

การพัฒนาระบบการวัดความเรียบผิว  
โดยอาศัยหลักการแทรกสอดแบบการกวาดแนวตั้ง  
DEVELOPMENT OF SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT  
SYSTEM BASED ON VERTICAL SCANNING INTERFEROMETRY



กัณฑ์กนกสิน วงศ์สกุลอมร  
ภาณรินทร์ สัมปตติกร

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุญาตให้นำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงปีการศึกษา 2558 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT  
SYSTEM BASED ON VERTICAL SCANNING INTERFEROMETRY



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)

DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2015

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาระบบการวัดความเรียบผิวโดยอาศัยหลักการแทรกสอด  
แบบการกวาดแนวตั้ง  
DEVELOPMENT OF SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT  
SYSTEM BASED ON VERTICAL SCANNING INTERFEROMETRY

ชื่อนักศึกษา นางสาว กัญจน์กนกลิน วงศ์สกุลอมร รหัสนักศึกษา 55051451  
นาย ภาณุรินทร์ สัมปัตติกร รหัสนักศึกษา 55051583

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชา ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.พิชานันท์ อีเศรษฐ์โศภน ประธานกรรมการ	
อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์ กรรมการ	
อ.ธนภรณ์ สีสาวัดนานนท์ กรรมการ	
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก แพร่กระจาย และต่อจากไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาระบบการวัดความเร็วผิวโดยอาศัยหลักการแทรกสอดแบบการกวาดแนวตั้ง	
ชื่อนักศึกษา	นางสาว กัญจน์กนกสิน วงศ์สกุลอมร	รหัสนักศึกษา 55051451
	นาย ภาณุรินทร์ สัมปัตติกร	รหัสนักศึกษา 55051583
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
ปีการศึกษา	2558	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร .วราวุฒิ เถาลัดดา	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการวัดความเร็วและโครงสร้างสามมิติของพื้นผิวโดยใช้วิธีการแทรกสอดของแสงแบบกวาดแนวตั้ง ริวแทรกสอดที่เกิดจากอินเตอร์เฟอริเตอร์ชนิดไมเคิลสันซึ่งมีไดโอดเปล่งแสงความเข้มสูงสี่ฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดแสงจะถูกบันทึกด้วยกล้องซีซีดีความละเอียด 8 ล้านพิกเซลทุกครั้งที่มีการเลื่อนของกระจกอ้างอิงของอินเตอร์เฟอริเตอร์โดยกระจกจะถูกขับให้เคลื่อนที่ในระดับนาโนเมตรด้วยเพียโซทรานสดิวเซอร์ โปรแกรม MATLAB ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์ภาพริวแทรกสอดและแสดงผลในรูปของโครงสร้างสามมิติและความเรียบของพื้นผิว

คำสำคัญ : ความเรียบ, อินเตอร์เฟอริเตอร์, ริวแทรกสอด, การกวาดแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Development of Surface Roughness Measurement System Based on Vertical Scanning Interferometry
<b>Students</b>	Ms. Kankanoksin wongsakul-amorn Student ID 55051451 Mr. Panarin Sampattigorn Student ID 55051583
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physics)
<b>Department</b>	Physics
<b>Academic Year</b>	2015
<b>Advisor</b>	Associate Professor Dr. Warawoot Thowladda
<b>Co-advisor</b>	Dr. S.Tipawan Khlayboonme

### Abstract

This special project proposes surface roughness and 3-D surface profile measurement system based on vertical scanning interferometry. The interferogram obtained by Michelson interferometer with a high-brightness blue LED used as a light source were recorded by an eight-megapixel CCD camera. The reference mirror of the interferometer was moved in order of nanometre by means of a piezoelectric driven. Each step of movement of the mirror, the interferograms were recorded. A program was developed to interpret the interferograms and the result was displayed as a 3-D surface profile and roughness.

**Keywords:** Surface roughness, interferometer, interferogram, vertical scanning interferometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ผู้จัดทำได้ร่วมมือกันทำงานเพื่อให้ได้ชิ้นงานตามที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้ ซึ่งได้ใช้เวลาในการศึกษาค้นคว้า ทำการทดลองและทำความเข้าใจในหลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นผลสำเร็จ ซึ่งได้รับคำแนะนำ ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาจากหลายๆท่าน จึงขอกล่าวขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ของผู้จัดทำ รศ.ดร. วราวุฒิ เถาลัดดาและ ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง และคณาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ แก่ผู้จัดทำให้มีความรู้ความสามารถในด้านต่างๆ

กัณฑ์กนกสิน วงศ์สกุลอมร  
ภาณรินทร์ สัมปัตติกร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 การวัดความเรียบพื้นผิว	3
2.1.1 ประเภทการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย	3
2.1.2 ประเภทการวัดความหยาบผิวโดยขนาด	4
2.2 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	5
2.3 Coherence	6
2.3.1. Temporal coherence	6
2.3.2. Spatial coherence	7
2.4 Vertical scanning interferometry (VSI)	7
2.4.1. หลักการโดยทั่วไป	7
2.4.1. หลักการของการแทรกสอดแบบการกวาดแนวตั้ง	9
2.4.1. ข้อดีของ VSI	9
2.5 เซียร์เพลต อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Shear Plate Interferometer)	9
2.6 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect)	11
2.7 สเตรนเกจ (Strain gauge)	11
2.8 Charge Coupled Device (CCD camera)	13
2.9 สัญญาณรบกวนภาพ (Noise)	14
2.9.1 รูปแบบของสัญญาณรบกวน (TYPES OF NOISE)	14
2.9.2 ลักษณะของสัญญาณรบกวน	15
2.9.3 การลดสัญญาณรบกวน	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 การศึกษาการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser	18
3.2 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser แบบลำแสงขนาน	19
3.3 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED แบบลำแสงขนาน	20
3.4 การควบคุม Piezo Driver	21
3.4.1 ปุ่มบนแผงควบคุมและตัวบ่งชี้	22
3.4.2 การดำเนินงานของ OUTPUT Potentiometer	22
3.4.3 การนำเดินงานของปุ่มต่างๆ	22
3.4.4 การใช้ Kinesis Software	24
3.5 T-Cube Strain Gauge Reader	26
3.5.1 ข้อมูลทั่วไปของซอฟต์แวร์ kinesis	26
3.5.2 เชื่อมต่อกับฮาร์ดแวร์	28
3.5.3 การจ่ายแรงดันไฟฟ้าและความต้องการกระแสไฟฟ้า	28
3.5.4 การเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟแบบสแตนด์อโลน	28
3.5.5 ปุ่มบนแผงควบคุมและตัวชี้วัด	29
3.5.6 การใช้ซอฟต์แวร์ Kinesis	29
3.5.7 การใช้ Strain Gauge Reader T-Cube กับ a Piezo Driver T-Cube	30
3.6 ทดสอบโดยใช้ตัวอย่างที่มีความแตกต่างของพื้นผิว	30
3.7 การวิเคราะห์ภาพ	31
3.8 การสร้างโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว	32
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	
4.1 ผลจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser แบบลำแสงขนาน	33
4.2 ผลจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED (Blue Light emitting diode)	33
4.2.1 ควบคุมระยะกระจกตัวอย่างโดยกำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้กับ Piezo Driver	34
4.2.2 ควบคุมระยะกระจกตัวอย่างโดยกำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้กับ Piezo Driver ซึ่งผิวของตัวอย่างทดสอบเป็นกระจกความเรียบสูง	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนและใช้ภายใต้ลิขสิทธิ์และมีความผิดที่การนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 การปรับแต่งภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์	36
4.4 การใช้โปรแกรม Vertical Scanning Interferometer Analyze and Simulation วิเคราะห์ความเรียบพื้นผิวของตัวอย่างที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น	36
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผล	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	44
เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก	46
ภาคผนวก ก	47
ภาคผนวก ข	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ความหยابผิวเฉลี่ยเลขคณิต	3
2.2 ความหยابผิวเฉลี่ยกำลังสอง	3
2.3 ความหยابผิวเฉลี่ยปริมาตร	4
2.4 ความหยابผิวเฉลี่ยรูปร่าง	4
2.5 ความหยابผิวขนาดโดยรวม	4
2.6 ความหยายผิวขนาดหลุ่มลึกสุด	4
2.7 ความหยายผิวขนาดยอดสูงสุด	5
2.8 ความหยابผิวขนาดโดยเฉลี่ย	5
2.9 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	6
2.10 Incoherent light waves	7
2.11 Coherent light waves	7
2.12 รูปแบบของริ้วการแทรกสอด Michelson Interferometer	8
2.13 ริ้วการแทรกสอดหลายสีและสีเดียวในไมเคิลสัน	8
2.14 Shear Plate SI254 ของบริษัท THORLAB	9
2.15 Shear Plate Interferometry	10
2.16 ลักษณะของลำแสงบนเซียร์เพลตที่ลำแสงขนาน	10
2.17 ลักษณะของลำแสงบนเซียร์เพลตที่ลำแสงไม่ขนาน	10
2.18 ปรากฏการณ์ Piezoelectricity	11
2.19 สเตอรนเกจ	12
2.20 วงจรวีตสโตนบริดจ์	12
2.21 Charge Coupled Device : CCD camera	13
2.22 แสงตกกระทบลงบนโฟโต้ไซด์แล้วเกิดอิเล็กตรอนอิสระ	13
2.23 ตัวอย่างการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ความไวแสงสูง ระหว่างกล้องถ่ายภาพแบบ Digital SLR ซึ่งมีขนาดพิกเซลที่ใหญ่กับกล้องถ่ายภาพแบบ Compact Digital ที่มีขนาดพิกเซลที่เล็กกว่า	14
2.24 ภาพตัวอย่างของรูปแบบสัญญาณรบกวน Random noise, Fixed pattern noise, Banding noise ที่ให้ผลที่ต่างกัน	15
2.25 ภาพตัวอย่างแสดงลักษณะของสัญญาณรบกวน Chrominance Noise และ Luminance Noise	15
2.26 ตัวอย่างภาพถ่ายจากการบันทึกภาพด้วยเวลานาน	16
3.1 Michelson Interferometry ด้วย He-Ne Laser	18
เอกสาคู 3.2 Michelson Interferometry ด้วย He-Ne Laser และภาพริ้วการแทรกสอดนำไปใช้ประโยชน์ด้านราคา	18

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 การจักระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสงขนาน และภาพรีวิการแทรกสอด	19
3.4 การจักระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย Blue LED	20
3.5 Piezo Driver TPZ001	21
3.6 ปุ่มบนแผงควบคุมและตัวบ่งชี้	22
3.7 การเลือกค่าจำกัดทางแรงดันไฟฟ้า	23
3.8 การตั้งค่าลูเปิด / ปิด	23
3.9 การเปิด / ปิดใช้การรับสัญญาณจากภายนอก	24
3.10 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุม Piezo	24
3.11 การใส่ค่าแรงดันไฟฟ้าใน Jog Step Size	25
3.12 การตั้งค่า Piezo Driver	25
3.13 T-Cube Strain Gauge Reader (TSG001)	26
3.14 T-Cube Strain Gauge Program	27
3.15 ระบบแผนภาพ	27
3.16 การจ่ายแรงดันไฟฟ้าและความต้องการกระแสไฟฟ้า	28
3.17 ด้านหน้าแผงตัวเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟ	28
3.18 แผงควบคุมและตัวชี้วัด	29
3.19 หน้าจอแสดงซอฟต์แวร์ GUI ทั่วไปของ Piezo และ Strain Gauge T-Cube	29
3.20 แผนผังภาพวาดการจัดเรียงของ Piezo และ Strain Gauge T-Cube	30
3.21 ทดสอบโดยใช้ตัวอย่างที่มีความแตกต่างของพื้นผิว	30
3.22 แผนผังการจัดวางระบบ VSI ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED	31
3.23 Interferogram ที่เก็บรวบรวมโดยหนึ่งพิกเซล CCD	32
3.24 แผนผังวิธีการสร้างพื้นผิว เส้นในแนวตั้งคือข้อมูลความเข้มแสง	32
3.25 Flowchart การสร้างโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว	32
4.1 รีวิการแทรกสอดจากการจักระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย He-Ne Laser แหล่งกำเนิดแสงขนาน	33
4.2 รีวิการแทรกสอดจากการจักระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย Blue LED แหล่งกำเนิดแสงขนาน	33
4.3 ภาพรีวิการแทรกสอดของผิวตัวอย่างทดสอบเป็นกระจกความเรียบสูง และใช้ฉากรับแสงเป็นกระดาษไข	34
4.4 ภาพรีวิการแทรกสอดของผิวตัวอย่างทดสอบเป็นกระจกความเรียบสูง และใช้ฉากรับแสงเป็นกระจกฝ้า	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 4.5 การปรับภาพก่อนนำไปใช้ในโปรแกรมวิเคราะห์  
 ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปลูกภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ไอคอนโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว	36
4.7 หน้าต่างโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว	37
4.8 การเลือกเปิดไฟล์ภาพของโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว	37
4.9 การลากครอบภาพ	38
4.10 การป้อนค่า step size ของโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว	38
4.11 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของโปรแกรม	39
4.12 การเลือกแสดง Grid	39
4.13 โครงสร้างพื้นผิวในคำสั่ง mesh	40
4.14 โครงสร้างพื้นผิวในคำสั่ง contour	40
4.15 กรอบแสดงค่า data surface	41
4.16 การล้างข้อมูลของโปรแกรมเมื่อกดปุ่ม Reset	41
4.17 การออกจากหน้าต่างโปรแกรม	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาของงานวิจัย

ความเรียบบนพื้นผิวและชนิดของวัสดุเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อของวัสดุนั้นๆ เช่น สมบัติของการสะท้อนแสง การดูดกลืนแสง ฯลฯ ซึ่งลักษณะของวัสดุแต่ละชนิดมีความขรุขระของพื้นผิวที่ไม่เท่ากันและบางชนิดไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า จึงทำให้การตรวจสอบความเรียบพื้นผิววัสดุมีความจำเป็นต่อการตัดสินใจในการเลือกใช้วัสดุนั้นๆ เพื่อให้มีคุณสมบัติที่ตรงต่อความต้องการและให้มีประสิทธิภาพต่อการใช้งานสูงสุด

เนื่องจากพื้นผิววัสดุบางชนิดมีความเปราะบางและสามารถเกิดรอยขีดข่วนได้ง่าย การตรวจสอบแบบไม่สัมผัสจึงมีความจำเป็นต่อการวัดชิ้นงานที่ทำจากวัสดุเหล่านี้ การตรวจสอบแบบไม่สัมผัสนั้นมีหลากหลายวิธี เช่น การใช้คลื่นอัลตราโซนิก การวิเคราะห์ทางแสง ฯลฯ

การตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวโดยใช้แสง เป็นการตรวจสอบที่สามารถวัดความเรียบพื้นผิวของวัสดุได้ถึงในระดับนาโนเมตร และไม่ทำการสัมผัสกับวัสดุจึงทำให้พื้นผิวของวัตถุไม่เกิดความเสียหายจากการตรวจสอบ อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบวัสดุได้หลากหลายชนิด เช่น เหล็ก พลาสติก ฯลฯ รวมทั้งยังสามารถตรวจสอบได้หลากหลายรูปร่างทั้ง ทรงกลม ทรงกระบอก ฯลฯ ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ได้เลือกใช้วิธีการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย LED (Light emitting diode) สีฟ้า ในการตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานนั้นยังคงสภาพและใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการแทรกสอดของแสง
2. เพื่อนำหลักการแทรกสอดของแสงมาประยุกต์ใช้ในเครื่องมือวัด
3. เพื่อศึกษาระบบการวัดความเรียบพื้นผิวโดยอาศัยหลักการแทรกสอดแบบการกวาดแนวตั้ง
4. เพื่อศึกษาการทำงานของระบบ Michelson Interferometry เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์แสงสีแดงและหลอด LED สีฟ้า

### ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาความเป็นมาของหลักการแทรกสอดของแสง
2. ติดตั้งระบบ Michelson Interferometry
3. ทำการจัดลำแสงขนาน โดยใช้ ระบบ Michelson Interferometry
4. จัดเก็บภาพรบกวนการแทรกสอดของแสงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างแต่ละชนิด
5. ศึกษาหลักการเขียนโปรแกรมวิเคราะห์
6. เขียนโปรแกรม Matlab เพื่อทำการวิเคราะห์ความเรียบของผิววัสดุ
7. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองของระบบการวัดความเรียบของพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องการแทรกสอดของแสงและเครื่องมือวัดความเรียบพื้นผิว
2. สามารถวิเคราะห์และจำลองโครงสร้างของพื้นผิววัตถุออกมาในรูปแบบ 3 มิติ
3. สามารถพัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือวัดพื้นผิว
4. ระบบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดไม่เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งาน

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

ระยะเวลาในการดำเนินงาน								
ส.ค.	ก.ย.	ค.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
ศึกษาหลักการ								
ตรวจสอบพื้นผิว								
		ศึกษาหลักการ						
		Michelson Interferometry						
				ทดสอบตามทฤษฎี				
						ศึกษาและออกแบบ		
						โปรแกรมวิเคราะห์		
							สรุปผลการทดลอง	
							ปรับปรุงและแก้ไข	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

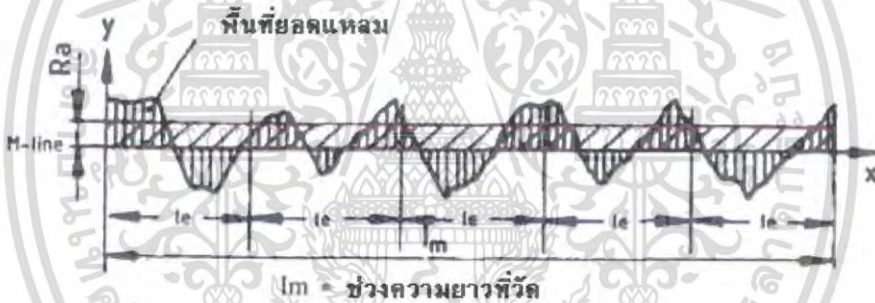
### 2.1 การวัดความเรียบพื้นผิว

ความเรียบผิวหรือความหยาบผิว ในภาษาอังกฤษเรียกว่า “Surface Roughness” หากมีความขรุขระพื้นผิวมากแสดงว่าที่ความหยาบมาก แต่หากมีความขรุขระพื้นผิวน้อยแสดงว่ามีความหยาบน้อย

#### 2.1.1 ประเภทการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Average parameter)

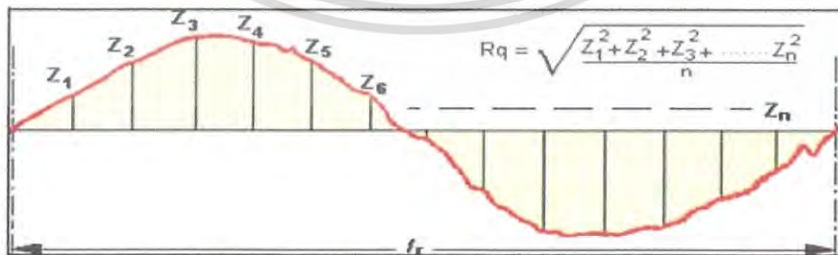
ประเภทการวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Average parameter) คือ อาศัยการวัดแล้วคำนวณค่าความหยาบผิวออกมาเป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ยซึ่งจะทำให้เรารู้ระดับความหยาบโดยรวมแต่ไม่สามารถรู้ลักษณะความคลาดเคลื่อนสูงต่ำของความหยาบวิธีการกลุ่มนี้ได้แก่ Ra Rku Rq และ Rsk

1. ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average :Ra) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตของผิวที่วัด ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุด และหลายมาตรฐานมักอ้างอิงค่านี้ในการกำหนดมาตรฐานความหยาบผิวการหาค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิตได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลาง ทารด้วยความยาวเฉลี่ย (Lm) โดยที่ค่าของ Ra มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ )



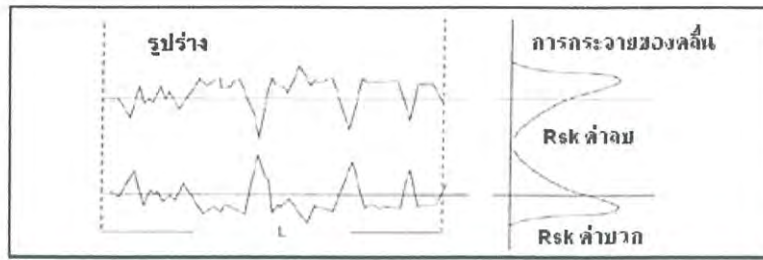
รูปที่ 2.1 ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต

2. ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness root mean square :Rq) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของผิวที่วัด



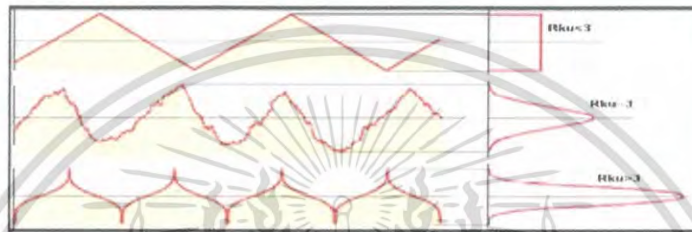
รูปที่ 2.2 ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง

3. ความหยาบผิวเฉลี่ยปริมาตร (Roughness skewness :Rsk) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยการวัดปริมาณของยอดและหลุม โดยปริมาณของยอดให้เป็นค่าบวก ส่วนปริมาณของหลุมให้เป็นค่าลบ หากค่าได้มีมากก็แสดงให้เห็นถึงการมียอดหรือหลุมมากนั่นเอง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ความหยาบผิวเฉลี่ยปริมาณ

4. ความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง (Roughness kurtosis :Rku) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิว โดยแสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปร่างของยอดผิวว่ามีลักษณะยอดโค้ง ยอดแหลม หรือยอดเรียบ

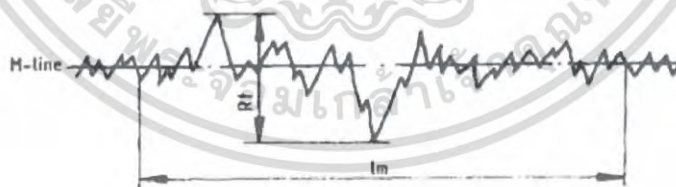


รูปที่ 2.4 ความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง

### 2.1.2 ประเภทการวัดความหยาบผิวโดยขนาด (Amplitude parameter)

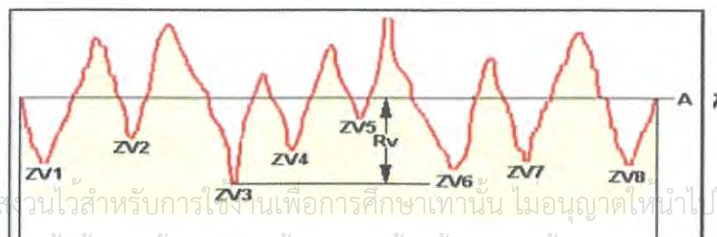
ประเภทการวัดความหยาบผิวโดยขนาด (Amplitude parameter) คือ อาศัยการวัด หาค่าสูงต่ำของขนาดความหยาบของพื้นผิวซึ่งจะทำให้เรารู้รูปลักษณะของความหยาบได้ชัดเจนกว่า วิธีการกลุ่มนี้ได้แก่ Rp Rt Rv และ Rz

1. ความหยาบผิวขนาดโดยรวม (Roughness total height :Rt , Ry) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความห่างระหว่างยอดสูงสุดถึงหลุมลึกสุดของผิวค่านี้นี้มีประโยชน์มากตรงที่หากเราต้องการขัดผิวเพื่อขจัดความขรุขระออกให้หมด เราจะรู้ได้ว่าจะต้องขัดผิวลงไปลึกกี่ไมครอน



รูปที่ 2.5 ความหยาบผิวขนาดโดยรวม

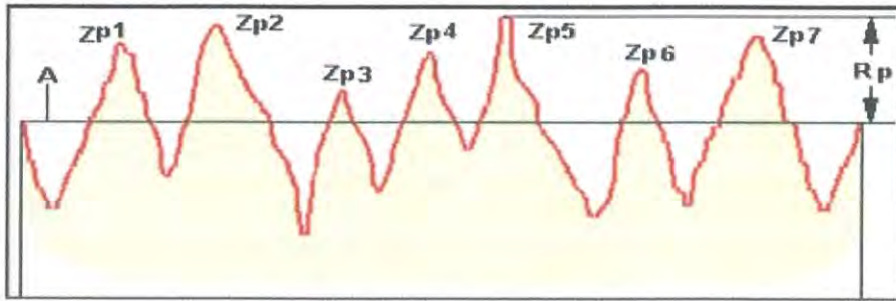
2. ความหยาบผิวขนาดหลุมลึกสุด (Roughness valley :Rv) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิว โดยวัดขนาดความลึกของหลุม โดยแสดงความลึกหลุมที่มีขนาดลึกที่สุด



รูปที่ 2.6 ความหยาบผิวขนาดหลุมลึกสุด

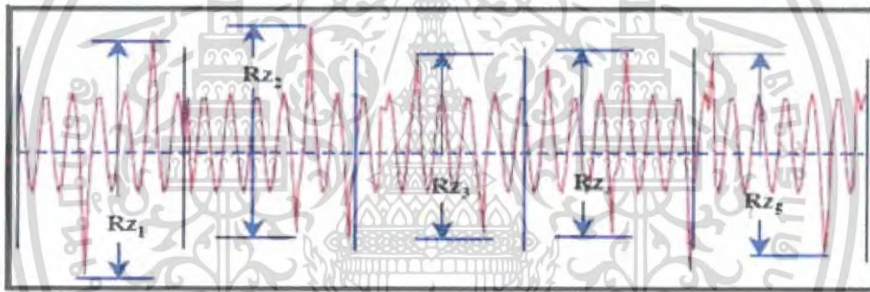
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความหยาบผิวขนาดยอดสูงสุด (Roughness Peak :Rp) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอด โดยแสดงความสูงของยอดที่มีขนาดสูงที่สุด



รูปที่ 2.7 ความหยาบผิวขนาดยอดสูงสุด

4. ความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย (Roughness Ten-point mean :Rz) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดกับความลึกของหลุมโดยแสดงขนาดเฉลี่ย ของระยะระหว่างความสูงของยอดกับความลึกของหลุม ทั้งหมด 5 ชุดการวัดทดสอบเป็นช่วงเท่าๆ กัน 5 ช่วง แล้วนำค่าที่ได้มารวมกันหารด้วย 5 โดยที่ค่าของ Rz มีหน่วยเป็นไมโครเมตร



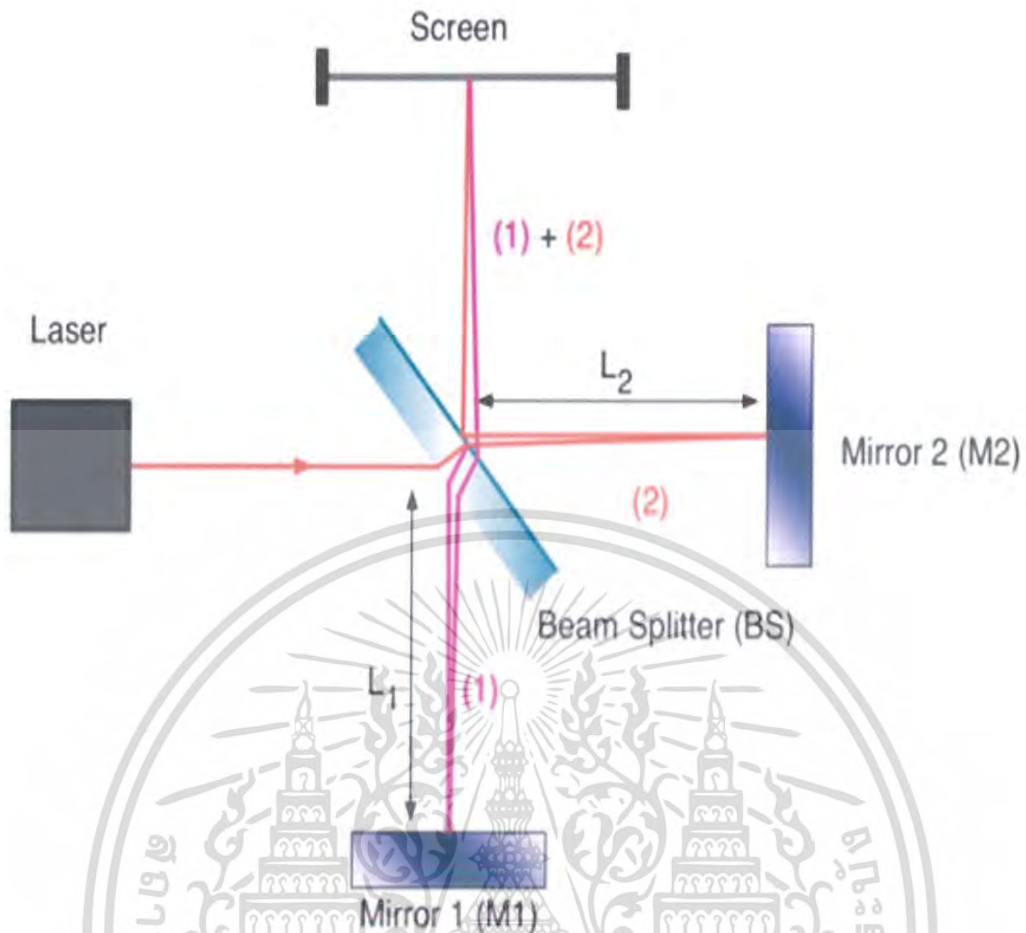
รูปที่ 2.8 ความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย

## 2.2 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการแทรกสอดของคลื่นแสงสอง ขบวน คลื่นที่แทรกสอดกันจะเกิดเป็นริ้วการแทรกสอด (Fringe) ลำแสงทั้งสองขบวนต้องเป็นแสงโคฮีเรนต์และกำเนิดจากแหล่งกำเนิดเดียวกันถึงจะสามารถสังเกตริ้วการแทรกสอดที่เกิดได้ โดยอาศัยหลักการทางแสงของอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์สามารถวัดระยะทางในเทอมของความยาวคลื่นได้ โดยอาศัยการนับริ้วการแทรกสอดของ คลื่นแสงสองขบวนที่แทรกสอดกันซึ่งมีหลักการพื้นฐานของไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser

ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์เป็นรูปแบบการแทรกสอดเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสงโคฮีเรนต์เดียวกัน ลำแสงจะถูกแยกออกเป็นแสงสองขบวนโดยตัวแยกแสง (Beam Splitter : BS) โดยปกติ ลำแสงลำที่ 1 จะสะท้อน (Reflected : R) ตัวแยกแสงและไปตกกระทบ Mirror 1 (M1) จากนั้นจะสะท้อนกระจกกลับมายังตัวแยกแสง และส่งผ่านละแสงไปยังฉากรับแสง (Screen) และลำแสงอีกลำหนึ่งจะส่งผ่าน (Transmitted : T) โดยตัวแยกแสงไปยัง Mirror 2 (M2) และสะท้อนกระจกกลับมายังตัวแยกแสง จากนั้นจะสะท้อนตัวแยกแสงไปยังฉากรับแสง ทำให้ได้ลำแสง 2 ลำมาแทรกสอดกันและเกิดภาพริ้วการแทรกสอด

เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์

การเกิดภาพริ้วการแทรกสอดนั้น ระยะห่างระหว่างกระจก M1 ถึงตัวแยกแสง และระยะห่างระหว่างกระจก M2 ถึงตัวแยกแสง ทั้ง 2 ค่าจะต้องมีค่าห่างกันไม่เกินความยาวโคฮีเรนต์ของแหล่งกำเนิด ซึ่งในกรณีเลเซอร์นั้นเป็นแหล่งกำเนิดที่มีความยาวโคฮีเรนต์มาก ดังนั้นหากกระจกทั้ง 2 ห่างจากตัวแยกแสงเป็นระยะที่ไม่เท่ากันก็ยังสามารถเกิดภาพริ้วการแทรกสอด

## 2.3 Coherence

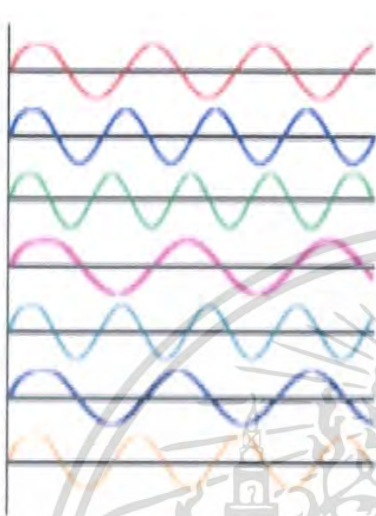
โคฮีเรเรนซ์ คือ สมบัติหรือลักษณะเฉพาะของคลื่นที่บอกถึงขีดความสามารถหรือเกณฑ์ในการเกิดการแทรกสอดของคลื่นแต่ละลูก เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละเฟสของคลื่นที่วัดที่จุดต่างๆ คลื่นสองขบวนที่เป็นโคฮีเรเรนซ์สามารถรวมกันแล้วเกิดเป็นริ้วแทรกสอดที่เสริมกันและหักล้างกันเป็นแถบมืดแถบสว่าง โดยไม่เคลื่อนที่ (Unmoving) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของ เฟสของแต่ละคลื่นที่มาชนกันที่จุดๆหนึ่ง เมื่อเราอธิบายถึงสมบัติโคฮีเรเรนซ์ของคลื่นแสง เราจะ แบ่งสมบัติโคฮีเรเรนซ์ออกเป็นสองชนิด

### 2.3.1. Temporal coherence

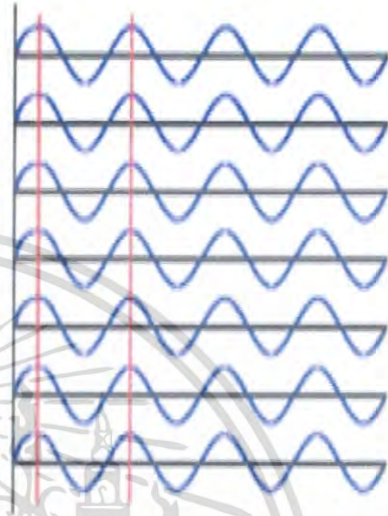
Temporal coherence คือเกณฑ์ของความเกี่ยวพันกันระหว่างแต่ละเฟสของคลื่นแสงที่จุดต่างๆในทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น temporal coherence บ่งบอกถึงแหล่งกำเนิดแสงโครมาติกส์นั้นเป็นอย่างไร สมมุติว่าแหล่งกำเนิดแสงเปล่งแสง หลายความยาวคลื่น โดยที่ความยาวคลื่นเป็น  $\lambda$  และ  $\lambda \pm \Delta\lambda$  คลื่นเหล่านี้จะเกิดการแทรกสอดกัน จะมีบางช่วงของทางเดินแสงที่ต่างกัน ก็คือช่วงที่คลื่นนั้นมีความต่างเฟสคงที่ หรือมีเฟสเดียวกัน (in phase) เราจะเรียกช่วง  $cl$  ว่า Coherence length ถ้าคลื่นเคลื่อนที่ไปใน space ด้วยความเร็ว  $c$  และยังคงอยู่ในช่วงที่ in phase กัน เราเรียกช่วงเวลานั้นว่า Coherence time

### 2.3.2. Spatial coherence

**Spatial coherence** คือเกณฑ์ของความเกี่ยวพันกันระหว่างแต่ละเฟสของคลื่นแสงที่จุดต่างๆ ที่ขวาง (transverse) กับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น ถ้าการรวมคลื่นนั้นเกิดเป็นริ้วแทรกสอดแถบมืด แถบสว่างและเคลื่อนที่ไปรอบๆ อย่างรวดเร็ว หรือคลื่นนั้นไม่ in phase กันกล่าวได้ว่าคลื่นนั้น incoherence



รูปที่ 2.10 Incoherent light waves



รูปที่ 2.11 Coherent light waves

จากรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นรูปคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิดปกติเคลื่อนที่ไปใน Space ไม่มีคลื่นใดเลยที่มีความสัมพันธ์กันกล่าวได้ว่าแสงนี้ incoherence และ จากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่าที่ทุกๆ จุดคลื่นเหล่านี้มีเฟสเดียวกัน หรือ in phase กัน คือคลื่นมีสมบัติ coherence

## 2.4 Vertical scanning interferometry (VSI)

### 2.4.1 หลักการโดยทั่วไป

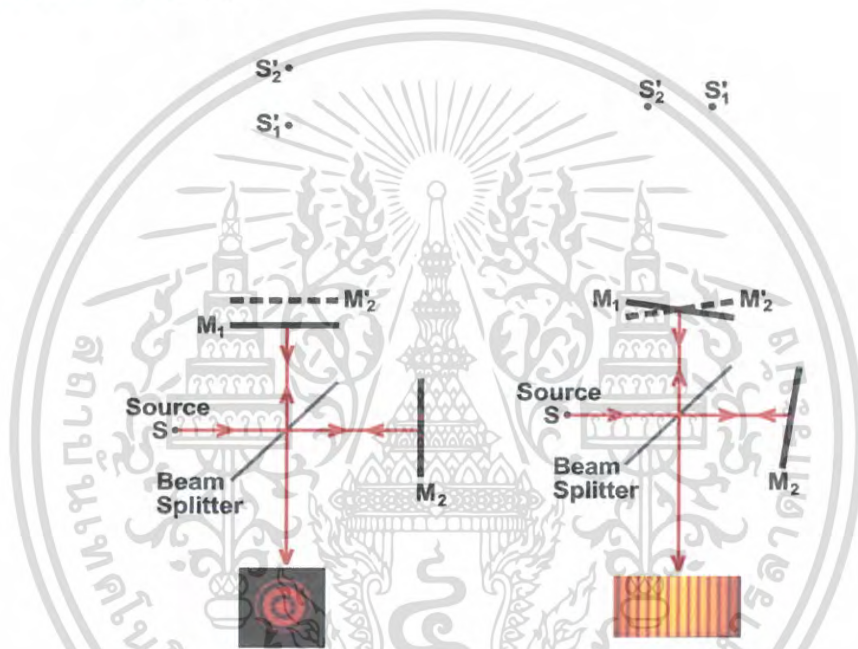
หลักการแทรกสอดจะใช้ประโยชน์จากหลักการของการทับซ้อนในการรวมคลื่น ผลของการรวมกันนี้มีคุณสมบัติบางอย่างที่มีความหมาย นั่นคือการวินิจฉัยสภาพเดิมของคลื่น เป็นเช่นนี้เพราะว่าเมื่อคลื่นทั้งสองที่มีความถี่เดียวกันมารวมกัน รูปแบบความเข้มที่เกิดขึ้นจะถูกกำหนดโดยความแตกต่างของเฟสระหว่างทั้งสองคลื่น คลื่นที่อยู่ในเฟสจะมีการแทรกสอดในขณะที่คลื่นที่ไม่อยู่ในเฟสจะไม่เกิดการแทรกสอด คลื่นที่ไม่สมบูรณ์อยู่ในเฟสหรือสมบูรณ์อยู่นอกเฟสจะมีรูปแบบความเข้มระดับกลางซึ่งสามารถนำมาใช้ในการกำหนดความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันของเฟสได้ interferometers ส่วนใหญ่ใช้แสงหรือบางอย่างที่เป็นรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยปกติลำแสงอาพันธ์เดี่ยวที่เข้ามาจะถูกแบ่งออกเป็นสองลำแสงที่เหมือนกันโดยการแยกลำแสงแต่ละลำแสงเหล่านี้เดินทางในเส้นทางที่แตกต่างกันและจะรวมกันก่อนที่จะมาถึงที่ตรวจจับ ความแตกต่างในระยะทางที่เดินทางโดยลำแสงแต่ละเส้นทางนั้นสร้างความแตกต่างของเฟสระหว่างพวกเขา มันคือความแตกต่างเฟสที่จะสร้างรูปแบบการแทรกสอดระหว่างคลื่นที่เหมือนในตอนแรก หากลำแสงเดี่ยวที่ได้รับการแยกออกไปตามเส้นทางที่สองแล้วความแตกต่างเฟสคือการวินิจฉัยคือสิ่งใดก็ตามที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเฟสตามเส้นทาง ซึ่งอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในความยาวของเส้นทางหรือการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหในเส้นทาง

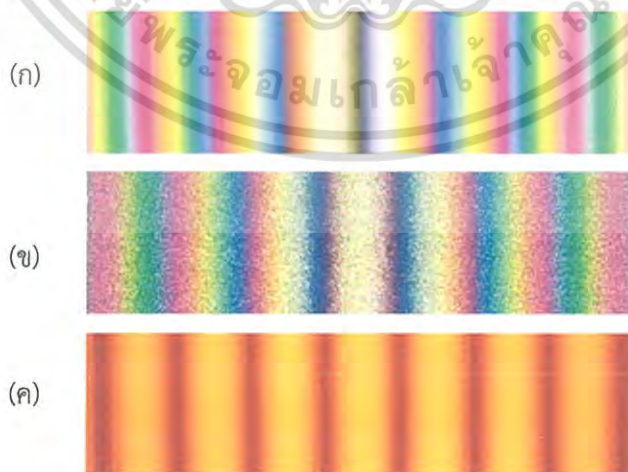
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของทางโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นหรือใช้ประโยชน์จากการนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่าที่เห็นในรูป 2A และ 2B สังเกตการณ์มีมุมมองตรงของกระจก M1 เห็นตัวแยกลำแสงและเห็นภาพสะท้อนกระจก M'2 ของ M2 รั้วการแทรกสอดถูกตีความเป็นผลจากการแทรกสอดระหว่างแสงมาจากภาพที่เสมือนจริงสองภาพ S'1 และ S'2 ของแหล่งกำเนิดแสง S ลักษณะของรูปแบบการแทรกสอดขึ้นอยู่กับลักษณะของแหล่งกำเนิดแสงและความแม่นยำในการวางทิศทางการของกระจกและตัวแยกลำแสง ในรูป 2a องค์ประกอบแสงถูกมุ่งเน้นเพื่อให้ S'1 และ S'2 สอดคล้องกับผู้สังเกตการณ์และรูปแบบการแทรกสอดที่เกิดขึ้นประกอบด้วยวงกลมมีศูนย์กลางปกติอยู่ที่ M1 และ M'2 ถ้าเป็นในรูป 2B, M1 และ M'2 จะเอียงด้วยเข้าหาซึ่งกันและกัน รั้วการแทรกสอดโดยทั่วไปจะใช้รูปทรงของภาคตัดกรวย (hyperbolas) แต่ถ้า M1 และ M'2 ซ้อนทับกัน รั้วการแทรกสอดที่ใกล้แกนจะตรง, ขนาน และเว้นระยะห่างเท่ากัน

การใช้แสงสีขาวจะมีผลในรูปแบบของรั้วการแทรกสอดสี (ดูรูปที่ 2.13) รั้วการแทรกสอดตรงกลางที่เป็นตัวแทนของความยาวเส้นทางที่เท่ากันอาจจะอ่อนหรือเข้มขึ้นอยู่กับจำนวนของเฟสที่เกิดขึ้นในลำแสงสองลำขณะที่ตัดผ่านระบบทางแสง



รูปที่ 2.12 รูปแบบของรั้วการแทรกสอด Michelson Interferometer



รูปที่ 2.13 รั้วการแทรกสอดหลายสีและสีเดียวในไมเคิลสัน

(ก) รั้วการแทรกสอดแสงสีขาวที่ลำแสงสองลำมีจำนวนการผกผันของเฟสแตกต่างกัน  
 (ข) รั้วการแทรกสอดแสงสีขาวที่ลำแสงสองลำมีจำนวนการผกผันของเฟสจำนวนเดียวกัน  
 (ค) รูปแบบรั้วการแทรกสอดที่ใช้แสงสีเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อยู่ภายใต้การเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.2 หลักการของการแทรกสอดแบบการกวาดแนวตั้ง

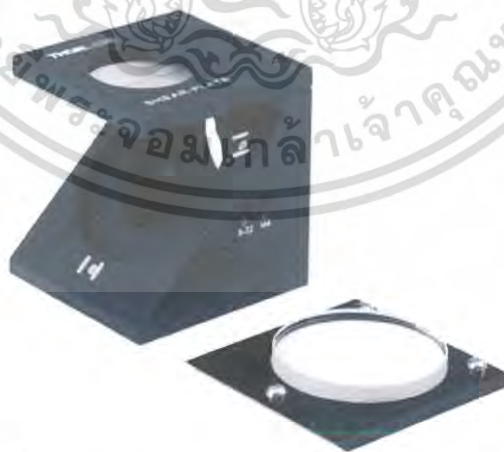
1. ความแตกต่างระหว่างการอ้างอิงและการทดสอบเส้นทางแสงที่ทำให้เกิดความแตกต่างในเฟส
2. ความคมชัดของริ้วการแทรกสอดที่ดีที่สุดที่สอดคล้องกับความแตกต่างที่เป็นศูนย์ของเส้นทางแสง
3. โฟกัสที่ดีที่สุดที่สอดคล้องกับความแตกต่างที่เป็นศูนย์ของเส้นทางแสง
4. ในโฟกัสที่ดีที่สุดริ้วการแทรกสอดจะเกิดเป็นระดับไปทั่ว
5. วัตถุประสงค์ในการวัดความเข้มแสงในแต่ละพิกเซล คือการเคลื่อนย้ายในแนวตั้ง
6. ใช้อัลกอริทึมหาตำแหน่งของริ้วการแทรกสอดเพื่อตรวจสอบความสูงของพื้นผิวในแต่ละพิกเซล
7. การวัดความสูงของพื้นผิวสามารถเปลี่ยนแปลงได้ถึง 10mm

#### 2.4.3 ข้อดีของ VSI

1. วัดพื้นผิวแบบ 3 มิติ ได้จริง
2. มีความสามารถในการวัดพื้นผิวขรุขระที่ไม่มีความเงาหรือมันวาว
3. ให้ผลลัพธ์ที่ดีกับริ้วการแทรกสอดที่มีความคมชัดต่ำ
4. ผลลัพธ์ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในมุมมองตามขวาง
5. ความสูงในแนวตั้งจำกัดโดยตัวสแกนและระยะทางในการทำงาน
6. ไม่มีชั้นความสูงที่คลุมเครือ
7. พื้นที่ที่ถูกทดสอบมักจะอยู่ในโฟกัส

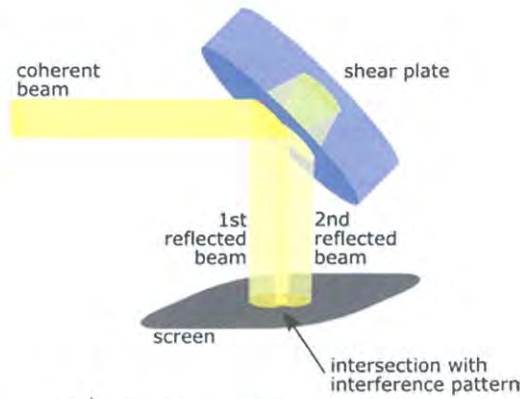
### 2.5 เชียร์เพลต อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Shear Plate Interferometer)

เชียร์เพลต (Shear Plate) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบความขนานของลำแสง (Collimation of light)



รูปที่ 2.14 Shear Plate SI254 ของบริษัท THORLAB

หลักการทำงานพื้นฐานของเชียร์เพลต เมื่อระนาบของคลื่นตกกระทบที่มุม 45 องศา จะเกิดการสะท้อนสองครั้งที่แผ่นเพลต(Plate) ที่มีขอบเขตความหนาจำกัดจะทำให้ลำแสงที่สะท้อนจะถูกแยกออกทางด้านข้างเชียร์เพลตถูกสร้างให้มีการสะท้อนแสงที่พื้นผิวด้านหน้า และด้านหลังนั้นมีเส้นทางเดินแสงแตกต่างกันตามลำดับ ส่งผลให้ตรงบริเวณที่มีการซ้อนทับกันของลำแสงขนานนั้นเกิดเป็นริ้วแทรกสอดเส้นตรง



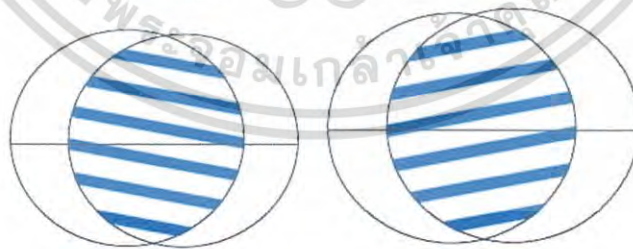
รูปที่ 2.15 Shear Plate Interferometry

ริ้วที่เกิดขึ้นนั้นจะมีระยะห่างเท่าๆกัน ขนานตามแนวแกนแสงในเชียร์ริงอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ โดยทิศทางของริ้วจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อลำแสงนั้นไม่ได้ขนานกันอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.16 ลักษณะของลำแสงบนเชียร์เพลตที่ลำแสงขนาน

จะเห็นได้ว่า ลักษณะของลำแสงบนเชียร์เพลตนั้น มีหลายรูปแบบแต่การที่ลำแสงขนานนั้นจะทำให้ได้ลักษณะลำแสงบนเชียร์เพลตดังรูป collimated beam ส่วนลำแสงที่ไม่ขนานนั้นจะได้ดังรูป diverging beam และ converging beam



ก ข

รูปที่ 2.17 ลักษณะของลำแสงบนเชียร์เพลตที่ลำแสงไม่ขนาน

- (ก) ลำแสงคู่เข้า
- (ข) ลำแสงคู่ออก

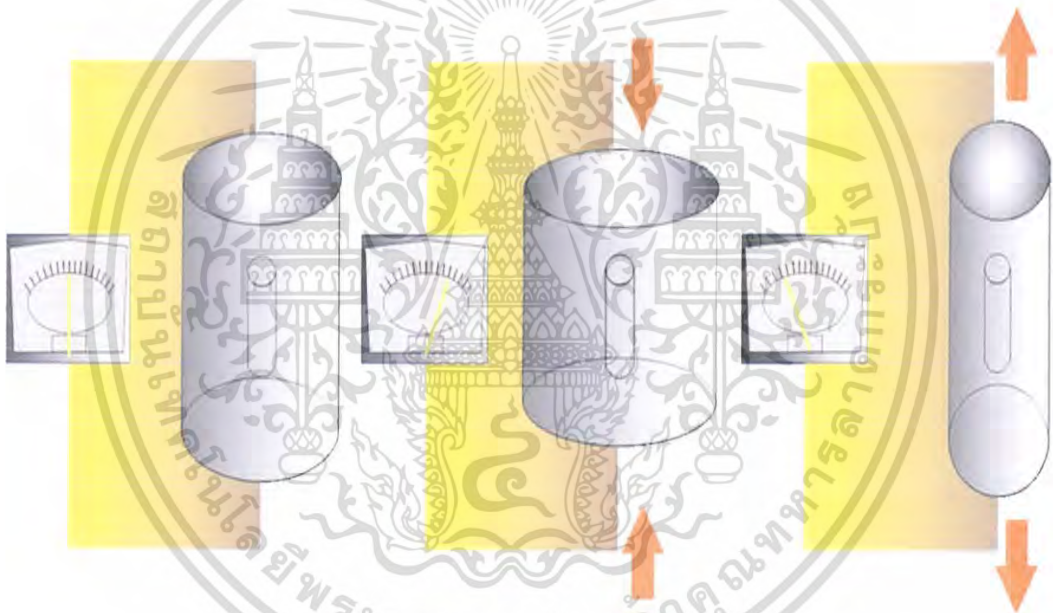
การแก้ไขลำแสงที่ไม่ขนานนั้นอาจทำได้โดยการจัดระบบแสงให้มีความถูกต้อง เช่น การปรับลำเลเซอร์ให้ขนาน การปรับมุมและความสูงของกระจกให้เหมาะสมรวมถึงการปรับระยะเลนส์ซึ่งเป็นระบบจัดแสงไม่ว่านานให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องด้วย แต่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect)

เพียโซอิเล็กทริก คือ อุปกรณ์ตรวจวัดแรงกลต่างๆ เช่น แรงดัน ความเร่ง การสั่น แรงเครียด หรือแรงกระทำอื่นๆ โดยเปลี่ยนพลังงานกลต่างๆเหล่านี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ในทางกลับกันเมื่อให้พลังงานไฟฟ้า แก่วัดที่มีความถี่เป็นเพียโซอิเล็กทริก วัสดุนั้นก็เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้เช่นกัน

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric material) เป็นเซรามิกประเภทหนึ่งที่มีสมบัติพิเศษ กล่าวคือเมื่อได้รับแรงกล (mechanical force) จะให้แรงดันไฟฟ้า (voltage) ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) ในทางกลับกันเมื่อวัสดุได้รับแรงดันไฟฟ้าจะทำให้มีการเปลี่ยนรูปร่าง (deformation) เกิดแรงกลซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์อินเวอร์สเพียโซอิเล็กทริก (inverse piezoelectric effect) การเปลี่ยนไปมา ระหว่างพลังงานกล และพลังงานไฟฟ้า สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ลักษณะการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกดังรูปที่ 2.18

สมบัติเพียโซอิเล็กทริก จะเกิดขึ้นในวัสดุที่มีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้าเท่านั้น วัสดุเพียโซอิเล็กทริก มีทั้งที่พบในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ เช่น คริสตอล (gallium phosphate, quartz, tourmaline) เซรามิก โพลีเมอร์ เป็นต้น

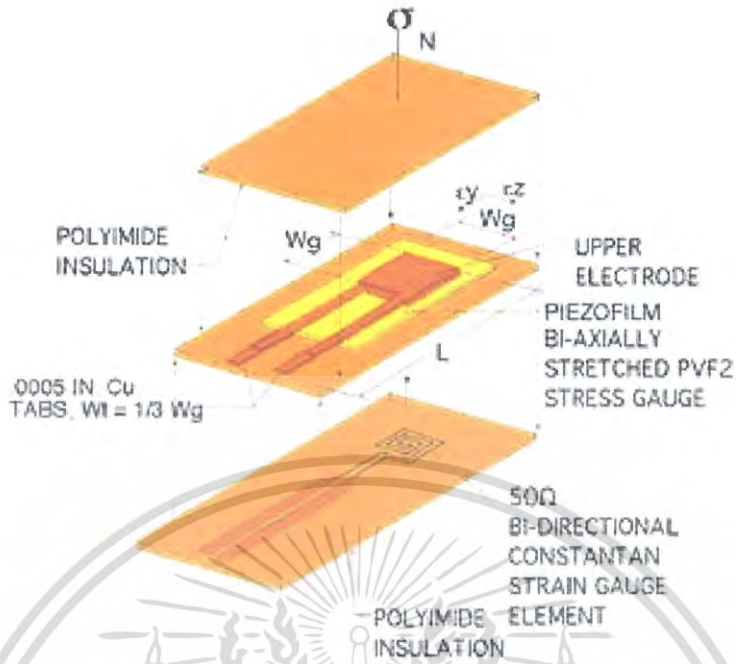


รูปที่ 2.18 ปรากฏการณ์ Piezoelectricity

## 2.7 สเตรนเกจ (strain gauge)

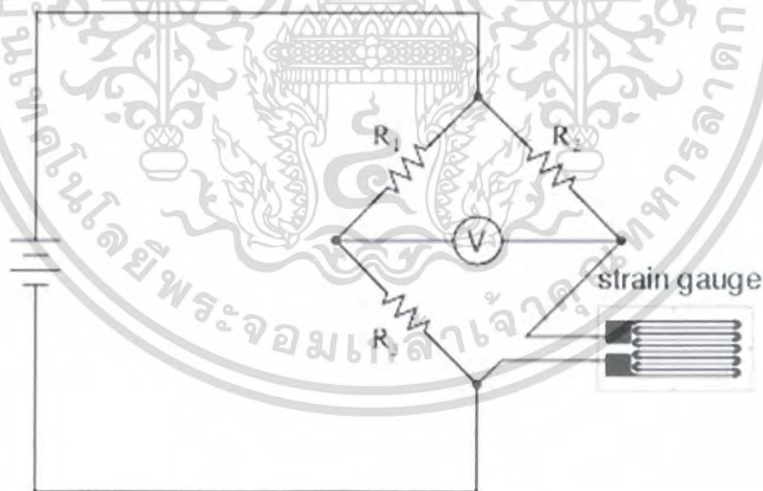
สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดการเปลี่ยนรูปของวัสดุ หรือที่เรียกว่าความเครียด (strain) ค่าสัญญาณที่ได้จากการวัดเป็นผลมาจากการเปลี่ยนค่าความต้านทานของสเตรนเกจ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเครียด และความเครียดนี้มีความสัมพันธ์อยู่กับแรงที่กระทำต่อวัสดุ ด้วยเหตุนี้ การวัดค่าความต้านทานจึงสามารถนำไปหาค่าแรงที่กระทำได้ สเตรนเกจโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบาง มีโลหะแผ่นบาง (foil) ขดตัวอยู่ภายใน ดังรูปที่ 2.16 เมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนรูปจะทำให้ค่าความต้านทานภายในตัวสเตรนเกจเปลี่ยนไป ในการใช้งาน สเตรนเกจจะถูกแปะติดกับชิ้นงานด้วยกาว การเปลี่ยนความต้านทานของสเตรนเกจมักถูกวัดด้วยวงจรวีตสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) ดังรูปที่ 2.19 สเตรนเกจถูกนำมาใช้เพื่อหาแรงที่ตัวทำงานส่วนปลายและข้อมือของหุ่นยนต์ ตัวอย่างเช่น การติดสเตรนเกจไว้ที่ปลายมือจับของหุ่นยนต์ เพื่อวัดและควบคุมแรงในการจับ สเตรนเกจสามารถวัดแรงที่เกิดขึ้นที่ข้อต่อและลิงค์ได้ แต่พบไม่บ่อยนัก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 สเตรนเกจ

Quarter bridge strain gauge circuit



รูปที่ 2.20 วงจรวัดสเตรนเกจ

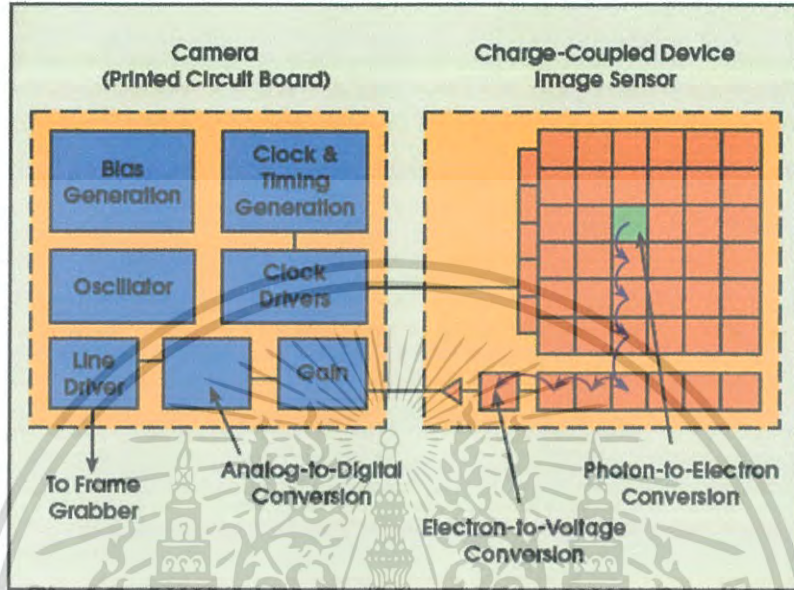
จากรูปที่ 2.20 ในสภาวะปกติ ความต่างศักย์ที่จุด A และจุด B มีเท่ากัน หากมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตัวหนึ่งตัวใดในสี่ตัว จะมีการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างจุด A กับจุด B ดังนั้น ในตอนเริ่มต้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับเทียบให้ค่ากระแสที่ไหลมีค่าเป็นศูนย์ การปรับค่าความต้านทานสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการ

$$R_1 R_{\text{gauge}} = R_2 R_3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อค่าของสเตรนเกจ แต่สามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้หนึ่งตัวในวงจรวัดสเตรนเกจ เพื่อปรับค่าชดเชยให้กับวงจรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

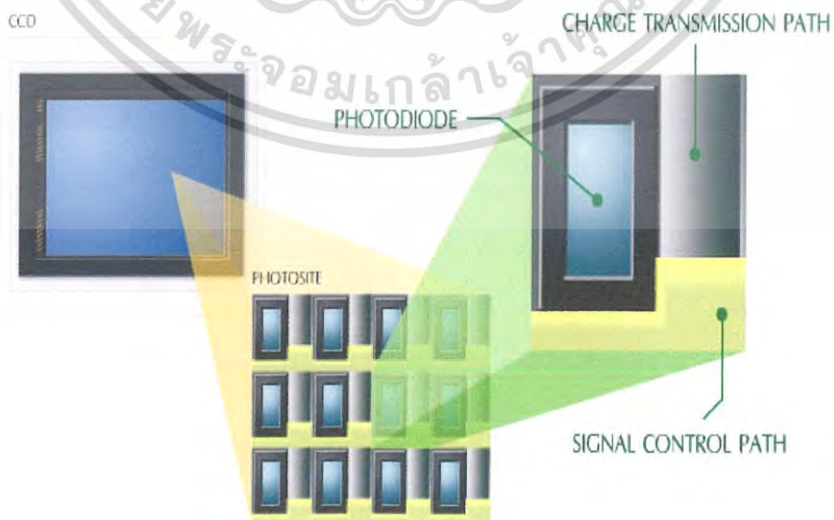
## 2.8 Charge Coupled Device: CCD camera

CCD ย่อมาจาก Charge Coupled Device เป็น Sensor ที่ทำงานโดยส่วนที่เป็น Sensor แต่ละพิกเซล จะทำหน้าที่รับแสงและเปลี่ยนค่าแสงเป็นสัญญาณอนาล็อก ส่งเข้าสู่วงจรเปลี่ยนค่าอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 Charge Coupled Device : CCD camera

เมื่อแสงตกกระทบบนเลนส์โฟโตไดโอดจะเกิดอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าอ่อน ๆ ภายใน Image Sensor ยิ่งแสงมาก กระแสไฟฟ้าก็จะมากขึ้นด้วย จากกระแสไฟฟ้าจะถูกแปลงค่าให้ออกมาเป็นตัวเลขโดย ANALOG TO DIGITAL CONVERTER ( A/D Converter ) กลายมาเป็นข้อมูลดิจิทัล จากข้อมูลดิจิทัลที่ได้มานี้สามารถนำไปปรับแต่ง เปลี่ยนแปลง และแปรกลับมาเป็นภาพถ่ายในภายหลังได้



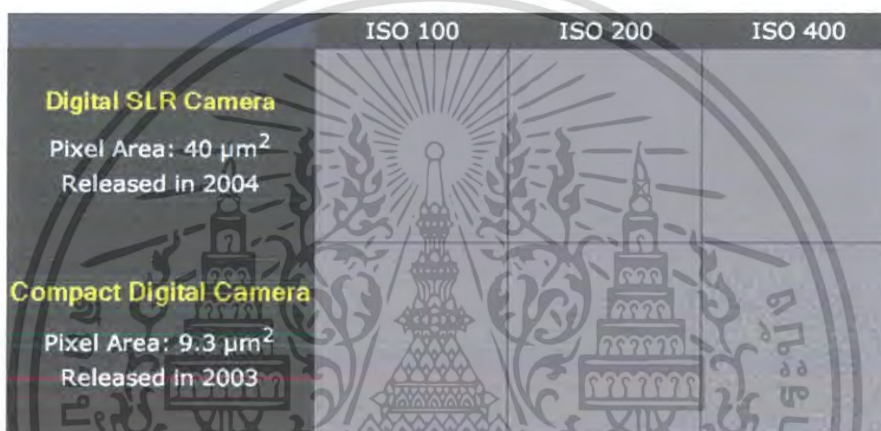
รูปที่ 2.22 Image Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Image Sensor สามารถเปลี่ยนแสงให้เป็นภาพได้ดังรูปที่ 2.22 โดยการวัดจากปริมาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละ Photosite ส่วนขาวของภาพจะมีแสงมาก ส่วนของ Photosite ที่รับแสงบริเวณนั้นก็จะได้รับแสงมาก เกิดกระแสไฟฟ้ามาก ส่วนมืดของภาพจะมีแสงน้อย ส่วนของ Photosite ที่ได้รับแสงจากส่วนมืดก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าน้อยลงไป ส่วนที่แสงปานกลางก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าในช่วงกลาง ๆ ตามลำดับ เมื่อกระแสไฟฟ้าถูกเปลี่ยนเป็นตัวเลขโดย A/D Converter จากตัวเลขนั้นจะสามารถเปลี่ยนเป็นภาพได้ ตัวเลขมากเท่ากับส่วนขาว ตัวเลขน้อยเท่ากับส่วนดำ ตามสัดส่วนกันไป

## 2.9 สัญญาณรบกวนภาพ (Noise)

Noise ก็คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในภาพ ทำให้เห็นความไม่สม่ำเสมอของความสว่างและสี ซึ่งเกิดจากการถ่ายภาพด้วยความไวแสงสูงๆ การใช้ระยะเวลาในการถ่ายภาพนานๆ หรืออุณหภูมิและขนาดของเซ็นเซอร์รับภาพอีกด้วย โดยที่กล่าวมานั้น ก็มักเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนได้ทั้งสิ้น



รูปที่ 2.23 ตัวอย่างการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ความไวแสงสูง ระหว่างกล้องถ่ายภาพแบบ Digital SLR ซึ่งมีขนาดพิกเซลที่ใหญ่ กับกล้องถ่ายภาพแบบ Compact Digital ที่มีขนาดพิกเซลที่เล็กกว่า

### 2.9.1 รูปแบบของสัญญาณรบกวน (TYPES OF NOISE)

สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในภาพจากอุปกรณ์ถ่ายภาพแบบดิจิตอลนั้น มีด้วยกัน 3 รูปแบบหลักๆ โดยมีสาเหตุการเกิดที่แตกต่างกัน ดังนี้

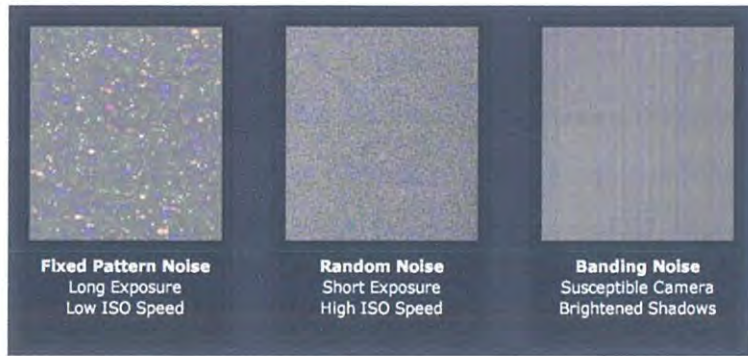
1. Random noise คือสัญญาณรบกวนที่ไม่มีรูปแบบเฉพาะเป็นรูปแบบของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้ทุกช่วงการบันทึกภาพและจะเกิดขึ้นมากกับการปรับความไวแสงสูงรูปแบบการเกิดสัญญาณรบกวนแบบ Random Noise จะเปลี่ยนไปกับภาพที่บันทึกในแต่ละภาพแม้ว่าจะใช้ค่าปรับตั้งเดียวกันบันทึกภาพ

2. Fixed pattern noise คือสัญญาณรบกวนเฉพาะเป็นรูปแบบของสัญญาณที่รวมไปถึง Hot Pixel ด้วยและโดยทั่วไปแล้วสัญญาณรบกวนในรูปแบบนี้จะปรากฏกับภาพที่ใช้เวลานานในการบันทึกภาพ และหากยังมีอุณหภูมิสูงก็จะยิ่งทำให้ปรากฏมากขึ้นด้วย จะมีรูปแบบการเกิดที่เฉพาะในลักษณะและตำแหน่งเดิมกับภาพที่ถูกถ่ายภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน เช่น มีอุณหภูมิเท่ากัน ระยะเวลาในการบันทึกภาพเท่ากัน ความไวแสงเท่ากัน

3. Banding noise คือสัญญาณรบกวนแบบแถบเป็นรูปแบบของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมากในภาพจากกล้องดิจิตอล เนื่องจากการอ่านข้อมูลจากเซ็นเซอร์ภาพจะพบสัญญาณรบกวนในรูปแบบ Banding Noise ได้ชัดเจนเมื่อใช้ความไวแสงสูง หรือเมื่อมีการปรับเพิ่มความสว่างในพื้นที่เงามืดของภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปภายนอกได้ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง

ไม่ว่าของภาพด้วยซอฟต์แวร์ทั้งหมดมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

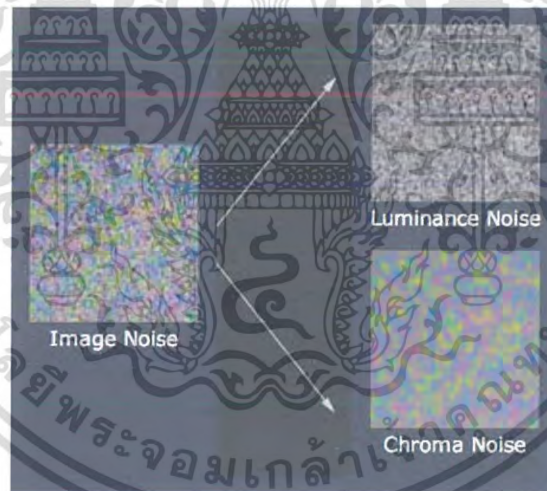


รูปที่ 2.24 ภาพตัวอย่างของรูปแบบสัญญาณรบกวน Random noise, Fixed pattern noise, Banding noise ที่ให้ผลที่ต่างกัน

### 2.9.2 ลักษณะของสัญญาณรบกวน

ลักษณะของการเกิดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในภาพจะมี 2 ลักษณะ คือ

1. Chrominance Noise คือ สัญญาณรบกวนที่มีเม็ดสีแตกต่างไปจากภาพจริง ซึ่งจะพบสัญญาณรบกวนในลักษณะนี้ เมื่อใช้เวลานานในการบันทึกภาพ
2. Luminance Noise คือ สัญญาณรบกวนที่มีความสว่างของพิกเซลไม่เท่ากัน โดยมีลักษณะเป็นสีเทาหรือขาวคล้ายเกรนของฟิล์ม จะพบสัญญาณรบกวนในลักษณะนี้ เมื่อใช้ความไวแสงสูง



รูปที่ 2.25 ภาพตัวอย่างแสดงลักษณะของสัญญาณรบกวน Chrominance Noise และ Luminance Noise

### 2.9.3 การลดสัญญาณรบกวน

ในการถ่ายภาพแม้ว่าเราจะสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ความไวแสงสูง แต่ก็ยังมีปัจจัยอื่นที่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน เช่น บริเวณที่เป็นโทนมืดก็ยากที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดสัญญาณรบกวนในภาพแม้จะใช้ความไวแสงไม่สูงมากก็ตาม รวมทั้งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการบันทึกภาพด้วยเวลานานที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ดังนั้น ในการถ่ายภาพจึงมีวิธีการที่จะช่วยลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับภาพให้น้อยที่สุด โดยมีส่วนของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อนเนื่องจากการถ่ายภาพด้วยเวลานานความรอนนี้เกิดจากการทำงานในตัวพิกเซล เพราะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าจึงมีความร้อนเกิดขึ้น เมื่อมีความร้อนมากเกินไป ก็ทำให้เกิดการทำงานที่ลดประสิทธิภาพเป็น noise ขึ้นมา รวมทั้งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาเราเพิ่มความไวสูง ISO ไม่ควรลดค่า หงส้น ออกทั้งหมดมิใช่แต่ดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ก็จะเป็นการขยายสัญญาณ รวมทั้งขยายสัญญาณรบกวนตามมาด้วย

## 1. การลดสัญญาณรบกวนจากการบันทึกภาพด้วยเวลานาน

การลดสัญญาณรบกวนจากการบันทึกภาพด้วยเวลานานในการทำงานของกล้องดิจิทัลที่มีการลดสัญญาณรบกวนจากระยะเวลาการบันทึก ภาพด้วยเวลานาน เรามักคุ้นกับฟังก์ชัน Long Exposure Noise Reduction เมื่อเปิดการทำงานแล้วบันทึกภาพโดยใช้เวลานาน กล้องจะบันทึกภาพต่อเนื่องอีก 1 ภาพ โดยภาพที่ 2 นี้จะถูกบันทึกโดยอัตโนมัติด้วยระยะเวลาที่เท่ากันและความไวแสงเท่ากัน แต่ชัตเตอร์ของกล้องจะปิดทำให้ได้ภาพมืด ที่มีสัญญาณรบกวนเหมือนภาพแรก จากนั้นจะนำ 2 ภาพมาเปรียบเทียบตำแหน่งที่เกิดจุดสัญญาณรบกวนเพื่อหาตำแหน่งของสัญญาณรบกวนแล้วทำการลบสัญญาณรบกวนออก เรียกการลดสัญญาณรบกวนในลักษณะนี้ว่า Dark Frame Subtraction

การถ่ายภาพ Dark Frame หลังจากถ่ายภาพในทันทีเพื่อเป็นการควบคุมทั้งเรื่องค่าความไวแสงและเวลา รวมทั้งอุณหภูมิ ให้มีค่าเหมือนกัน จำนวนหลายๆ ภาพแล้วนำเอา Dark Frame หลายๆ ภาพมารวมกันเป็น Master Dark เพื่อใช้ในการลบสัญญาณรบกวนได้ดียิ่งขึ้น โดยวิธีการนี้จะสามารถลดสัญญาณรบกวนแบบ Fixed pattern noise ที่เกิดจากการบันทึก ภาพเป็นเวลานานซึ่งจะเกิดสัญญาณรบกวนในลักษณะและตำแหน่งเดิมเมื่อมีการถ่ายภาพภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ทั้งความไวแสง และระยะเวลาการถ่ายภาพ

นอกจากนี้ในการถ่ายภาพวัตถุที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยหลีกเลี่ยงการบันทึกภาพด้วยเวลานาน ด้วยการถ่ายภาพเดิมซ้ำๆ หลายๆ พร้อมทั้งถ่ายภาพ Dark Frame หลายๆ ภาพเช่นกัน ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน แล้วนำเอาภาพที่ถ่ายได้มาลบสัญญาณรบกวนด้วย Master Dark แล้วจึงนำเอาภาพที่ลบ Noise แล้ว มารวมกันเป็นภาพอีกครั้งเรียกว่าการ Stacking Image ก็จะได้ภาพที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ และหลีกเลี่ยงการบันทึกภาพด้วยเวลานานได้ในระดับหนึ่ง



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างภาพถ่ายจากการบันทึกภาพด้วยเวลานาน จะสังเกตเห็น สัญญาณรบกวนแบบ

Fixed pattern noise ในลักษณะ Chrominance Noise ที่ปรากฏเป็นเม็ดสีอย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนำไปใช้งานเพื่อการศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาตรีเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ เดียวกัน ทั้งความไวแสง และระยะเวลาการถ่ายภาพ

## 2. การลดสัญญาณรบกวนจากใช้ความไวแสงสูง

การลดสัญญาณรบกวนจากใช้ความไวแสงสูงสำหรับการลดสัญญาณรบกวนจากใช้ความไวแสงสูงในกล้องดิจิทัลอนั้น จะมีเพียงบางรุ่นเท่านั้น ส่วนมากจะเป็นรุ่นที่ใหม่ๆ โดยมักใช้ชื่อฟังก์ชันในการลดสัญญาณรบกวนจากความไวแสงสูงว่า High ISO NR โดยเมื่อเปิดใช้งานระบบจะทำการลดสัญญาณรบกวนจากความไวแสงสูง ซึ่งมี 2 ลักษณะ คือ Chrominance Noise กับ Luminance Noise ซึ่งการลดสัญญาณรบกวนนี้จะมีผลต่อภาพการปรับลดรายละเอียดของสัญญาณให้ลดลง ซึ่งสัญญาณรบกวนลักษณะ Chrominance Noise ที่เป็นเม็ดสี อาจทำให้สีในภาพเปลี่ยนไปหรือมีการเหลื่อมสีบ้างในขณะที่การปรับลดรายละเอียดของสัญญาณรบกวนลักษณะ Luminance Noise ที่เป็นเสมือนสีขาวหรือสีเทา ซึ่งอาจเป็นส่วนรายละเอียดของภาพทำให้ภาพดูง่ายขึ้น

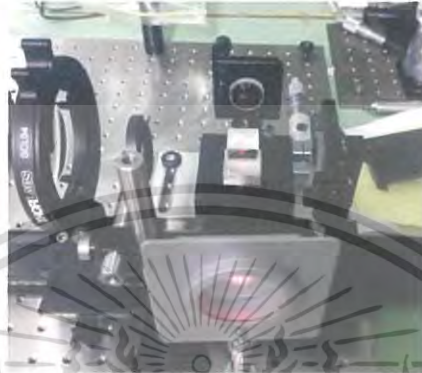


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

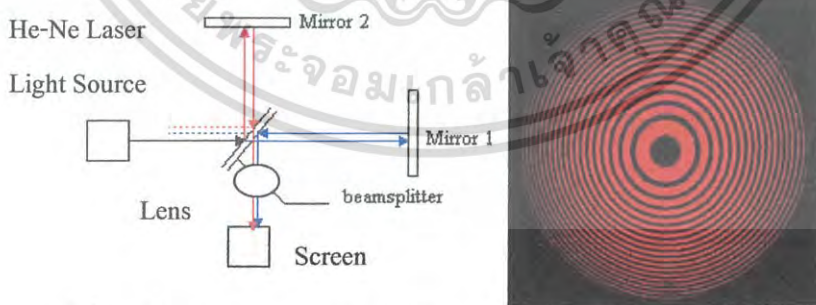
### 3.1 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne laser



รูปที่ 3.1 Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser

อุปกรณ์ของระบบ Michelson Interferometry ด้วย He-Ne Laser แสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย

1. He-Ne Laser
2. เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens)
3. กระจกสะท้อนมุม 45 องศา
4. ตัวแยกแสง (Beam Splitter) ทำหน้าที่ในการแยกลำแสงออกเป็น 2 ลำ โดยแบ่งความเข้มแสงเป็น 50 : 50
5. กระจกความเรียบสูง
6. ฉากรับแสง คืออุปกรณ์ที่คอยรับภาพริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.2 Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser และภาพริ้วการแทรกสอด

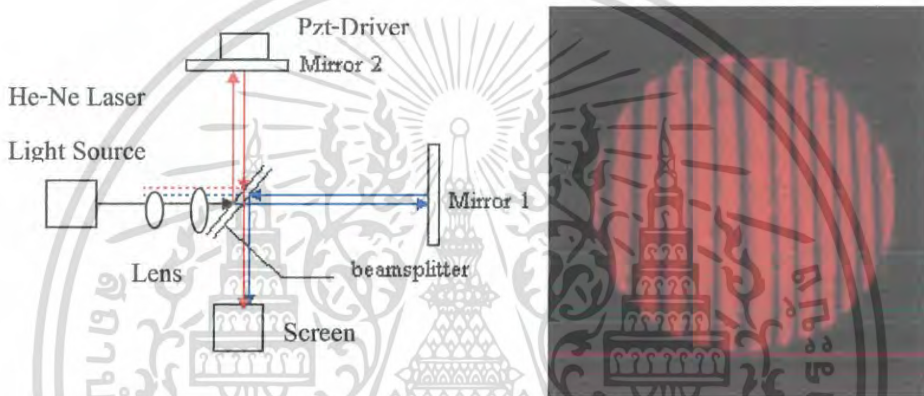
จากรูปที่ 3.2 เป็นการจัดระบบแสง Michelson Interferometry โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง He-Ne laser วางในแนวระนาบ จากนั้นนำเลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) และตัวแยกแสง (Beam Splitter) มาวางไว้หน้าแหล่งกำเนิดแสง โดยจัดระยะและปรับระดับความสูงของอุปกรณ์ให้ลำแสงนั้นเข้าที่

กึ่งกลางเลนส์และตัวแยกแสง จากนั้นนำกระจกความเรียบสูง 2 บานมาวาง โดยบานที่ 1 วางไว้ในแนว  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องยังอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบใช้

เดียวกันกับแหล่งกำเนิดแสง และบานที่ 2 วางตั้งฉากกับตัวแยกแสง แล้วนำฉากรับแสงมาวางไว้อีกฝั่งของตัวแยกแสงซึ่งจะตรงข้ามกับกระจกความเรียบสูงบานที่ 2 พอดี

เมื่อจัดระบบอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วจึงเปิดแหล่งกำเนิดแสง สังเกตให้แสงเลเซอร์ทะลุผ่านกึ่งกลางเลนส์นูนนูนแกมระนาบ (Plano convex lens) และตัวแยกแสง (Beam Splitter) โดยการปรับความสูงและจัดระยะห่างของเลนส์กับตัวแยกแสง ซึ่งตัวแยกแสงจะแบ่งลำแสงเป็น 2 ลำ ไปตกกระทบกระจกความเรียบสูงที่วางไว้ทั้ง 2 บาน ปรับกระจกให้ได้ระยะที่ตั้งฉากกัน ถ้าจัดระบบแสงได้ถูกต้อง จะสังเกตเห็นว่าลำแสงที่ไปตกกระทบบนฉากรับนั้น เกิดริ้วการแทรกสอดรูปวงกลมที่มีแถบสว่างสลับกับแถบมืด ดังรูปขวามือของรูปที่ 3.2

### 3.2 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser แบบลำแสงขนาน



รูปที่ 3.3 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser แบบลำแสงขนานและภาพริ้วการแทรกสอด

อุปกรณ์ของระบบ Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสงขนานแสดงดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วย

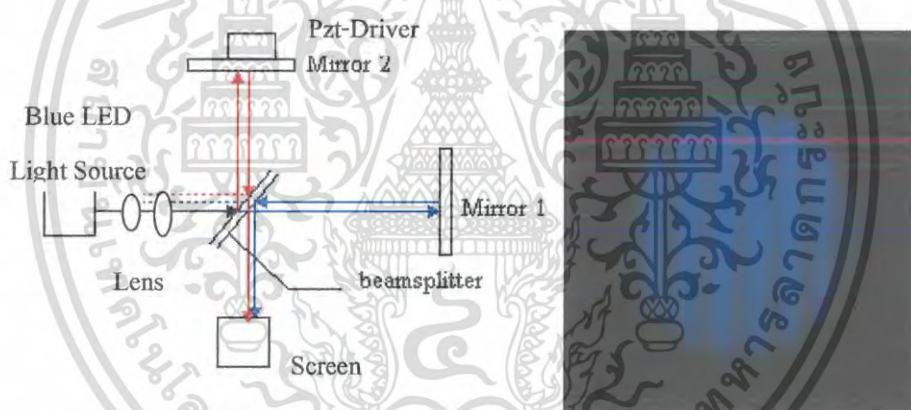
1. He-Ne Laser
2. เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) 2 อัน (ใหญ่-เล็ก)
3. กระจกสะท้อนมุม 45 องศา
4. ตัวแยกแสง (Beam Splitter) ทำหน้าที่ในการแยกลำแสงออกเป็น 2 ลำ โดยแบ่งความเข้มแสงเป็น 50 : 50
5. กระจกความเรียบสูง
6. ฮอร์ริส 2 อัน
7. เซียร์เพลท ใช้ตรวจสอบการเป็นลำแสงขนาน
8. ฉากรับแสง คืออุปกรณ์ที่คอยรับภาพริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 3.3 เป็นการจัดระบบแสง Michelson Interferometry โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง He-Ne laser วางในแนวระนาบ จากนั้นนำเลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) 2 อันมาวาง โดยวางเลนส์นูนอันเล็กก่อนแล้วจึงจัดระยะวางเลนส์นูนอันใหญ่และตัวแยกแสง (Beam Splitter) โดยปรับระดับความสูงของอุปกรณ์ให้ลำแสงนั้นเข้าที่กึ่งกลางเลนส์และตัวแยกแสงพอดี นำฮอร์ริสมาวางไว้หลังเลนส์ไว้เพื่อใช้หริ้วลำแสงให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นนำกระจกความเรียบสูง 2 บานมาวาง โดยบานที่ 1 วางไว้ในแนวเดียวกันกับแหล่งกำเนิดแสง และบานที่ 2 วางตั้งฉากกับตัวแยกแสง แล้วติดตั้ง Piezo Driver ไว้ที่ฐานวางของกระจก

ความเรียบสูงบานใดก็ได้เพื่อใช้ในการขยับระยะของกระจก (จากรูปที่ 3.3 ติดตั้งไว้ที่กระจกบานที่ 1 ) นำฉากรับแสงมาวางไว้อีกฝั่งของตัวแยกแสง ซึ่งตรงข้ามกับกระจกความเรียบสูงบานที่ 2 พอดี

เมื่อจัดระบบอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วจึงเปิดแหล่งกำเนิดแสง สังเกตให้แสงเลเซอร์ทะลุผ่านกึ่งกลาง เลนส์นูนแกมระนาบทั้ง 2 ตัว และตัวแยกแสง โดยการปรับความสูงของเลนส์ทั้งสองให้เท่ากันและจัดระยะห่างของเลนส์นูนอันใหญ่ไว้ที่ตำแหน่งระยะโฟกัสของเลนส์นูนอันเล็ก โดยใช้เอริสช่วยหรือลำแสงให้เล็กลงก่อนที่ลำแสงจะผ่านไปยังเลนส์นูนอันใหญ่ ทำให้ลำแสงที่ผ่านออกมาเป็นลำแสงขนานและส่งไปยังตัวแยกแสง ซึ่งจะแบ่งลำแสงเป็น 2 ลำ ไปตกกระทบบนกระจกความเรียบสูงที่วางไว้ทั้ง 2 บาน ตรวจสอบว่าลำแสงที่ได้นั้นเป็นลำแสงขนาน โดยการวางซีร์เพลทแทนที่กระจกความเรียบสูงบานที่ 1 แล้วดูลำแสงที่ตกกระทบบนซีร์เพลท หากลำแสงนั้นขนานไปกับเส้นอ้างอิงของซีร์เพลท แสดงว่าลำแสงนั้นเป็นลำแสงขนาน ถอดซีร์เพลทออกและวางกระจกความเรียบสูงบานที่ 1 ไว้ที่ตำแหน่งเดิม ปรับกระจกให้ได้ระยะที่ตั้งฉากกันพอดีโดยควบคุม Piezo Driver เพื่อปรับหาระยะที่กระจกบานที่ 1 จะอยู่ในความยาวโคฮีเรนต์ของแสง จะสังเกตเห็นว่าลำแสงที่ไปตกกระทบบนฉากรับนั้นเกิดริ้วการแทรกสอดที่มีแถบมืดและแถบสว่างสลับกันในแนวตั้ง ดังรูปขวามือของรูปที่ 3.3

### 3.3 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED แบบลำแสงขนาน



รูปที่ 3.4 การจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED แบบลำแสงขนานและภาพริ้วการแทรกสอด

อุปกรณ์ของการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED แบบลำแสงขนานแสดงดังรูปที่ 3.4 ประกอบด้วย

1. Blue LED (Blue Light emitting diode)
2. เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) 2 อัน (ใหญ่-เล็ก)
3. กระจกสะท้อนมุม 45 องศา
4. ตัวแยกแสง (Beam Splitter) ทำหน้าที่ในการแยกลำแสงออกเป็น 2 ลำ โดยแบ่งความเข้มแสงเป็น 50 : 50
5. กระจกความเรียบสูง

6. เอริส 2 อัน  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

7. ซีร์เพลท ใช้ตรวจสอบการเป็นลำแสงขนาน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ฉากรับแสง คืออุปกรณ์ที่คอยรับภาพริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 3.4 เป็นการจัดระบบแสง Michelson Interferometry โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจาก LED (Light emitter diode) สีฟ้า วางในแนวระนาบ จากนั้นนำเลนส์นูนแกมระนาบ (Plano convex lens) 2 อันมาวาง โดยวางเลนส์นูนอันเล็กก่อนแล้วจึงจัดระยะวางเลนส์นูนอันใหญ่และตัวแยกแสง (Beam Splitter) โดยปรับระดับความสูงของอุปกรณ์ให้ลำแสงนั้นเข้าที่กึ่งกลางเลนส์และตัวแยกแสงพอดี นำไอริสมาวางไว้หลังเลนส์ว่าเพื่อใช้หรือลำแสงให้มีขนาดเล็กลง แล้วนำกระจกความเรียบสูง 2 บานมาวาง โดยบานที่ 1 วางไว้ในแนวเดียวกันกับแหล่งกำเนิดแสงและบานที่ 2 วางตั้งฉากกับตัวแยกแสง แล้วติดตั้ง Piezo Driver ไว้ที่ฐานวางของกระจกความเรียบสูงบานใดก็ได้เพื่อใช้ในการขยับระยะของกระจก (จากรูปที่ 3.3 ติดตั้งไว้ที่กระจกบานที่ 1 ) นำฉากรับแสงมาวางไว้อีกฝั่งของตัวแยกแสง ซึ่งตรงข้ามกับกระจกความเรียบสูงบานที่ 2 พอดี

เมื่อจัดระบบอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วจึงเปิดแหล่งกำเนิดแสง สังเกตให้แสงของ LED สีฟ้าทะลุผ่านกึ่งกลางเลนส์นูนแกมระนาบทั้ง 2 ตัว และตัวแยกแสง โดยการปรับความสูงของเลนส์ทั้งสองให้เท่า กันและจัดระยะห่างของเลนส์นูนอันใหญ่ไว้ที่ตำแหน่งระยะโฟกัสของเลนส์นูนอันเล็ก โดยใช้ไอริสช่วยหรือลำแสงให้เล็กลงก่อนที่ลำแสงจะผ่านไปยังเลนส์นูนอันใหญ่ ทำให้ลำแสงที่ผ่านออกมาเป็นลำแสงขนานและส่งไปยังตัวแยกแสง ซึ่งจะแบ่งลำแสงเป็น 2 ลำ ไปตกกระทบกระจกความเรียบสูงที่วางไว้ทั้ง 2 บาน ตรวจสอบว่าลำแสงที่ได้ นั้นเป็นลำแสงขนาน โดยการวางเชิърเพลทแทนที่กระจกความเรียบสูงบานที่ 1 แล้วดูลำแสงที่ตกกระทบบนเชิърเพลท หากลำแสงนั้นขนานไปกับเส้นอ้างอิงของเชิърเพลท แสดงว่าลำแสงนั้นเป็นลำแสงขนาน ถอดเชิърเพลทออกและวางกระจกความเรียบสูงบานที่ 1 ไว้ที่ตำแหน่งเดิม ปรับกระจกให้ได้ระยะที่ตั้งฉากกันพอดีโดยควบคุม Piezo Driver เพื่อปรับหาระยะที่กระจกบานที่ 1 จะอยู่ในความยาวโคฮีเรนต์ของแสง จะสังเกตได้ว่าลำแสงที่ไปตกกระทบบนฉากรับนั้นเกิดริ้วการแทรกสอดที่มีแถบมืดและแถบสว่างสลับกัน แนวตั้ง ดังรูปขวามือของรูปที่ 3.4

### 3.4 การควบคุม Piezo Driver



รูปที่ 3.5 Piezo Driver TPZ001

ในโครงการพิเศษนี้เราใช้ T-Cube Piezo Driver รุ่น TPZ001 ของ Thorlabs ซึ่งมีความสามารถในการควบคุมรูปที่มีลักษณะเปิดรวมทั้งมีการปรับแรงดันไฟฟ้าของ piezo drive และเลือกแหล่งสัญญาณขาเข้า เมื่อ T-Cube Piezo Driver ถูกนำมาใช้ร่วมกับตัวอ่าน T-Cube Strain Gauge (TSG001) จะมีความแม่นยำสูงในการดำเนินงานแบบลูปปิด

ไม่วารณิตๆ ทั้งสิน อีกทั้งหามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 ปุ่มบนแผงควบคุมและตัวบ่งชี้

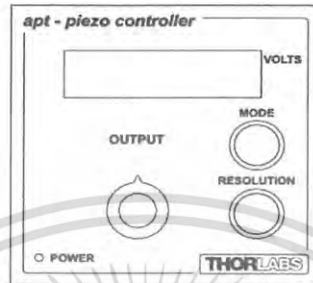
จอแสดงผล - แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับตัวกระตุ้น Piezo/อุปกรณ์ที่ซ่อนอยู่

OUTPUT Potentiometer - ใช้เพื่อกำหนดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับตัวกระตุ้น Piezo อุปกรณ์ที่ซ่อนอยู่

ปุ่มโหมด - ช่วยให้สามารถเข้าถึงการตั้งค่า (เช่น ตัวเลือกการควบคุมลูบเปิดหรือปิด)

ปุ่มความละเอียด - สลับการปรับ OUTPUT Potentiometer ระหว่างแบบ 'หยาบ' และ 'ละเอียด'

ไฟ LED - สว่าง เมื่อมีการใช้งาน



รูปที่ 3.6 ปุ่มบนแผงควบคุมและตัวบ่งชี้

### 3.4.2 การดำเนินงานของ OUTPUT Potentiometer

OUTPUT Potentiometer เป็นตัวเข้ารหัสแบบอนาล็อก ใช้ในการปรับแรงดันไฟฟ้าของ piezo drive ถ้าต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ให้หมุน potentiometer ตามเข็มนาฬิกา เมื่อเพิ่มแรงดัน ไฟฟ้าจนสูงสุด (ตั้งค่าผ่านทางซอฟต์แวร์) การหมุนตามเข็มนาฬิกาในครั้งต่อไปจะไม่มีผลกับ output เมื่อต้องการลดแรงดันไฟฟ้า ให้หมุนทวนเข็มนาฬิกา ในทำนองเดียวกัน เมื่อแรงดันไฟฟ้าลดลงจนถึง 0 V การหมุนทวนเข็มนาฬิกาครั้งต่อไปจะไม่มีผลกับ output แต่แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นทันทีที่หมุนตามเข็มนาฬิกา

### 3.4.3 การนำเดินงานของปุ่มต่างๆ

#### 1. ปุ่มความละเอียด

ปุ่มนี้มีไว้สำหรับควบคุมเพื่อสลับการปรับ OUTPUT ระหว่างแบบ 'หยาบ' และ 'ละเอียด' ในโหมดหยาบนั้น ค่าที่ปรับได้ต่อครั้งจะต่างกันค่อนข้างมาก โดยมากกว่าแบบละเอียดถึง 10 เท่า ในโหมดลูบเปิดช่วงที่เต็ม 150V จะตรงกับกับการหมุนปรับแบบหยาบ 12 ครั้ง

#### 2. ปุ่มโหมด

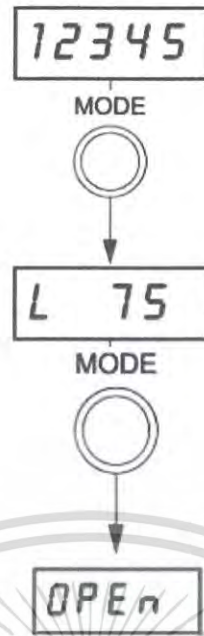
ปุ่ม Mode ช่วยให้สามารถเข้าถึงการตั้งค่า การกำหนดค่าที่สำคัญใน piezo Cube ช่วยให้ผู้ใช้จำกัดช่วงแรงดันไฟฟ้า output ได้ถึง 75V, 100V หรือ 150V; เลือกระหว่างการดำเนินการลูบเปิดและปิด; และปรับความสว่างหน้าจอ ในการใช้งานที่ Piezo Cube จะถูกใช้ในโหมดลูบปิดควบคู่กับ Strain Gauge Reader cube (TSG001) ปุ่มโหมดนี้ยังช่วยให้ผู้ใช้เลือกกระหว่าง 3 วิธีการในการกำหนดเส้นทางสัญญาณ feedback เพื่อจะผ่านเมนูตัวเลือกให้กดปุ่ม Mode สั้น ๆ (นั่นคือกดน้อยกว่า 1 วินาที) ในการบันทึก กดปุ่ม Mode มานานกว่า 1 วินาที การตั้งค่าเมนูปัจจุบันจะแสดงเป็นจุดทศนิยมที่ด้านขวามือของจอแสดงผล

#### 3. ขีดจำกัดแรงดันเอาต์พุต

กดปุ่มโหมดเพื่อเข้าสู่เมนูการตั้งค่าขีดจำกัดแรงดันเอาต์พุต ตัวกระตุ้น Piezo ต้องเชื่อมต่อกับ Cube ที่มีการระบุช่วงแรงดันไฟฟ้าในการทำงานสูงสุด

กดปุ่ม Mode เพื่อเลือกแรงดันเอาต์พุตสูงสุดที่เกี่ยวข้องกับตัวกระตุ้น Piezo ของคุณ 75V, 100V หรือ 150V

กดปุ่ม Mode ค้างไว้เพื่อบันทึกการตั้งค่า กดปุ่ม Mode เพื่อดำเนินการการตั้งค่า ลูบเปิด/ปิด โยชน์ด้านการค้า  
หมายเหตุ: การตั้งค่านี้อาจจะไม่หายไป เช่น ภายหลัง ถ้ามีการเปิดใช้งานขึ้นมา การตั้งค่าเดียวกันจะนำไปใช้โดย  
อัตโนมัติ



รูปที่ 3.7 การเลือกค่าจำกัดทางแรงดันไฟฟ้า

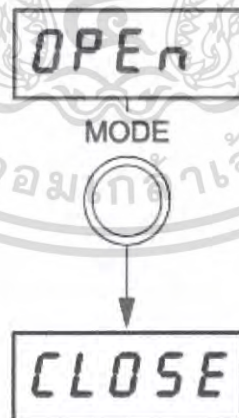
#### 4. การตั้งค่า ลูปเปิด / ปิด

เมื่อ T-Cube Piezo Driver ถูกนำมาใช้ร่วมกับตัวอ่าน T-Cube Strain Gauge (TSG001) จะมีความแม่นยำสูงในการดำเนินงานแบบลูปปิด ทำได้โดยใช้ช่วงการวัดทั้งหมดของ feedback ของตัวกระตุ้น Piezo ที่พร้อมใช้งานจาก ThorLabs

กดปุ่ม Mode เพื่อเลือกการควบคุมลูปเปิดหรือปิด

กดปุ่ม Mode ค้างไว้ เพื่อบันทึกการตั้งค่า

หมายเหตุ. การตั้งค่านี้อาจไม่สามารถบันทึกได้ นั่นคือการที่เปิดใช้ในภายหลัง มักจะเริ่มต้นที่โหมดเปิดลูป



รูปที่ 3.8 การตั้งค่าลูปเปิด / ปิด

#### 5. การตั้งค่ารับสัญญาณจากภายนอก

T-Cube Piezo Driver มี 3 ปังจยเอาต์พุตซึ่งมีฟังก์ชันขึ้นอยู่กับว่า Cube ที่มีการใช้ในโหมด ลูปเปิดหรือปิด กดปุ่ม Mode เพื่อดำเนินการต่อการตั้งค่าการรับสัญญาณจากภายนอก

หาก Ch 1 ถูกเลือกอยู่ สัญญาณ feedback จะไหลผ่านช่องทั้งหมด

ไม่ว่าหาก Ch 2 ถูกเลือกอยู่ สัญญาณ feedback จะระหว่างคู่ของช่อง T-Cube ที่อยู่ติดกันทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาก S1 ถูกเลือกอยู่สัญญาณจะถูกส่งผ่านทางช่องเสียบ SMA บนแผงด้านหลัง  
กดปุ่ม Mode เพื่อเลือกการป้อน input ที่ Ch 1 Ch 2 หรือ S1 (SMA)  
กดปุ่ม Mode ค้างเพื่อบันทึกการตั้งค่า  
กดปุ่ม Mode ค้างเพื่อดำเนินการตั้งค่า เปิด / ปิด ในการรับสัญญาณจากภายนอก

#### 6. การเปิดใช้หรือปิดสัญญาณภายนอก

ในโหมดคลุ่เปิด การรับสัญญาณจากภายนอก (ch 1 Ch 2 หรือ SMA) ใช้ในการควบคุม  
วงจรรขยายแรงดันสูง การเลือกป้อนข้อมูลสามารถเปิดหรือปิดการใช้งานง่ายๆโดยใช้เมนูตัวเลือกเหล่านี้

ES En - เปิดใช้งานการรับสัญญาณจากภายนอก

ES dl - ปิดการใช้งานการรับสัญญาณจากภายนอก

กดปุ่ม MODE เพื่อเลือกค่าที่ต้องการ

กดปุ่ม MODE เพื่อเปิดใช้งานการตั้งค่าและบันทึก

เมื่อบันทึก การตั้งค่านี้ไม่ถูกลบ ดังนั้นหลังจากที่ใช้งานรอบต่อไป เครื่องจะใช้ตัวเลือกเปิดหรือปิดรับ  
สัญญาณจากภายนอกที่ถูกเลือกไว้ เมื่อเปิดใช้งานโดยอัตโนมัติ



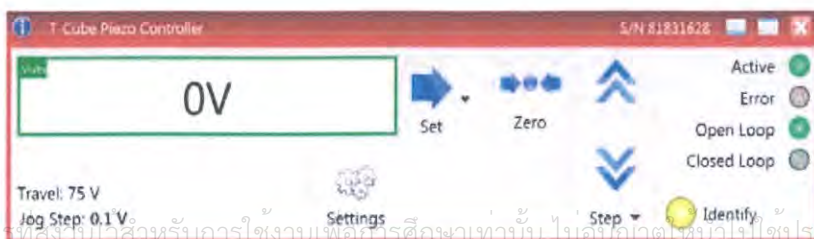
รูปที่ 3.9 การเปิด / ปิดใช้การรับสัญญาณจากภายนอก

#### 3.4.4 การใช้ Kinesis Software

แอปพลิเคชัน Kinesis ช่วยให้ผู้ใช้สามารถโต้ตอบกับจำนวนใด ๆ ของชุดควบคุมฮาร์ดแวร์ที่  
เชื่อมต่อกับ PC USB Bus โปรแกรมนี้สามารถแสดงกราฟิกได้หลายแผงเครื่องมือเพื่อให้สามารถควบคุมได้  
หลายๆอุปกรณ์ ทุกปัจจัยขั้นพื้นฐานในการดำเนินการและการทำงานพื้นฐานทั้งหมด (เช่นขยับ Piezo)  
สามารถเริ่มต้นด้วยการตั้งค่าผ่านโปรแกรมนี้

1) ให้เปิดเครื่องฮาร์ดแวร์และรอจนกระทั่ง TPZ001 บุตเสร็จสิ้น แล้วรันซอฟต์แวร์ Kinesis - Start / All  
Programs / Thortlabs / Kinesis / Kinesis

อุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่บน USB Bus จะลงทะเบียนเซิร์ฟเวอร์โดยอัตโนมัติ และแสดงแผง GUI ที่เกี่ยวข้องดัง  
รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุม Piezo

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดำเนินงานของลูเปิด

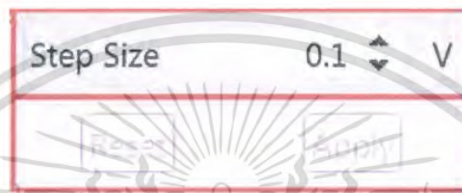
ขั้นตอนต่อไปจะอธิบายวิธีการกระตุ้น Piezo ให้ขับเคลื่อน ในโหมดลูเปิด Piezo สามารถปรับตำแหน่งได้สามวิธี: โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า, โดยใช้ 'Output' Potentiometer หรือโดยการคลิกที่ปุ่ม 'Jog'

### 1. Jogging the Piezos

เมื่อปุ่ม jog ถูกกด Piezo จะขยับโดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถูกระบุไว้ในช่อง Jog Step Size

คลิกที่ลูกศรชี้ขึ้น เพื่อผลัก Piezo เบาๆ ให้สังเกตว่าแรงดันไฟฟ้ามีการเพิ่มขึ้นที่จอแสดงผล ในทุกครั้งที่มีการคลิกปุ่มลูกศร

คลิกที่ลูกศรชี้ลง เพื่อลดค่าแรงดันไฟฟ้า ให้สังเกตว่าแรงดันไฟฟ้ามีการลดลงที่จอแสดงผล ในทุกครั้งที่มีการคลิกปุ่มลูกศร



รูปที่ 3.11 การใส่ค่าแรงดันไฟฟ้าใน Jog Step Size

### 2. การดำเนินงานของลูปิด

ขั้นตอนต่อไปนี้อธิบายการดำเนินการพื้นฐานของ Piezo Driver T-Cube เมื่อใช้ร่วมกับ Strain

Gauge Reader T-Cube

คลิกปุ่ม Setting บนแผง GUI ของ Piezo Driver จะแสดงผลแผงการตั้งค่าดังรูปที่ 3.4.8



รูปที่ 3.12 การตั้งค่า Piezo Driver

ให้ทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่อไปนี้

เพื่อการควบคุม

โหมดลูปิด - เลือกลูปิด

เลือกแรงดันไฟฟ้าสูงสุด - ตั้งแรงดันไฟฟ้าที่สอดคล้องกันสำหรับขับเคลื่อน Piezo ที่แรงดันไฟฟ้า 75V, 100V หรือ 150V ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 T-Cube Strain Gauge Reader



รูป 3.13 T-Cube Strain Gauge Reader (TSG001)

ในโครงการพิเศษนี้ ใช้ใช้ T-Cube Piezo Driver รุ่น TPZ001 ซึ่งต้องมีการใช้งานร่วมกับ T-Cube Strain Gauge Reader รุ่น TSG001 ของ Thorlabs ด้วย โดยตัวอ่าน T-Cube Strain Gauge เป็นตัวอ่านช่องทางเดียวแบบใหม่ที่มีขนาดกะทัดรัด สามารถเตรียมการดำเนินงานทันทีที่ 'ออกจากกล่อง' สำหรับการไม่ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์อุปกรณ์ถูกจัดให้มีการอ่านข้อมูลตำแหน่ง LED และปุ่ม Mode ในการเปลี่ยนแปลงหน่วยแสดงผลและตั้งจุดตำแหน่งที่ศูนย์ นอกจากนี้อุปกรณ์ยังถูกจัดให้มีการแสดงผลตำแหน่ง SMA การส่งออกการสร้างแรงดันไฟฟ้าแบบอะนาล็อก (0-10V) เป็นสัดส่วนกับสัญญาณ strain gauge

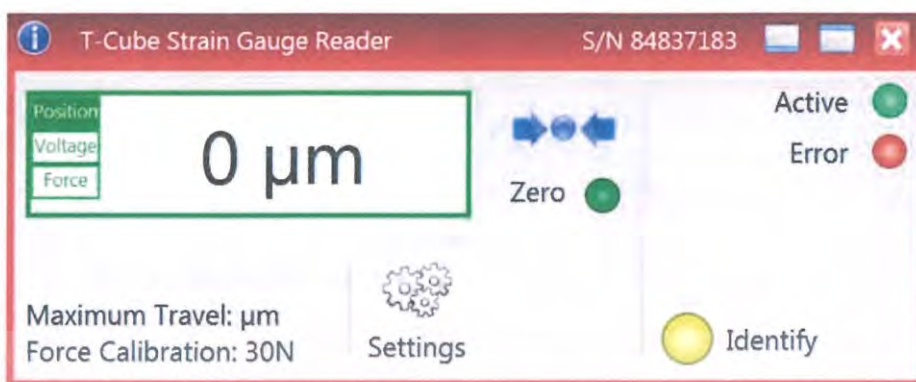
เพื่อความสะดวก ชุดอุปกรณ์นี้ได้รับการเก็บไว้ในค้ำที่น้อยที่สุด วัดได้ 60mm x 60mm x 47mm เท่านั้น และมีสิ่งอำนวยความสะดวกในการติดตั้งโดยตรงกับโต๊ะที่ใช้จัดแสงไปยังอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม การดำเนินงานบนโต๊ะยังช่วยให้ใช้ความยาวสายเคเบิลได้น้อยที่สุด เพื่อจัดการสายเคเบิลได้ง่ายขึ้น การควบคุมด้วยตนเองทั้งหมดตั้งอยู่บนหน้าด้านบนของตัวเครื่อง – สะดวกมากเมื่อใช้ตรวจสอบตำแหน่งที่ง่ายต่อการอ่านจอแสดงผลแรงดันไฟฟ้า (ปรับความสว่างได้)

#### 3.5.1 ข้อมูลทั่วไปของซอฟต์แวร์ kinesis

การควบคุม kinesis เป็นการรวบรวมคอมพิวเตอร์เน็ตซอฟต์แวร์สำหรับที่จัดหาทั้งอินเตอร์เฟซผู้ใช้แบบกราฟิกและอินเตอร์เฟซโปรแกรมให้สามารถนำใช้งานได้ใหม่ การควบคุมดังกล่าวเป็นจำนวนมากสามารถใช้ได้สำหรับการพัฒนาโปรแกรม Windows ซึ่งให้ช่วงที่หลากหลายสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ของฟังก์ชัน ตัวอย่างเช่น มีการควบคุมที่สามารถนำมาใช้เพื่อจัดการไฟล์ภาพ เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตหรือเพียงอินเตอร์เฟซผู้ใช้กับส่วนประกอบเช่นปุ่มและกล่องรายการ

ด้วยระบบ Kinesis ควบคุมสุทธิจะนำไปใช้เพื่อให้การควบคุมโดยตรง (และยังสะท้อนให้เห็นถึงสถานะ) ช่วงของการควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์รวมทั้ง Piezo T-Cube การใช้งานซอฟต์แวร์ ตัวควบคุมสุทธิมักจะถูกเรียกว่า 'การใช้งานของลูกค้า' การควบคุมสุทธิเป็นองค์ประกอบภาษาซอฟต์แวร์อิสระดังนั้นการควบคุมสามารถรวมอยู่ในช่วงกว้างของการพัฒนาสภาพแวดล้อมซอฟต์แวร์สำหรับการใช้งานโดยนักพัฒนาโปรแกรมของลูกค้า การพัฒนาสภาพแวดล้อมที่สนับสนุนรวมถึง Visual Basic, Labview, Visual C++, Matlab, VB.NET, C # .NET และผ่าน VBA, โปรแกรม Microsoft Office เช่น Excel และ Word ไม่จำกัดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

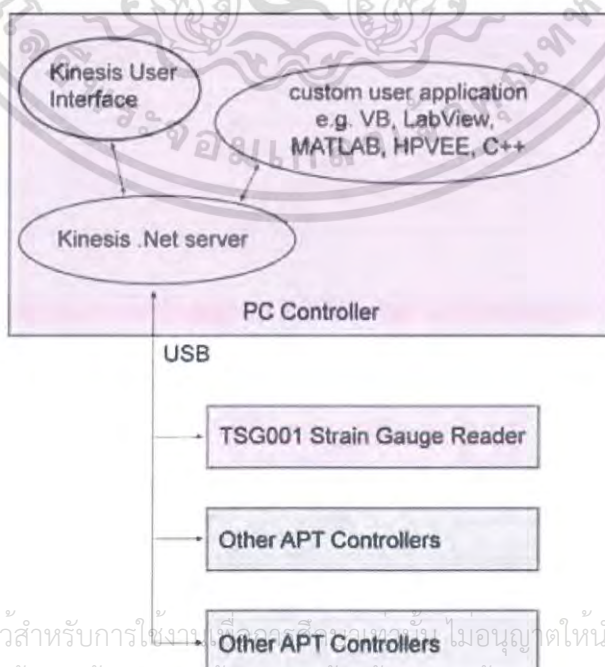
พิจารณาการควบคุมที่จัดมาสำหรับอุปกรณ์ TSG001 Strain Gauge T-Cube



รูป 3.14 T-Cube Strain Gauge Program

การควบคุมนี้มีแผงเครื่องมือแบบกราฟิกที่สมบูรณ์สำหรับผู้ใช้ เพื่อยอมให้ Strain Gauge จะได้รับการดำเนินการด้วยการปรับมือ เช่นเดียวกับชุดที่สมบูรณ์ของฟังก์ชันซอฟต์แวร์ (มักเรียกว่าวิธีการ) เพื่อให้พารามิเตอร์ทั้งหมดได้รับการตั้งค่าและการควบคุมการดำเนินงาน Strain Gauge เพื่อเป็นไปโดยอัตโนมัติโดยโปรแกรมลูกข่าย แผงเครื่องมือสะท้อนให้เห็นถึงสถานะการทำงานต่างๆ ของอุปกรณ์ควบคุมที่เชื่อมโยงกัน (เช่น การอ่าน Strain Gauge ) การปรับปรุงแผงจะเกิดขึ้นโดยอัตโนมัติเมื่อผู้ใช้ (ลูกข่าย) โปรแกรมต่อสายซอฟต์แวร์เข้ามาสู่การควบคุมที่เหมือนกัน ตัวอย่างเช่นถ้าโปรแกรมลูกข่ายสั่งควบคุม Strain Gauge ให้ตำแหน่งเป็นศูนย์ ความคืบหน้าจะถูกตรวจสอบโดยอัตโนมัติโดยการเปลี่ยนตำแหน่งการอ่านข้อมูลบนอินเตอร์เฟซแบบกราฟิกโดยไม่จำเป็นต้องมีการแทรกแซงการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติม

การรวบรวมการควบคุม Kinesis ทำให้เกิดชุดที่สมบูรณ์ของแผงผู้ใช้แบบกราฟิกและอินเตอร์เฟซ โปรแกรมได้ช่วยให้ผู้ใช้และนักพัฒนาโปรแกรมลูกข่ายในการโต้ตอบอย่างต่อเนื่องกับฮาร์ดแวร์ Kinesis ตัวควบคุม Kinesis แต่ละตัวมีการเชื่อมโยงกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 3.15 ระบบแผนภาพ

### 3.5.2 เชื่อมต่อกับฮาร์ดแวร์

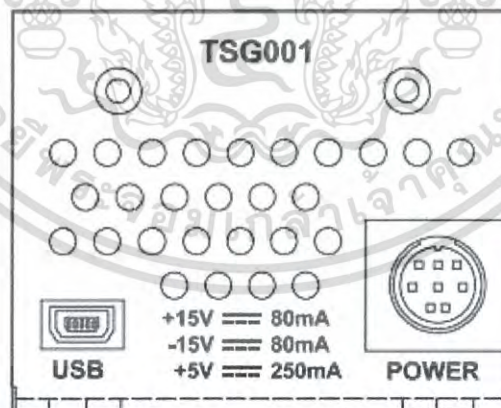
- 1) ดำเนินการติดตั้งทางกล
- 2) ติดตั้งซอฟต์แวร์ Kinesis
- 3) เชื่อมต่อ Strain Gauge ไปยังหน่วยควบคุม
- 4) การเชื่อมต่อหน่วยควบคุมกับแหล่งจ่ายไฟ
- 5) เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกับแหล่งจ่ายหลักและ'เปิด'สวิตช์ หมายเลขรุ่นของซอฟต์แวร์ที่ฝังตัวจะปรากฏขึ้นในขณะที่เครื่องบูสต์ หากอุปกรณ์มีการใช้กับ TCH002 USB Controller hub จำนวนช่องเสียบที่แสดงปรากฏเวอร์ชันของซอฟต์แวร์จะเป็นประโยชน์เมื่อมีการขอการสนับสนุนทางเทคนิค
- 6) ต่อเครื่องควบคุมไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ของคุณ

### 3.5.3 การจ่ายแรงดันไฟฟ้าและความต้องการกระแสไฟฟ้า

Supply	Minimum	Maximum	Max Operating Current
+5V	+4.9V	+5.1V	400 mA
+15V	+14.5V	+15.5V	250 mA
-15V	-14.5V	-15.5V	100 mA

รูป 3.16 การจ่ายแรงดันไฟฟ้าและความต้องการกระแสไฟฟ้า

### 3.5.4 การเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟแบบสแตนด์อโลน

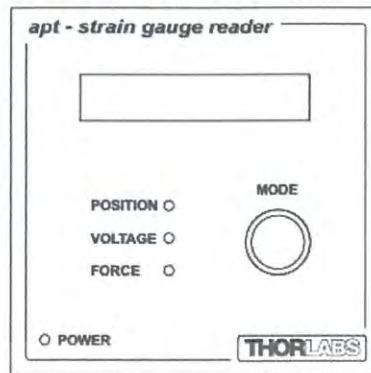


รูป 3.17 ด้านหน้าแผงตัวเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟ

- 1) เชื่อมต่อด้านหน้าแผงดังรูป กับอุปกรณ์การควบคุมแหล่งจ่ายไฟ DC
- 2) เปิดสวิตช์เครื่องแหล่งจ่ายไฟ
- 3) หมายเลขเวอร์ชันของซอฟต์แวร์ที่ฝังตัวอยู่จะแสดงในไม่กี่วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.5 ปุ่มบนแผงควบคุมและตัวชี้วัด



รูป 3.18 แผงควบคุมและตัวชี้วัด

#### ปุ่ม Mode

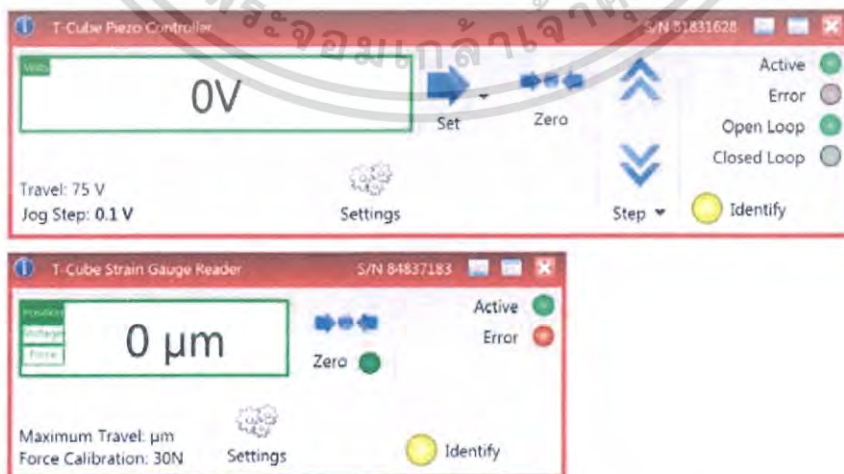
1) กดและปล่อยเพื่อสลับระหว่างโหมดการแสดงผล :  
ตำแหน่ง - โหมดนี้จะแสดงตำแหน่งของเซ็นเซอร์ในระดับไมโครเมตร  
แรงดันไฟฟ้า - โหมดนี้จะแสดงสัดส่วนแรงดันไฟฟ้ากับสัญญาณโดยวัดจาก strain gauge ช่วง 0 ถึง 10V (10V เป็นสเกลเต็มของการโก่งตัว)

Force - ในโหมดนี้สัญญาณเซ็นเซอร์ strain gauge มีการปรับให้เป็นแรงในหน่วยนิวตัน สเกลเต็มของการโก่งตัวกำหนดไว้ในในการตั้งแผง

2) กดค้างเพื่อให้เซ็นเซอร์อยู่ในตำแหน่ง null

### 3.5.6 การใช้ซอฟต์แวร์ Kinesis

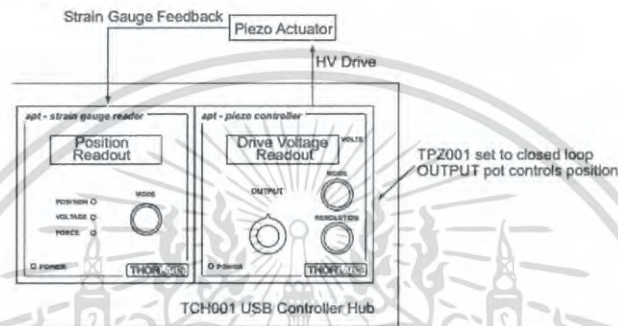
เปิดเครื่องฮาร์ดแวร์และรอนจนกระทั่ง TPZ001 บูตเสร็จสิ้น แล้วรันซอฟต์แวร์ Kinesis - Start/All Programs/Thorlabs/Kinesis/Kinesis อุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่บน USB Bus จะลงทะเบียนเซิร์ฟเวอร์โดยอัตโนมัติ และแสดงแผง GUI ที่เกี่ยวข้องดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของทางบริษัทที่ผลิตออกให้ และอยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้งาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.7 การใช้ Strain Gauge Reader T-Cube กับ a Piezo Driver T-Cube

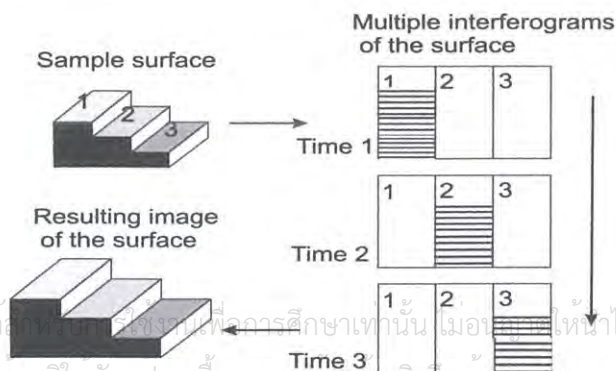
- 1) ตั้งค่าเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งศูนย์
- 2) กดปุ่ม Mode เพื่อตั้งค่า Strain Gauge T-Cube ไปที่โหมด 'ตำแหน่ง'
- 3) หมุนควบคุมเอาท์พุท Piezo Drive T-Cube ตามเข็มนาฬิกา ขอให้สังเกตว่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อแสดงแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นที่ถูกนำไปใช้กับ Piezo การแสดงผลตำแหน่งบน Strain Gauge Reader T-Cube แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นในตำแหน่ง (ระดับไมครอน)
- 4) หมุน เอาท์พุทควบคุมทวนเข็มนาฬิกา ขอให้สังเกตว่าแรงดันไฟฟ้าลดลงเพื่อแสดงแรงดันไฟฟ้าลดลงที่ถูกนำไปใช้กับ Piezo การแสดงผลตำแหน่งบน Strain Gauge Reader T-Cube แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนที่ลดลงในตำแหน่ง (ระดับไมครอน)



รูป 3.20 แผนผังภาพวาดการจ้ดเรียงของ Piezo และ Strain Gauge T-Cube

### 3.6 ทดสอบโดยใช้ตัวอย่างที่มีความแตกต่างของพื้นผิว

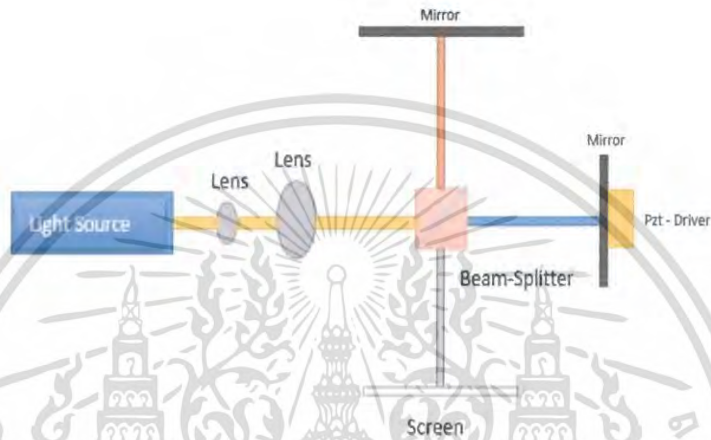
ทำได้โดยการจ้ดระบบแสง Michelson Interferometry โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจาก LED สีฟ้า แล้วเปลี่ยนจากกระจกความเรียบสูงบานใดก็ได้ เป็นตัวอย่างพื้นผิวที่ต้องการวัด ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ใช้ตัวอย่างพื้นผิวที่มีความสูงแตกต่างกัน 2 ระดับ และ 3 ระดับ ที่ทำการวัดโดยการปรับระยะจากการควบคุม Piezo Driver ไปเรื่อยๆจะพบว่าริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลง คือเกิดริ้วการแทรกสอดขึ้นเฉพาะพื้นผิวในแต่ละระดับไล่จากความสูงที่มากที่สุดไปจนถึงความสูงที่ต่ำที่สุด โดยเริ่มจากระดับที่ 1 ที่มีความสูงมากที่สุด เมื่อปรับระยะเลื่อนไปเรื่อยๆจะเกิดริ้วการแทรกสอดของพื้นผิวในระดับที่ 2 และ 3 สังเกตได้ว่าริ้วการแทรกสอดจะไม่เกิดขึ้นพร้อมกันในระดับพื้นผิวที่มีความสูงต่างกัน เพราะในขณะที่เกิดริ้วการแทรกสอดของพื้นผิวระดับใดระดับหนึ่งนั้น คือการที่ระยะห่างระหว่างตัวอย่างถึงตัวแยกแสง กับระยะห่างระหว่างกระจกความเรียบสูงถึงตัวแยกแสง มีระยะอยู่ในช่วงความยาวโคฮีเรนซ์ของแสง LED สีฟ้า ซึ่งพื้นผิวอีก 2 ระดับที่ต่างกันไม่ได้มีระยะอยู่ในช่วงความยาวโคฮีเรนซ์ จึงไม่เกิดริ้วการแทรกสอดของพื้นผิวในระดับนั้นขึ้น ดังรูปตัวอย่างที่ 3.12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงแก้ไขและดัดแปลงข้อมูลเชิงเทคนิคของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
รูปที่ 3.21 ทดสอบโดยใช้ตัวอย่างที่มีความแตกต่างของพื้นผิว

### 3.7 การวิเคราะห์ภาพ

แนวคิดของระบบ VSI ที่ใช้ในหลายๆงานวิจัย เป็นดังที่เห็นในรูปที่ 3.14 ลำแสงขนานจากแหล่งกำเนิดแสง Blue LED (Blue Light emitting diode) แพร่กระจายผ่าน beamsplitter (BS) และแบ่งออกเป็นสองแขน แขนหนึ่ง เรียกว่ากลุ่มตัวอย่างที่แขนไปตรงกับตัวอย่าง อีกแขนเรียกว่าแขนอ้างอิงไปตรงกับกรอ้างอิงกระจกเงา สะท้อนให้เห็นตัวอย่างและการอ้างอิงแขนที่รวมกันอีกครั้งที่ beamsplitter (BS) ในการผลิตรูปแบบของรีวการแทรกสอด ตรวจจับโดยกล้อง CCD โดยกำหนดตัวอย่างและการเคลื่อนย้ายกระจกอ้างอิงในทิศทางแกน Z ของแต่ละพิกเซล CCD สามารถตรวจสอบความเข้มแสงที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งทิศทางแกน Z ของแขนอ้างอิง

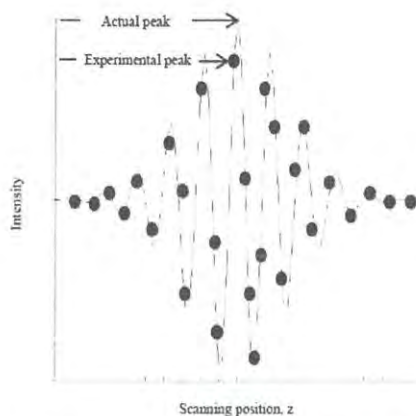


รูปที่ 3.22 แผนผังการจัดวางระบบ VSI ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED

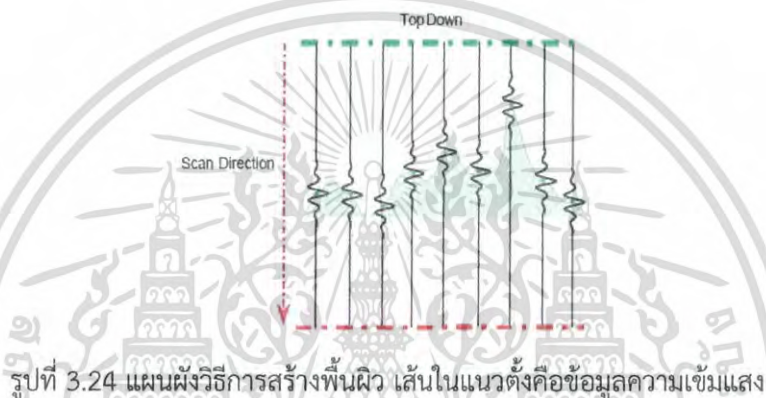
การแทรกสอดของไมเคิลสันและ Blue LED (Blue Light emitting diode) ถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายลักษณะรายละเอียดของพื้นผิวของตัวอย่าง ระบบทดลองได้รับการจัดวางแสดงในรูป 3.14 มี Blue LED (Blue Light emitting diode) สร้างลำแสง, ทำให้เป็นรังสีโดย Len 1 และ Len 2 ที่จะกลายเป็นลำแสงขนาน จากนั้นลำแสงนี้แยกออกเป็นสองแขน คือ แขนอ้างอิงและแขนตัวอย่างโดย beamsplitter (BS) แต่ละลำแสงจะสะท้อนจากจุดสิ้นสุดของแต่ละแขนรวมเข้าด้วยกันและเดินทางไปยังฉากรับ ซึ่งได้รับการตรวจจับโดยกล้อง CCD ที่มีความละเอียด 8 ล้านพิกเซล เพราะเส้นทางของชุดลำแสงนี้บรรจุด้วยความแตกต่างระหว่างสองแขน จึงมีรูปแบบการแทรกสอดที่สามารถสังเกตได้ ในฐานะที่เป็นลำแสงขนานสามารถสันนิษฐานเป็นแนวของแหล่งกำเนิดแสงขนาดเล็ก แต่ละพิกเซล CCD ยังสามารถตรวจจับ interferogram ของพื้นที่เล็กๆ ของพื้นผิวตัวอย่างได้ด้วย

สำหรับการบันทึก interferogram, กระจกอ้างอิงติดตั้งอยู่แทน PZT ที่ปลายแขนอ้างอิงจะค่อยๆ ขยับไปตามทิศทางแนวแกน Z โดยการควบคุมคอมพิวเตอร์ เพราะ Blue LED (Blue Light emitting diode) มีความยาวคลื่นกลาง เป็น 646 นาโนเมตร เลือกระดับของการขยับแทน PZT ให้เป็น 10 นาโนเมตร (0.01 ไมครอน) ในการส่ง ชุดของสัญญาณความเข้มแสงตรวจพบโดยแต่ละพิกเซล CCD ในทุกชั้นจะผลิตแต่ละ interferogram ตัวอย่างของ interferogram ที่เก็บรวบรวมโดยหนึ่งพิกเซล CCD แสดงให้เห็นในรูป 3.15 จากนั้นใช้ความเข้มแสงสูงสุดเป็นตัวกำหนดความสูงที่แท้จริง เพื่อใช้เป็นตัวแทนของความสูงของพื้นผิวที่บริเวณพิกเซลนั้น โดยการรวมผลจากแต่ละพิกเซล CCD รายละเอียดความสูงของพื้นผิวที่ได้จากความเข้มแสงจะสามารถสร้างขึ้นได้ดังรูป 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



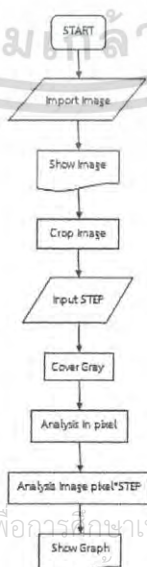
รูปที่ 3.23 interferogram ที่เก็บรวบรวมโดยหนึ่งพิกเซล CCD



รูปที่ 3.24 แผนผังวิธีการสร้างพื้นผิว เส้นในแนวตั้งคือข้อมูลความเข้มแสง

### 3.8 การสร้างโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว

เนื่องจากการจะวิเคราะห์ภาพที่ได้จัดเก็บมานั้นต้องสร้างโปรแกรมวิเคราะห์เฉพาะขึ้นมาซึ่งโปรแกรมที่เป็นตัวสร้างขึ้นคือ Matlab โดยทำการใช้ฟังก์ชันในส่วนของ Image Processing โดยเริ่มต้นเราได้ทำการศึกษาฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ภาพและจากนั้นได้ทำการออกแบบและใช้คำสั่งต่างๆ ที่ได้จากการศึกษามาประกอบจึงได้โปรแกรมวิเคราะห์ที่ออกมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

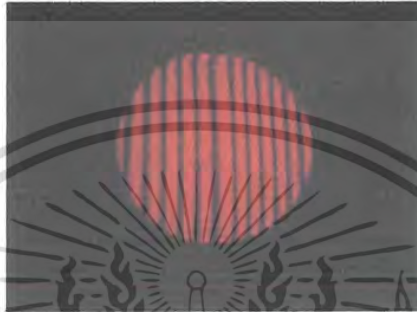
รูปที่ 3.25 Flowchart การสร้างโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser แบบลำแสงขนาน

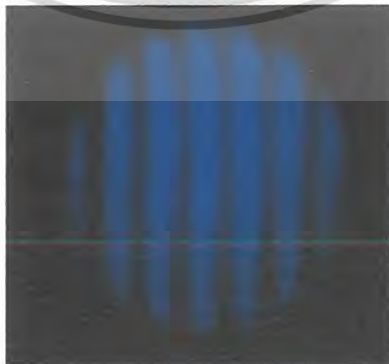
เมื่อทดลองจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย He-Ne Laser แหล่งกำเนิดแสงขนาน รี้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงเรียงกันในแนวตามยาว



รูปที่ 4.1 รี้วการแทรกสอดจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser แบบขนาน

#### 4.2 ผลจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED (Blue Light emitting diode)

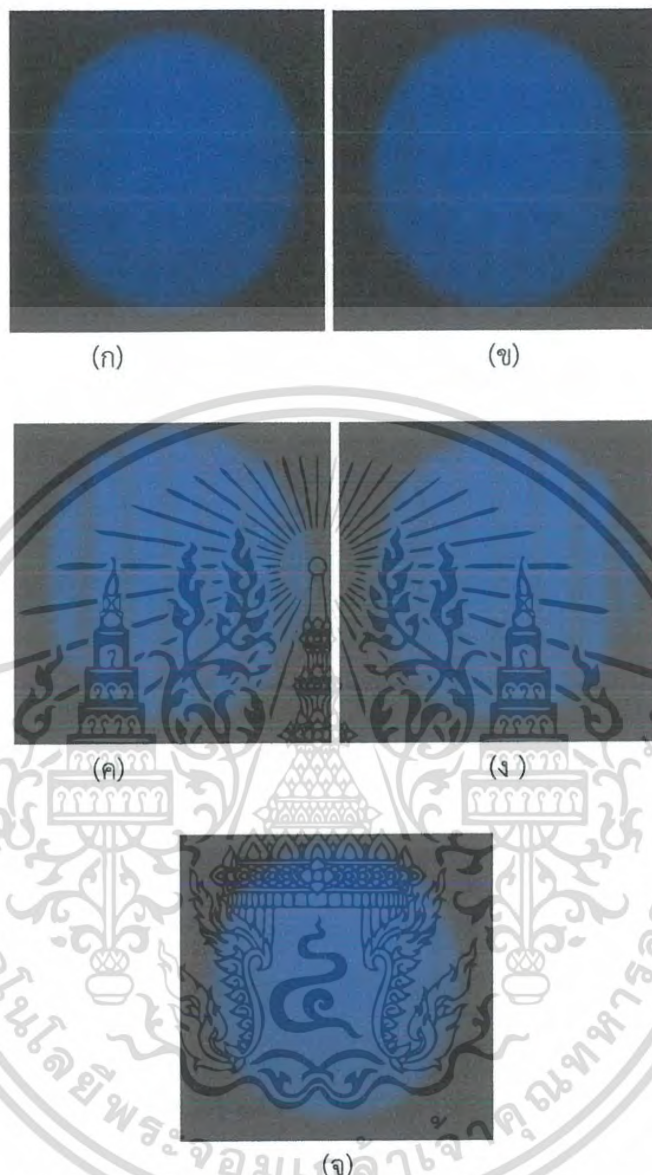
เมื่อทดลองจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย LED สีฟ้า นั้น รี้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงเรียงกันในแนวตามยาวคล้ายกันกับรี้วการแทรกสอดจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วยแหล่งกำเนิดแสง He-Ne Laser แบบขนาน แต่มีความคมชัดน้อยกว่า และเกิดรี้วการแทรกสอดได้ยากกว่าเนื่องจากความยาวโคฮีเรนซ์ของ LED สีฟ้า นั้นมีระยะสั้นกว่าความยาวโคฮีเรนซ์ของเลเซอร์มาก จึงต้องใช้เพียโซอิเล็กทริกในการควบคุมการปรับระยะของกระจกตัวอย่างเพื่อช่วยหาช่วงความยาวโคฮีเรนซ์ของ LED สีฟ้า ซึ่งเป็นผลจากการแทรกสอดของแสงสีฟ้าระหว่างกระจกความเรียบสูงกับพื้นผิวตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4.2 รี้วการแทรกสอดจากการจัดระบบแสง Michelson Interferometry แหล่งกำเนิดแสง Blue LED (Blue Light emitting diode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ความคุมระยะกระจกตัวอย่างโดยกำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้กับ Piezo Driver ซึ่งผิวของตัวอย่างทดสอบเป็นกระจกความเรียบสูง และใช้ฉากรับแสงเป็นกระดาดไข่

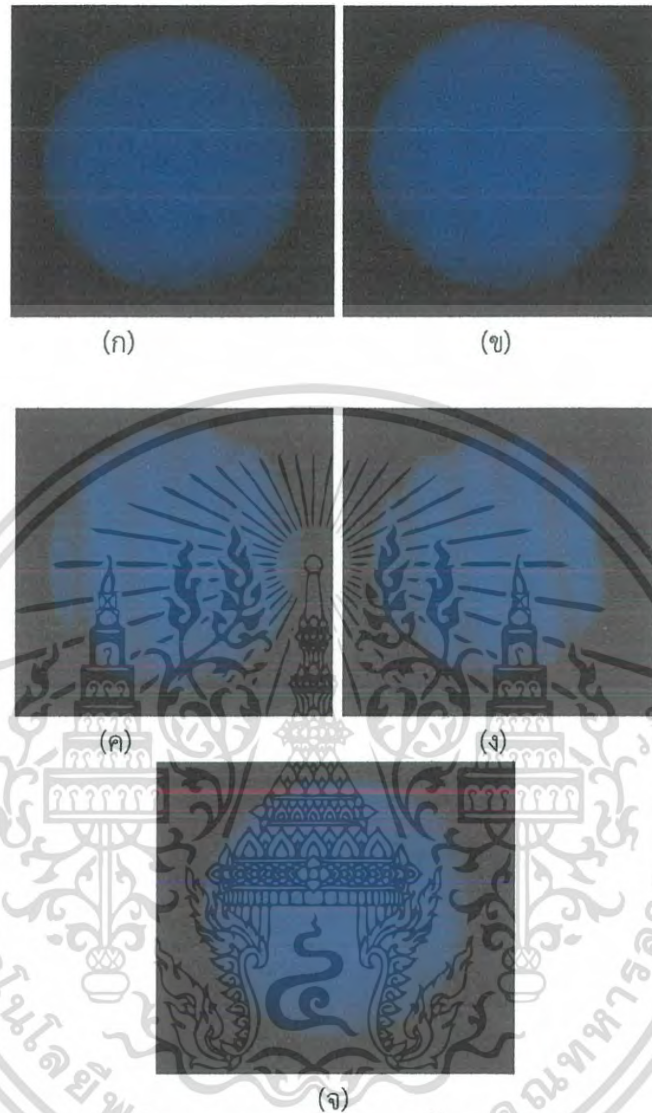


รูปที่ 4.3 ภาพรวิการแทรกสอดของผิวตัวอย่างทดสอบเป็นกระจกความเรียบสูงและใช้ฉากรับแสงเป็นกระดาดไข่

- (ก) ภาพรวิการแทรกสอดที่บันทึกได้เมื่อขยับไปเป็นระยะ 0 nm
- (ข) ภาพรวิการแทรกสอดที่บันทึกได้เมื่อขยับไปเป็นระยะ 200 nm
- (ค) ภาพรวิการแทรกสอดที่บันทึกได้เมื่อขยับไปเป็นระยะ 400 nm
- (ง) ภาพรวิการแทรกสอดที่บันทึกได้เมื่อขยับไปเป็นระยะ 600 nm
- (จ) ภาพรวิการแทรกสอดที่บันทึกได้เมื่อขยับไปเป็นระยะ 800 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ควบคุมระยะกระจกตัวอย่างโดยกำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้กับ Piezo Driver ซึ่งผิวของตัวอย่างทดสอบเป็นกระจกความเรียบสูง และใช้ฉากรับแสงเป็นกระจกฝ้าแทนที่การใช้กระดาษไข



รูปที่ 4.4 ภาพรีวการแทรกสอดของผิวตัวอย่างทดสอบเป็นกระจกความเรียบสูงและใช้ฉากรับแสงเป็นกระจกฝ้า

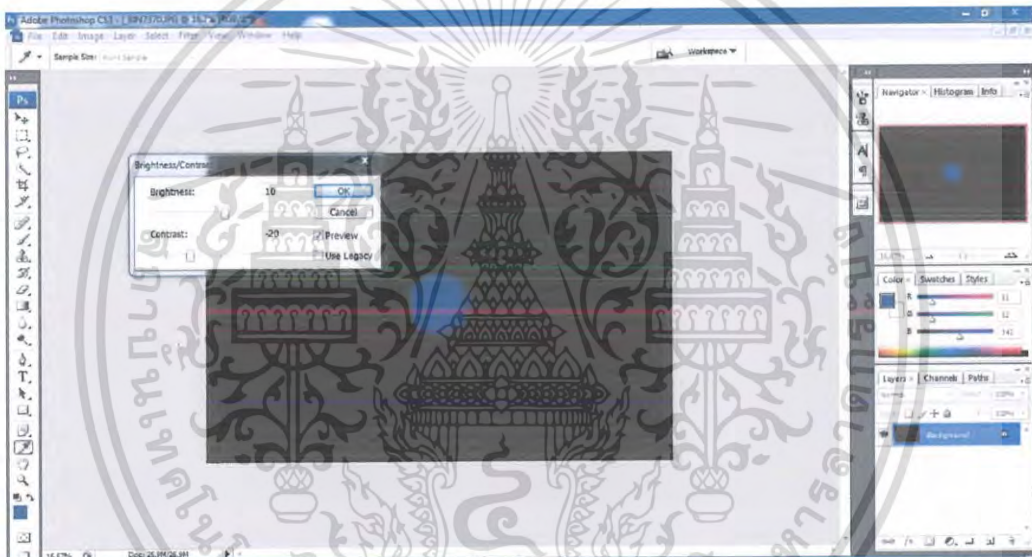
- (ก) ภาพรีวการแทรกสอดที่บันทึกได้เมื่อขยับไปเป็นระยะ 0 nm
- (ข) ภาพรีวการแทรกสอดที่บันทึกได้เมื่อขยับไปเป็นระยะ 210 nm
- (ค) ภาพรีวการแทรกสอดที่บันทึกได้เมื่อขยับไปเป็นระยะ 420 nm
- (ง) ภาพรีวการแทรกสอดที่บันทึกได้เมื่อขยับไปเป็นระยะ 620 nm
- (จ) ภาพรีวการแทรกสอดที่บันทึกได้เมื่อขยับไปเป็นระยะ 830 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การปรับแต่งภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

รูปภาพที่บันทึกได้จากการทดลองนั้น ในบางครั้งก็ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้โดยทันที เนื่องจากภาพอาจมีสัญญาณรบกวน (noise) มากเกินไปหรือมีความสว่างของริ้วการแทรกสอดไม่เพียงพอ, มีความละเอียดของภาพสูงมากจนทำให้ความเข้มแสงมีค่ากระโดดกว่าที่ควรเป็น และพื้นหลังของภาพมีค่า contrast มากเกินไป ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลทำให้การวิเคราะห์ภาพผิดพลาดได้ เราจึงต้องทำการปรับภาพ โดยการลด noise, ปรับค่า brightness, ปรับค่า contrast และเกลี่ยภาพ โดยในการปรับภาพแต่ละชุดนั้น ต้องปรับค่าเหล่านี้ให้เท่ากันทั้งหมดในทุกภาพ เพื่อป้องกันการผิดพลาดไปของความเข้มแสงที่จะใช้วิเคราะห์ ซึ่งเป็นข้อมูลในการใช้จำลองโครงสร้างพื้นผิวต่อไป

การปรับแต่งภาพนั้น สามารถทำได้โดยโปรแกรมหลายชนิด เช่น Adobe Photoshop, ACDSee Pro, Photoscape ฯลฯ ซึ่งจะเลือกใช้โปรแกรมใดก็ได้ตามความถนัดของผู้ใช้ เพราะมีเงื่อนไขในการปรับแต่งภาพมีเพียงข้อเดียว นั่นคือ ภาพที่ปรับแต่งเสร็จแล้วนั้นต้องมีคุณสมบัติที่ดีพอที่จะนำไปวิเคราะห์



รูปที่ 4.5 การปรับภาพก่อนนำไปใช้ในโปรแกรมวิเคราะห์

### 4.4 การใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์ความเรียบพื้นผิวของตัวอย่าง (VSI Analyze Simulation)

การใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์ความเรียบพื้นผิวของตัวอย่าง (VSI Analyze Simulation) มีขั้นตอนดังนี้

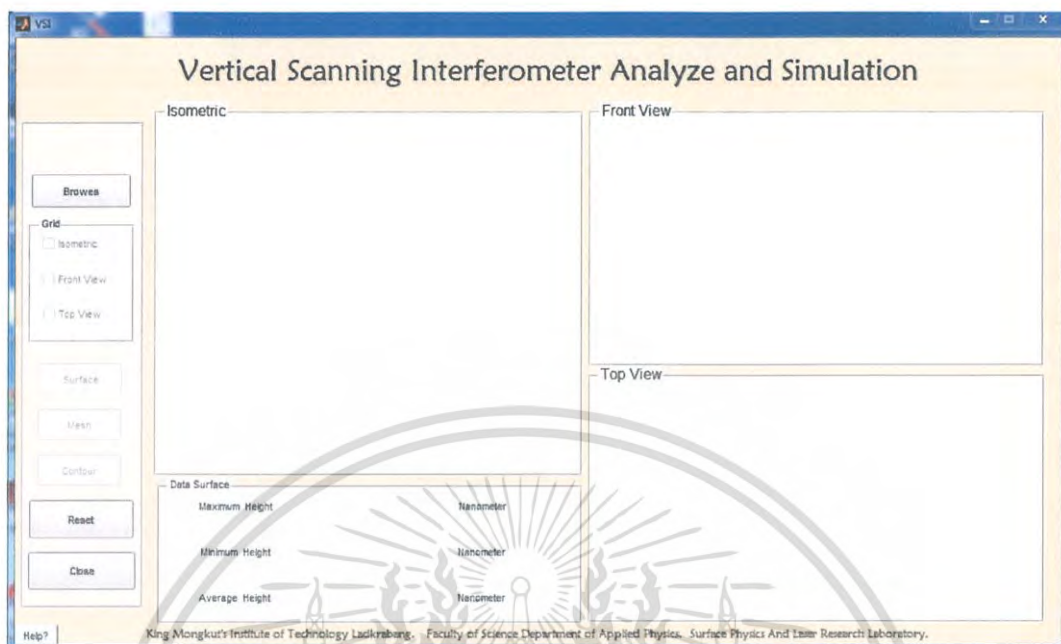
- ทำการเปิดใช้งานโปรแกรมหลังจากติดตั้งโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิวลงในคอมพิวเตอร์แล้ว โดยคลิกเลือกไอคอนโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว (VSI) จากหน้าเดสก์ทอปของคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีลักษณะดังรูป 4.4.1 แล้วดับเบิลคลิกที่ไอคอน 1 ครั้งเพื่อเปิดหน้าต่างโปรแกรมขึ้นมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

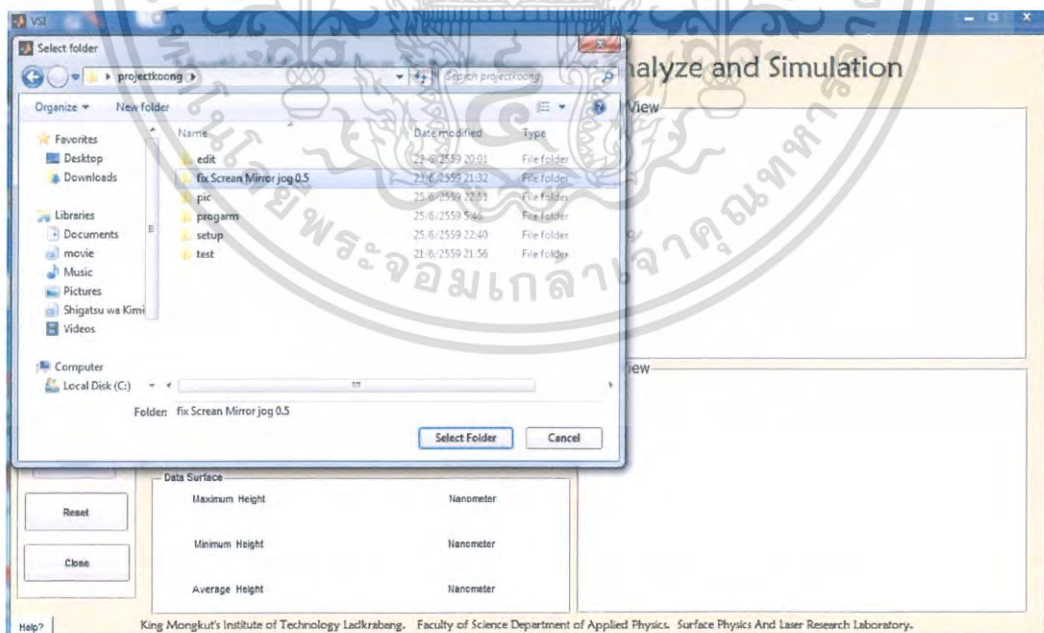
รูปที่ 4.6 ไอคอนโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว

จะได้หน้าต่างโปรแกรม ดังรูป 4.8



รูปที่ 4.7 หน้าต่างโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว

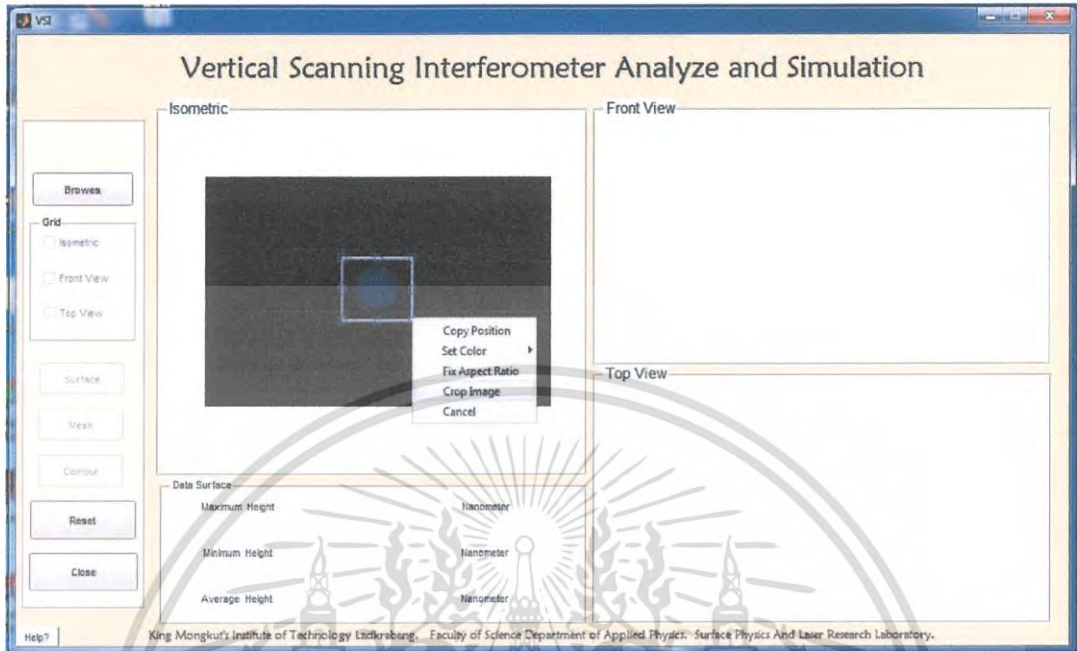
- คลิกปุ่ม browse เพื่อเลือกไฟล์เตอร์ที่มีไฟล์ภาพ (ได้รับการปรับแต่งเสร็จแล้ว) วิศวกรแทรกสอดของตัวอย่างพื้นผิวที่ต้องการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิว



รูปที่ 4.8 การเลือกเปิดไฟล์ภาพของโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว

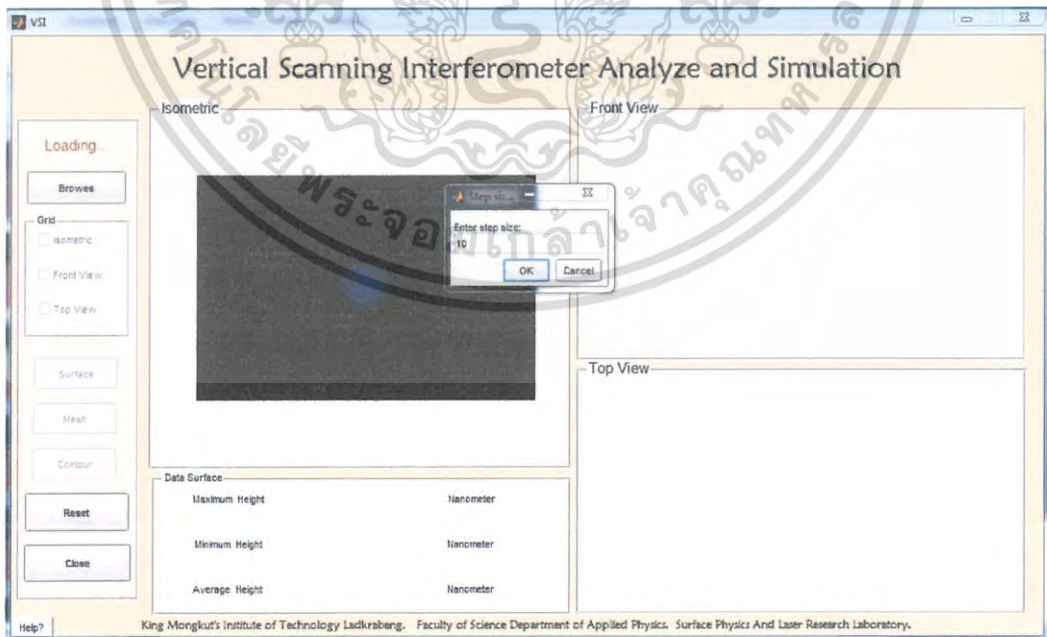
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลากกรอบบริเวณที่ต้องการจะครอบรูปภาพ แล้วคลิกขวาเลือกคำสั่ง crop image ซึ่งการครอบรูปภาพนั้นจะทำการครอบภาพในตำแหน่งเดียวกันทั้งโฟลเดอร์



รูปที่ 4.9 การลากครอบภาพ

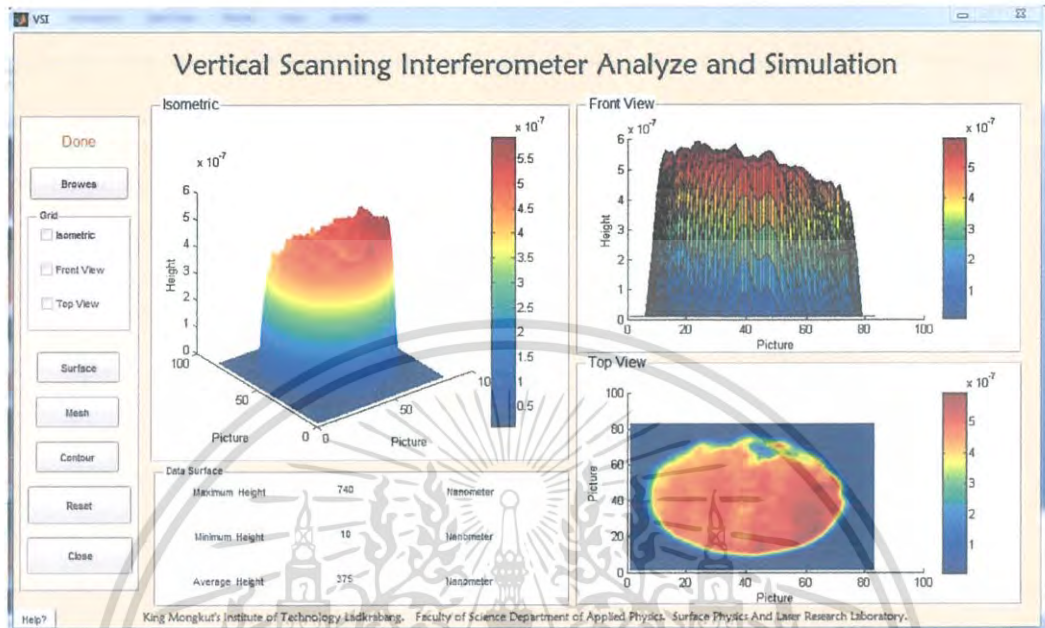
- จากนั้นจะมีกล่องคำสั่ง Step size ปรากฏขึ้น ป้อนค่า step size ที่เราใช้ หรือต้องการให้โปรแกรมวิเคราะห์ลงไป



รูปที่ 4.10 การป้อนค่า step size ของโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว

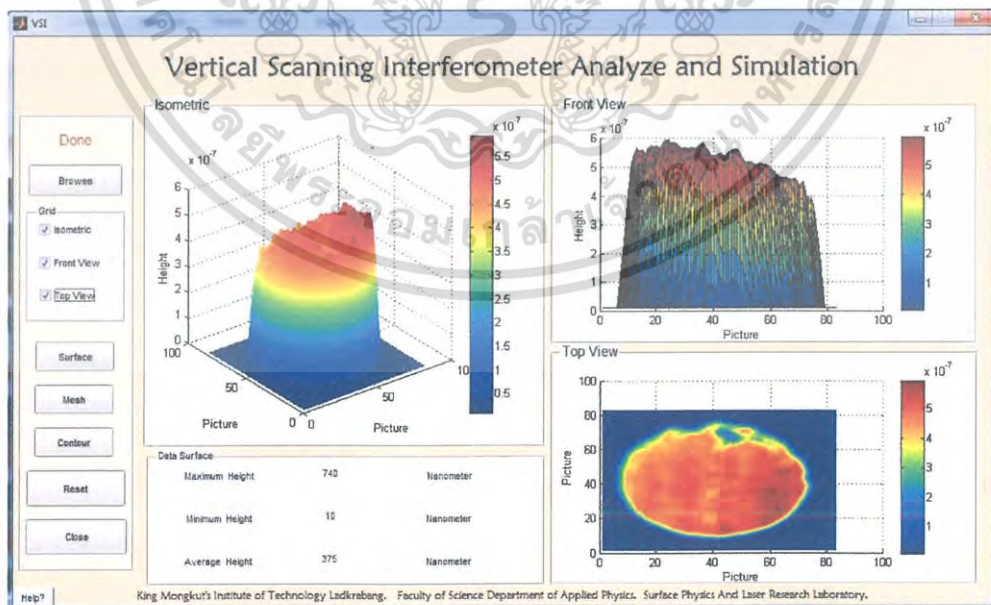
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โปรแกรมจะวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวและจำลองขึ้นมาในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยที่แกน x กับ y เป็นจำนวนรูปภาพทั้งหมดที่ใช้วิเคราะห์ และแกน z เป็นความสูง (ระดับนาโนเมตร) ของพื้นผิวที่วิเคราะห์ได้



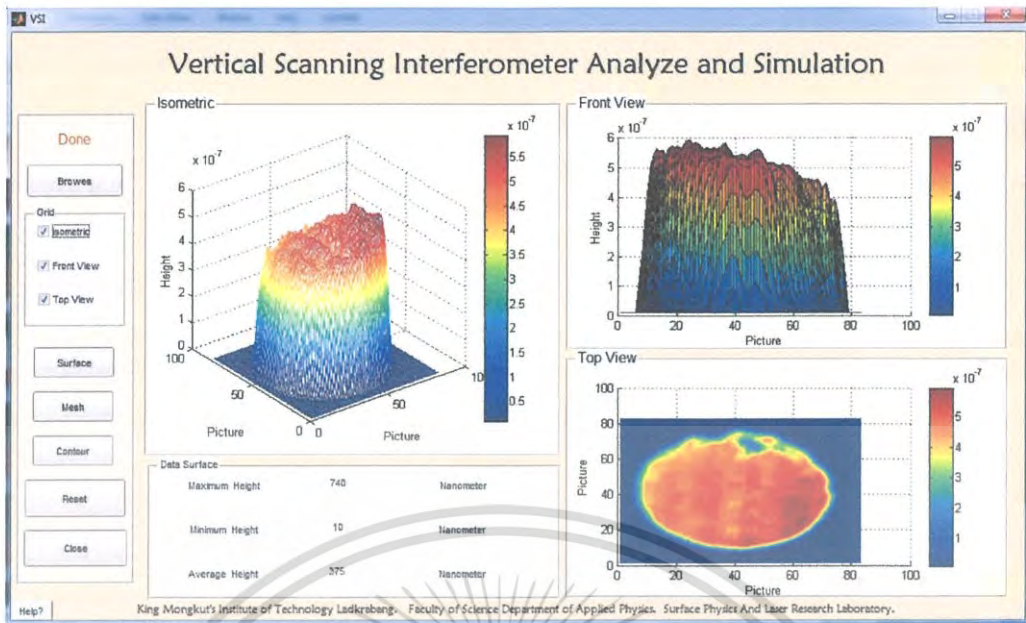
รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของโปรแกรม

- คลิกเลือก Grid ในด้านที่ต้องการให้แสดงตาราง เพื่อใช้ในการสังเกตค่าตามแนวแกนต่างๆ ซึ่งสามารถเลือกให้แสดงเพียงด้านใดด้านหนึ่ง, แสดงสองด้าน และแสดงทั้งหมด 3 ด้านก็ได้



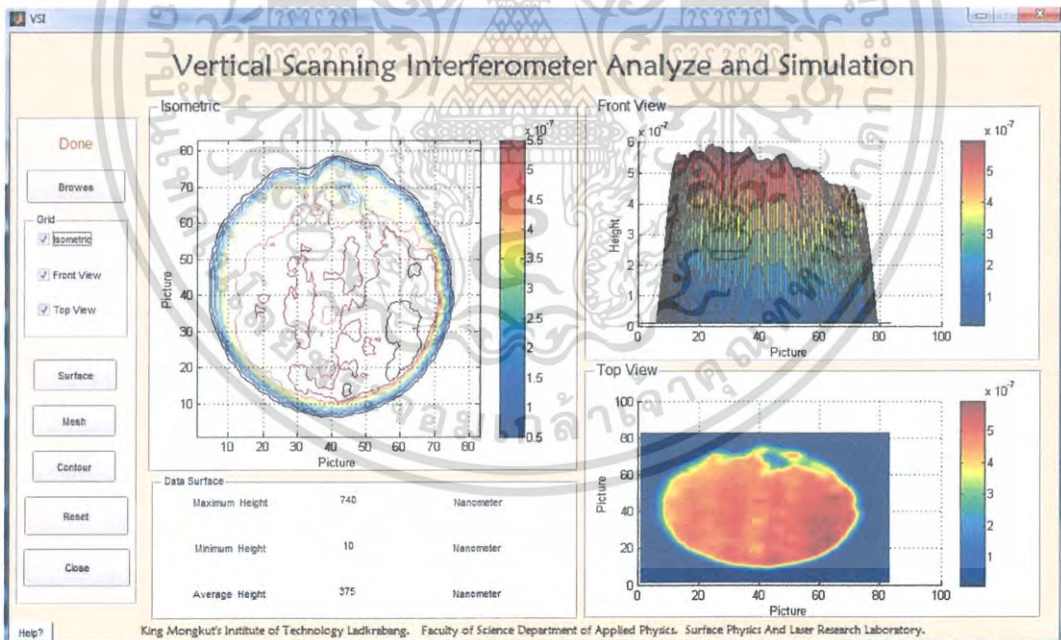
รูปที่ 4.12 การเลือกแสดง Grid

- ปุ่ม surface, mesh และ contour ในการตั้งค่าเดิมของโปรแกรมนั้นจะใช้คำสั่ง surface โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สร้างไว้สำหรับใช้สำหรับการศึกษายกเว้น เมื่อต้องการเห็นไปเซกระยะเชิงมิติที่เรากำลังจะอธิบาย แต่อัตโนมัติ แต่สามารถเลือกใช้คำสั่งอื่นเพื่อใช้สังเกตลักษณะโครงสร้างพื้นผิวในกรอบ isometric ได้ง่ายขึ้น ไม่วากรณ์ใดๆ ซึ่งสิ้น ล้างทั้งหมดที่เห็นได้และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ตามความถนัดของผู้สังเกต เช่น mesh และ contour



รูปที่ 4.13 โครงสร้างพื้นผิวในคำสั่ง mesh

- เมื่อคลิกที่ปุ่ม mesh จะสังเกตว่าโครงสร้างพื้นผิวในกรอบ isometric จะมีลักษณะคล้ายตาข่ายคลุมอยู่บนพื้นผิว ดังรูป 4.14



รูปที่ 4.14 โครงสร้างพื้นผิวในคำสั่ง contour

- เมื่อคลิกที่ปุ่ม contour จะสังเกตว่าโครงสร้างพื้นผิวในกรอบ isometric จะมีลักษณะเป็นเค้าโครงเส้นตามรูปร่างของพื้นผิว ซึ่งแสดงในรูปแบบ 2 มิติ ดังรูป 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

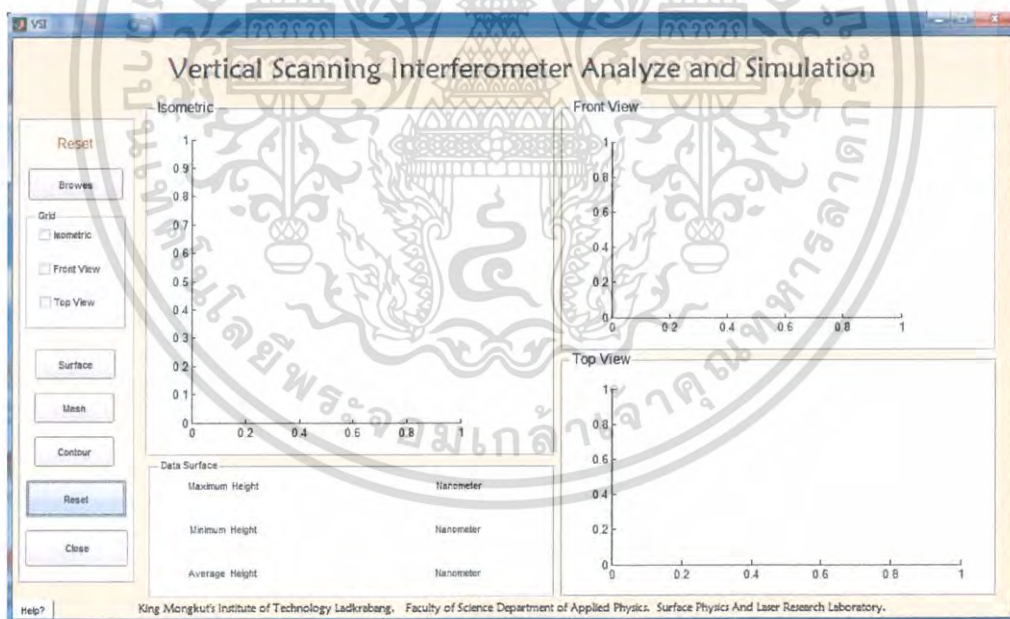
- การอ่านค่า data surface

ในกรอบสี่เหลี่ยมข้างล่างของกรอบ Isometric นั้น คือกรอบแสดงค่า data surface ซึ่งบอกถึงความสูง (ระดับนาโนเมตร) ของพื้นผิวในแนวแกน z โดย Maximum Height คือ ค่าความสูงที่มากที่สุดของโครงสร้างพื้นผิว, Minimum Height คือ ค่าความสูงที่ต่ำที่สุดของโครงสร้างพื้นผิว และ Average Height คือ ค่าความสูงโดยเฉลี่ยของโครงสร้างพื้นผิว

Data Surface		
Maximum Height	670	Nanometer
Minimum Height	10	Nanometer
Average Height	340	Nanometer

รูปที่ 4.15 กรอบแสดงค่า data surface

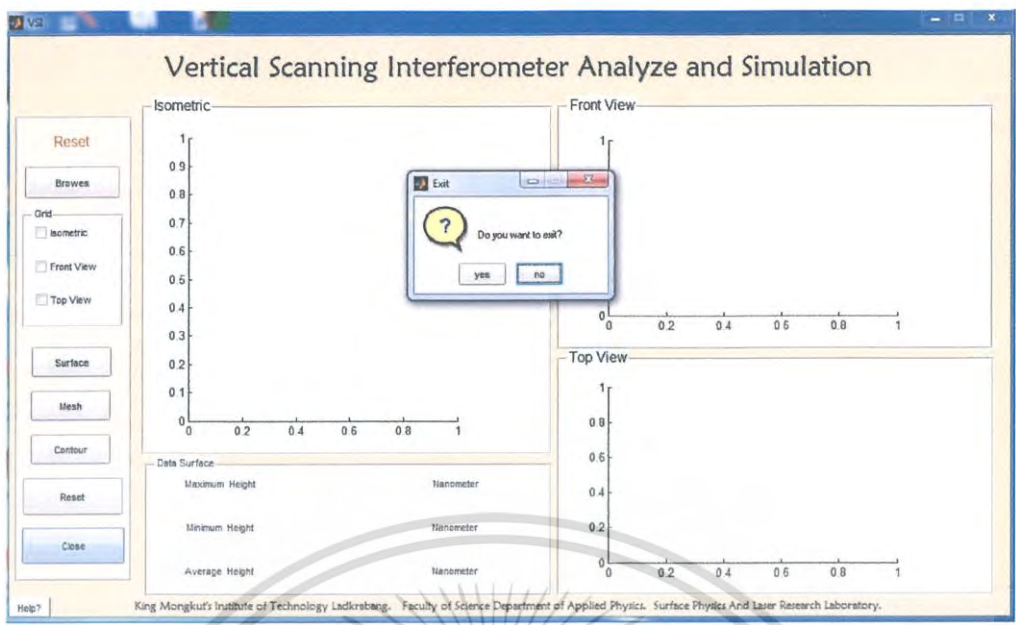
คลิกปุ่ม Reset เมื่อต้องการเริ่มการวิเคราะห์ใหม่ทั้งหมดโดยไม่ต้องปิดหน้าต่างโปรแกรม ซึ่งโปรแกรมจะล้างข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้ทำในก่อนหน้านั้นออก ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 การล้างข้อมูลของโปรแกรมเมื่อคลิกปุ่ม Reset

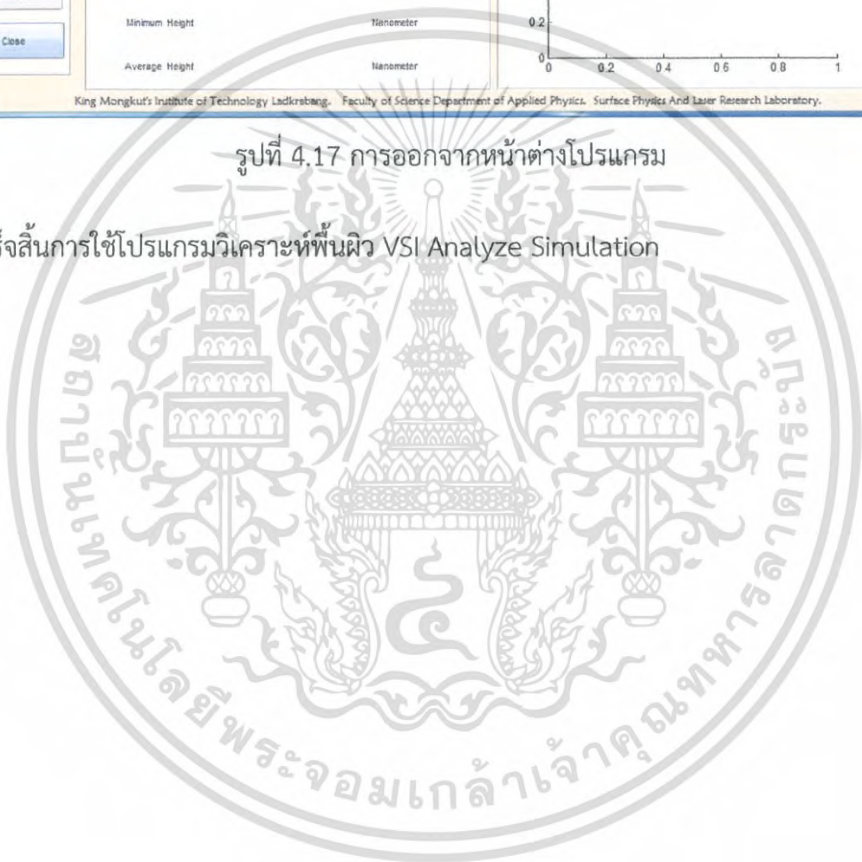
คลิกที่ปุ่ม Close เมื่อต้องการออกจากหน้าต่างโปรแกรม จะมีกล่องคำถามปรากฏขึ้น ถ้าต้องการออก ให้คลิกที่ Yes ถ้าไม่ ให้คลิกที่ No

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 การออกจากหน้าต่างโปรแกรม

เป็นอันเสร็จสิ้นการใช้โปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว VSI Analyze Simulation



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผล

การวัดความเรียบพื้นผิวโดยอาศัยหลักการแทรกสอดแบบการกวาดแนวตั้ง มีการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง อีกทั้งนำมาทำการทดลองเพื่อพัฒนาใช้ในทางวิทยาศาสตร์และประโยชน์ทางอุตสาหกรรม ซึ่งในโครงการพิเศษนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการวัดความเรียบพื้นผิวโดยอาศัยหลักการแทรกสอดแบบการกวาดในแนวตั้งให้สามารถใช้งานได้จริง และลดขั้นตอนการดำเนินงานของระบบให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น

โครงการพิเศษนี้ได้เลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงจาก Blue LED (Blue Light emitting diode) เพราะมีความยาวโคฮีเรนซ์ที่สั้นมาก จึงมีค่าความยาวโคฮีเรนซ์เพียงค่าเดียวที่เกิดริ้วการแทรกสอดที่ชัดที่สุดได้ ทำให้สามารถวัดความเรียบพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ ซึ่งการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย Blue LED (Blue Light emitting diode) ค่อนข้างมีข้อจำกัดในเรื่องของแสงสว่างที่เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อม เนื่องจากการจัดระบบแสงเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและไม่เกิดความผิดพลาดนั้นควรทำในห้องมืดที่ไม่มีแสงสว่างจากภายนอกมารบกวน จึงทำให้การจัดระบบเพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุดนั้นทำได้ค่อนข้างยาก

ในระหว่างการจัดระบบแสงนั้น ได้พบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นจากอุปกรณ์และปัจจัยอื่นๆ เช่น กระจกความเรียบสูงที่ใช้ในนั้นไม่มีความสะอาดเพียงพอ มีรอยขีดข่วนบนผิวหน้ากระจกสะท้อนที่ทำมุม 45 องศา, ตัวแยกแสงเสียหายจากภายในจึงต้องทำการเปลี่ยนตัวแยกแสงใหม่, Piezo Driver เสียหาย ไม่สามารถทำการทดลองซ้ำเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดได้, การบันทึกผลโดยใช้ CCD Camera นั้นจำเป็นต้องใช้เลนส์ที่มีความละเอียดและมีประสิทธิภาพสูง ฯลฯ

การเก็บภาพริ้วการแทรกสอดที่เกิดจาก LED สีฟ้า ต้องทำอย่างระมัดระวังเพื่อให้ได้ภาพที่ชัดที่สุด เนื่องจากต้องใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป จึงมีความจำเป็นต้องใช้กล้องถ่ายภาพที่มีคุณภาพสูงและมีความคมชัดค่อนข้างมาก โดยในการถ่ายภาพชุดหนึ่งนั้นต้องเริ่มถ่ายภาพจากช่วงที่เริ่มเกิดริ้วการแทรกสอด ช่วงที่เห็นริ้วการแทรกสอดได้ชัดเจนที่สุด และช่วงที่ริ้วการแทรกสอดเริ่มหายไป โดยเมื่อทำการป้อนค่าคงที่ Piezo Driver 1 ครั้ง ให้ถ่ายภาพเก็บไว้ 1 ภาพ และทำซ้ำเรื่อยๆจนกระทั่งริ้วการแทรกสอดหายไป และทำซ้ำโดยการเปลี่ยนค่าคงที่ๆป้อนให้กับ Piezo Driver เป็นค่าต่างๆ ที่สนใจ แล้วจึงทำซ้ำโดยใช้ค่าคงที่เหล่านั้นกับตัวอย่างพื้นผิวใหม่

การทดสอบโดยใช้ตัวอย่างพื้นผิวที่มีระดับแตกต่างกันในชิ้นงานเดียวกัน โดยเปลี่ยนกระจกความเรียบสูงบานใดก็ได้ เป็นตัวอย่างพื้นผิวที่ต้องการวัด ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ใช้ตัวอย่างพื้นผิวที่มีความสูงแตกต่างกัน 2 ระดับ และ 3 ระดับ ที่ทำการวัดโดยการปรับระยะจากการควบคุม Piezo Driver ไปเรื่อยๆจะพบว่าริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะที่ขยับ ถ้าความแตกต่างของระยะที่ขยับไปทั้งสองข้างนั้น อยู่ในช่วงเดียวกันกับระยะความยาวโคฮีเรนซ์ของแสง LED สีฟ้า จะเกิดริ้วการแทรกสอดที่ชัดเจนขึ้น เฉพาะตรงส่วนที่สูงที่สุดของตัวอย่างพื้นผิว แต่จะไม่เห็นริ้วการแทรกสอดที่ชัดเจนสำหรับส่วนที่ต่ำกว่า

การใช้ซอฟต์แวร์ Kinesis เพื่อใช้ควบคุม Piezo Driver ทำได้โดยเริ่มต้นจากการเปิดใช้งานฮาร์ดแวร์ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วย USB Bus แล้วรออุปกรณ์บูตให้เสร็จ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การดำเนินงานแบบลูปเปิด และการดำเนินงานแบบลูปปิด

การดำเนินงานแบบลูปเปิด Piezo สามารถปรับตำแหน่งได้สามวิธี: โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า, โดยการใช้ 'Output' Potentiometer หรือโดยการคลิกที่ปุ่ม 'Jog' ซึ่งทางผู้ทดลองได้เลือกใช้วิธีที่สาม คือการคลิกที่ปุ่ม Jog เป็นการผลัก Piezo ให้ขยับด้วยแรงดันไฟฟ้า โดยการป้อนค่าคงที่ลงในกล่อง Step size ซึ่งจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้ Piezo ทุกครั้งที่คลิกลูกศรชี้ขึ้น และลดแรงดันไฟฟ้าลงเมื่อคลิกลูกศรชี้ลง

การดำเนินงานแบบลูปปิด เป็นการดำเนินงานพื้นฐานของ Piezo Driver T-Cube เมื่อใช้ร่วมกับ Strain Gauge Reader T-Cube เริ่มจากการคลิกปุ่ม Setting บนแผง GUI ของ Piezo Driver แล้วตั้งค่าพารามิเตอร์ในแท็บการควบคุมโดยให้ โหมดลูป - เลือกลูปปิด, แรงดันไฟฟ้าสูงสุด - ตั้งแรงดันไฟฟ้าที่สอดคล้องกันสำหรับขับเคลื่อน Piezo ที่แรงดันไฟฟ้า 75V, 100V และ 150V

ตั้งค่าพารามิเตอร์ในแท็บขั้นสูงโดยให้ แหล่งสัญญาณขาเข้า - เลือกซอฟต์แวร์ + Potentiometer และ โหมดอะนาล็อกอินพุต - เลือกการป้อนข้อมูล SMA ภายนอก ถ้าต้องการค่าที่ตั้งไว้ ให้คลิกปุ่ม 'Persist Settings To Hardware' การตั้งค่าเหล่านี้จะถูกโหลดในการเปิดใช้งานในแต่ละรอบ แล้วคลิก 'ตกลง' เพื่อบันทึกการตั้งค่า

รูปภาพที่บันทึกได้จากการทดลองนั้น ในบางครั้งก็ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้โดยทันที เนื่องจากภาพอาจมีสัญญาณรบกวน (noise) มากเกินไปหรือมีความสว่างของริ้วการแทรกสอดไม่เพียงพอ, มีความละเอียดของภาพสูงมากจนทำให้ความเข้มแสงมีค่ากระโดดกว่าที่ควรเป็น และพื้นหลังของภาพมีค่า contrast มากเกินไปพอดี จึงต้องมีการปรับแต่งภาพ ที่สามารถทำได้โดยโปรแกรมหลายชนิด โดยต้องปรับค่าเหล่านี้ให้เท่ากันทั้งหมดในทุกภาพ เพื่อป้องกันการผิดเพี้ยนไปของความเข้มแสงที่จะใช้วิเคราะห์

การใช้โปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิวตัวอย่าง (VSI Analyze Simulation) โดยเริ่มจากการเลือกไฟล์เดอร์ของภาพจากในคอมพิวเตอร์เพื่อเปิดทุกไฟล์ภาพในหน้าต่างโปรแกรม แล้วครอบตัดภาพ ซึ่งจะต้องครอบตัดที่ตำแหน่งเดียวกันในทุกๆภาพ จากนั้นป้อนค่า step size ที่เราใช้ หรือต้องการให้โปรแกรมวิเคราะห์ลงไป โปรแกรมจะวิเคราะห์และจำลองโครงสร้างพื้นผิวแบบ 3 มิติ ขึ้นมา เลือกปรับแต่ง colormap, colorbar, grid, surface, mesh และ contour ตามต้องการ ซึ่งจะมีค่าความสูงแสดงอยู่ในกรอบ data surface และหากต้องล้างข้อมูลเพื่อเริ่มทำใหม่ทั้งหมด ให้คลิกปุ่ม Reset

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย Blue LED (Blue Light emitting diode) ควรทำในระบบปิดที่เป็นห้องมืดและไม่มีแสงอื่นรบกวน
2. หากต้องการนำระบบการวัดความเรียบพื้นผิวโดยอาศัยหลักการแทรกสอดแบบการกวาดแนวตั้งนี้ไปใช้งานจริงได้อย่างเต็มประสิทธิภาพนั้น
3. ควรจัดระบบแสง Michelson Interferometry ด้วย Blue LED (Blue Light emitting diode) ในพื้นที่ที่มีการสั่นสะเทือนน้อย
4. กระจกความเรียบสูงที่ใช้ต้องมีความสะอาดเสมอ
5. ควรระวังอุปกรณ์นำไฟฟ้าเนื่องจาก Piezo Driver ใช้ไฟฟ้ามากถึง 150 โวลต์
6. การจัดเก็บรูปควรใช้การถ่ายแบบ manual และควรใช้ขาตั้งกล้องคู่กับสายลั่นชัตเตอร์เพื่อป้องกันการสั่นของภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

Akkapong. (2014). อินเทอร์เน็ตเพียโซมิเตอร์. October 18, 1997, from academia.edu :  
[http://www.academia.edu/4460435/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5\\_9\\_%E0%B8%AD%E0%B8%B4%E0%B8%99%E0%B9%80%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A3\\_%E0%B9%80%E0%B8%9F%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B9%82%E0%B8%A3%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A3\\_](http://www.academia.edu/4460435/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5_9_%E0%B8%AD%E0%B8%B4%E0%B8%99%E0%B9%80%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A3_%E0%B9%80%E0%B8%9F%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B9%82%E0%B8%A3%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A3_)

benz bme. (2010). ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก. November 2, 2015 from metrobme :  
<http://metrobme.blogspot.com/2010/08/piezoelectric-effect.html>

ศุภฤกษ์ คฤหานนท์. (2013). Noise เรื่องน้อยๆ. July 15, 2013 from manager :  
<http://www.manager.co.th/Science/ViewNews.aspx?NewsID=9560000086131>

MathWorks. (2016). Noise Removal. January 8, 2016 from mathworks :  
<http://www.mathworks.com/help/images/noise-removal.html>

MathWorks. (2016). Crop image. January 8, 2016 from mathworks :  
<http://www.mathworks.com/help/images/ref/imcrop.html>

MathWorks. (2016). Convert RGB to grayscale. January 8, 2016 from mathworks :  
<http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rgb2gray.html>

MathWorks. (2016). Importing images. January 8, 2016 from mathworks :  
[http://www.mathworks.com/help/matlab/import\\_export/importing-images.html](http://www.mathworks.com/help/matlab/import_export/importing-images.html)

Atom. (2010). สเตรนเกจ (strain gauge). August 7, 2010 from blogspot :  
<http://vrbme.blogspot.com/2010/08/strain-gauge.html>

NON. (2012). การถ่ายภาพย้อนแสง. March 23, 2012 from site :  
<https://sites.google.com/site/non054463411/kar-thay-phaph-yxn-saeng>

TechXcite. (2011). ถ่ายภาพในสภาวะแสงน้อยๆ. February 19, 2011 from TechXcite :  
<http://www.techxcite.com/topic/4955.html>

MathWorks. (2014). Mesh & surface plot. September 19, 2014 from MathWorks :

[http://www.mathworks.com/help/matlab/learn\\_matlab/creating-mesh-and-surface-plots.html?requestedDomain=www.mathworks.com](http://www.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/creating-mesh-and-surface-plots.html?requestedDomain=www.mathworks.com)  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นแต่มีเหตุพิเศษขออนุญาต และต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

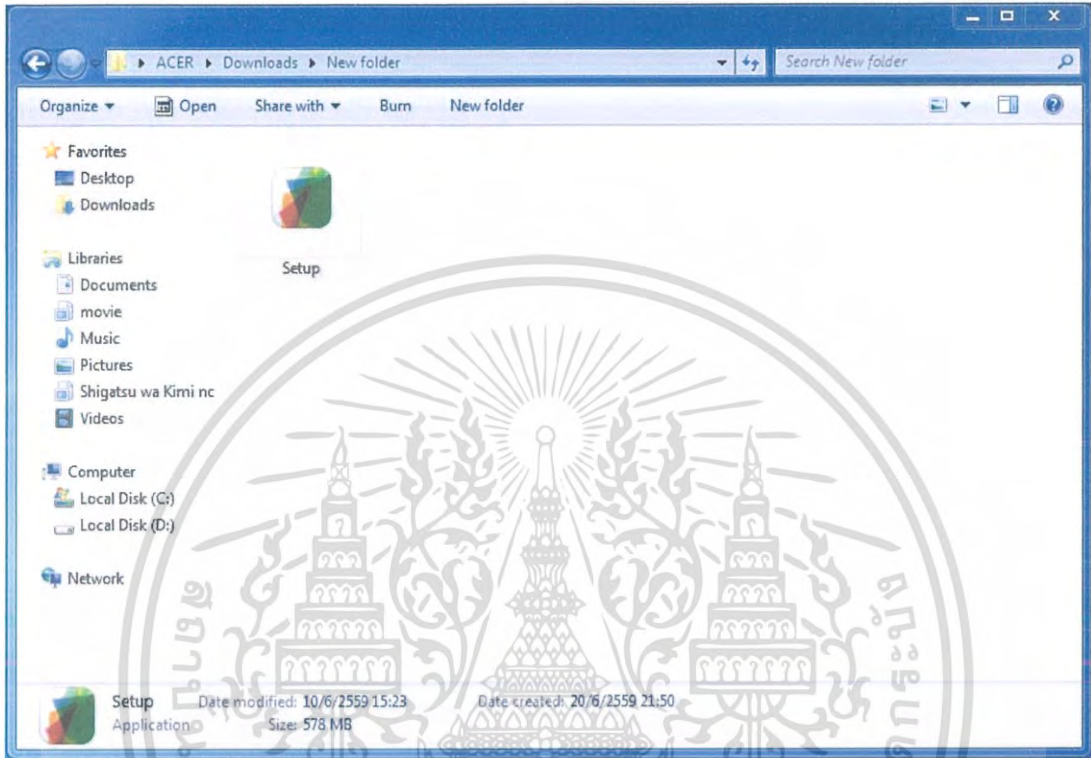


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

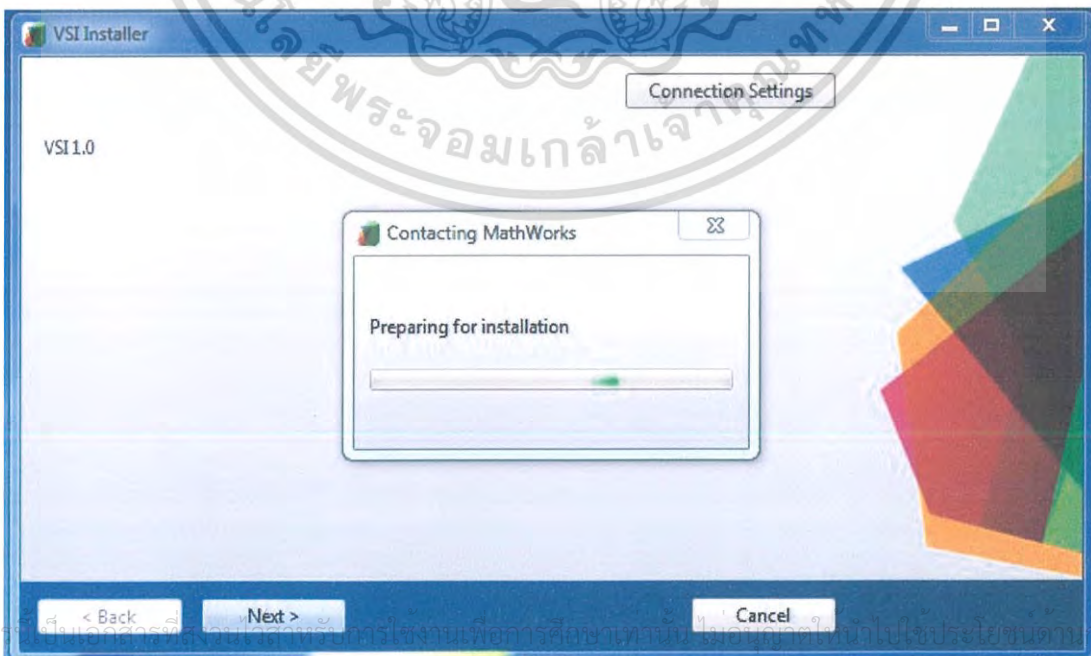
## ภาคผนวก ก

### การติดตั้งโปรแกรมวิเคราะห์พื้นผิว VSI Analyze and Simulation

1. เปิดโฟลเดอร์ที่มีตัว Setup โปรแกรมขึ้นมาดั่ง แล้วดับเบิลคลิก

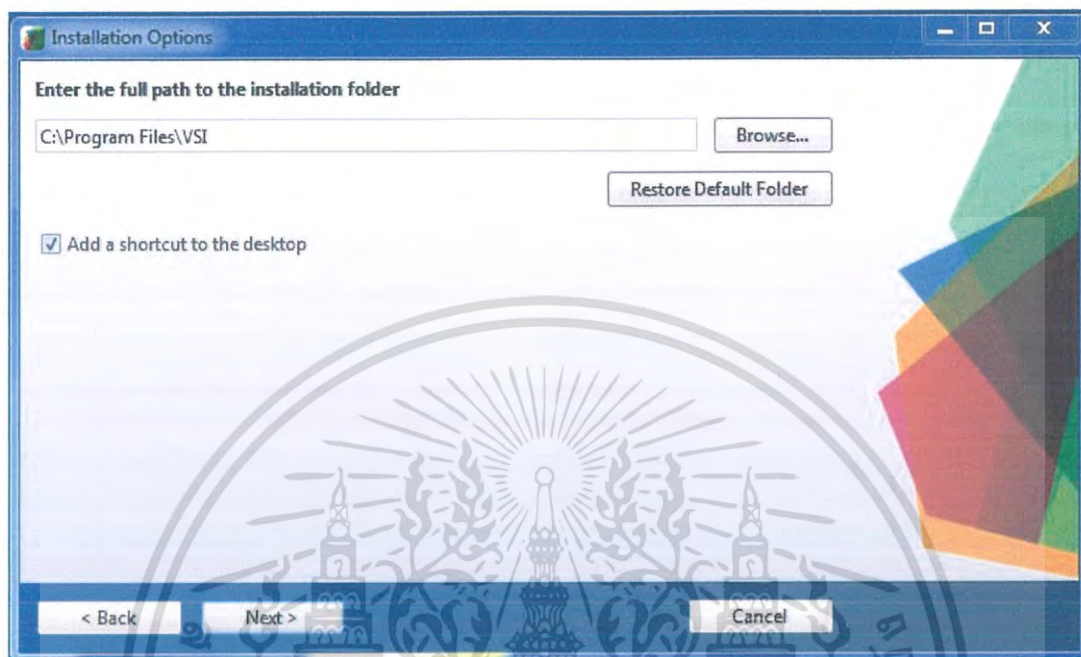


2. เมื่อดับเบิลคลิกแล้วจะมีหน้าต่างปรากฏขึ้นดังรูป คลิกปุ่ม Next



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่บนเว็บไซต์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หน้าต่างที่ให้เลือกที่อยู่ของโปรแกรมจะปรากฏขึ้นดังรูป คลิกปุ่ม Browse เพื่อเลือกไดรฟ์และโฟลเดอร์หลักที่ต้องการเก็บโปรแกรม คลิกที่กล่องสี่เหลี่ยมเล็กๆ หน้าข้อความ Add a shortcut to the desktop เพื่อทำเครื่องหมายถูก หากต้องการสร้างไอคอนโปรแกรมบนหน้าเดสก์ทอป แล้วคลิกปุ่ม Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

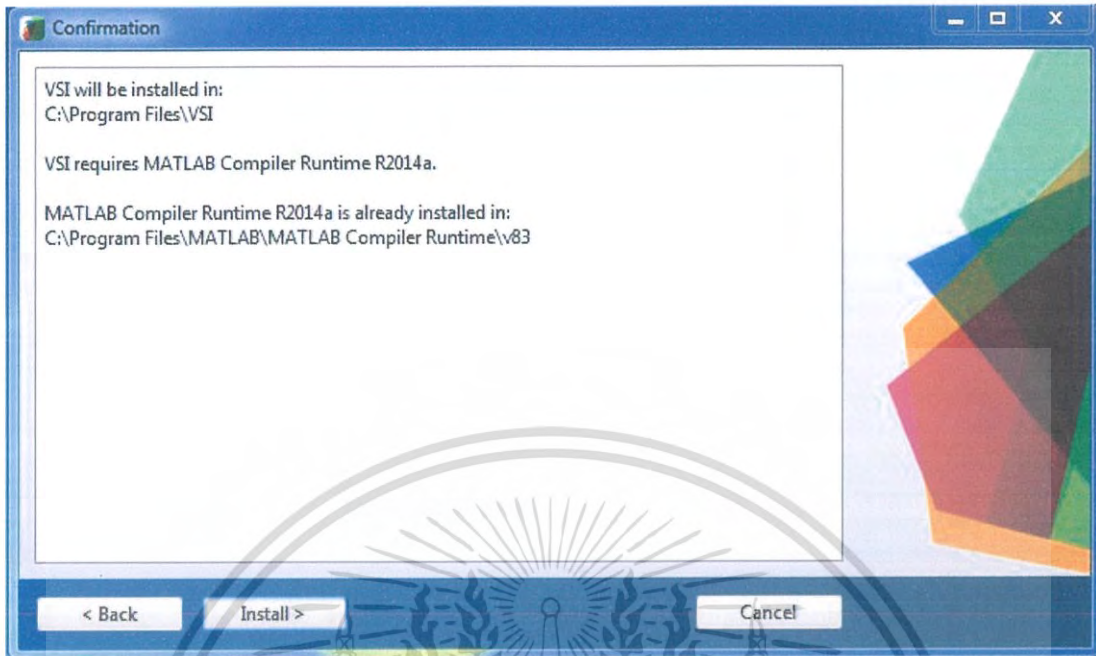


4. เมื่อหน้าต่างดังรูปปรากฏ คลิกปุ่ม Next

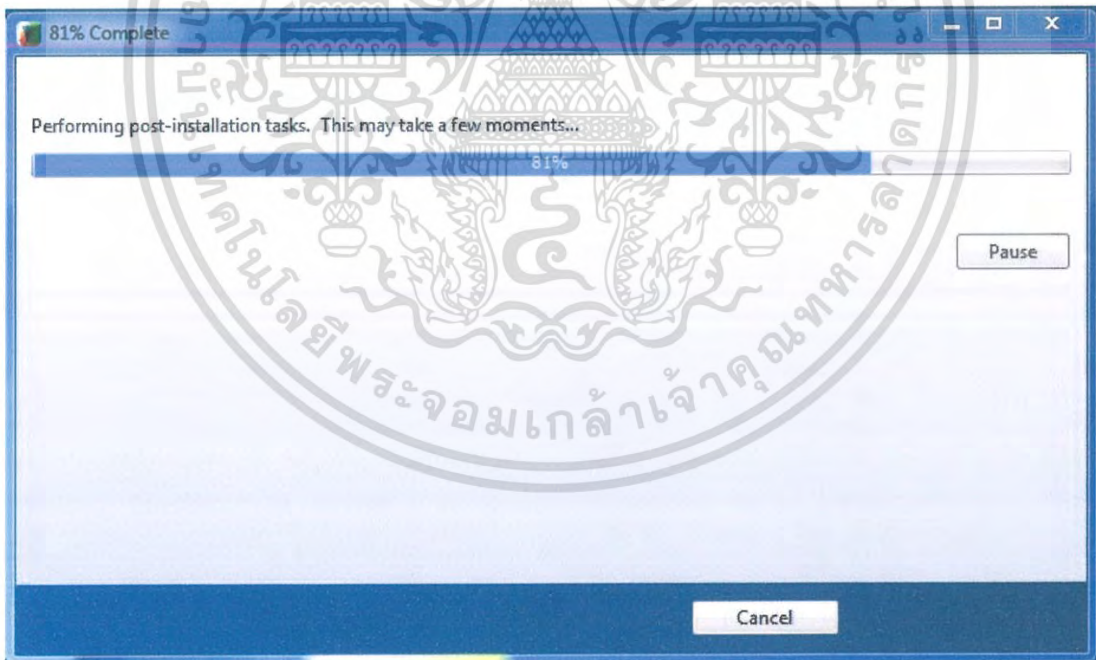


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. หน้าต่างยืนยันที่อยู่สำหรับเก็บโปรแกรมจะปรากฏขึ้น คลิกที่ปุ่ม Install

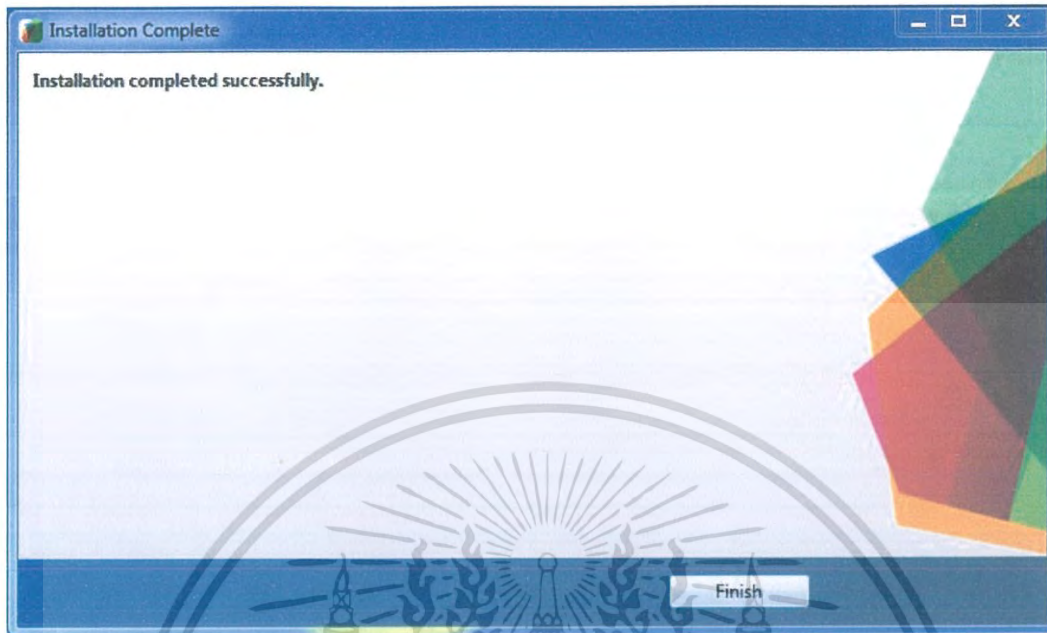


6. จะปรากฏหน้าต่างที่แสดงการติดตั้งโปรแกรม ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เมื่อทำการติดตั้งโปรแกรมสำเร็จ หน้าต่างดังรูปจะปรากฏขึ้น คลิกที่ปุ่ม Finish เป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม VSI Analyze and Simulation



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

โค้ดโปรแกรม VSI Analyze and Simulation ที่เขียนขึ้นโดยใช้โปรแกรม Matlab

```
function varargout = VSI(varargin)
% VSI MATLAB code for VSI.fig
% VSI, by itself, creates a new VSI or raises the existing
% singleton*.
%
% H = VSI returns the handle to a new VSI or the handle to
% the existing singleton*.
%
% VSI('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
% function named CALLBACK in VSI.M with the given input arguments.
%
% VSI('Property','Value',...) creates a new VSI or raises the
% existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
% applied to the GUI before VSI_OpeningFcn gets called. An
% unrecognized property name or invalid value makes property application
% stop. All inputs are passed to VSI_OpeningFcn via varargin.
%
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
%
% Edit the above text to modify the response to help VSI
%
% Last Modified by GUIDE v2.5 25-Jun-2016 05:24:54
%
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
'gui_OpeningFcn', @VSI_OpeningFcn, ...
'gui_OutputFcn', @VSI_OutputFcn, ...
'gui_LayoutFcn', [] , ...
'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
```

เอกสารนี้ `gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});` หมายความว่า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

```

```

% --- Executes just before VSI is made visible.
function VSI_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to VSI (see VARARGIN)

% Choose default command line output for VSI
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes VSI wait for user response (see UIRESUME45)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = VSI_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure

```

```

varargout{1} = handles.output;

```

```

clear all
clc

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% --- Executes on button press in import.
function import_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to import (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
DRs = uigetdir(pwd,'Select folder');
```

```
direct = dir([DRs '\*.JPG']);
```

```
if isempty(direct)
```

```
    errordlg('Please enter your Image.','File Error');
```

```
    beep
```

```
return
```

```
else
```

```
    L = length(direct);
```

```
    AllPic = cell(1);
```

```
end
```

```
set(handles.Loading, 'String','Loading...');
```

```
pause(1)
```

```
%%% load image %%%
```

```
for k=1:L
```

```
    lms = fullfile(DRs,direct(k).name);
```

```
    AllPic{k} = imread(lms);
```

```
end
```

```
axes(handles.axes1);
```

```
set(handles.Loading, 'String','');
```

```
pause(2)
```

```
%%% Crop image %%%
```

```
beep
```

```
[F rect] = imcrop(AllPic{1,1});
```

```
set(handles.Loading, 'String','Loading...');
```

```
pause(3)
```

```
for k=1:L
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าวิธีใดก็ตาม ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    Im_crop{k} = imcrop(AllPic{k},rect);
end

```

```

%% Step

```

```

beep
STEP = inputdlg({'Enter step size:','Step size(nm)'});
step = str2num(STEP{1});
STR = sprintf('Step jog');
pause(2)

```

```

%% image resize

```

```

for k=1:L
    Im_resize{k} = imresize(Im_crop{k},[L,L]);
end

```

```

%% cover to gray image

```

```

for k=1:L
    CovGay{k} = rgb2gray(Im_resize{k});
end

```

```

%% cat

```

```

[r,c] = size(CovGay{k});
imagescat = cat(3,CovGay{:});
new = zeros(r,c);

```

```

for R = 1:r;

```

```

for C = 1:c;

```

```

    Cat = imagescat(R,C,:);

```

```

    [Val position] = max(Cat);

```

```

    POSITION = position*(step*10.^(-9));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังเป็นลิขสิทธิ์ของภาควิชาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
new(R,C) = POSITION;
```

```
end
```

```
end
```

```
for R = 1:r;
```

```
    Re_Sur(R,:) = smooth(new(R,:),'moving');
```

```
end
```

```
for C = 1:c;
```

```
    Re_Sur2(:,C) = smooth(Re_Sur(:,C),'moving');
```

```
end
```

```
handles.Re_Sur2 = Re_Sur2;
```

```
guidata(hObject, handles);
```

```
%%%%%%%%%%%%%% Result %%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%Show graph 1%%
```

```
axes(handles.axes1);
```

```
surf( handles.Re_Sur2);
```

```
shading interp;
```

```
colormap jet;
```

```
colorbar;
```

```
rotate3d on;
```

```
grid off;
```

```
xlabel('Picture');
```

```
ylabel('Picture');
```

```
zlabel('Height');
```

```
%%Show graph 2%%
```

```
axes(handles.axes2);
```

```
surf( handles.Re_Sur2);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

colormap jet;
colorbar;
view(90,0);
grid off;
xlabel('Picture');
ylabel('Picture');
zlabel('Height');

```

```

%%Show graph 3%%
axes(handles.axes3);
surf( handles.Re_Sur2);
colormap jet;
shading interp;
view(0,90);
grid off;
colorbar;
xlabel('Picture');
ylabel('Picture');
zlabel('Height');

```

```

%%%%%%%%%%%% data %%%%%%%%%%

```

```

sf_max = max(max(new)/10.^(-9));
sf_min = min(min(new)/10.^(-9));
sf_ave =((sf_max+sf_min)/2);

```

```

% max text
set(handles.Datamax,'String',sf_max);
% min text
set(handles.Datamin,'String',sf_min);
% ave text
set(handles.Dataave,'String',sf_ave);

set(handles.Loading, 'String','Done');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 % enable programe  
 ไม่ว่าจะรู้หรือไม่รู้ ก็ขอรบกวนให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

set(handles.sur,enable,on);

```

```

set(handles.mesh,'enable','on');
set(handles.contour,'enable','on');
set(handles.checkbox4,'enable','on');
set(handles.checkbox5,'enable','on');
set(handles.checkbox6,'enable','on');

```

```

%%%%% Bottom mesh suf contour %%%%%%%%%%

```

```

% --- Executes on button press in sur.

```

```

function sur_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject handle to sur (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

set(handles.Loading, 'String','Loading...');

```

```

pause(1)

```

```

axes(handles.axes1);

```

```

surf( handles.Re_Sur2);

```

```

shading interp;

```

```

colormap jet;

```

```

colorbar;

```

```

rotate3d on;

```

```

grid off;

```

```

xlabel('Picture');

```

```

ylabel('Picture');

```

```

zlabel('Height');

```

```

set(handles.Loading, 'String','Done');

```

```

% --- Executes on button press in mesh.

```

```

function mesh_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject handle to mesh (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

set(handles.Loading, 'String','Loading...');

```

```

pause(1)

```

```

axes(handles.axes1);

```

```

mesh( handles.Re_Sur2);

```

```

shading interp;

```

```

colorbar;

```

```

colormap jet;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

rotate3d on;
grid off;
xlabel('Picture');
ylabel('Picture');
zlabel('Height');
set(handles.Loading, 'String','Done');

```

% --- Executes on button press in contour.

```

function contour_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to contour (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.Loading, 'String','Loading...');
pause(1)
axes(handles.axes1);
contour( handles.Re_Sur2);
shading interp;
colormap jet;
colorbar;
rotate3d on;
grid off;
xlabel('Picture');
ylabel('Picture');
zlabel('Height');
set(handles.Loading, 'String','Done');

```

% --- Executes on button press in help.

```

function help_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to help (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)
Inotepad E:\Matlab Code\pro 4\help.txt

```

% --- Executes on button press in reset.

```

function reset_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to reset (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใด ทั้งสิ้น คือทั้งแบบพิมพ์และแบบอิเล็กทรอนิกส์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

set(handles.Datamax,'String','');
set(handles.Datamin,'String','');
set(handles.Dataave,'String','');
cla(handles.axes1,'reset');
cla(handles.axes2,'reset');
cla(handles.axes3,'reset');
set(handles.Loading, 'String','Reset');
grid off;
rotate3d off;

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Datamax_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Datamax (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Datamin_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Datamin (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Dataave_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Dataave (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% --- Executes on button press in Close.
function Close_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Close (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

close(ancestor(hObject,'figure'));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น คือสงวนไว้ให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% --- Executes when user attempts to close figure1.
function figure1_CloseRequestFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to figure1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
answer = questdlg('Do you want to exit?','Exit','yes','no','no');
switch answer
case 'yes'
    delete(hObject);
case 'no'

```

```
end
```

```
% Hint: delete(hObject) closes the figure
```

```

% --- Executes on button press in checkbox4.
function checkbox4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to checkbox4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
axes(handles.axes2);
check_grid = get(hObject,'Value');
if check_grid == 1;
    grid on
else
    grid off
end
handles.check_grid = get(hObject,'Value');
guidata(hObject, handles);

```

```
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox4
```

```

% --- Executes on button press in checkbox5.
function checkbox5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to checkbox5 (see GCBO)

```

```

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```
axes(handles.axes1);
```

```

check_grid = get(hObject,'Value');
if check_grid == 1;
    grid on
else
    grid off
end
handles.check_grid = get(hObject,'Value');
guidata(hObject, handles);

```

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox5

```

% --- Executes on button press in checkbox6.
function checkbox6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to checkbox6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
axes(handles.axes3);
check_grid = get(hObject,'Value');
if check_grid == 1;
    grid on
else
    grid off
end
handles.check_grid = get(hObject,'Value');
guidata(hObject, handles);

```

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้