. When the gap is filled with these materials, the index difference across interfaces become smaller and the evanescent fields become thicker. The maximum gaps that can be imaged in these cases are 70 nm and 120 nm, respectively.

#### 4. Discussion and conclusions

We have introduced a novel microscopy method of total internal reflection holographic microscopy (TIRHM) for obtaining quantitative phase images of light in total internal reflection (TIR). The theory of TIRHM is developed from the basic Fresnel description of TIR and frustrated TIR (fTIR). Phase shifts in TIR and fTIR are calculated in terms of the indices of refraction, angle of incidence, and the gap thickness. Digital holography allows imaging of the phase profile of TIR and two specific imaging modes of TIRHM are described. In one, the reflection phase profile results from variation of refractive index of an object of inhomogeneous optical property in contact with the prism. A biological cell, for example, in complete contact with the prism surface can be imaged to reveal the intracellular structure. In the other mode, the reflection phase profile images the gap distance between the surfaces of the prism and an object placed on the prism. For example, a biological cell in locomotion can reveal the profile of protrusion of pseudopodia, formation of focal adhesion, development of traction, and release of adhesion.

The holographic microscopy of total internal reflection (TIRHM) is particularly advantageous in cellular microscopy applications for a number of reasons. The imaging makes use of total reflection, meaning essentially all of the input photons participate in the formation of the image signals, and therefore the input optical power can be kept at minimal level. Although the intensity images of conventional holography are often associated with speckle and other interference noise, the phase images of digital holography are much less susceptible to such noise. The phase image is directly calculated from the hologram as part of the complex optical field. Therefore it is completely quantitative and can be subjected to various numerical processing techniques. In principle, it may be possible to image the phase front of TIR using conventional interference techniques, but the geometry of the imaging system through the prism requires the ability to image a plane with large inclination angle. This is not possible in any existing microscopy technology, whereas digital holography has a great deal of flexibility including the ability to image an inclined plane. With a relatively simple apparatus, one can easily obtain phase images of prism-cell interface with a optical

thickness resolution of a few nanometers. We have demonstrated these imaging principles of TIRHM using model objects of liquid droplets and spherical surface of known material and shape. The results unambiguously demonstrate the capabilities of TIRHM to image profiles of these parameters and indicate strengths in potential applications in biomedical cellular imaging.

#### Acknowledgments

This work is supported in part by National Science Foundation under Grant #0755705. One of the authors (WMA) is supported by NSF IGERT Fellowship DGE 0221681.



#96189 - \$15.00 USD  
(C) 2008 OSA

Received 13 May 2008; revised 9 Jun 2008; accepted 15 Jun 2008; published 19 Jun 2008  
23 June 2008 / Vol. 16, No. 13 / OPTICS EXPRESS 9820

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้