

การวัดความขรุขระของผิวสแตนเลสโดยอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน

นายวิรุณ เล้าพรพิชยานุวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชามาตรวิทยา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT OF STAINLESS STEEL
BY MICHELSON INTERFEROMETER

Mr. Wirun Laopornpichayanuwat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Metrological Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

วิรุณ เล้าพรพิชยานุวัฒน์ : การวัดความขรุขระของผิวสแตนเลสโดยอินเตอร์เฟอริมิเตอร์แบบไมเคลสัน. (SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT OF STAINLESS STEEL BY MICHELSON INTERFEROMETER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ดร.มนต์เทียน เทียนประทีป, 99 หน้า.

ความขรุขระของพื้นผิวเป็นหนึ่งในตัวแปรที่มีผลต่อความเสถียรภาพเชิงมวลของคัมภ์น้ำหนักมาตรฐาน ที่ปกติใช้เป็นตัวถ่ายค่าทางด้านมวล อีกทั้งคัมภ์น้ำหนักส่วนใหญ่ผลิตจากสแตนเลส 316 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเน้นวัดความขรุขระของพื้นผิวสแตนเลส 316 ด้วยอินเตอร์เฟอริมิเตอร์แบบไมเคลสัน (MI) ที่มีซูปเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอด (SLD) ความยาวคลื่น 830 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดแสง และเพราะความยาวอาพันธ์ของซูปเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอดที่สั้นในระดับไมโครเมตร ประกอบกับการใช้อินเตอร์เฟอริมิเตอร์แบบปรับระยะ (VSI) ที่ใช้การประมวลผลแบบการแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่อง (CWT) ทำให้เราหาค่าหนึ่งในแนวแกน z ที่ละเอียดในระดับไมโครเมตรได้จากการหาค่าตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุดของรีฟรอยการแทรกสอดได้ ในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธี VSI ทดสอบวัดความขรุขระของพื้นผิวสแตนเลส 316 จำนวน 3 ชิ้น และเทียบกับผลการวัดที่ได้กับเครื่องมือมาตรฐานรุ่น SP-500 ของบริษัท TORAY พบว่าค่าอัตราส่วนอีเอ็นซึ่งเป็นค่าแสดงระดับการยอมรับตามมาตรฐาน ISO/IEC Guide 43-1 ของความขรุขระของวิธีวัดทั้งสองวิธีที่ได้จากการวัดตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้นงาน มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จาก VSI ด้วยวิธีการประมวลผลแบบ CWT จึงยอมรับได้ นอกจากนี้ ในตอนท้ายของงานวิจัยยังประยุกต์ใช้อินเตอร์เฟอริมิเตอร์แบบเลื่อนเฟส (PSI) ด้วยวิธีการประมวลผลแบบเชิงอนุพันธ์ (DB) วิเคราะห์รีฟรอยการแทรกสอดที่ได้จาก MI เพื่อวัดความลึกของชิ้นงานสำหรับวัดความลึกมาตรฐาน (DMS) ที่มีความลึกเท่ากับ 1.8 ไมโครเมตร จากผลการทดลองพบว่า วิธี PSI และการประมวลผลแบบ DB ช่วยลบรีฟรอยการแทรกสอดของสัญญาณให้หมดไป และทำให้ได้โค้งสหสัมพันธ์ของการแทรกสอดที่ขึ้นกับระยะตามแนวแกนที่เลื่อนไปของเพียโซอิเล็กทริกแอกทูเอเตอร์ จากการประมวลผลตามลำดับภาพพบว่า ความลึกของ DMS หาได้จากตำแหน่งสูงสุดของโค้งสหสัมพันธ์ แต่ผลการทดลองพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการหาความลึกของ DMS ด้วยสมการตัวแทนข้อมูลในงานวิจัยนี้เทียบกับค่าจากโรงงานผู้ผลิตให้ผลคลาดเคลื่อนไป 55.6 เปอร์เซ็นต์

สาขาวิชา..... มาตรฐานวิทยา..... ลายมือชื่อนิสิต.....
ปีการศึกษา 2551..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

4872468823: MAJOR METROLOGICAL SCIENCE

KEYWORDS: ROUGHNESS / VERTICAL SCANNING INTERFEROMETRY / PHASE SHIFT INTERFEROMETRY / CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM

WIRUN LAOPORNPICHAYANUWAT: SURFACE ROUGHNESS

MEASUREMENT OF STAINLESS STEEL BY MICHELSON

INTERFEROMETER. ADVISOR: MONTIAN TIANPRATEEP, Ph.D., 99 pp.

Surface roughness is one of parameters, influencing on mass stability of standard weight. 316-stainless steel is also usually used for producing the standard weight, commonly used as a transfer standard of mass unit. Thus, surface roughness of 316-stainless steel was measured in this research by using a Michelson Interferometer (MI) with a 830-nm Super Luminescence Diode (SLD). Because of a micro-scale of SLD's coherence length and a Vertical Scanning Interferometry (VSI) with a Continuous Wavelet Transform (CWT) algorithm, an accuracy micro-scale of position in z-axis could be determined from a highest intensity position of interferogram. Three 316-stainless steel artifacts were tested by applying this VSI technique in this research, and their surface roughness values were compared with ones measured from a standard equipment (TORAY's SP-500). According to the measuring results of these three samples, the calculated values of En ratio, which is an acceptable level based on ISO/IEC Guide 43-1, between surface roughness of these two methods were less than or equal to 1. Therefore, the results of this VSI with a CWT algorithm technique are acceptable. Moreover, in the end of this study, a Phase Shift Interferometry (PSI) with a Derivatives-Based (DB) algorithm was also applied to analyze the interferogram of this MI, in order to measure depth of a 1.8- μ m Depth Measurement Standard (DMS). PSI with DB method could get rid of the interference fringe, which led to get an envelop curve of the interferences along the shifting axis of PZT. By evaluating the image order, depth of this DMS-sample could be defined by a maximum position of the envelop curve. It was found that the error of calculated DMS depth from this research, compared with a factory's value and evaluated by data curve fitting, was 55.6 %.

Field of Study : Metrological Science Student's Signature :

Academic Year : 2008 Advisor's Signature :

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นงานวิจัยที่ต้องอาศัยองค์ความรู้และทักษะความเชี่ยวชาญในหลายสาขา โดยคำฟังกผู้วิจัยคงไม่สามารถดำเนินการวิจัยและทำให้ผลงานนี้ประสบความสำเร็จออกมาเป็นรูปธรรมได้ หากขาดซึ่งคุณูปการจากบุคคลและหน่วยงานที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

ลำดับแรก ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.มนต์เทียน เทียนประทีป อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้โอกาสแก่ผู้วิจัยให้ได้ทำงานวิจัยในหัวข้อนี้ อีกทั้งยังให้คำปรึกษาและชี้แนะแก่ผู้วิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือสนับสนุนส่งผลให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จลงได้ด้วยดี

ลำดับที่สอง ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจรยศ อยู่ดี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลำดับที่สาม ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ โดยเฉพาะนายวิระ ตูลาสมบัติ หัวหน้าฝ่ายมาตรวิทยาเชิงกล สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ได้โอกาสระดมได้ใช้ช่วงเวลาส่วนหนึ่งของการทำงานเพื่อใช้ในการศึกษาต่อในครั้งนี้

ลำดับที่สี่ ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางมลฤดี เรณูสวัสดิ์ นักมาตรวิทยา ห้องปฏิบัติการความยาวคลื่น และ ดร.จริยา บัวเจริญ นักมาตรวิทยา ห้องปฏิบัติการความเรียบผิว ฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ช่วยเหลือให้คำปรึกษาและสนับสนุนงานวิจัย และฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่สนับสนุนเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

ลำดับที่ห้า ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวโรจนา ลีเจริญ นักมาตรวิทยา ห้องปฏิบัติการแสง ฝ่ายมาตรวิทยาแสง สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ได้คำแนะนำและช่วยเหลือในการเขียนโปรแกรมการประมวลผลของงานวิจัยนี้ จนแล้วเสร็จลงได้ด้วยดี

ลำดับสุดท้าย ผู้วิจัยขอขอบคุณกำลังใจจาก คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัว ที่มีให้ตลอดช่วงเวลาของการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ท
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 การแทรกสอดของแสง.....	7
2.2 อินเตอร์เฟอเมตรีแบบไมเคลสัน.....	11
2.3 มาตรฐานความขรุขระของคຸ້มน้ำหนัก.....	15
2.4 แสงอาพันธ์ต่ำ.....	18
2.5 การวิเคราะห์และประมวลผล.....	21
2.6 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด.....	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 ขั้นตอนการวิจัย.....	34
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	34

3.2.1	แหล่งกำเนิดแสงซูเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอด.....	34
3.2.2	ตัวแยกลำแสง.....	36
3.2.3	กระจก.....	36
3.2.4	เพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์.....	36
3.2.5	ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับหาค่าความขรุขระและความลึกของพื้นผิว.....	37
3.2.6	กล้องซีซีดี	38
3.3	วิธีการทดลอง.....	38
3.3.1	การติดตั้งระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน	38
3.3.2	วิธีการวัด.....	39
บทที่ 4	วิธีการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม VSI.....	41
4.1	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม VSI.....	41
4.2	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม VSI.....	43
4.3	ผลการเปรียบเทียบข้อมูลจากโปรแกรม VSI.....	65
บทที่ 5	วิธีการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม PSI.....	71
5.1	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม PSI.....	71
5.2	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม PSI.....	72
บทที่ 6	อภิปรายและสรุปผลการวิจัย	80
6.1	การวัดด้วยวิธีอินเตอร์เฟอเมตรีแบบปรับระยะ.....	80
6.2	การวัดด้วยวิธีอินเตอร์เฟอเมตรีแบบเลื่อนเฟส.....	82
6.3	ข้อเสนอแนะ.....	83
	รายการอ้างอิง.....	84

ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก โปรแกรมการประมวลผล :โปรแกรม VSI	87
ภาคผนวก ข โปรแกรมการประมวลผล: โปรแกรม PSI.....	96
ภาคผนวก ค คุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์.....	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	99

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แสดงความขรุขระมากที่สุดของคุ่มน้ำหน้ามาตรฐานในระดับชั้นต่างๆ.....	4
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้มากที่สุด.....	16
ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ต่ำ	20
ตารางที่ 2.3 แสดงตารางการกระจายแบบที่.....	33
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองและค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดพร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของชิ้นงานตัวอย่างสแตนเลสชิ้นที่ 1 ที่วัดโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ	44
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองและค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดพร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของชิ้นงานตัวอย่างสแตนเลสชิ้นที่ 2 ที่วัดโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ.....	45
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองและค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดพร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของชิ้นงานตัวอย่างสแตนเลสชิ้นที่ 3 ที่วัดโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ.....	46
ตารางที่ 4.4 แสดงช่วงในการประมวลผลของค่าความสูงต่ำเฉลี่ยและค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง	50
ตารางที่ 4.5 แสดงช่วงในการประมวลผลของค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุด.....	50
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองและค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชิ้นที่ 1 ในแถวของฟิกเซลที่ 1-2.....	52
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองและค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชิ้นที่ 1 ในแถวของฟิกเซลที่101-102.....	52

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองและค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชั้นที่ 3 ในแถวของพิกเซลที่ 101-102.....	56
ตารางที่ 4.18 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองและค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชั้นที่ 3 ในแถวของพิกเซลที่ 201-202.....	56
ตารางที่ 4.19 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองและค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชั้นที่ 3 ในแถวของพิกเซลที่ 301-302.....	56
ตารางที่ 4.20 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองและค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชั้นที่ 3 ในแถวของพิกเซลที่ 401-402.....	57
ตารางที่ 4.21 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองและค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชั้นที่ 3 ในแถวของพิกเซลที่ 479-480.....	57
ตารางที่ 4.22 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองและค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของชิ้นงานสแตนเลสทั้ง 3 ชั้น โดยกำหนดพื้นที่ 2x2 พิกเซล.....	57
ตารางที่ 4.23 แสดงแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน สัมประสิทธิ์ความไว และค่าความไม่แน่นอนของปริมาณอินพุต	58
ตารางที่ 4.24 แสดงค่ามุมเฟสจากทฤษฎีกับมุมเฟสจากการคำนวณ.....	59
ตารางที่ 4.25 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความสูงต่ำเฉลี่ยของสแตนเลสชั้นที่ 1	60
ตารางที่ 4.26 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองของสแตนเลสชั้นที่ 1.....	61
ตารางที่ 4.27 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชั้นที่ 1.....	61
ตารางที่ 4.28 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความสูงต่ำเฉลี่ยของสแตนเลสชั้นที่ 2	62

ตารางที่ 4.29 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองของสแตนเลสชั้นที่ 2.....62

ตารางที่ 4.30 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชั้นที่ 2.....63

ตารางที่ 4.31 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความสูงต่ำเฉลี่ยของสแตนเลสชั้นที่ 363

ตารางที่ 4.32 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองของสแตนเลสชั้นที่ 3.....64

ตารางที่ 4.33 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชั้นที่ 3.....64

ตารางที่ 4.34 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดสแตนเลสชั้นที่ 1 ระหว่าง มว. กับ โปรแกรม VSI..... 65

ตารางที่ 4.35 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดสแตนเลสชั้นที่ 2 ระหว่าง มว. กับ โปรแกรม VSI 65

ตารางที่ 4.36 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดสแตนเลสชั้นที่ 3 ระหว่าง มว. กับ โปรแกรม VSI 66

ตารางที่ 4.37 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองและค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของชิ้นงานสแตนเลสทั้ง 3 ชั้น โดยกำหนดพื้นที่ 1x1 พิกเซล.....68

ตารางที่ 4.38 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองและค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของชิ้นงานสแตนเลสทั้ง 3 ชั้น โดยกำหนดพื้นที่ 3x3 พิกเซล.....68

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงหลักการของอินเตอร์ฟิรอมิเตอร์แบบไมเคลสัน.....	12
รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดการแทรกสอดในระบบอินเตอร์ฟิรอมิเตอร์แบบไมเคลสัน.....	13
รูปที่ 2.3 แสดงความเข้มแสงเมื่อเลื่อนระยะของกระจก M_2	14
รูปที่ 2.4 แสดงการสอบกลับของมวล.....	15
รูปที่ 2.5 แสดงเส้นเฉลี่ย, ค่า R_a และ ค่า R_q	17
รูปที่ 2.6 แสดงค่า R_z	18
รูปที่ 2.7 แสดงรูปคลื่นที่ระยะเวลาแตกต่างกัน.....	19
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของแสงอาพันธ์ต่ำ.....	19
รูปที่ 2.9 แสดงรูปแบบการติดตั้งระบบการวัดอินเตอร์ฟิรอมิเตอร์แบบไมเคลสัน.....	21
รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มแสงกับระยะที่เกิดการแทรกสอด.....	22
รูปที่ 2.11 แสดงมุมเฟสระหว่างความสูงต่ำที่ได้จากการแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่องและ ความสูงต่ำที่แท้จริง.....	25
รูปที่ 2.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงขอบของสหสัมพันธ์.....	28
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะการกระจายค่าความไม่แน่นอนแบบโค้งปกติ.....	30
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการกระจายค่าความไม่แน่นอนแบบสี่เหลี่ยม.....	30
รูปที่ 3.1 แสดงตัวควบคุมกระแสกับตัวแปลงไฟ.....	35
รูปที่ 3.2 แสดงตัวแหล่งกำเนิดแสงซูเปอร์ลูมินิสเซนส์ไดโอด.....	35
รูปที่ 3.3 แสดงเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์.....	36
รูปที่ 3.4 แสดงชิ้นงานตัวอย่างสแตนเลส 316.....	37
รูปที่ 3.5 แสดงชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก $1.8 \mu\text{m}$	37
รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการติดตั้งระบบการวัด.....	38
รูปที่ 3.7 แสดงภาพถ่ายของระบบการวัด.....	39
รูปที่ 4.1 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรม VSI.....	42
รูปที่ 4.2 แสดงรูปถ่ายกล้องจุลทรรศน์ชนิดแทรกสอดแบบอินเตอร์ฟิรอมิเตอร์ชนิด ไมเคลสัน.....	43
รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานสแตนเลสชิ้นที่ 1 ขณะที่เกิดรีวรอยการแทรกสอด.....	47
รูปที่ 4.4 แสดงขนาดภาพถ่ายเทียบกับขนาดพิกลเซลของกล้องซีซีดี.....	48

รูปที่ 4.5 แสดงการประมวลผลสัญญาณในแต่ละพื้นที่ที่เลือก.....	48
รูปที่ 4.6 แสดงความเข้มของแสงในแต่ละตำแหน่งที่เลื่อนเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ ของแถวที่ 1 พื้นที่ที่ 1 จากพื้นที่ทั้งหมด 320 ตำแหน่ง.....	49
รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมการแปลงเวฟเลขของความเข้มแสงของแถวที่ 1 พื้นที่ที่ 1 จาก พื้นที่ทั้งหมด 320 ตำแหน่ง.....	49
รูปที่ 4.8 แสดงค่าที่วัดได้พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของสแกนเลสซันที่ 1.....	66
รูปที่ 4.9 แสดงค่าที่วัดได้พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของสแกนเลสซันที่ 2.....	67
รูปที่ 4.10 แสดงค่าที่วัดได้พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของสแกนเลสซันที่ 3.....	67
รูปที่ 4.11 แสดงค่าความสูงค่าเฉลี่ยที่วัดได้ พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของสแกนเลส ซันที่ 1 เทียบระหว่างค่าที่วัดได้จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ค่าที่วัดได้จาก การกำหนดพื้นที่ 1x1 พิกเซล ค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 2x2 พิกเซล และ ค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 3x3 พิกเซล.....	69
รูปที่ 4.12 แสดงค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองที่วัดได้พร้อมทั้ง ค่าความไม่แน่นอนของสแกนเลสซันที่ 1 เทียบระหว่างค่าที่วัดได้จากสถาบัน มาตรวิทยาแห่งชาติ ค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 1x1 พิกเซล ค่าที่วัดได้จาก การกำหนดพื้นที่ 2x2 พิกเซล และค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 3x3 พิกเซล.....	69
รูปที่ 4.13 แสดงค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดที่วัดได้พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอน ของสแกนเลสซันที่ 1 เทียบระหว่างค่าที่วัดได้จากสถาบันมาตรวิทยาแห่ง ชาติ ค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 1x1 พิกเซล ค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 2x2 พิกเซลและค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 3x3 พิกเซล.....	70
รูปที่ 5.1 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรม PSI.....	72
รูปที่ 5.2 แสดงภาพแรกเริ่ม	72
รูปที่ 5.3 แสดงวีร่อยการแทรกสอดที่เกิดบนภาพจากการสร้าง (Simulate)	73
รูปที่ 5.4 แสดงภาพที่โปรแกรมได้ลบวีร่อยการแทรกสอด	73
รูปที่ 5.5 แสดงภาพชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ที่บันทึกได้จากกล้องซีซีดีใน ตอนแรกยังไม่เกิดวีร่อยการแทรกสอด.....	74
รูปที่ 5.6 แสดงภาพชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ที่บันทึกได้จากกล้องซีซีดีใน ตอนที่เกิดวีร่อยการแทรกสอด.....	75

รูปที่ 5.7 แสดงภาพชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ที่บันทึกได้จากกล้องซีซีดีใน ตอนที่โปรแกรมได้ลบรีวรอยการแทรกสอด ภาพที่ 1.....	75
รูปที่ 5.8 แสดงภาพชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ที่บันทึกได้จากกล้องซีซีดีใน ตอนที่โปรแกรมได้ลบรีวรอยการแทรกสอด ภาพที่ 2.....	76
รูปที่ 5.9 แสดงภาพชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ที่บันทึกได้จากกล้องซีซีดีใน ตอนที่โปรแกรมได้ลบรีวรอยการแทรกสอด ภาพที่ 3.....	76
รูปที่ 5.10 แสดงความเข้มแสงในแต่ละภาพที่ถูกลบรีวรอยการแทรกสอด ณ ตำแหน่ง A โดยที่ความเข้มแสงที่กระจายคือข้อมูลที่เก็บได้จากการวัดและเส้นโค้งคือการ เปลี่ยนแปลงขอบของสหสัมพันธ์	77
รูปที่ 5.11 แสดงความเข้มแสงในแต่ละภาพที่ถูกลบรีวรอยการแทรกสอด ณ ตำแหน่ง B โดยที่ความเข้มแสงที่กระจายคือข้อมูลที่เก็บได้จากการวัดและเส้นโค้งคือการ เปลี่ยนแปลงขอบของสหสัมพันธ์.....	78
รูปที่ 5.12 แสดงความเข้มแสงในแต่ละภาพที่ถูกลบรีวรอยการแทรกสอด ณ ตำแหน่ง C โดยที่ความเข้มแสงที่กระจายคือข้อมูลที่เก็บได้จากการวัดและเส้นโค้งคือการ เปลี่ยนแปลงขอบของสหสัมพันธ์.....	78

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

SI Units	หน่วยพื้นฐานของหน่วยวัดระบบสากล (International System of Units)
OIML	องค์การมาตรวิทยากฎหมายสากล (International Organization of Legal Metrology)
OPD	ความต่างของทางเดินเชิงแสง (Optical path difference)
δm	ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ได้มากที่สุด (Maximum permissible errors)
R_a	ค่าความสูงต่ำเฉลี่ยของโครงร่างความขรุขระของพื้นผิว (Mean height of roughness profile)
R_q	ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองของ โครงร่างความขรุขระของพื้นผิว (Root mean square height of roughness profile)
R_z	ค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของโครงร่างความขรุขระของพื้นผิว (Maximum height of roughness profile)
VSI	อินเตอร์ฟีรอมตรีแบบปรับระยะ (Vertical scanning interferometry)
PSI	อินเตอร์ฟีรอมตรีแบบเลื่อนเฟส (Phase shift interferometry)
CWT	การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (Continuous wavelet transform)
E_r	การเปลี่ยนแปลงขอบของสหสัมพันธ์ (Envelop of autocorrelation)
SD	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)
c_i	สัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity coefficient)
u_c	ค่าความไม่แน่นอนรวม (Combined standard uncertainty)
U	ค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty)
k	ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor)
ν	ค่าองศาแห่งความอิสระ (Effective degree of freedom)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ประเภทต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์ที่ผลิต เลนส์ กระจก อุปกรณ์ทางแสง และการผลิตซิลิกอนเวเฟอร์ (Silicon wafer) อุตสาหกรรมประเภทจักรกลอุตสาหกรรม หรือแม้แต่ทางด้านมาตรวิทยานั้น ความขรุขระถือได้ว่าเป็นสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุที่ใช้เป็นข้อกำหนดในการยอมรับชิ้นงานนั้นๆ เพราะความขรุขระเป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ยิ่งชิ้นงานนั้นมีความขรุขระน้อยเท่าใดมูลค่าของชิ้นงานก็จะสูงตามไปด้วย เพราะการผลิตและทดสอบชิ้นงานเหล่านั้นจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีระดับสูงที่มีความละเอียดและความถูกต้องสูงนั่นเอง

ในสาขามาตรวิทยา คຸ່ມน้ำหนักรซึ่งเป็นตัวถ่ายค่าทางด้านมวลที่เป็นหน่วยพื้นฐาน 1 ใน 7 หน่วยของระบบหน่วยเอสไอ (International System of Units; SI Units) และได้มาตรฐานตามองค์การมาตรวิทยากฎหมายสากล (International Organization of Legal Metrology; OIML) [1] นั้นผลิตจากสแตนเลส 316 และปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ามวลของคຸ່ມน้ำหนักที่ต้องคำนึงถึงนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายประการ อาทิเช่น รูปร่าง โครงสร้าง วัสดุที่ใช้ ความเป็นแม่เหล็ก ความหนาแน่น และ สภาพผิวของคຸ່ມน้ำหนัก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของพื้นผิวคຸ່ມน้ำหนัก มีผลให้ค่าเสถียรภาพของคຸ່ม น้ำหนักไม่คงที่ ดังนั้นสภาพผิวของคຸ່มน้ำหนักจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งต่อมวลของคຸ່ม น้ำหนักมาตรฐานของ OIML และค่าที่แสดงถึงสภาพผิวของคຸ່มน้ำหนักได้คตินั้นก็คือค่าความขรุขระของผิว ซึ่งจะเป็นตัวชี้ให้เห็นว่าค่าเสถียรภาพของคຸ່มน้ำหนักยังคงที่อยู่หรือไม่

เครื่องวัดความขรุขระที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายนั้นส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องมือเชิงกล ที่เรียกว่าเครื่องมือปลายแหลม (Stylus profile instrument) เครื่องมือปลายแหลมนี้จะมีหัวลากที่มีขนาดเล็กหลายขนาดตามความละเอียดของการวัด ในขณะที่หัววัดจะลากไปบนผิวชิ้นงานและจะ ต้นสะเทือนตามลักษณะของพื้นผิวแล้วส่งสัญญาณออกไปยังหน่วยประมวลผลและแสดงผลใน รูปกราฟและค่าตัวแปรต่างๆ อาทิ ขนาดของแอมพลิจูดสูงสุด ค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูด และ ความกว้างของลูกคลื่น เป็นต้น วิธีวัดลักษณะนี้นั้นมีข้อจำกัดหลายประการ อาทิ ข้อมูลที่ได้จากการวัด ความขรุขระจะบอกลักษณะของพื้นผิวเพียง 1 มิติเท่านั้น และเพราะในขณะที่วัดจะต้องลากหัวลาก ไปบนพื้นผิวที่ทดสอบซึ่งอาจส่งผลให้พื้นผิวที่ทดสอบเกิดความเสียหายได้ อีกทั้งความละเอียดของ

การวัดด้วยเครื่องมือปลายแหลมนั้นยังขึ้นอยู่กับขนาดของหัวลากด้วย จึงทำให้เครื่องมือชนิดนี้เหมาะสำหรับการวัดที่ไม่ต้องการความละเอียดนัก เช่น ชิ้นงานจากงานจักรกลอุตสาหกรรม

ในขณะที่การวัดความเรียบในระดับสูงส่วนใหญ่จะใช้เครื่องมือทางแสงแทบทั้งสิ้น และวิธีที่นิยมอย่างมากทางแสงก็คือการใช้หลักการวิเคราะห์รบกวนการแทรกสอด (Interferogram) ซึ่งเกิดจากแสง 2 ขบวน แสงสองขบวนนี้ขบวนหนึ่งสะท้อนมาจากผิวที่มีความเรียบสูง และอีกขบวนหนึ่งสะท้อนมาจากพื้นผิวที่ต้องการทดสอบ ซึ่งลักษณะของพื้นผิวที่แตกต่างกันจะให้รบกวนการแทรกสอดในแต่ละจุดแตกต่างกันไป รบกวนการแทรกสอดที่ได้จะนำมาแปรความหมายเพื่อแสดงถึงลักษณะพื้นผิวด้วยวิธีการต่างๆ ต่อไป การวัดด้วยวิธีทางแสงมีข้อดีกว่าวิธีเชิงกล คือ ในขณะทดสอบผิวของชิ้นงานนั้นจะไม่เกิดการสัมผัสผิวของชิ้นงานเราจึงแน่ใจได้ว่าชิ้นงานที่นำมาทดสอบนั้นจะไม่เสียหายหลังการทดสอบ ข้อดีอีกประการหนึ่งก็คือภาพรบกวนการแทรกสอดที่เกิดขึ้นนำมาแปรความหมายในลักษณะของพื้นผิวที่เป็น 3 มิติได้ ในส่วนนี้จำเป็นต้องใช้โปรแกรมที่แปลงข้อมูลรบกวนการแทรกสอดให้เป็นภาพ 3 มิติ ซึ่งจะไม่ขอกว่าในรายงานนี้

ปัจจุบันอินเตอร์เฟอเมตรีแบบอาพันธ์ต่ำ (Low coherence interferometry) เป็นระบบที่รู้จักกันดีในฐานะที่เป็นวิธีการวัดเชิงแสงของวัตถุไม่ว่าจะเป็นความหนา (Thickness) หรือ โครงร่างพื้นผิว (Surface profile) ในการวัดระบบนี้จะอาศัยแหล่งกำเนิดแสงที่มีความกว้างแถบสเปกตรัมที่กว้าง ซึ่งเป็นแสงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดต่างๆ อาทิ หลอดฮาโลเจน (Halogen lamp) และ ซุปเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอด (Superluminescent diode; SLD) เป็นต้น ซึ่งแสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดเหล่านี้จะมีความยาวอาพันธ์ต่ำ และหนึ่งในวิธีของระบบอินเตอร์เฟอเมตรีแบบอาพันธ์ต่ำที่ได้รับความนิยมก็คือ การสร้างภาพอาพันธ์เชิงแสง (Optical coherence tomography; OCT) อันเป็นวิธีการสร้างภาพตัดขวางด้วยการวัดความเข้มแสงที่ได้จากการสะท้อนจากผิวชิ้นงาน [2,3] จากการวิจัยที่ผ่านมา มีกลุ่มผู้วิจัยใช้ระบบอินเตอร์เฟอเมตรีแบบอาพันธ์ต่ำหาโครงร่างพื้นผิวและ โครงร่างภายในที่มีการปิดทับ (Inner layer profile) อาทิ

งานวิจัยของ P. Pavlíček และคณะ [4] ใช้ระบบอินเตอร์เฟอเมตรีแสงขาว (White light interferometry) และ อินเตอร์เฟอเมตรีแบบไมเคลสัน (Michelson interferometer) วัดโครงร่างความสูง (Height profile) ของกระจก, เทริชยูโร และ ซิลิกอนเวเฟอร์ โดยได้ค่าความขรุขระของพื้นผิวในระดับไมโครเมตร

งานวิจัยของ S.Chang และคณะ [5] ใช้ระบบอินเตอร์เฟอเมตรีแบบอาพันธ์ต่ำและวิธีการเลื่อนเฟส (Phase shift) โดยมีแหล่งกำเนิดแสงเป็นซุปเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอด มาวัดแผ่นโปรงใสความหนา $100 \mu\text{m}$ โดยเขียนคำว่า OCT และ NRC ไว้บนผิวด้านของแผ่นที่ตำแหน่งเดียวกัน หลังจากการวัดและประมวลผลด้วยอัลกอริทึมแบบใหม่ที่เรียกว่า การเลื่อนเฟสหลายครั้ง (Multi

step phase shift) พบว่าพวกเขาสร้างภาพของตัวอักษรทั้งสองชุดให้เห็นอย่างชัดเจนแยกกันได้โดยใช้เวลาในการประมวลผลน้อยลง

ตัวอย่างงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นใช้ระบบอินเตอร์เฟอเมตรีแบบอาพันธ์ต่ำกับแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ต่ำที่เป็นแสงขาว (White light) ที่ได้จากหลอดฮาโลเจนและซูปเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอด แหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ต่ำทั้งสองนั้นมีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป แสงขาวที่ได้จากหลอดฮาโลเจนนั้นแม้จะมีความเข้มแสงที่สูง แต่มันก็มีขนาดใหญ่ ราคาแพงและมีความร้อนเกิดขึ้นค่อนข้างสูง ในขณะที่ซูปเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอดมีขนาดเล็ก ราคาถูก และระบบควบคุมที่ไม่ซับซ้อน แต่มันก็มีความเข้มแสงที่ต่ำ ทำให้ต้องโฟกัสลำแสงที่เกิดจากซูปเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอดเมื่อต้องการใช้งานเพื่อเพิ่มความเข้มแสง แต่การวัดด้วยระบบดังกล่าวจะใช้เวลานานในการวัดและระบบการวัดก็จะซับซ้อนขึ้น

นอกจากนี้ C.J.Tay และคณะ [6] ยังวิจัยเกี่ยวกับการสร้างโครงร่างพื้นผิวของชิ้นงานด้วยการใช้อินเตอร์เฟอเมตรีแบบปรับระยะ (Vertical scanning interferometry; VSI) ที่มีหลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสงขาวควบคู่กับวิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่อง (Continuous wavelet transform; CWT) เพื่อวัดความหนาของวัสดุโปร่งแสง ที่มีดัชนีการหักเหเท่ากับ 1.65 จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าค่าความละเอียดของโครงร่างพื้นผิวที่ได้จากการแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่องมีค่าที่ถูกต้องและแม่นยำกว่าวิธีการประมวลผลแบบการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transform; DFT)

อีกทั้งในเชิงพาณิชย์ได้มีการผลิตเครื่องมือสำหรับสร้างภาพพื้นผิวชิ้นงาน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดแทรกสอด (Interference microscope) แบบอินเตอร์เฟอเมตรีชนิดมิรา (Mirau) และอินเตอร์เฟอเมตรีชนิดไมเคลสันที่มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงขาว ที่ได้จากหลอดฮาโลเจนเพื่อวัดความขรุขระของพื้นผิว

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการวัดความขรุขระของพื้นผิวสแตนเลส 316 ที่ใช้แสงจากซูปเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอดเพื่อลดข้อจำกัดของการใช้แสงขาวที่มีขนาดใหญ่และมีความร้อนสูงและอินเตอร์เฟอเมตรีแบบอาพันธ์ต่ำ ที่สร้างโครงร่างพื้นผิวของชิ้นงานด้วยแสงขนานแทนการโฟกัสแสง วิธีการของแสงขนานนี้จะเสมือนว่าความเข้มแสงที่วัดได้แต่ละพิกเซลของกล้องซีซีดีเกิดจากแหล่งกำเนิดแสงขนาดเล็กที่สะท้อนจากพื้นผิวของชิ้นงานแต่ละจุด ซึ่งการใช้แสงขนานจะทำให้ช่วยลดเวลาในการวัด อีกทั้งในงานวิจัยนี้ยังเลือกใช้การแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่องในการวิเคราะห์สัญญาณที่วัดได้เนื่องจากมีการพิสูจน์จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าวิธีนี้ให้ความถูกต้องและแม่นยำกว่าวิธีอื่นๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบการวัดความขรุขระ ด้วยเทคนิคอินเตอร์เฟอริมิเตอร์แบบไมเคลสัน ที่มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงอาพันธ์ต่ำ วิธีการนี้เป็นวิธีการวัดแบบไม่ทำลายและไม่เพิ่มรอยขีดข่วนให้แก่พื้นผิวตัวอย่าง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาถึงวิธีการวัดความขรุขระของพื้นผิวสเตนเลส 316 ด้วยเทคนิคอินเตอร์เฟอริมิเตอร์แบบไมเคลสัน
- 1.2.3 หาวิธีการวัดแบบใหม่ที่ทำให้การวัดแม่นยำและรวดเร็วขึ้น จากการสร้างโครงร่าง (Profile) ของพื้นผิว 3 มิติในรูป 2 มิติ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบและสร้างระบบวัดความขรุขระของพื้นผิวสเตนเลส 316 ด้วยเทคนิคอินเตอร์เฟอริมิเตอร์แบบไมเคลสัน ซึ่งสเตนเลส 316 นี้เป็นวัสดุที่ใช้ผลิตตู้มน้ำหนักมาตรฐาน ซึ่งที่ระดับชั้น (Class) E_1 , E_2 , F_1 และ F_2 ของตู้มน้ำหนักมาตรฐานตาม OIML กำหนดค่าความขรุขระมากที่สุดของผิวตู้มน้ำหนักมาตรฐานดังตารางที่ 1.1 สาเหตุที่ OIML ต้องกำหนดความขรุขระในแต่ละระดับชั้นนั้น เนื่องจากความขรุขระมีผลต่อค่าเสถียรภาพของตู้มน้ำหนักเป็นผลให้มวลของตู้มน้ำหนักมีความถูกต้องลดลง ดังนั้นความขรุขระของผิวตู้มน้ำหนักจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ OIML กำหนดให้เป็นตัวแปรมาตรฐานที่ต้องวัด

หลังจากการหาค่าความขรุขระด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นแล้ว งานวิจัยนี้ยังแสดงการเปรียบเทียบผลที่วัดได้กับเครื่องมือสร้างภาพพื้นผิวชิ้นงานมาตรฐานที่ใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดแทรกสอด (Interference microscope : 3D Non-contact surface profiler) รุ่น SP-500 ของบริษัท TORAY อีกทั้งในงานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอแนวทางการวัดความลึกของพื้นผิวมาตรฐานใหม่ โดยใช้การวิเคราะห์จากภาพ 2 มิติของพื้นผิวแทนการหาด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

ตารางที่ 1.1 แสดงความขรุขระมากที่สุดของตู้มน้ำหนักมาตรฐานในระดับชั้นต่างๆ [1]

ระดับชั้น	E_1	E_2	F_1	F_2
R_z (μm)	0.5	1	2	5
R_a (μm)	0.1	0.2	0.4	1

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สร้างชุดการวัดความขรุขระของผิววัสดุ ด้วยเทคนิคอินเตอร์ฟีโรมิเตอร์แบบไมเคลสันที่มีขนาดเล็กและราคาไม่แพง ซึ่งนำมาวัดความขรุขระของพื้นผิวสเตนเลส 316 ในระดับไมโครเมตรได้
- 1.4.2 นำวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไปพัฒนาเพื่อวัดพื้นผิวของคัมน์น้ำหนักมาตรฐานตาม OIML ต่อไป ซึ่งปัจจุบันการวัดตามมาตรฐาน OIML ได้ใช้วิธีการวัดแบบเปรียบเทียบด้วยตากับชิ้นงานมาตรฐาน ทำให้การวัดแบบนี้ได้ความแม่นยำของการเปรียบเทียบค่อนข้างต่ำกับวิธีวัดด้วยเครื่องมือปลายแหลม ซึ่งเป็นการวัดแบบสัมผัส อันจะเป็นผลทำให้เกิดรอยบนผิวคัมน์น้ำหนักมาตรฐาน และทำให้ค่าเสถียรภาพของคัมน์น้ำหนักมาตรฐานเปลี่ยนไป ฉะนั้นวิธีการจากงานวิจัยนี้จึงน่าที่จะเป็นประโยชน์ต่อการวัดความขรุขระของผิวคัมน์น้ำหนักมาตรฐานที่นอกจากจะได้ค่าความละเอียดสูงแล้วยังไม่ทำลายพื้นผิวของคัมน์น้ำหนักอีกด้วย
- 1.4.3 ได้วิธีวัดแบบใหม่ที่วิเคราะห์ความเข้มแสงจากภาพ 2 มิติของพื้นผิว อันจะเป็นแนวทางในการพัฒนาการหาค่าความขรุขระของพื้นผิวแบบใหม่ต่อไปในอนาคต

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบและพัฒนาระบบวัดความขรุขระด้วยเทคนิคอินเตอร์ฟีโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน ตามขั้นตอนต่อไปนี้

- 1.5.1 ค้นคว้าและรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยด้านการวัดด้วยเทคนิคอินเตอร์ฟีโรมิเตอร์แบบไมเคลสันและด้านการวัดความขรุขระของพื้นผิวต่างๆ
- 1.5.2 ออกแบบระบบที่ใช้วัด พร้อมปรับแนว (Alignment) ของระบบที่ใช้
- 1.5.3 ศึกษาโปรแกรมในการแปลงภาพที่ถ่ายได้และโปรแกรมในการประมวลผลสัญญาณที่ได้จากกล้อง
- 1.5.4 สร้างชิ้นงานตัวอย่างจากสเตนเลส 316 เพื่อนำมาทดสอบกับระบบการวัดพร้อมทั้งเตรียมชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm
- 1.5.5 วัดความขรุขระของผิวสเตนเลส 316 และวัดความลึกของชิ้นงานมาตรฐานที่มีความลึก 1.8 μm ด้วยเทคนิคอินเตอร์ฟีโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน และปรับปรุง แก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น
- 1.5.6 วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้พร้อมคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัด

- 1.5.7 เปรียบเทียบผลการวัดที่ได้จากระบบการวัดนี้กับเครื่องมือสร้างภาพพื้นผิวชิ้นงานที่ใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดแทรกสอด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแทรกสอดของแสง (Interference of light)

ปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงนั้นอธิบายได้ด้วยหลักการซ้อนทับของคลื่น ซึ่งปรากฏการณ์การแทรกสอดนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อคลื่น 2 ขบวนขึ้นไปรวมกัน แล้วส่งผลให้เกิดการเพิ่มและลดแอมพลิจูดของคลื่นรวม การแทรกสอดที่ส่งผลให้เกิดการเพิ่มแอมพลิจูดของคลื่นรวม เรียกว่าการแทรกสอดแบบเสริม (Constructive interference) ส่วนการแทรกสอดที่ส่งผลให้เกิดการลดแอมพลิจูดของคลื่นรวม เรียกว่าการแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive interference) ภาพที่แสดงการเพิ่มลดแอมพลิจูดนี้เรียกว่า ภาพหรือริ้วการแทรกสอด (Interference pattern or fringe) ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้โดยคิดว่าแสงเคลื่อนที่แบบคลื่น และรวมกันตามหลักการซ้อนทับของคลื่น ซึ่งปรากฏการณ์การแทรกสอดนี้มีอยู่รอบตัวเรา และมีการประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อย่างกว้างขวาง

ในขั้นต้น เราจะพิจารณาการแทรกสอดของแสง 2 ลำ (Two beam interference) ที่มีสนามไฟฟ้า \vec{E}_1 และ \vec{E}_2 เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณากำหนดให้คลื่นแสงทั้งสองเกิดจากแหล่งกำเนิดลักษณะเหมือนกันทุกประการและเคลื่อนที่เป็นระยะทางที่แตกต่างกัน นั่นคือลำแสงทั้ง 2 ลำจะมีความถี่เดียวกัน แต่ทิศทางของค่าคงที่การเคลื่อนที่ \vec{k}_1 และ \vec{k}_2 แตกต่างกัน [7] ดังสมการ

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \omega t + \phi_1) \quad (2-1)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 - \omega t + \phi_2) \quad (2-2)$$

เมื่อคลื่นแสงทั้งสองมาพบกันที่ตำแหน่งหนึ่งๆ เราสามารถหาผลลัพธ์ของการรวมคลื่นได้จากหลักการรวมกันของคลื่นคือ

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (2-3)$$

การวัดปริมาณของคลื่นด้วยเครื่องมือวัดนั้นเป็นการวัดปริมาณความหนาแน่นของพลังงาน หรือความเข้มของแสง (Irradiance) ซึ่งเป็นการวัดกำลังสองของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้ารวมหรือ

$$I = \langle E^2 \rangle \quad (2-4)$$

เมื่อ $\langle \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยตามเวลา และ $E^2 = \vec{E} \cdot \vec{E}$ จากสมการข้างต้นทำให้ได้

$$\begin{aligned} E^2 &= \vec{E} \cdot \vec{E} \\ &= (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \\ &= E_1^2 + E_2^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \\ \text{หรือ} \quad \langle E^2 \rangle &= \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle \\ &= I_1 + I_2 + I_{12} \end{aligned} \quad (2-5)$$

เมื่อ I_{12} เป็นพจน์ที่ขึ้นกับการกระทำระหว่าง E_1 และ E_2 เรียกว่า พจน์ของการแทรกสอด (Interference term) หรือ I_{12} เป็นพจน์ที่ทำให้เพิ่ม-ลดความเข้มแสงของคลื่นรวมนั่นเอง เมื่อพิจารณา

$$I_{12} = 2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle \quad (2-6)$$

พบว่า I_{12} จะมีค่าสูงสุด ถ้า \vec{E}_1 และ \vec{E}_2 ขนานกันและ I_{12} จะเป็นศูนย์ ถ้า \vec{E}_1 และ \vec{E}_2 ตั้งฉากกัน หรือไม่เกิดการแทรกสอด จากการพิจารณาในลักษณะนี้ ทำให้ทราบว่าเมื่อแสงที่ไม่โพลาไรซ์ 2 ลำมารวมกัน จะทำให้เกิดการแทรกสอดขึ้นได้จากองค์ประกอบของแสงที่มีทิศขนานกัน จากสมการ (2-6) ถ้าแทนค่า \vec{E}_1 และ \vec{E}_2 จากสมการ (2-1) และ (2-2) จะได้

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 &= (\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}) \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \omega t + \phi_1) \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 - \omega t + \phi_2) \\ &= \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} [\cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \phi_1) \cos \omega t + \sin(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \phi_1) \sin \omega t] \\ &\quad [\cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 + \phi_2) \cos \omega t + \sin(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 + \phi_2) \sin \omega t] \end{aligned} \quad (2-7)$$

$$\begin{aligned} \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle &= \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} [\cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \phi_1) \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 + \phi_2) + \sin(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \phi_1) \sin(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 + \phi_2)] \\ \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle &= \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \phi_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 - \phi_2) \end{aligned}$$

$$\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos \delta \quad (2-8)$$

โดยที่ $\delta = (\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2) + (\phi_1 - \phi_2)$ ซึ่งก็คือความแตกต่างเฟสของ \vec{E}_1 และ \vec{E}_2 เมื่อแทนค่า $\langle \cos^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2}$, $\langle \sin^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2}$, $\langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle = 0$ หรือจะได้ว่า

$$I_{12} = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos \delta \quad (2-9)$$

นั่นเองเมื่อแทนสมการ (2-9) ในสมการ (2-5) จะได้

$$I = I_1 + I_2 + \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos \delta \quad (2-10)$$

ส่วนค่า I_1 และ I_2 นั้น เมื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ $\langle E_1^2 \rangle$ และ $\langle E_2^2 \rangle$ จะได้ว่า

$$I_1 = \langle E_1^2 \rangle = \frac{1}{2} E_{01}^2,$$

$$I_2 = \langle E_2^2 \rangle = \frac{1}{2} E_{02}^2$$

หรือเขียนสมการ (2-9) ได้ใหม่เป็น

$$I_{12} = \sqrt{2I_1} \cdot \sqrt{2I_2} \cos \delta$$

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2-11)$$

ดังนั้นสมการ (2-5) จึงเขียนได้เป็น

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2-12)$$

จากสมการ (2-12) พบว่าค่าของ I ขึ้นอยู่กับค่าของ $\cos \delta$ กล่าวคือ ถ้า $\cos \delta > 0$ จะทำให้ I มีค่ามากกว่า $I_1 + I_2$ แต่ถ้า $\cos \delta < 0$ จะทำให้ I มีค่าน้อยกว่า $I_1 + I_2$ ซึ่งหมายถึงเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันและแบบหักล้างกันตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าความต่างเฟสของคลื่นจากแหล่งกำเนิดทั้งสองหรือ δ จะพบว่า δ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ $\phi_1 - \phi_2$ ซึ่งเป็นความต่างเฟสอันเนื่องมาจากเฟสเริ่มต้นและ $\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2$

ซึ่งเป็นความต่างของเวกเตอร์ค่าคงที่โพเพเกชั่น (Propagation constant vector) ถ้า $\phi_1 - \phi_2$ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบ หรือแหล่งกำเนิดทั้งสองไม่เป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์ (Incoherent source) ซึ่งกันและกัน จะทำให้ $\langle \cos \delta \rangle$ มีค่าเป็นศูนย์ หรือไม่มีการแทรกสอดเกิดขึ้น นั่นหมายความว่าในกรณีที่เรามองเห็นภาพการแทรกสอดแหล่งกำเนิดทั้งสองจะต้องมีสมบัติของความ เป็นอาพันธ์อยู่บ้างหรือ $\langle \cos \delta \rangle$ ต้องมีค่าไม่เป็นศูนย์ ในกรณีคลื่นที่แทรกสอดกันเป็นคลื่นที่มา จากแหล่งกำเนิดที่เป็นอิสระต่อกัน เช่น หลอดไฟ 2 หลอดก็จะมองเห็นภาพของการแทรกสอด ไม่ได้ เพราะแหล่งกำเนิดทั้งสองไม่เป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์ซึ่งกันและกัน สำหรับส่วนของค่า δ หรือ $\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2$ นั้น จะมีค่าเปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงของ r ทำให้ $\cos \delta$ มีค่าเปลี่ยนได้ จากค่าสูงสุดไปถึงค่าต่ำสุด และทำให้เกิดภาพการแทรกสอดขึ้น

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่า ที่ตำแหน่งต่างๆ ผลลัพธ์ของ I อาจจะน้อยตัดออกไปเลยหรือ มากกว่า $I_1 + I_2$ ขึ้นอยู่กับเทอม I_{12} หรือพิจารณาที่ความต่างเฟส (Phase difference) δ ต่างๆ กัน ดังนี้

1) กรณีที่ I มากที่สุด เมื่อ $\cos \delta = 1$ จะได้การแทรกสอดแบบเสริมกัน หรือ

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2-13)$$

เมื่อ $\delta = 2m\pi$ โดยที่ m เป็นศูนย์หรือเลขจำนวนเต็มใดๆ

2) กรณีที่ I น้อยที่สุด เมื่อ $\cos \delta = -1$ จะได้การแทรกสอดแบบหักล้างกัน หรือ

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2-14)$$

เมื่อ $\delta = (2m+1)\pi$ โดยที่ m เป็นศูนย์หรือเลขจำนวนเต็มใดๆ

2.2 อินเทอร์เน็ตโรเมตรแบบไมเคลสัน (Michelson interferometry)

อินเทอร์เน็ตโรเมตร (Interferometer) เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการแทรกสอดของแสง เครื่องมือดังกล่าวมีมากมายหลายแบบตามลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ทางแสงและการนำไปใช้ อาทิ อินเทอร์เน็ตโรเมตรแบบไมเคลสัน (Michelson interferometer), อินเทอร์เน็ตโรเมตรแบบแฟบริ-เพอโรต์ (Fabry-Perot interferometer) และ อินเทอร์เน็ตโรเมตรแบบฟีโซ (Fizeau interferometer)

อินเทอร์เน็ตโรเมตรทำให้แสงอาพันธ์ 2 ลำแทรกสอดกันได้ด้วยวิธีแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดออกเป็น 2 ส่วน หรือมากกว่านั้น แต่ละส่วนของลำแสงจะเคลื่อนที่ไปในตัวกลางที่ระยะทางต่างๆ กัน จากนั้นก็จะเดินทางกลับมารวมกันและเกิดการแทรกสอดกันขึ้น เราจึงอาจแบ่งลักษณะของการแทรกสอดได้ 2 แบบ คือ การแบ่งหน้าคลื่น (Wavefront splitting) และการแบ่งแอมพลิจูด (Amplitude splitting) [8]

- การแทรกสอดแบบแบ่งหน้าคลื่น

วิธีนี้จะแบ่งหน้าคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงอันหนึ่ง ออกเป็น 2 ส่วนด้วยกระจกเงา, ปริซึม หรือเลนส์ และหน้าคลื่นทั้งสองจะมารวมกันและเกิดการแทรกสอดหลังจากเคลื่อนที่ผ่านระยะทางที่ต่างกัน ตัวอย่างของการแทรกสอดแบบแบ่งหน้าคลื่น ได้แก่ การแทรกสอดจากการทดลองของยัง (Young's Experiment), การแทรกสอดจากกระจกของลอยด์ (Lloyd's Mirror) และการแทรกสอดแบบปริซึมคู่ของเฟรเนล (Fresnel's Biprism)

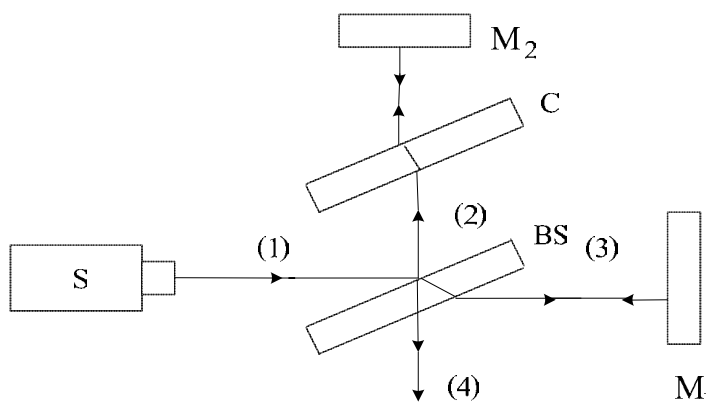
- การแทรกสอดแบบแบ่งแอมพลิจูด

วิธีนี้จะใช้ตัวแยกลำแสงแยกแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดแสง ออกเป็น 2 ส่วน แสงส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ผ่านไป ในขณะที่แสงอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนที่ผิวด้านหลัง ทั้งคลื่นส่งผ่านและคลื่นสะท้อนที่ผิวด้านหลังจะมีแอมพลิจูดลดลงกว่าเดิม จึงกล่าวได้ว่าแอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดแสงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ถ้าคลื่น 2 ส่วนนี้รวมกันที่จุดสังเกตในช่วงความยาวอาพันธ์ (Coherence length) ก็จะเกิดริ้วรอยการแทรกสอดได้ การแทรกสอดแบบแบ่งแอมพลิจูดนี้มีด้วยกันหลายลักษณะแต่รู้จักกันมากที่สุดก็คือ อินเทอร์เน็ตโรเมตรแบบไมเคลสัน

ในปี พ.ศ. 2424 (ค.ศ.1881) ไมเคลสัน ได้เสนอหลักการของระบบอินเทอร์เน็ตโรเมตรแบบไมเคลสันนี้ขึ้น [9] ซึ่งเป็นระบบที่มีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาศาสตร์ด้านฟิสิกส์ยุคใหม่ กล่าวคือ ระบบดังกล่าวใช้ยืนยันสมมติฐานของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ ใช้วัดโครงสร้างที่ละเอียด

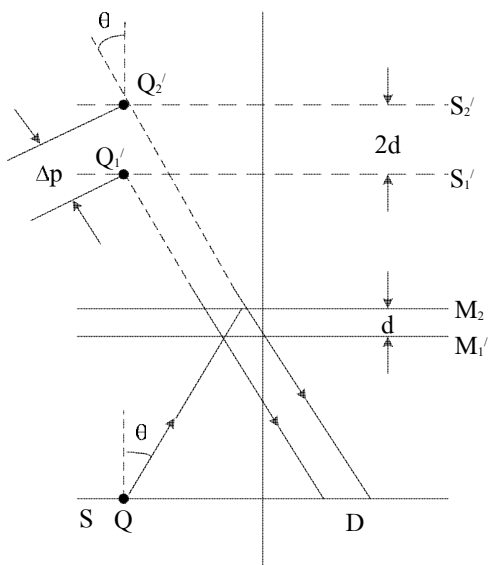
มาก (Hyperfine structure) ของเส้นสเปกตรัม และใช้เป็นมาตรฐานในการกำหนดความยาวในรูปของความยาวคลื่นแสงได้ เป็นต้น

หลักการของระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสันนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 โดยกำหนดให้ S เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ลำแสง (1) ออกมา เมื่อลำแสงนี้ไปตกกระทบที่ตัวแยกลำแสง (Beam splitter ; BS) ซึ่งตัวแยกลำแสงนี้เป็นแท่งแก้วที่ฉาบผิวเพื่อให้เกิดการสะท้อนแบบ 50:50 จึงทำให้ลำแสงแยกออกเป็น 2 ลำที่มีแอมพลิจูดเท่ากัน คือ ลำแสงสะท้อน (2) และลำแสงส่งผ่าน (3) ลำแสงทั้งสองลำนี้จะสะท้อนที่กระจก M_2 และ M_1 แล้วเคลื่อนที่กลับมาตามแนวเดิมสู่ตัวแยกลำแสงอีกครั้งหนึ่ง ในครั้งนี้ที่บริเวณตัวแยกลำแสง ลำแสง (2) จะทะลุผ่านและลำแสง (3) จะสะท้อนแล้วรวมกันเป็นลำแสง (4) ที่มีริ้วรอยการแทรกสอดขึ้น



รูปที่ 2.1 แสดงหลักการของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน

กระจก M_1 และ M_2 ปรับให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน และกระจกบานหนึ่งเลื่อนเข้า-ออกตามแนวลำแสงได้ การเคลื่อนนี้จะทำให้ความต่างของทางเดินเชิงแสง (Optical path difference ; OPD) ของลำแสง (2) และ (3) มีค่าเปลี่ยนแปลงได้ตามต้องการ จากรูปที่ 2.1 จะสังเกตได้ว่าลำแสง (2) และ (3) มีการเคลื่อนที่ผ่านตัวแยกลำแสงไม่เท่ากัน กล่าวคือลำแสง (2) ผ่านเพียง 1 ครั้ง ในขณะที่ลำแสง (3) ผ่านถึง 3 ครั้ง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้เพิ่มอุปกรณ์อีกชิ้นหนึ่ง ได้แก่ ตัวชดเชย (Compensator; C) ที่วางขนานกับตัวแยกลำแสงไว้ระหว่างการเคลื่อนที่ของแนวลำแสง (2) โดยให้ตัวชดเชยเป็นแก้วชนิดเดียวกันและมีความหนาเท่ากับตัวแยกลำแสง ทำให้ลำแสง (2) จึงมีการเคลื่อนที่ผ่านแผ่นแก้ว 3 ครั้งเท่ากับลำแสง (3)



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดการแทรกสอดในระบบอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคิลสัน

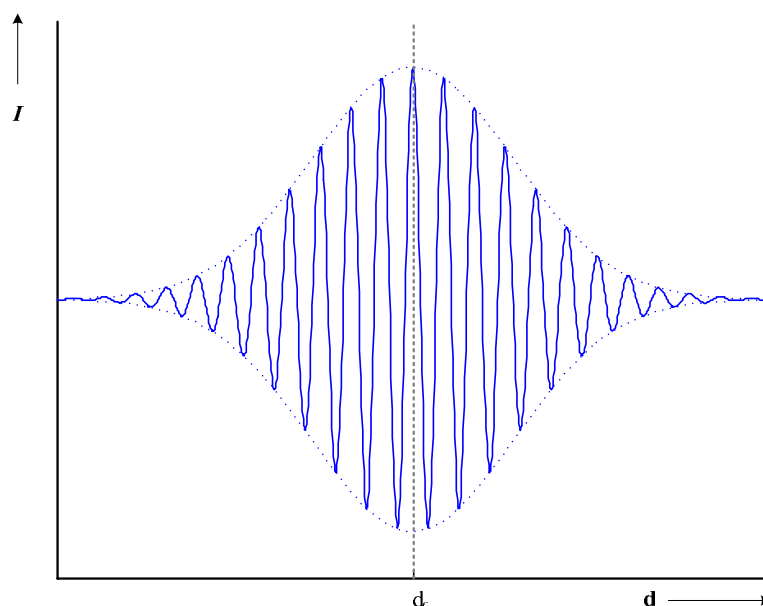
อินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคิลสันที่แสดงในรูป 2.1 นี้มีแนวการเคลื่อนที่ของลำแสงถึง 2 แนว ซึ่งแนวแกนทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกัน แต่ระบบดังกล่าวอาจเขียนแผนภาพแทนให้มีแนวแกนของแสงเพียง 1 แกนได้โดยหมุนแนว SM_1 ไปในทิศทวนเข็มนาฬิกาเป็นมุม 90° รอบจุดตัดของลำแสงกับตัวแยกลำแสงดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยที่ M_1' เป็นตำแหน่งใหม่ของกระจก M_1 การเขียนแผนภาพแทนในลักษณะนี้ช่วยให้ง่ายต่อการพิจารณาความต่างของทางเดินเชิงแสงของลำแสง (2) และ (3) ซึ่งสมมติว่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ M_2 อยู่ได้ทั้งด้านหน้า หลัง หรือพอดีกับตำแหน่งของ M_1' ถ้า M_1' อยู่ห่างจาก M_2 เป็นระยะ d และ S_1' กับ S_2' เป็นภาพเสมือนที่เกิดจากกระจก M_1' และ M_2 ตามลำดับ จะได้ว่าระยะที่ S_1' ห่างจาก S_2' มีค่าเป็น $2d$ พิจารณาแสงจากจุด Q บนแหล่งกำเนิดแสง S แสงดังกล่าวจะสะท้อนจากทั้ง M_1' และ M_2 ลำแสงสะท้อนทั้งสองนี้เสมือนเป็นลำแสงจากภาพเสมือน Q_1' และ Q_2' ของจุด Q ที่เกิดที่ตำแหน่งของ S_1' และ S_2' ตามลำดับ เข้าสู่ตัวรับภาพ D Q_1' และ Q_2' นี้เกิดเนื่องจากระยะระหว่าง S_1' และ S_2' หรือระยะระหว่าง Q_1' และ Q_2' มีค่าเท่ากับ $2d$ ดังนั้นความต่างของทางเดินเชิงแสงของลำแสงสะท้อนทั้งสองมีค่าเป็น

$$\Delta p = 2d \cos \theta \quad (2-15)$$

เมื่อ θ เป็นมุมที่ลำแสงตกกระทบบนแนวตั้งฉากกับกระจก M_1 ในกรณีที่แสงตกกระทบบนแนวตั้งฉากกับกระจก M_1 จะได้ $\Delta p = 2d$ ถ้ากระจก M_1 กับ M_2 อยู่ห่างจากตัวแยกลำแสงเป็นระยะที่ต่างกันเท่ากับ d เมื่อมีแสงจากตัวแยกลำแสงตกกระทบบน M_1 และ M_2 ในแนวตั้งฉากกับกระจก แล้ว

แสงที่สะท้อนกลับมาไปพบกันที่ตัวแยกลำแสงจะมีระยะต่างกันเป็น $2d$ ซึ่งร็วรอยการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะสังเกตเห็นได้ก็ต่อเมื่อความต่างของทางเดินเชิงแสงของลำแสงมีค่าน้อยกว่าความยาวอาพันธ์

สำหรับความยาวอาพันธ์ของแสงอาพันธ์ต่ำ ร็วรอยการแทรกสอดจะสังเกตเห็นได้ในระดับไมโครเมตร ถ้าเลื่อนตำแหน่งกระจก M_2 ตั้งแต่อยู่ด้านหน้ากระจก M_1' จนตำแหน่งพอดีกันและเลื่อนไปด้านหลังตำแหน่ง M_1' จะได้ร็วรอยการแทรกสอดเลื่อนตั้งแต่เสริมกัน หักล้างกัน สลับกันไปเรื่อยๆ ดังภาพที่ 2.3 ที่แสดงความเข้มแสงที่ตำแหน่ง M_2 ต่างๆ กัน



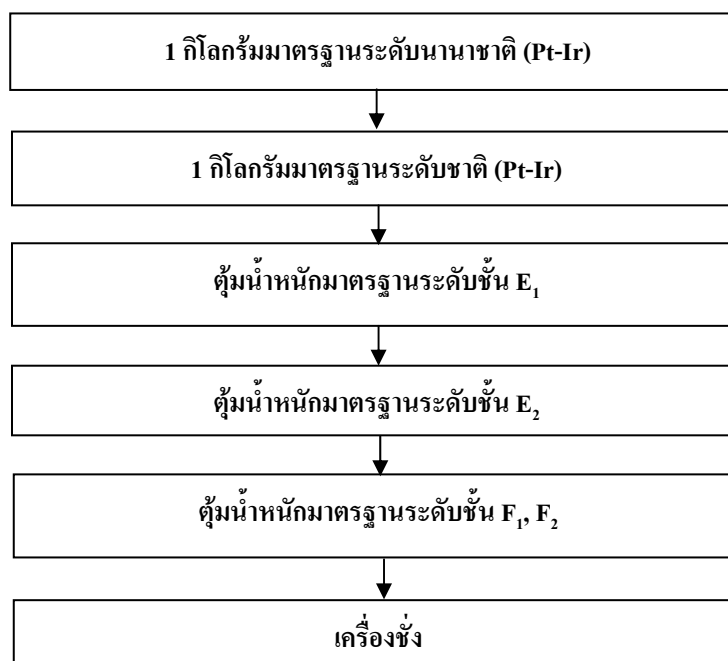
รูปที่ 2.3 แสดงความเข้มแสงเมื่อเลื่อนระยะของกระจก M_2

ณ ตำแหน่ง d_0 เป็นตำแหน่งที่ไม่มีความแตกต่างของระยะระหว่างกระจก 2 บาน และความเข้มจะลดลงอย่างรวดเร็วจากตำแหน่ง d_0 เนื่องจากแสงมีความยาวอาพันธ์ต่ำ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและตำแหน่งต่างๆที่แสดงในรูปที่ 2.3 นี้ เรียกว่าร็วรอยของการแทรกสอด (Interferogram) ซึ่งที่ตำแหน่ง d_0 นี้จะไม่เกิดความหน่วงของเวลา (Time delay) ระหว่างกระจก 2 บาน ความเข้มสูงสุดของร็วรอยการแทรกสอดจึงเกิดขึ้น ถ้ากระจก M_2 มีการเปลี่ยนระยะไปเล็กน้อยก็จะทำให้ระยะทางของลำแสงทั้ง 2 แขนเกิดความหน่วงของเวลา ทำให้เกิดการรวมกันแบบหักล้าง (Destructive addition) และเป็นเช่นนี้สลับกันไปเรื่อยๆ จึงทำให้ความเข้มแสงของการแทรกสอดค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งความต่างทางเดินเชิงแสงมากกว่าความยาวอาพันธ์ ก็จะไม่เกิดความหน่วงของเวลาระหว่างแขนทั้งสอง ทำให้ร็วรอยการแทรกสอดไม่เกิดขึ้นอีกต่อไป

2.3 มาตรฐานความขรุขระของคูน้้าหนัก (Roughness) [10]

ลักษณะความขรุขระของพื้นผิวเกิดขึ้นหลังการผลิตโดยค่าความขรุขระขึ้นกับวัสดุที่นำมาผลิตและกรรมวิธีในการผลิต รวมถึงลักษณะการใช้งานอีกด้วย ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวัดความขรุขระของพื้นผิวสแตนเลส 316 เนื่องจากสแตนเลส 316 เป็นวัสดุที่นำมาผลิตคูน้้าหนักมาตรฐานตามมาตรฐานของ OIML ซึ่งหลังจากที่ใช้คูน้้าหนักมาตรฐานไปแล้วก็อาจจะเกิดร่องรอยของการขีดข่วนเป็นผลให้ค่ามวลของคูน้้าหนักมีการเปลี่ยนแปลงไป ค่าความขรุขระจึงเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเสถียรภาพของคูน้้าหนัก

คูน้้าหนักตามมาตรฐาน OIML เป็นตัวถ่ายค่าทางด้านมวลซึ่งเป็นหน่วยพื้นฐาน 1 ใน 7 หน่วยของระบบเอสไอ (International System of Units; SI Units) ซึ่งการสอบกลับของมวล (Traceability of mass) มีขั้นตอนดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการสอบกลับของมวล

ค่าความขรุขระมากที่สุดของผิวสแตนเลส 316 ที่ใช้สร้างคูน้้าหนักมาตรฐานที่ระดับชั้น (Class) E_1 , E_2 , F_1 และ F_2 แสดงได้ดังตารางที่ 1.1 และค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เกิดขึ้นได้มากที่สุดตามข้อกำหนดของ OIML แบ่งตามระดับชั้นแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้มากที่สุด (Maximum permissible errors; δm)

[1]

ค่าระบุ	$\pm \delta m$ in mg						
	ระดับชั้น E ₁	ระดับชั้น E ₂	ระดับชั้น F ₁	ระดับชั้น F ₂	ระดับชั้น M ₁	ระดับชั้น M ₂	ระดับชั้น M ₃
5000 kg			25000	80000	250000	800000	2500000
2000 kg			10000	30000	100000	300000	1000000
1000 kg		1600	5000	16000	50000	160000	500000
500 kg		800	2500	8000	25000	80000	250000
200 kg		300	1000	3000	10000	30000	100000
100 kg		160	500	1600	5000	16000	50000
50 kg	25	80	250	800	2500	8000	25000
20 kg	10	30	100	300	1000	3000	10000
10 kg	5.0	16	50	160	500	1600	5000
5 kg	2.5	8.0	25	80	250	800	2500
2 kg	1.0	3.0	10	30	100	300	1000
1 kg	0.5	1.6	5.0	16	50	160	500
500 g	0.25	0.8	2.5	8.0	25	80	250
200 g	0.10	0.3	1.0	3.0	10	30	100
100 g	0.05	0.16	0.5	1.6	5.0	16	50
50 g	0.03	0.10	0.3	1.0	3.0	10	30
20 g	0.025	0.08	0.25	0.8	2.5	8.0	25
10 g	0.020	0.06	0.20	0.6	2.0	6.0	20
5 g	0.016	0.05	0.16	0.5	1.6	5.0	16
2 g	0.012	0.04	0.12	0.4	1.2	4.0	12
1 g	0.010	0.03	0.10	0.3	1.0	3.0	10
500 mg	0.008	0.025	0.08	0.25	0.8	2.5	
200 mg	0.006	0.020	0.06	0.20	0.6	2.0	
100 mg	0.005	0.016	0.05	0.16	0.5	1.6	
50 mg	0.004	0.012	0.04	0.12	0.4		
20 mg	0.003	0.010	0.03	0.10	0.3		
10 mg	0.003	0.008	0.025	0.08	0.25		
5 mg	0.003	0.006	0.020	0.06	0.20		
2 mg	0.003	0.006	0.020	0.06	0.20		
1 mg	0.003	0.006	0.020	0.06	0.20		

การวัดค่าความขรุขระนั้นนิยามได้หลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้เน้นไปที่การวัดค่าความสูงต่ำเฉลี่ยของโครงร่างความขรุขระของพื้นผิว (Mean height of roughness profile; R_a), ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยความสูงต่ำยกกำลังสองของโครงร่างความขรุขระของพื้นผิว (Root mean square height of roughness profile; R_q) และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของโครงร่างความขรุขระของพื้นผิว (Maximum height of roughness profile; R_z) [11]

- ค่าความสูงต่ำเฉลี่ยของโครงร่างความขรุขระของพื้นผิว หาได้จาก

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i| \quad (2-16)$$

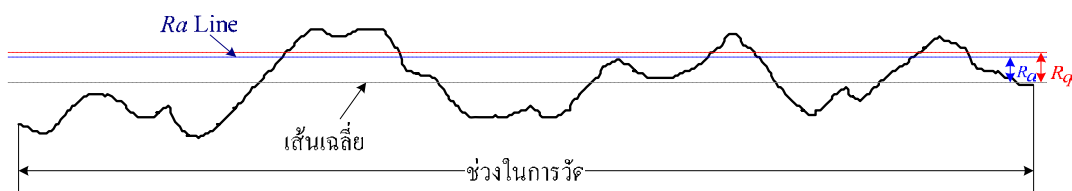
เมื่อ Z_i คือ ค่าความสูงต่ำแต่ละยอด

ในการหาค่า Z_i ของแต่ละยอด ต้องหาเส้นเฉลี่ย (Mean line) จากค่าเฉลี่ยของความสูงต่ำของโครงร่างความขรุขระของพื้นผิวเสียก่อน เส้นเฉลี่ยนี้เป็นเส้นที่แบ่งพื้นที่รวมของด้านบนเส้นและพื้นที่รวมของด้านล่างเส้นให้เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5

- ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยความสูงต่ำยกกำลังสองของโครงร่างความขรุขระของพื้นผิว หาได้จาก

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i^2} \quad (2-17)$$

ซึ่งระดับค่าของ R_q แสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงเส้นเฉลี่ย, ค่า R_a และ ค่า R_q

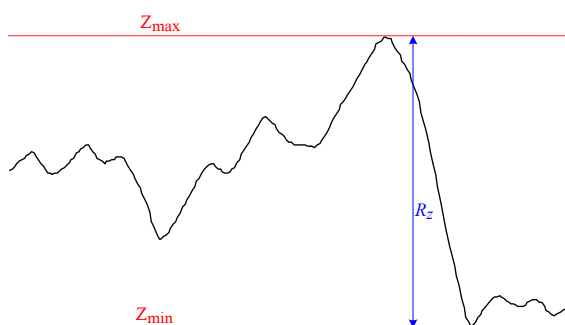
- ค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของโครงร่างความขรุขระของพื้นผิว หาได้จาก

$$R_z = Z_{\max} - Z_{\min} \quad (2-18)$$

เมื่อ Z_{\max} คือ ค่าความสูงของพื้นผิวสูงสุดของโครงร่างความขรุขระของพื้นผิว

Z_{\min} คือ ค่าความลึกของพื้นผิวต่ำสุดของโครงร่างความขรุขระของพื้นผิว

นิยามของ R_z แสดงดังรูปที่ 2.6

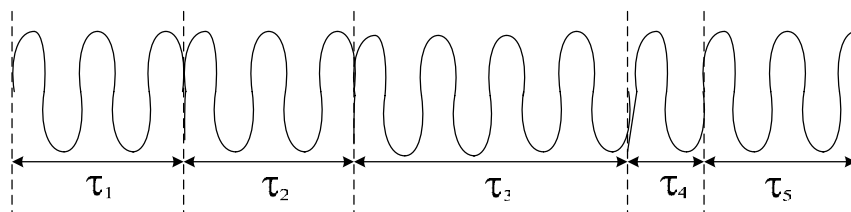


รูปที่ 2.6 แสดงค่า R_z

2.4 แสงอาพันธ์ต่ำ (Low coherence light)

ในระบบอินเตอร์เฟอเมตรีอาพันธ์ต่ำ ความอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสงมีความสำคัญยิ่งต่อผลการวัดด้วยเทคนิคที่ใช้ความยาวอาพันธ์ต่ำนี้ช่วยให้วิเคราะห์โครงร่างพื้นผิวในระดับไมโครเมตรได้

ความอาพันธ์มีความสัมพันธ์กับเฟสของแสงโมโนโครมาติก (Monochromatic light) แสงที่มีเฟสคงที่เรียกว่าแสงอาพันธ์แบบสมบูรณ์ แต่ถ้าแสงที่มีเฟสแบบสุ่มจะเรียกว่าแสงอนาพันธ์แบบสมบูรณ์ ในกรณีที่แสงโมโนโครมาติกในอุดมคติ แสงจะมีความกว้างของแถบความถี่แสงเป็นศูนย์ นั่นหมายความว่าส่วนกลับของมันจะมีค่าเป็นอนันต์ หรือเรียกว่าเวลาอาพันธ์ (Coherence time ; τ_c) แต่ธรรมชาติของแสงโดยทั่วไปนั้นจะไม่เกิดกรณีเช่นนี้ขึ้นเพราะแหล่งกำเนิดแสงจะปล่อยคลื่นเป็นลำดับออกมาในเวลาจำกัด ซึ่งความไม่ต่อเนื่องในเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

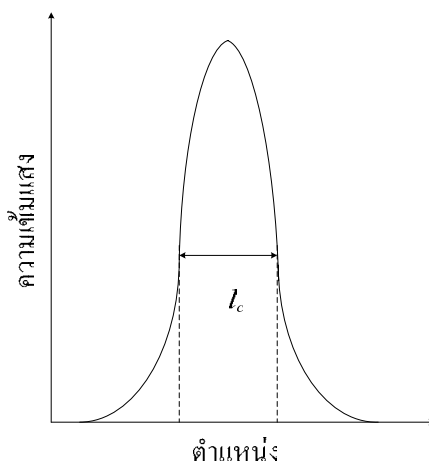


รูปที่ 2.7 แสดงรูปคลื่นที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

ในกรณีที่ความกว้างของแถบความถี่แสงไม่เป็นศูนย์ เวลาอาพันธ์ก็จะไม่มีค่าเป็นอนันต์ ซึ่งแสงที่มีสมบัติตามนี้จะมีลักษณะคล้ายแสงโมนโครมาติก เรียกว่า แสงกึ่งโมนโครมาติก (Quasimonochromatic light) โดยแสงดังกล่าวจะมีความอาพันธ์เป็นบางช่วง สำหรับแสงที่มีความยาวอาพันธ์ในระดับไมโครเมตรจะจัดว่าเป็นแสงอาพันธ์ต่ำ โดยที่ระยะอาพันธ์ (Coherence length ; l_c) [12] มีความสัมพันธ์กับเวลาอาพันธ์ดังสมการ

$$l_c = c\tau_c = \frac{2\ln 2}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \tag{2-19}$$

เมื่อ c คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ มีค่าประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาที
 λ_0 คือ ความยาวคลื่นศูนย์กลาง (Central wavelength) ของแหล่งกำเนิดแสง
 $\Delta\lambda$ คือ ความกว้างสเปกตรัม (Spectral width) ของแหล่งกำเนิดแสง
 ลักษณะของแสงอาพันธ์ต่ำและความยาวอาพันธ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของแสงอาพันธ์ต่ำ

ในการวัดความหนาของวัสดุหลายๆ ชั้น ถ้าความยาวอาพันธ์ของแสงน้อยกว่าความหนาของชั้นวัสดุในแต่ละชั้นจะแสดงให้เห็นชั้นต่าง ๆ นั้นได้ แต่ถ้าความยาวอาพันธ์ของแสงมากกว่าความหนาของชั้นวัสดุ จะทำให้ผลการวัดที่ได้ไม่ถูกต้อง เนื่องจากตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุดจะซ้อนกันจนไม่อาจแยกตำแหน่งทั้งสองนั้นได้ ตัวอย่างของแหล่งกำเนิดแสงความยาวอาพันธ์ต่ำแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ต่ำ [2]

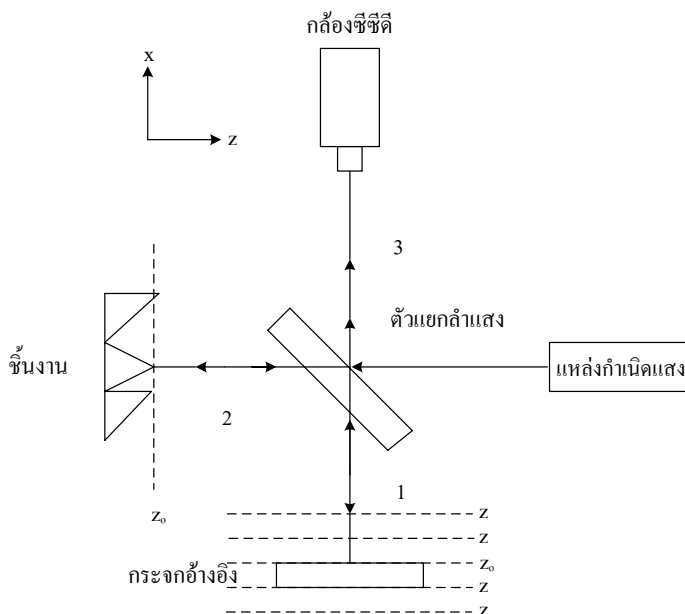
แหล่งกำเนิดแสง	ความยาวคลื่นศูนย์กลาง ($\bar{\lambda}$)	ความกว้างสเปกตรัม ($\Delta\lambda$)	ความยาวอาพันธ์ (l_c)	กำลัง
ซูเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอด (SLD)	875 nm	10 nm	20 μm	40 mW
	820 nm	20 nm	15 μm	50 mW
	820 nm	50 nm	6 μm	6 mW
	930 nm	70 nm	6 μm	30 mW
	1300 nm	35 nm	21 μm	10 mW
	1550 nm	70 nm	15 μm	5 mW
ไลท์อีมิตติ้งไดโอด (LED)	1240 nm	40 nm	17 μm	0.1 mW
	1300 nm	40 nm	17 μm	0.1 mW
ซูเปอร์ฟลูออเรสเซนส์ Yb-โด๊ป ไฟเบอร์ Er-โด๊ป ไฟเบอร์ Tm-โด๊ป	1064 nm	30 nm	17 μm	40 mW
	1550 nm	80-100 nm	16 μm	100 mW
	1800 nm	80 nm	18 μm	7 mW
โฟโตนิก คริสตัล ไฟเบอร์	1.3 μm	370 nm	2.5 μm	6 mW
	725 nm	370 nm	0.75 μm	6 mW

2.5 การวิเคราะห์และประมวลผล (Analysis)

หลักการของระบบอินเทอร์เฟอเมตริ์เป็นไปตามรูปที่ 2.9 โดยที่คิดว่าแต่ละพิกเซลของภาพที่บันทึกได้จากกล้องซีซีดีแทนการตรวจจับของแสงแต่ละจุดบนพื้นผิวของชิ้นงาน ฉะนั้นแต่ละพิกเซลเปรียบเสมือนเป็นตัวตรวจจับของแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งที่มีขนาดเล็ก เท่ากับขนาดของพิกเซลนั้น ซึ่งจะช่วยให้ลดเวลาในการวัด ในงานวิจัยนี้แบ่งระบบที่ใช้วัดออกเป็น 2 แบบ คือ อินเทอร์เฟอเมตริ์แบบปรับระยะ (Vertical scanning interferometry; VSI) ที่ใช้วิธีการประมวลผลแบบการแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่อง (Continuous wavelet transform; CWT) และ อินเทอร์เฟอเมตริ์แบบเลื่อนเฟส (Phase shift interferometry; PSI) ที่ใช้วิธีการประมวลผลแบบเชิงอนุพันธ์ (Derivatives-based)

แบบที่ 1 : อินเทอร์เฟอเมตริ์แบบปรับระยะที่ใช้วิธีการประมวลผลแบบการแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่อง

วิธการแทรกสอดที่เกิดขึ้นตามลักษณะของผิวที่มีความสูงต่ำไม่เท่ากันของชิ้นงานที่กล้องซีซีดี (Charge coupled device; CCD) บันทึกภาพได้ นั้นมีการแสดงผลออกมาในรูปของความเข้มแสง ความเข้มแสงสูงสุดของสัญญาณที่ได้ในแต่ละพิกเซลของกล้องซีซีดีจะเป็นตัวแทนของความสูงต่ำของแต่ละพื้นผิว



รูปที่ 2.9 แสดงรูปแบบการติดตั้งระบบการวัดอินเทอร์เฟอเมตริ์แบบไมเคลสัน

เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ต่ำที่มีระยะอาพันธ์สั้นในระดับไมโครเมตร ทำให้แสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดจะมีลักษณะคล้ายพัลส์ (Pulse) สั้นๆ ที่ขึ้นกับเวลา จากรูปที่ 2.9 เมื่อเลื่อนระยะกระจกอ้างอิงให้ใกล้กับระยะของผิวชิ้นงาน รีวรอยการแทรกสอดจะเกิดขึ้นเมื่อผลต่างของทางเดินแสงจากด้านทั้งสองมีค่าน้อยกว่าระยะอาพันธ์ของแสงที่ใช้ในระบบ ความเข้มแสงที่เกิดจากการแทรกสอด เขียนความสัมพันธ์ตามระยะตามแนวแกน z ได้เป็น [4]

$$I(z) = I_0 \left\{ 1 + \exp \left[- \left(\frac{z - z_0}{l_c} \right)^2 \right] \cos \left(4\pi \frac{z - z_0}{\lambda_0} \right) \right\} \quad (2-20)$$

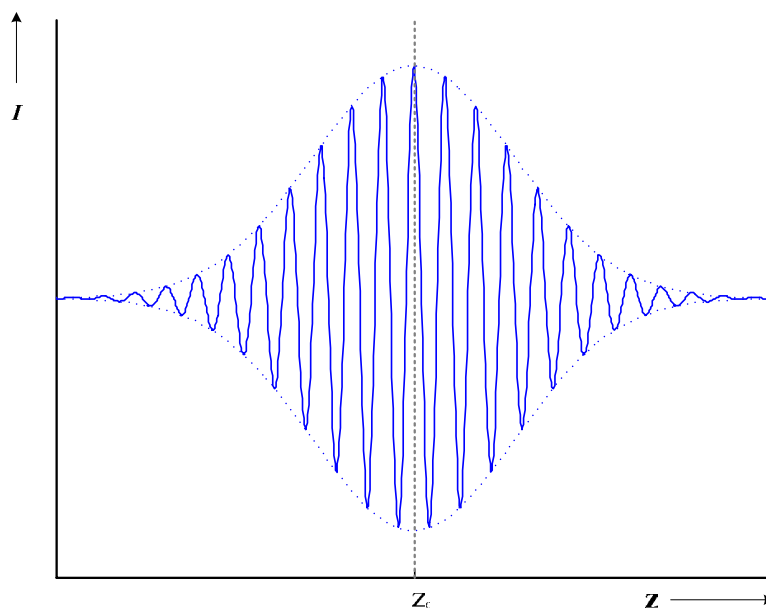
เมื่อ I_0 คือ ความเข้มแสงด้านวัตถุและด้านอ้างอิง โดย $I_0 = I_{object} = I_{ref}$

z_0 คือ ระยะที่แกนด้านวัตถุเท่ากับแกนด้านอ้างอิงที่จุดใดๆ

z คือ ระยะที่เกิดการแทรกสอดที่จุดใดๆ

ซึ่งความสัมพันธ์ของความเข้มแสงกับระยะที่เกิดการแทรกสอดในแต่ละจุดมีความสัมพันธ์

ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มแสงกับระยะที่เกิดการแทรกสอด

จากรูปที่ 2.10 พบว่ารีวรอยการแทรกสอดที่ได้จากกล้องซีซีดีเมื่อระยะแกนทั้งสองของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ต่างกันอยู่ในช่วงของระยะอาพันธ์ และที่จุด z_0 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ระยะของด้าน

อ้างอิงเท่ากับระยะความสูงของแต่ละจุดบนผิวของชิ้นงาน ความเข้มของแสงที่แทรกสอดที่ตำแหน่งดังกล่าวจะมีค่าสูงสุด ด้วยการนิยามตำแหน่ง z_0 จะทำให้ทราบตำแหน่งความสูงต่ำของแต่ละจุดได้ แม้ว่าข้อมูลของรีวรอยการแทรกสอดที่ได้จากกล้องซีซีดีจะขึ้นกับระยะต่างระหว่างแกนของอินเตอร์เฟอริมิเตอร์แบบไมเคลสันทั้งสอง แต่ความสูงต่ำที่ได้แต่ละจุดมีความเป็นไปได้ที่จะอาจยังไม่ใช่ตำแหน่งที่แท้จริง เนื่องจากข้อมูลที่ได้เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นระยะ z_0 จึงอาจอยู่ระหว่างจุดของข้อมูลที่เก็บได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีการแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่อง (Continuous wavelet transform; CWT) [6] มาใช้ประมวลผลเพื่อให้ผลการวัดความขรุขระที่ได้มีความละเอียดและถูกต้องมากขึ้น

ในงานวิจัยนี้ใช้การแปลงเวฟเลท (Wavelet transform) ที่มีการแปลงสัญญาณให้อยู่ทั้งในโดเมนความถี่และโดเมนเวลาโดยใช้ฟังก์ชันเวฟเลท

เนื่องจากสัญญาณของรีวรอยการแทรกสอดมีรูปร่างแบบเกาส์เซียน (Gaussian shape) และเวฟเลทแบบมอร์เลท (Morlet wavelet) เป็นเวฟเลทแม่ (Mother wavelet) [13] ที่มีรูปร่างคลื่นที่ปรับโดยอิงจากรูปร่างเกาส์เซียนเราจึงเลือกใช้เวฟเลทแม่เป็นเวฟเลทแบบมอร์เลท ซึ่งแสดงได้ดังสมการ [14]

$$h(\eta) = \left[\exp(i\omega_0\eta) - \exp\left(-\frac{\omega_0^2}{2}\right) \right] \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) \quad (2-21)$$

โดยที่ η คือ พารามิเตอร์เวลาที่ไม่มิตติ (Nondimensional time parameter)

ω_0 คือ ความถี่ที่ไม่มิตติ (Nondimensional frequency)

และสมการการแปลงฟูเรียร์ของสมการ (2-21) เขียนได้เป็น

$$\hat{h}(\omega) = \sqrt{2\pi} \left\{ \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2}\right] - \exp\left(-\frac{\omega_0^2}{2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\omega^2}{2}\right) \right\} \quad (2-22)$$

จากสมการข้างต้น $\hat{h}(\omega) = 0$ เมื่อ $\omega = 0$ นั่นคือ $\int_R h(\eta) d\eta = 0$ ดังนั้นสมการ (2-21) เป็นสมการเวฟเลทเฉลี่ยที่มีค่าเท่ากับศูนย์ [13]

ถ้า $\omega_0 = 6$ เทอมของ $\exp\left(-\frac{\omega_0^2}{2}\right) = 0$ และสมการ (2-21) จะเป็น

$$h(\eta) = \exp(i\omega_0\eta)\exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right); \text{ ในกรณีที่ } \omega_0 = 6 \quad (2-23)$$

การแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่องของสัญญาณ $y(\eta)$ กับฟังก์ชันเวฟเลท $h(\eta)$ แสดงได้ดังสมการ [15]

$$W_{a,b}(\eta) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} y(\eta)h^*\left(\frac{\eta-b}{a}\right)d\eta \quad (2-24)$$

สำหรับสัญญาณวิเคราะห์หรือการแทรกสอดที่ไม่ต่อเนื่องตามทิศทางแกน z การแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่องจะหาได้จากสมการ [16]

$$W_{a,b}(z) = \sqrt{\frac{\Delta z}{|a|}} \sum_{z=0}^{N-1} I_D(z)h^*\left(\frac{z-b}{a}\right)\Delta z \quad (2-25)$$

- เมื่อ h^* คือ คอนจูเกตจำนวนเชิงซ้อนของ h
 a คือ พารามิเตอร์สเกล (Scale parameter) สำหรับควบคุมการย่อหรือขยายของเวฟเลทแม่
 b คือ พารามิเตอร์ตำแหน่ง (Position parameter) สำหรับควบคุมเกี่ยวกับระยะห่าง
 Δz คือ ระยะห่างในการเลื่อนตำแหน่ง
 N คือ จำนวนของสัญญาณ

เนื่องจากสัญญาณไม่ต่อเนื่อง และความสูงค่าที่แท้จริงอาจจะอยู่ระหว่างความสูงค่าที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งจากการแปลงเวฟเลทพบว่ามุมเฟสของค่า $W_{a,b}(z)$ แต่ละค่าสัมพันธ์กับระยะห่างจากจุดสูงสุดจริงกับจุดนั้นๆ โดยที่มุมเฟส φ ของการแปลงเวฟเลท $W_{a,b}(z)$ จะหาได้จากสมการ

$$\varphi = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[W_{a,b}(z)]}{\text{Re}[W_{a,b}(z)]} \right\} \quad (2-26)$$

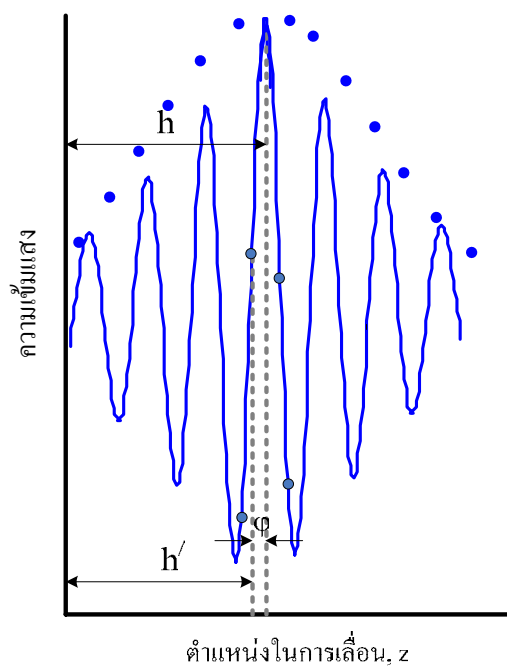
ถ้า $W_{a,b}(z)$ คือ ค่าของตำแหน่งของแอมพลิจูด $|W_{a,b}(z)|$ มีค่ามากที่สุด โดยที่ Im เป็น ส่วนของจำนวนจินตภาพของจำนวนเชิงซ้อน (Imaginary part of the complex number) และ Re เป็น ส่วนของจำนวนจริงของจำนวนเชิงซ้อน (Real part of the complex number) ดังนั้นค่าความสูงต่ำที่แท้จริงหาได้จาก

$$h = h' - \frac{\lambda_0}{4\pi} \varphi \quad (2-27)$$

เมื่อ h คือ ความสูงต่ำที่แท้จริง

h' คือ ความสูงต่ำที่ได้จากการแปลงเวฟเลขแบบต่อเนื่อง

φ คือ มุมเฟส



รูปที่ 2.11 แสดงมุมเฟสระหว่างความสูงต่ำที่ได้จากการแปลงเวฟเลขแบบต่อเนื่อง และความสูงต่ำที่แท้จริง

แบบที่ 2 : อินเตอร์เฟอเมตรีแบบเลื่อนเฟสที่ใช้วิธีการประมวลผลแบบเชิงอนุพันธ์

จากรีวรอยการแทรกสอดที่เกิดขึ้นตามลักษณะของผิวที่มีความสูงต่ำไม่เท่ากันของชิ้นงาน ที่กล้องซีซีดีบันทึกภาพได้ จะมีความเข้มแสงตามสมการ [17]

$$I(x, y, t) = I_0(x, y) + A_i(x, y, t)\sin[\omega t + \phi(x, y)] \quad (2-28)$$

เมื่อ $I(x, y, t)$ คือ ความเข้มแสง ณ เวลาใดๆ

$I_0(x, y)$ คือ ความเข้มแสงพื้นฐาน

$A_i(x, y, t)$ คือ ภาพตัดขวางของภาพลำดับที่ i

$\sin \phi$ คือ รีวการแทรกสอด (Interference fringes)

ω คือ ความถี่เชิงมุมศูนย์กลาง (Central angular frequency) ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่ศูนย์กลาง (Central frequency) ของแสงเป็น $\omega = 2\pi f$

กรณีแหล่งกำเนิดแสงเป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ต่ำ และในกรณีที่เป็นการถ่ายภาพตัดขวางอาพันธ์เชิงแสง (Optical coherence tomography; OCT) สมการ (2-28) เขียนใหม่ได้เป็น

$$I(x, y, t) = I_0(x, y) + E_r(x, y, t)A_i(x, y, t)\sin[\omega t + \phi(x, y)] \quad (2-29)$$

เมื่อ $E_r(x, y, t)$ เป็นการเปลี่ยนแปลงขอบของสหสัมพันธ์ (Envelop of autocorrelation) ของแหล่งกำเนิด โดยการเปลี่ยนแปลงขอบดังกล่าวมีรูปแบบการกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ตามแนวแกน z แสดงดังรูปที่ 2.12 และเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความยาวอาพันธ์ และความละเอียดของแกนในระบบภาพตัดขวางอาพันธ์เชิงแสง ซึ่งภาพตัดขวางของชิ้นนั้นๆ เขียน $E_r(x, y, t)A_i(x, y, t)$ แทนด้วย $E_r(x, y)A_i(x, y)$ ได้ ถ้าเวลาที่เลื่อนเพียงโซอิลเลททริก แอคทูเอเตอร์ตามแนวแกน z ไปทุกๆ 4 ภาพมีระยะทางน้อยมาก จึงทำให้ค่าเวลาไม่มีผลกับการเปลี่ยนแปลงของ $E_r(x, y, t)A_i(x, y, t)$

จากสมการ (2-29) ถ้าหาค่าอนุพันธ์ลำดับที่ 1, 2 และ 3 ของ $I(x, y, t)$ ตามลำดับ จะได้ว่า

$$I'_t(x, y, t) = \omega E_r(x, y)A_i(x, y)\cos[\omega t + \phi(x, y)] \quad (2-30)$$

$$I''_t(x, y, t) = -\omega^2 E_r(x, y)A_i(x, y)\sin[\omega t + \phi(x, y)] \quad (2-31)$$

$$I_t'''(x, y, t) = -\omega^3 E_r(x, y) A_i(x, y) \cos[\omega t + \phi(x, y)] \quad (2-32)$$

เมื่อรวมสมการ (2-30), (2-31) และ (2-32) โดยใช้ความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} I_t''^2 - I_t''' x I_t' &= \omega^4 E_r^2(x, y) A_i^2(x, y) \sin^2[\omega t + \phi(x, y)] \\ &+ \omega^4 E_r^2(x, y) A_i^2(x, y) \cos^2[\omega t + \phi(x, y)] = \omega^4 E_r^2(x, y) A_i^2(x, y) \end{aligned} \quad (2-33)$$

พบว่า

$$E_r(x, y) A_i(x, y) = \left[(I_t''^2 - I_t''' x I_t') / \omega^4 \right]^{1/2} \quad (2-34)$$

ถ้าความเข้มแสงของภาพที่ (x, y) ใดๆ ตามลำดับของภาพที่ 1-4 มีค่าเป็น $I_1(x, y) - I_4(x, y)$ ซึ่งการถ่ายภาพที่ 1-4 นั้นมีการเลื่อนเฟสออกทีละ ϕ พบว่า $I_1(x, y) - I_4(x, y)$ มีความสัมพันธ์กับอนุพันธ์ลำดับที่ 1,2,3 ของ $I(x, y)$ เป็น

$$\begin{aligned} I_1' &= I_2(x, y) - I_1(x, y) \\ I_1'' &= I_3(x, y) - 2I_2(x, y) + I_1(x, y) \\ I_1''' &= I_4(x, y) - 3I_3(x, y) + 3I_2(x, y) - I_1(x, y) \end{aligned}$$

ดังนั้นสมการ (2-29) จะได้ว่า

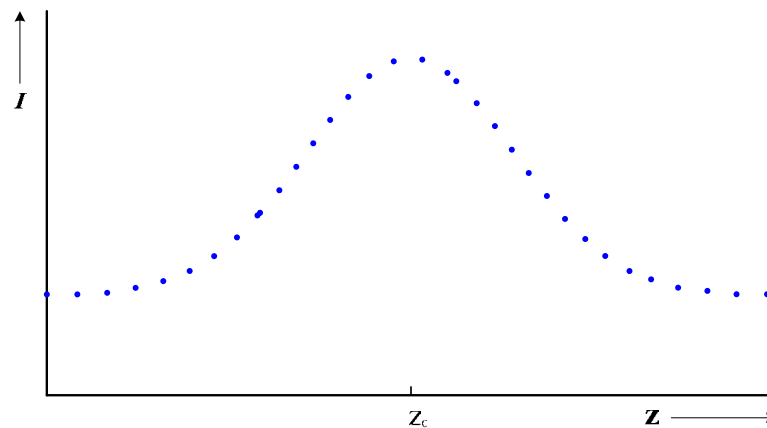
$$\begin{aligned} E_r(x, y) A_i(x, y) &= C \{ [I_3(x, y) - 2I_2(x, y) + I_1(x, y)]^2 - [I_4(x, y) - 3I_3(x, y) + 3I_2(x, y) - \\ &I_1(x, y)] [I_2(x, y) - I_1(x, y)] \}^{1/2} \end{aligned} \quad (2-35)$$

เมื่อ $C = 1/\omega^4$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} E_r(x, y) A_i(x, y) &= \left| [I_3(x, y) - 2I_2(x, y) + I_1(x, y)]^2 - [I_4(x, y) - 3I_3(x, y) - 3I_2(x, y) - \right. \\ &\left. I_1(x, y)] [I_2(x, y) - I_1(x, y)] \right|^{1/2} \end{aligned} \quad (2-36)$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะช่วยลบรื้อรอยการแทรกสอดในภาพลงได้ และค่า $E_r(x, y) A_i(x, y)$ จะแสดงค่าที่เป็นตัวแทนค่าความเข้มแสงของชุดความเข้ม $I_1 - I_4$ นั้นๆ และถ้า

ความเข้มแสงของภาพที่ได้ทำการลบรีวรอยแล้ว ณ ตำแหน่ง (x,y) เดียวกันไปเขียนกราฟกับ ระยะทาง z ก็น่าจะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และค่าสูงสุดของกราฟดังกล่าวก็คือ ตำแหน่ง z_0 ซึ่งน่าจะคำนวณหาค่าความลึกของชิ้นงานได้



รูปที่ 2.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของขอบของสัทสัมพันธ์

2.6 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty) [18]

ในกระบวนการวัดทุกประเภท องค์ประกอบความถูกต้องของการวัดประกอบด้วย ปริมาณที่วัดได้ และค่าความไม่แน่นอนในการวัด โดยค่าความไม่แน่นอนในการวัด คือ ปริมาณที่ บ่งบอกถึงความถูกต้องและแม่นยำของผลการวัด และบอกลักษณะการกระจายของผลที่วัดได้ รวมถึงระดับความเชื่อมั่นในผลการวัด ระดับความเชื่อมั่นสากลของผลการวัดโดยปกติคือ 95% และ ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor; k) = 2 ซึ่งค่าความไม่แน่นอนจากการวัดมีแหล่งที่มา ได้หลายแหล่ง อาทิ การวัดทวนซ้ำ (Repeatability), ใบรับรองผลการสอบเทียบ (Certificate) และ ผลกระทบเนื่องจากสภาวะแวดล้อม (Effects of environment) เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 1990 องค์การชั่ง ตวง วัด ระหว่างประเทศ (Bureau International des Poids et Mesures; BIPM) ร่วมกับองค์การระบบคุณภาพ (International Organization for Standardization; ISO) ได้แนะนำให้ใช้ความไม่แน่นอนของการวัดเป็นมาตรการในการบอกความน่าเชื่อถือของผลการวัด โดยใช้หลักการพื้นฐานของ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) และ European Cooperation for Accreditation of Laboratories (EAL) ซึ่งมีแนวคิดดังนี้

ปริมาณ “Y” ที่เป็นผลจากการวัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณอินพุต (Input; x_i) ที่เกี่ยวข้องใน กระบวนการวัดหรือ

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงของปริมาณอินพุทเหล่านี้ได้ ปริมาณอินพุทที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการวัดจะมีค่าความไม่แน่นอนติดมาด้วยเสมอ ดังนั้นผลการวัด “Y” จึงเป็นเพียงค่าประมาณ “y” พร้อมกับความไม่แน่นอนของการวัด “U” ที่เกิดจากปริมาณอินพุทเหล่านั้นด้วย ในการรายงานผล ปริมาณที่ถูกวัดจะอยู่ในรูป

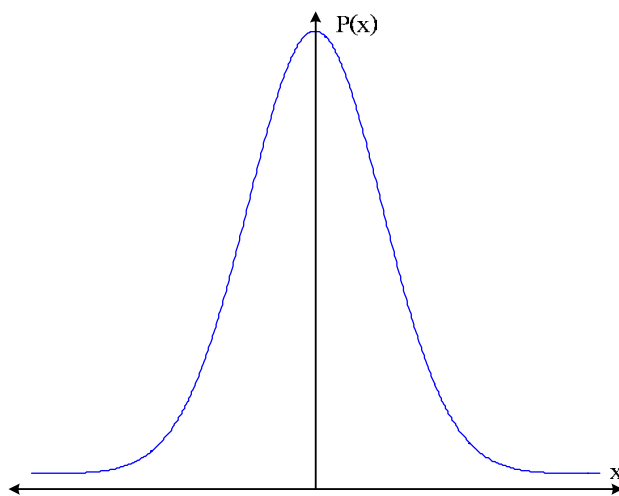
$$Y = y \pm U$$

โดยค่าความไม่แน่นอนได้มาจากการประเมินองค์ประกอบรวมทั้งหมดของความไม่แน่นอน การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบนั้นประกอบด้วยความไม่แน่นอน 2 ส่วน คือ ความไม่แน่นอนประเภท (Type) A และ ประเภท (Type) B การประเมินความไม่แน่นอนประเภท A (Type A evaluation of uncertainty) นั้น ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจากการวัดหลายๆ ครั้งหรือการทวนซ้ำที่อยู่ในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขณะที่ประเภท B (Type B evaluation of uncertainty) คือ ความไม่แน่นอนในการวัดที่เป็นผลมาจากองค์ประกอบอื่น ๆ ในการสอบเทียบที่ไม่ใช่การประเมินทางสถิติ โดยจะอยู่ในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มาจากใบรับรองผลการสอบเทียบ หรือ ข้อกำหนดจำเพาะของเครื่องมือ เป็นต้น

ในการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด จำเป็นต้องมีการวินิจฉัยว่ามีสาเหตุใดบ้างที่จะทำให้ผลการวัดนั้นๆ มีความไม่แน่นอน แต่ละสาเหตุมีผลให้เกิดความไม่แน่นอนขนาดเท่าใด และมีโอกาสมากน้อยเพียงไรที่จะก่อให้เกิดความไม่แน่นอนขนาดที่ระบุนั้น ในการวินิจฉัยดังกล่าว จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลหรือสมมติฐานที่บ่งบอกถึงลักษณะการกระจายของค่าความไม่แน่นอนของแต่ละสาเหตุ ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงลักษณะการกระจาย 2 แบบ คือ การกระจายแบบโค้งปกติ (Normal distribution) และ การกระจายแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular distribution)

- การกระจายแบบ โค้งปกติ

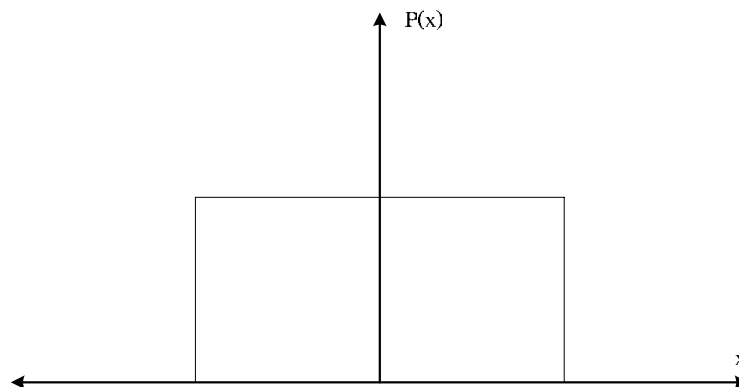
การกระจายแบบนี้มีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำที่สมมาตร ซึ่งผลการวัดส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ย ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะการกระจายค่าความไม่แน่นอนแบบโค้งปกติ

- การกระจายแบบสี่เหลี่ยม

การกระจายแบบนี้มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งผลการวัดมีโอกาสเท่าๆกันที่จะคลาดเคลื่อนมากหรือคลาดเคลื่อนน้อยในขอบเขตหนึ่ง ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการกระจายค่าความไม่แน่นอนแบบสี่เหลี่ยม

จากค่าความไม่แน่นอนย่อยแต่ละสาเหตุนั้น เมื่อนำมาคำนวณค่าความไม่แน่นอนรวม (Combined standard uncertainty; $u_c(y)$) โดยมีหลักเกณฑ์ว่า ค่าความไม่แน่นอนแต่ละสาเหตุนั้น จะต้องมีหน่วยเดียวกัน และมีระดับความเชื่อมั่นเท่ากัน โดยรวมแบบรากที่สองของผลรวมของค่าที่ยกกำลังสอง (Root sum of the square) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)} \quad (2-37)$$

เมื่อ c_i คือ สัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity coefficient) เป็นตัวที่ทำให้หน่วยของปริมาณอินพุตแต่ละตัวสามารถนำมารวมกันได้ผลลัพธ์สุดท้ายคือหน่วยของปริมาณเอาต์พุต (Output)

$u(x_i)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของปริมาณอินพุตแต่ละตัว

ในการรายงานผลค่าความไม่แน่นอนของการวัดจำเป็นจะต้องรายงานค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น 95.5 % ถึง 99.7% ซึ่งก็คือรายงานค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty; U) ซึ่งเป็นปริมาณที่กำหนดช่วงที่ผลการวัดกระจายอยู่ภายใน ค่าเหล่านี้แสดงลักษณะของสิ่งที่วัดและคาดหวังว่าจะได้ค่าอยู่ในช่วงที่กำหนด ด้วยระดับความเชื่อมั่นสูง ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$U = k u_c(y) \quad (2-38)$$

เมื่อ k คือ ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor) ใช้เป็นตัวเลขสำหรับคูณกับค่าความไม่แน่นอนรวมเพื่อให้ได้ความไม่แน่นอนขยาย ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการโดยทั่วไป ค่า $k = 2$ ถึง 3 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95.5% ถึง 99.7%

ในการประเมินค่าความไม่แน่นอนขยายนี้ จะตั้งสมมติฐานว่า ค่า $u_c(y)$ มีการกระจายแบบโค้งปกติ และนิยมรายงานค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95.5 % หรือตัวประกอบครอบคลุมที่เหมาะสมมีค่า $k = 2$ ซึ่งหมายความว่า ค่าองศาแห่งความอิสระ (Degree of freedom; V_{eff}) มีค่าเท่ากับค่าอนันต์ (Infinity; ∞)

แต่ถ้าองศาแห่งความอิสระไม่เท่ากับค่าอนันต์เราจำเป็นต้องตรวจสอบค่าตัวประกอบครอบคลุมจากสมการ (Welch-Satterthwaite equation)

$$V_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{c_i^4 u_i^4(x_i)}{v_i}} \quad (2-39)$$

เมื่อ $u_i(y)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของปริมาณอินพุตแต่ละตัว ซึ่งรวมค่าสัมประสิทธิ์ความ
ไว

V_i คือ ค่าองศาแห่งความอิสระของอินพุตแต่ละตัว สำหรับประเภท A มีค่า
เท่ากับ

$$n-1$$

N คือ จำนวนอินพุต

จากนั้นนำค่าองศาแห่งความอิสระและระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการไปเทียบกับตารางการกระจาย
แบบที (t-distribution) ที่แสดงไว้ดังตารางที่ 2.3 เพื่อหาตัวประกอบครอบคลุมที่เหมาะสม (k) ต่อไป

ตารางที่ 2.3 แสดงตารางการกระจายแบบที [18]

ค่าองศาแห่ง ความอิสระ ν	$p = 68.27\%$	$p = 90\%$	$p = 95\%$	$p = 95.45\%$	$p = 99\%$	$p = 99.73\%$
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.80
2	1.32	2.92	4.30	4.53	9.92	19.21
3	1.20	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.60	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.90
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.50	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
11	1.05	1.80	2.20	2.25	3.11	3.85
12	1.04	1.78	2.18	2.23	3.05	3.76
13	1.04	1.77	2.16	2.21	3.01	3.69
14	1.04	1.76	2.14	2.20	2.98	3.64
15	1.03	1.75	2.13	2.18	2.95	3.59
16	1.03	1.75	2.12	2.17	2.92	3.54
17	1.03	1.74	2.11	2.16	2.90	3.51
18	1.03	1.73	2.10	2.15	2.88	3.48
19	1.03	1.73	2.09	2.14	2.86	3.45
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
25	1.02	1.71	2.06	2.11	2.79	3.33
30	1.01	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
35	1.01	1.70	2.03	2.07	2.72	3.23
40	1.01	1.68	2.02	2.06	2.70	3.20
45	1.01	1.68	2.01	2.06	2.69	3.18
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.005	1.660	1.984	2.025	2.626	3.077
∞	1.000	1.645	1.960	2.000	2.576	3.000

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การวัดความขรุขระของพื้นผิวสแตนเลส 316 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ผลิตคัม
น้ำหนักมาตรฐานตามมาตรฐาน OIML และการวัดความลึกของชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8
 μm โดยมีขั้นตอนการวิจัยมีดังต่อไปนี้

3.1.1 เตรียมชิ้นงานตัวอย่าง คือ สแตนเลส 316 และชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm
(Depth measurement standard) สำหรับวัดค่าความขรุขระและความลึกของพื้นผิว
ตามลำดับ

3.1.2 ออกแบบระบบการวัดความขรุขระด้วยเทคนิคอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคลสัน

3.1.3 วัดชิ้นงานตัวอย่างด้วยระบบที่ออกแบบ

3.1.4 เขียนโปรแกรมในการแปลงภาพที่ถ่ายได้และโปรแกรมในการประมวลผลสัญญาณที่ได้
จากกล้องซีซีดีแล้วนำสัญญาณที่ได้ไปวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการดังนี้

3.1.4.1 คำนวณหาจุดแต่ละจุดบนภาพของแต่ละภาพเพื่อหาตำแหน่งภาพที่มีความ
เข้มแสงสูงสุดจากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความขรุขระ

3.1.4.2 ลบรบกวนการแทรกสอดจากนั้นนำค่าความเข้มแสงในแต่ละภาพที่ได้มา
คำนวณหาความลึก

3.1.5 วัดค่าความขรุขระของพื้นผิวชิ้นงานสแตนเลส 316 ด้วยเครื่องมือมาตรฐานคือกล้อง
จุลทรรศน์ชนิดแทรกสอดแบบอินเตอร์เฟอริเตอร์ชนิดไมเคลสัน รุ่น SP-500 ของ
บริษัท TORAY โดยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณแบบเลื่อนเฟส

3.1.6 เปรียบเทียบผลการวัดที่ได้ระหว่างระบบการวัดที่ออกแบบขึ้นกับเครื่องมือมาตรฐาน
พร้อมทั้งคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัด

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

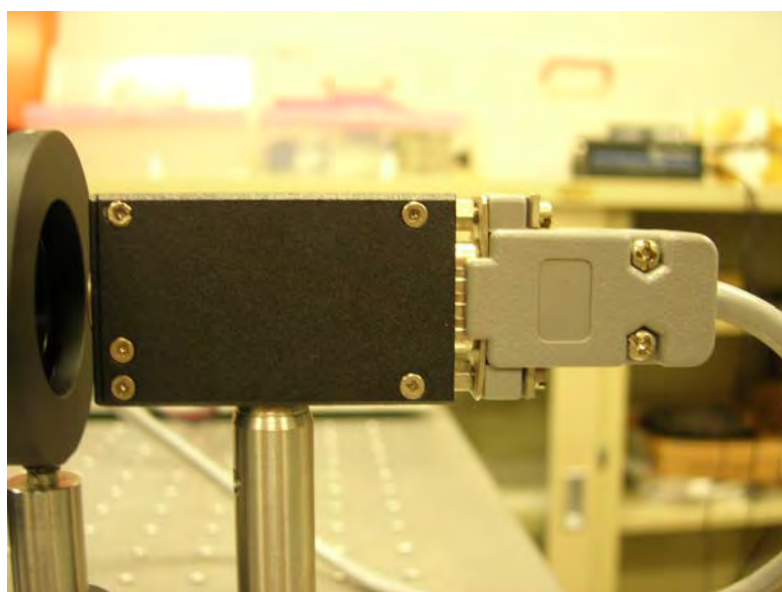
3.2.1 แหล่งกำเนิดแสงซูเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอด (Superluminescent diode; SLD)

แหล่งกำเนิดแสงเป็นซูเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอดมีความยาวคลื่น 830 nm ความกว้างของ
สเปกตรัมมีค่าเท่ากับ 15 nm ความยาวคลื่นอาพันธ์ (Coherence length) 20 μm และกำลัง (Power)

17.5 mW เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Superlum [19] รุ่น Pilot-2 ประกอบไปด้วย ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าและตัวแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งตัวแหล่งกำเนิดแสงติดตั้งอยู่บนอุปกรณ์จับยึดแสงแบบปรับระดับได้ ส่วนตัวควบคุมกระแสต่อเข้ากับตัวแปลงไฟ



รูปที่ 3.1 แสดงตัวควบคุมกระแสกับตัวแปลงไฟ



รูปที่ 3.2 แสดงตัวแหล่งกำเนิดแสงซูเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอด

3.2.2 ตัวแยกลำแสง (Beam splitter)

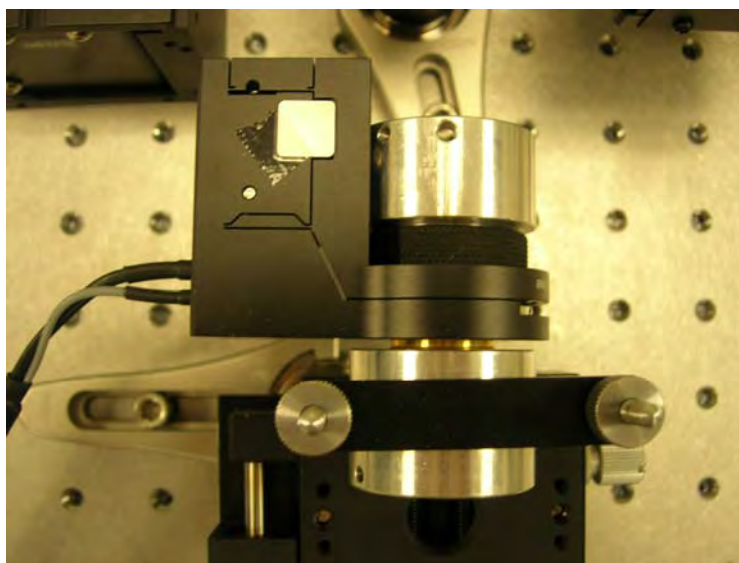
ตัวแยกลำแสงอยู่บริเวณกึ่งกลางและทำมุม 45 องศา กับแนวที่แสงตกกระทบของระบบการวัด ซึ่งทำหน้าที่แยกลำแสงที่ตกกระทบออกเป็น 2 ลำ ตัวแยกลำแสงที่ใช้เป็นแบบ 50:50 และไม่โพลาไรซ์มีขนาด 1x1x1 ลูกบาศก์นิ้ว ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Edmund

3.2.3 กระจก (Mirror)

กระจกเป็นแผ่นแก้วเชิงแสง ผิวด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านถูกขัดให้มีความเรียบมากระดับนาโนเมตร ทำหน้าที่เป็นผิวอ้างอิง กระจกที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Edmund และมีระดับความเรียบเท่ากับ $\lambda/4$ ซึ่งนิยามจากระยะจากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดของพื้นผิว

3.2.4 เพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ (Piezoelectric Actuator; PZT)

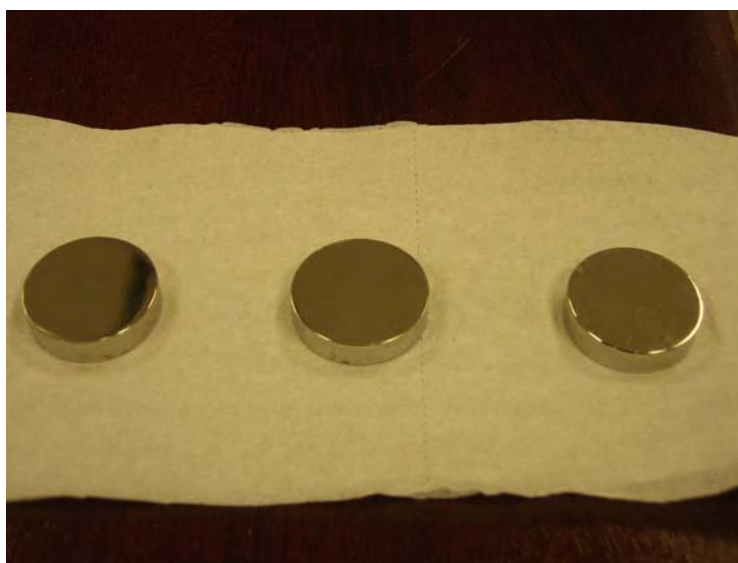
เพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับยึดกระจกหรือชิ้นงานที่ต้องการทดสอบเพื่อเลื่อนระยะหาความเข้มแสงในแต่ละพิกเซล ในงานวิจัยนี้ใช้เพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ของบริษัท Physik Instrumente ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์

3.2.5 ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับหาค่าความขรุขระและความลึกของพื้นผิว (Sample)

ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้หาค่าความขรุขระและความลึกของพื้นผิวในงานวิจัยนี้เป็นสแตนเลส 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm หนา 6.0 mm และชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ของบริษัท VLSI ทำจากซิลิกอนออกไซด์เคลือบผิวด้วยโครเมียมซึ่งชิ้นงานตัวอย่างทั้งสองมีลักษณะดังรูปที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 แสดงชิ้นงานตัวอย่างสแตนเลส 316



รูปที่ 3.5 แสดงชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm

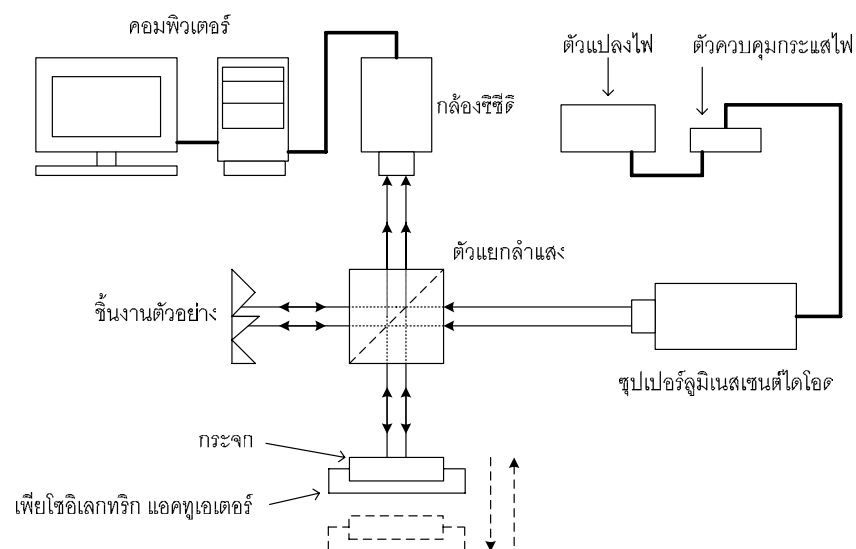
3.2.6 กล้องซีซีดี (CCD Camera)

กล้องซีซีดีที่ใช้รับภาพถ่ายเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Sony รุ่น XCD-50CR ที่มีความละเอียดในการเก็บภาพหนึ่งขนาด 640x480 พิกเซล ซึ่งภาพที่ถ่ายได้จากกล้องซีซีดีใช้วิเคราะห์เพื่อหาค่าความขรุขระและความลึกของพื้นผิว

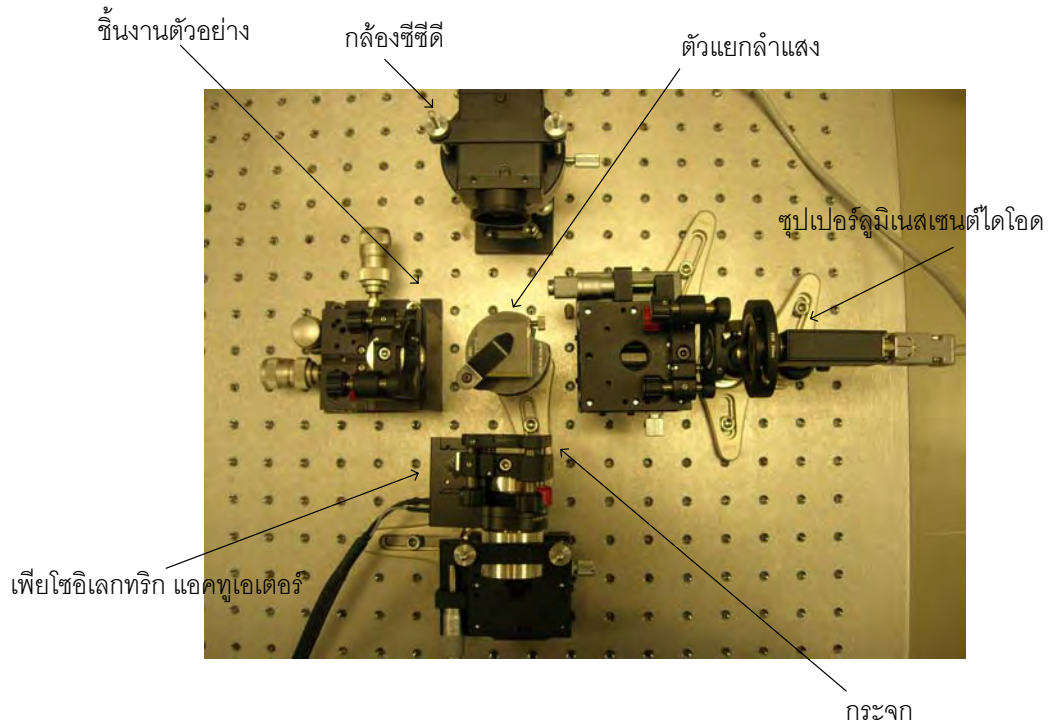
3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การติดตั้งระบบอินเทอร์ฟรอมิเตอร์แบบไมเคลสัน

ระบบอินเทอร์ฟรอมิเตอร์แบบไมเคลสันติดตั้งอยู่บนโต๊ะทดลองทางแสงในลักษณะดังแผนภาพที่ 3.6 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ได้แก่ ซุปเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอด จะติดตั้งบนอุปกรณ์จับยึดแบบปรับระดับได้ จากนั้นลำแสงจะเคลื่อนที่ผ่านรูเข็มเพื่อปรับระดับความเข้มแสง และผ่านต่อมายังเลนส์นูนเพื่อทำให้ลำแสงก่อนเข้าตัวแยกลำแสงเป็นแสงขนาน จากนั้นลำแสงจะผ่านไปในตัวแยกลำแสงและแยกออกเป็น 2 ลำ โดยลำแสงที่หนึ่งจะสะท้อนทำมุม 90 องศาเข้าสู่กระจกที่ติดตั้งอยู่บนเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ที่เลื่อนเข้าออกตามแนวแกน z เพื่อหาตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุดของในแต่ละพิกเซล ส่วนลำแสงที่สองจะส่งผ่านตัวแยกลำแสงออกมาแนวเดียวกับลำแสงที่ตกกระทบเข้าสู่ชิ้นงานตัวอย่าง จากนั้นลำแสงทั้งสองจะสะท้อนกลับเข้าสู่ตัวแยกลำแสงอีกครั้ง แล้วรีวรอยการแทรกสอดที่ได้จะบันทึกด้วยกล้องซีซีดี อุปกรณ์ที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้วแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการติดตั้งระบบการวัด



รูปที่ 3.7 แสดงภาพถ่ายของระบบการวัด

3.3.2 วิธีการวัด

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์แต่ละชิ้นเรียบร้อยแล้ว จึงเปิดสวิตช์อุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่างๆ เพื่อเตรียมพร้อม โดยปรับค่าของตัวแปลงไฟและตัวควบคุมกระแสที่ประมาณ 9 V และ 350 mA ตามลำดับ เมื่อปรับลำแสงจนได้ตำแหน่งที่ลำแสงทั้ง 2 ลำซ้อนทับกันพอดี แล้วก็จะจัดให้ลำแสงดังกล่าวเข้าสู่กล่องซีซีดี จากนั้นปรับระยะของกระจกที่ตั้งอยู่บนเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์จนลำแสงทั้งสองเกิดรีฟรอกชันแทรกสอดขึ้นแล้วจึงค่อยๆปรับระยะของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ทีละ 0.1 μm แล้วบันทึกภาพเก็บไว้ตั้งแต่เริ่มเกิดรีฟรอกชันแทรกสอดจนกระทั่งรีฟรอกชันดังกล่าวค่อยๆ จางลง ซึ่งฟิสิกส์ของภาพที่บันทึกโดยกล่องซีซีดี ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับแต่ละตัวของแหล่งกำเนิดแสงที่พื้นที่ต่างๆ กัน จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความขรุขระและค่าความลึกในภายหลังด้วยโปรแกรมวิเคราะห์รีฟรอกชันแทรกสอด จากนั้นเปลี่ยนชิ้นงานตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นสแตนเลส 3 ชั้น สำหรับการวัดด้วยระบบอินเทอร์ฟิโรเมตรีแบบปรับระยะที่ใช้วิธีการแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่องเราทดสอบโดยใช้โปรแกรม VSI และสำหรับระบบอินเทอร์ฟิโรเมตรีแบบเลื่อนเฟสที่ใช้วิธีการประมวลผลแบบเชิงอนุพันธ์เราใช้โปรแกรม PSI วิเคราะห์ ชิ้นงานตัวอย่างที่เราใช้ คือ ชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ในงานวิจัยนี้เรายังได้สร้าง (Simulate) รั้วรอยการแทรกสอดให้กับภาพ แล้วทดลองลบรั้วรอยการแทรกสอดก่อนที่จะนำมาใช้กับสัญญาณที่ได้จากการทดลองจริงด้วย

บทที่ 4

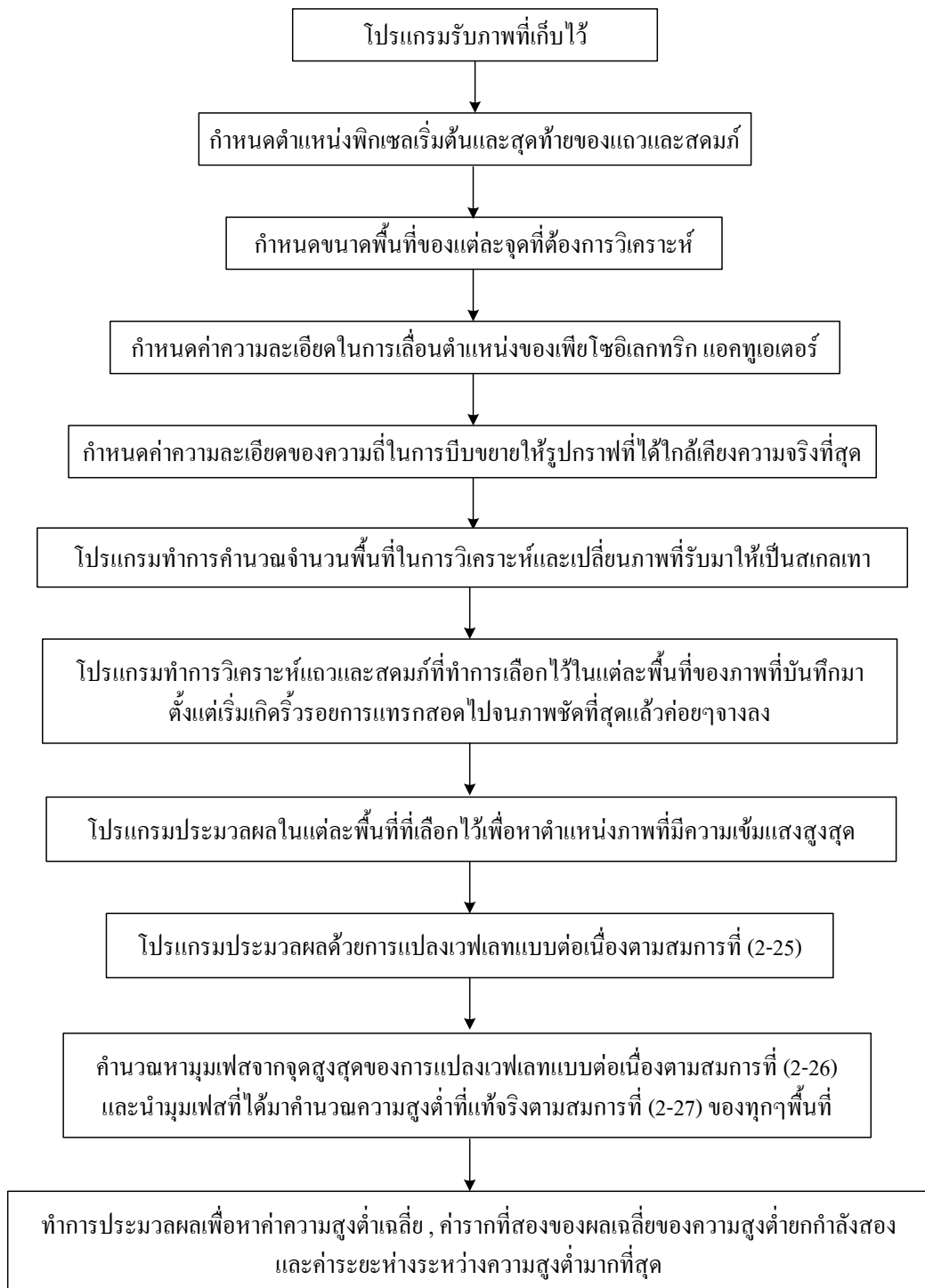
วิธีการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ ข้อมูลจากโปรแกรม VSI

4.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม VSI

หลังจากที่ได้ภาพจากอินเตอร์ฟรอมิเตอร์แบบไมเคลสันของผิวสแตนเลสทั้ง 3 ชั้นแล้ว เราจะนำภาพที่ได้ทั้งหมดมาประมวลผลด้วยโปรแกรมวิเคราะห์รีวรอยการแทรกสอดแบบ VSI : อินเตอร์ฟรอมิเตอร์แบบปรับระยะ โดยใช้การแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่อง

ในลำดับแรกเราจะต้องเลือกรูปภาพทั้งหมดที่จะนำมาประมวลผลก่อน จากนั้นจึงกำหนดตำแหน่งพิกเซลเริ่มต้นและสุดท้ายของแฉกและสคมภ์ที่ต้องการวิเคราะห์ แล้วกำหนดขนาดพื้นที่ของแต่ละจุดที่ต้องการวิเคราะห์พร้อมค่าความละเอียดในการเลื่อนตำแหน่งของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ออกมาได้ใกล้เคียงความจริงที่สุด

ต่อมาโปรแกรมจะคำนวณจำนวนพื้นที่ในการวิเคราะห์ โดยเปลี่ยนภาพที่ถ่ายได้ให้อยู่ในรูปของสเกลเทา (Grayscale) จากนั้นจึงวิเคราะห์แฉกและสคมภ์ที่เลือกไว้ในแต่ละพื้นที่ของภาพที่บันทึกมาตั้งแต่เริ่มเกิดรีวรอยการแทรกสอดไปจนภาพชัดที่สุดแล้วค่อยๆ จางลง โดยโปรแกรมจะประมวลผลหาตำแหน่งภาพที่มีความเข้มแสงสูงสุดของแต่ละพื้นที่ ซึ่งตำแหน่งภาพจะสัมพันธ์กับการเลื่อนเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ จากนั้นโปรแกรมจะประมวลผลด้วยการแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่องตามสมการที่ (2-25) และคำนวณหามุมเฟสจากจุดสูงสุดของการแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่องตามสมการที่ (2-26) และสุดท้ายเราจึงนำมุมเฟสที่ได้มาคำนวณความสูงค่าที่แท้จริงตามสมการที่ (2-27) ของทุกๆ พื้นที่ แล้วนำค่าความสูงค่าที่ได้จากการประมวลผลมาคำนวณหาค่าความสูงค่าเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยความสูงค่ายกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงค่ามากที่สุด การทำงานของโปรแกรม VSI เขียนสรุปเป็นแผนผังการทำงานได้แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรม VSI

4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม VSI

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม VSI : อินเทอร์เน็ตโรเมตรแบบปรับระยะ เริ่มจากการนำค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยความสูงต่ำยกกำลังสอง และ ค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดพร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของชิ้นงานตัวอย่างสแตนเลส 3 ชิ้น ที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดแทรกสอดแบบอินเทอร์เน็ตโรมิเตอร์ ชนิดไมเคลสัน (Interference microscope : 3D Non-contact surface profiler) รุ่น SP-500 ของบริษัท TORAY มีความละเอียดในระดับนาโนเมตร ที่แสดงดังรูปที่ 4.2 เป็นเครื่องมือมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบ

การวัดชิ้นงานตัวอย่างสแตนเลสทั้ง 3 ชิ้น ด้วยเครื่องมือมาตรฐานที่ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการความเรียบผิว (Surface texture standard laboratory) สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (National Institute of Metrology (Thailand); NIMT) ในการวัดค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดและค่าความไม่แน่นอนขยายของชิ้นงานตัวอย่างสแตนเลสชิ้นที่ 1, 2 และ 3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแทรกสอดแบบอินเทอร์เน็ตโรมิเตอร์ชนิดไมเคลสัน ได้ผลดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 แสดงรูปถ่ายกล้องจุลทรรศน์ชนิดแทรกสอดแบบอินเทอร์เน็ตโรมิเตอร์ชนิดไมเคลสัน

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุด พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของชิ้นงานสแตนเลสชิ้นที่ 1 ที่วัดโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

ตำแหน่งที่	R_a (nm)	R_q (nm)	R_z (nm)
1	80.16	94.73	366.54
2	60.38	70.19	257.55
3	106.53	133.97	490.84
4	55.67	68.32	268.57
5	44.60	53.01	198.78
6	52.66	62.94	242.29
7	42.53	50.87	199.62
8	53.19	63.22	215.59
9	53.35	62.38	228.38
10	52.57	59.00	190.42
11	45.55	56.29	234.54
12	50.65	59.27	212.11
13	32.04	38.70	150.31
14	42.25	49.63	195.95
15	66.00	78.52	288.62
16	41.79	50.88	192.04
17	63.06	77.52	302.20
18	61.27	71.71	250.76
19	32.85	39.00	146.55
20	47.57	58.47	223.23
ค่าเฉลี่ย	54.234	64.931	242.745
ค่าความไม่แน่นอนขยาย ($k=2$)	12.697	14.567	69.290

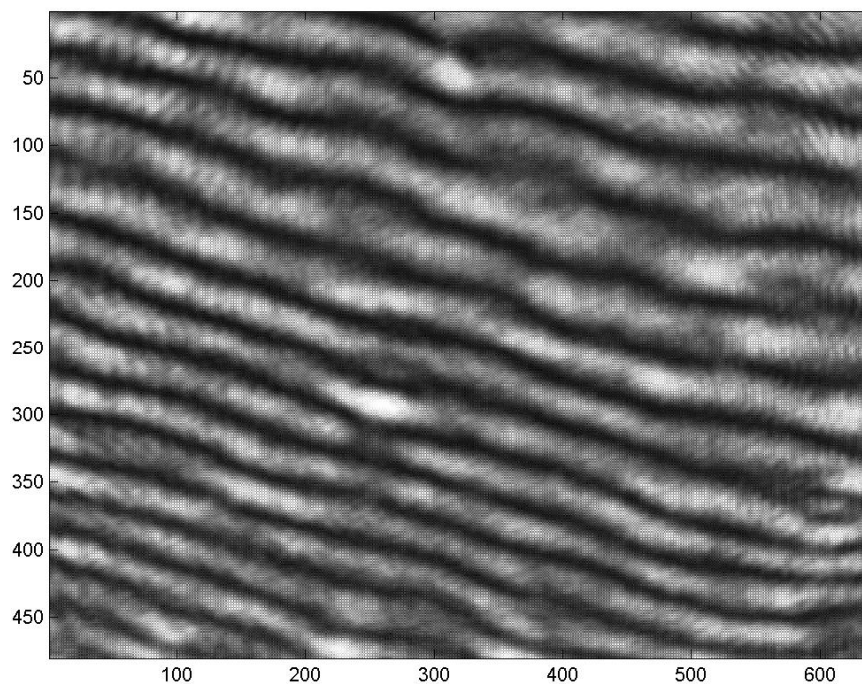
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุด พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของชิ้นงานสแตนเลสชนิดที่ 2 ที่วัดโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

ตำแหน่งที่	R_a (nm)	R_q (nm)	R_z (nm)
1	75.10	86.06	202.24
2	59.98	66.34	152.14
3	66.53	74.41	153.42
4	68.25	77.19	137.56
5	45.32	51.64	120.02
6	93.13	105.36	228.00
7	98.34	114.21	181.75
8	112.72	131.27	220.38
9	76.37	87.81	209.99
10	100.72	115.57	318.75
11	73.61	87.37	184.08
12	78.60	93.51	205.96
13	35.28	42.66	81.34
14	69.81	83.63	141.89
15	43.35	56.41	69.50
16	27.43	31.45	64.24
17	44.75	52.79	102.41
18	52.72	68.11	114.38
19	79.92	95.78	174.62
20	138.22	162.57	310.98
ค่าเฉลี่ย	72.008	84.207	168.683
ค่าความไม่แน่นอนขยาย ($k=2$)	15.842	18.088	48.615

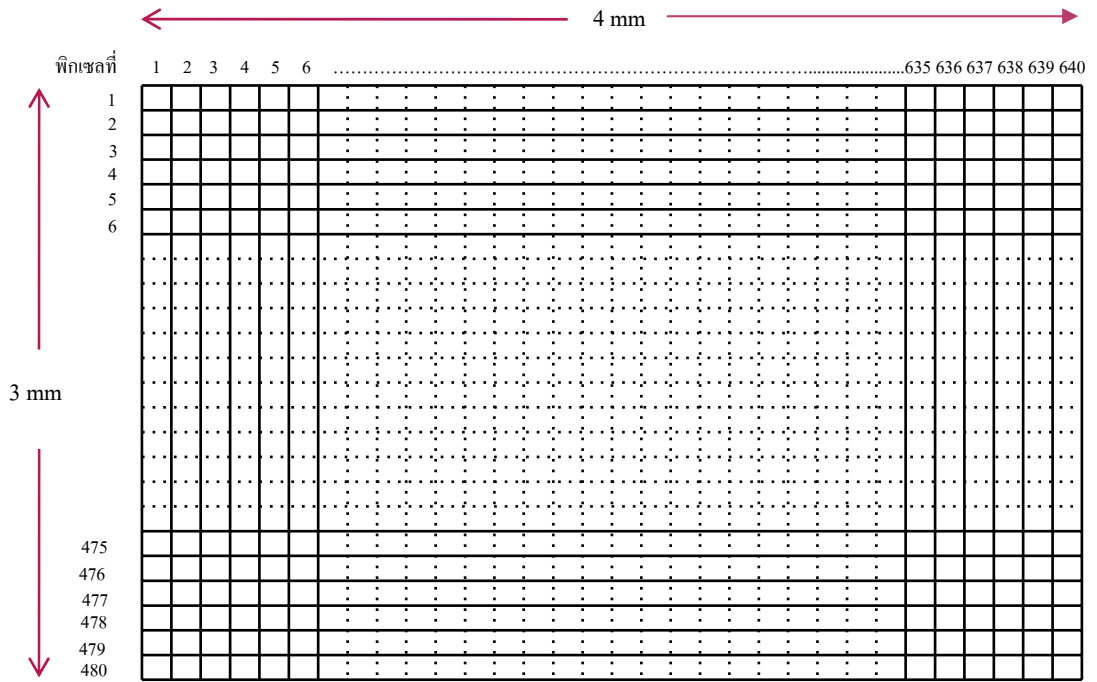
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุด พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของชิ้นงาน สเตนเลสซึ้นที่ 3 ที่วัด โดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

ตำแหน่งที่	R_a (nm)	R_q (nm)	R_z (nm)
1	91.78	114.76	221.42
2	122.68	147.57	312.66
3	135.26	164.84	330.96
4	151.41	176.53	636.28
5	121.26	147.64	512.74
6	108.52	131.16	454.48
7	137.91	163.06	603.57
8	105.77	128.77	477.81
9	109.61	132.90	526.52
10	74.69	84.15	302.96
11	77.02	98.43	390.30
12	74.34	92.15	425.28
13	70.42	83.57	293.19
14	63.11	71.82	247.21
15	53.88	65.89	261.84
16	48.87	60.88	244.36
17	162.66	187.09	609.84
18	118.81	143.23	524.54
19	74.51	89.29	354.76
20	120.19	142.80	484.46
ค่าเฉลี่ย	101.135	121.327	410.759
ค่าความไม่แน่นอนขยาย ($k=2$)	21.277	25.147	116.555

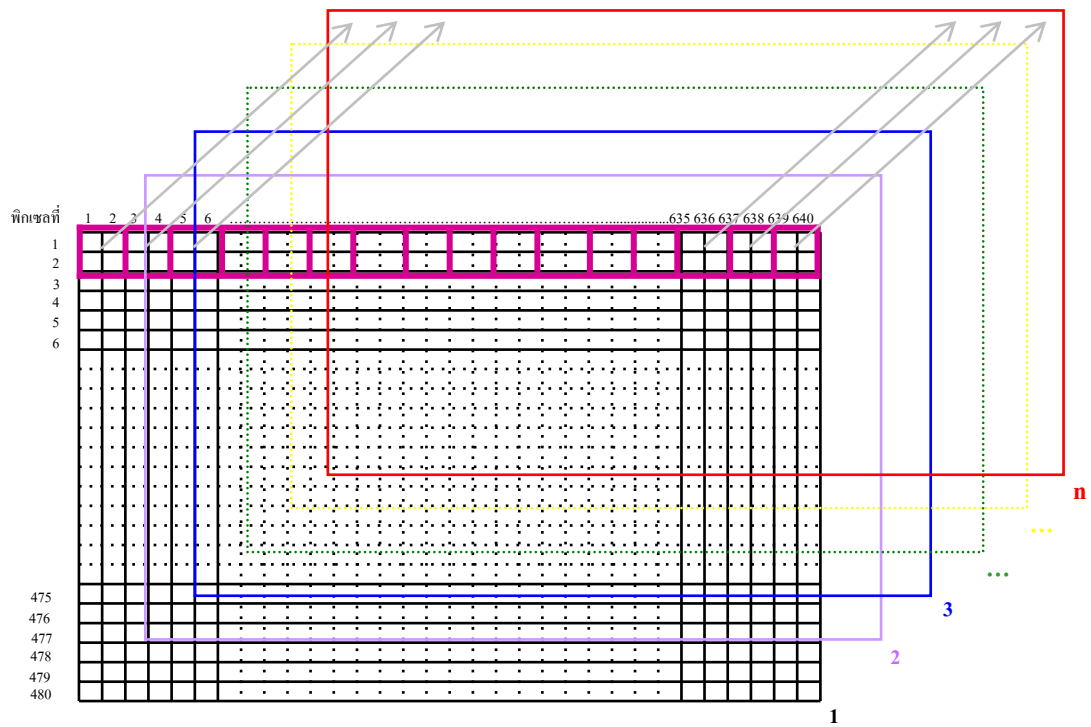
ในส่วนการประมวลผลของโปรแกรม VSI ของทั้ง 3 ชั้นงานนั้นคำนวณมาจากภาพที่ถ่าย โดยกล้องซีซีดีมีลักษณะดังรูปที่ 4.3 โดยภาพจะครอบคลุมพื้นที่ของพื้นผิวตัวอย่างขนาดกว้าง 3 mm ยาว 4 mm เมื่อเทียบกับความละเอียดของภาพแล้วจะมีค่าเท่ากับ 480x640 พิกเซล แสดงดังรูปที่ 4.4 จากนั้นโปรแกรมจะประมวลผลของสัญญาณในแต่ละพื้นที่ที่เลือกไว้ของทุกๆ ภาพดังแสดงในรูปที่ 4.5 เพื่อที่จะหาดำแหน่งภาพที่มีความเข้มแสงสูงสุดในแต่ละพื้นที่ ซึ่งตำแหน่งภาพจะสัมพันธ์กับการเลื่อนเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ ในที่นี้ยกตัวอย่างการประมวลผลชั้นงานตัวอย่างสแตนเลสชั้นที่ 1 ที่ตำแหน่งแถวของพิกเซลที่ 1-2 และสดมภ์ของพิกเซลที่ 1-640 โดยกำหนดขนาดของจุดซึ่งมีพื้นที่ในการประมวลผลมีขนาดเป็น 2x2 พิกเซล ฉะนั้นในแถวของพิกเซลที่ 1-2 นี้ จะมีข้อมูลพื้นที่ที่ประมวลผลได้เท่ากับ 320 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 4.6



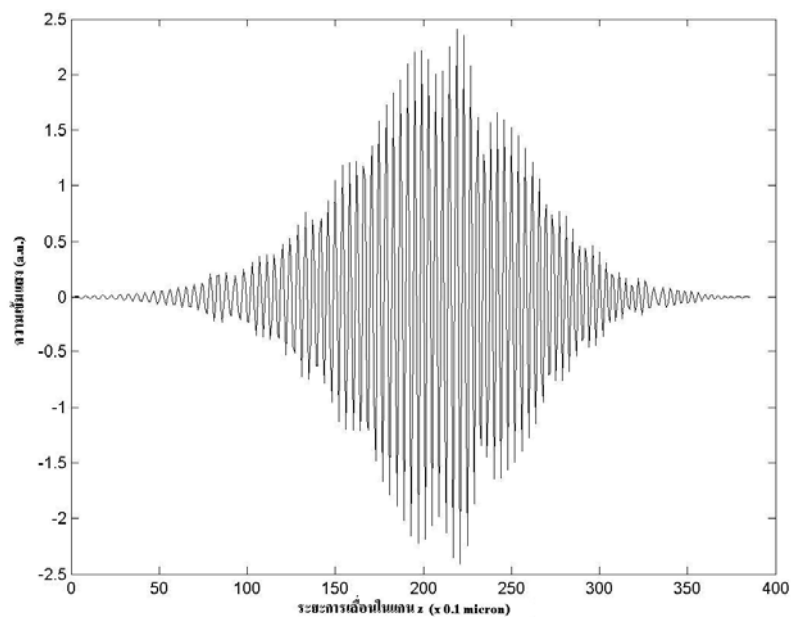
รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายชั้นงานสแตนเลสชั้นที่ 1 ขณะที่เกิดรบกวนการแทรกสอด



รูปที่ 4.4 แสดงขนาดภาพถ่ายเทียบกับขนาดพิกเซลของกล้องซีซีดี

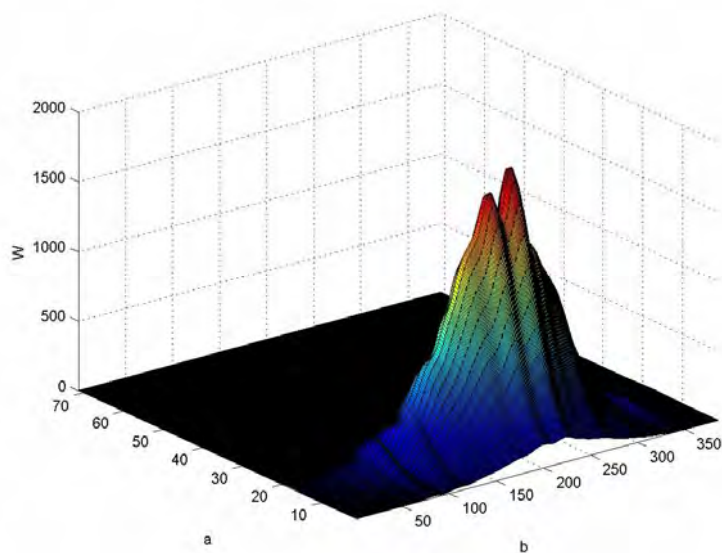


รูปที่ 4.5 แสดงการประมวลผลสัญญาณในแต่ละพื้นที่ที่เลือก



รูปที่ 4.6 แสดงความเข้มของแสงในแต่ละตำแหน่งที่เลื่อนเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์
ของแถวที่ 1 พื้นที่ที่ 1 จากพื้นที่ทั้งหมด 320 ตำแหน่ง

จากนั้น โปรแกรมประมวลผลด้วยการแปลงเวฟเลขแบบต่อเนื่องตามสมการที่ (2-25) แสดงดังรูปที่
4.7



รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมการแปลงเวฟเลขของความเข้มแสง
ของแถวที่ 1 พื้นที่ที่ 1 จากพื้นที่ทั้งหมด 320 ตำแหน่ง

ถัดมาโปรแกรมจะคำนวณหามุมเฟสที่ได้จากการแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่องที่มีค่าสูงสุดจากสมการที่ (2-26) และสุดท้ายจะให้ความสูงต่ำที่แท้จริงของบริเวณพื้นที่ที่ 1 จาก 320 ตำแหน่งตามสมการที่ (2-27) ซึ่งโปรแกรมจะคำนวณผลจนครบพื้นที่ 320 ตำแหน่ง แล้วจะนำค่าที่ได้หาค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดในแต่ละตำแหน่งแถวของพิกเซลที่ 1-2 โดยจะแบ่งเป็นช่วงๆ ในการคำนวณค่าตามมาตรฐาน ISO 4287:1997 [20] และ ISO 4288:1996(E) [21] ดังแสดงตามตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 แสดงช่วงในการประมวลผลของค่าความสูงต่ำเฉลี่ยและค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง

R_a, R_q (μm)	ช่วงย่อยของการวัด (mm)	ช่วงใหญ่ของการวัด (mm)
$0.006 < R_a, R_q \leq 0.02$	0.08	0.4
$0.02 < R_a, R_q \leq 0.1$	0.25	1.25
$0.1 < R_a, R_q \leq 2$	0.8	4
$2 < R_a, R_q \leq 10$	2.5	12.5
$10 < R_a, R_q \leq 80$	8	40

ตารางที่ 4.5 แสดงช่วงในการประมวลผลของค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุด

R_z (μm)	ช่วงย่อยของการวัด (mm)	ช่วงใหญ่ของการวัด (mm)
$0.025 < R_z \leq 0.1$	0.08	0.4
$0.1 < R_z \leq 0.5$	0.25	1.25
$0.5 < R_z \leq 10$	0.8	4
$10 < R_z \leq 50$	2.5	12.5
$50 < R_z \leq 200$	8	40

จากผลการวัดโดยห้องปฏิบัติการความเรียบผิว สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

ชิ้นงานสแตนเลสชิ้นที่ 1

- ค่าความสูงต่ำเฉลี่ย $0.054 \mu\text{m}$ อยู่ในช่วง $(0.02 < R_a \leq 0.1) \mu\text{m}$
- ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง $0.065 \mu\text{m}$ อยู่ในช่วง $(0.02 < R_q \leq 0.1) \mu\text{m}$

- ค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุด $0.243 \mu\text{m}$ อยู่ในช่วง $(0.1 < R_z \leq 0.5) \mu\text{m}$
 ชิ้นงานสเตนเลสซันที่ 2

- ค่าความสูงต่ำเฉลี่ย $0.072 \mu\text{m}$ อยู่ในช่วง $(0.02 < R_a \leq 0.1) \mu\text{m}$

- ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง $0.084 \mu\text{m}$ อยู่ในช่วง
 $(0.02 < R_q \leq 0.1) \mu\text{m}$

- ค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุด $0.169 \mu\text{m}$ อยู่ในช่วง $(0.1 < R_z \leq 0.5) \mu\text{m}$

ชิ้นงานสเตนเลสซันที่ 3

- ค่าความสูงต่ำเฉลี่ย $0.101 \mu\text{m}$ อยู่ในช่วง $(0.1 < R_a \leq 2) \mu\text{m}$

- ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง $0.121 \mu\text{m}$ อยู่ในช่วง
 $(0.1 < R_q \leq 2) \mu\text{m}$

- ค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุด $0.411 \mu\text{m}$ อยู่ในช่วง $(0.1 < R_z \leq 0.5) \mu\text{m}$

จากภาพถ่ายที่บันทึกไว้มีขนาดกว้าง 3 mm มีค่าเท่ากับ 480 พิกเซล และยาว 4 mm มีค่าเท่ากับ 640 พิกเซล ซึ่งชิ้นงานสเตนเลสซันที่ 1 มีค่าความสูงต่ำเฉลี่ยอยู่ในช่วง $(0.02 < R_a \leq 0.1) \mu\text{m}$ ช่วงในการวัดและประมวลผลคือ 1.25 mm จึงประมวลผลได้ 3 ช่วงใหญ่จากความยาวของภาพถ่ายที่บันทึกได้ใน 1 แถว โดยในแต่ละช่วงใหญ่ 1.25 mm แบ่งเป็น 5 ช่วงย่อย ช่วงย่อยละ 0.25 mm เมื่อทำการเทียบกับจำนวนพิกเซลตามยาว 640 พิกเซลโดยตอนแรกได้กำหนดตำแหน่งพื้นที่ที่จะประมวลผลเป็น 320 ตำแหน่งต่อ 1 แถว เพราะฉะนั้นช่วงใหญ่ระยะ 1.25 mm ต้องทำการประมวลผล 100 ตำแหน่ง โดยแบ่งเป็นช่วงย่อยช่วงละ 20 ตำแหน่ง ทำจนครบแถวจะได้ทั้งหมด 300 ตำแหน่ง จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความสูงต่ำเฉลี่ยที่ละช่วงย่อยและนำมาเฉลี่ยเป็นช่วงใหญ่ แล้วนำค่าจากช่วงใหญ่มาเฉลี่ยอีกครั้งจะได้ค่าความสูงต่ำเฉลี่ยในแถวของพิกเซลที่ 1-2 จากนั้นทำอีก 4 แถวให้ครอบคลุมภาพถ่ายแล้วนำค่าทั้ง 5 แถวมาเฉลี่ยอีกครั้ง

ในการแบ่งช่วงคำนวณ ค่าความสูงต่ำเฉลี่ยของสเตนเลสซันที่ 2 ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองของสเตนเลสซันที่ 1 และ 2 ค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสเตนเลสซันที่ 1, 2 และ 3 ทำการแบ่งช่วงเหมือนการคำนวณค่าความสูงต่ำเฉลี่ยของสเตนเลสซันที่ 1 ทำทั้งหมด 5 แถว ยกเว้นซันที่ 3 ทำการวัด 6 แถว

ส่วนชิ้นงานสเตนเลสซันที่ 3 มีค่าความสูงต่ำเฉลี่ยและค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองอยู่ในช่วง $(0.1 < R_a \leq 2) \mu\text{m}$ ช่วงในการวัดและประมวลผลคือ 4 mm จึงประมวลผลได้ 1 ช่วงจากความยาวของภาพถ่ายที่บันทึกได้ใน 1 แถว โดยในช่วง 4 mm แบ่งเป็น 5

ช่วงย่อย ช่วงย่อยละ 0.8 mm เมื่อทำการเทียบกับจำนวนพิกเซลตามยาว 640 พิกเซล โดยตอนแรกได้กำหนดตำแหน่งพื้นที่ที่จะประมวลผลเป็น 320 ตำแหน่งต่อ 1 แถว เพราะฉะนั้นช่วงระยะ 4 mm ต้องทำการประมวลผล 320 ตำแหน่ง โดยแบ่งเป็นช่วงย่อยช่วงละ 64 ตำแหน่ง ทำจนครบแถวจะได้พื้นที่ทั้งหมด 320 ตำแหน่ง จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความสูงต่ำเฉลี่ยที่ละช่วงย่อยและนำค่าจากช่วงย่อยมาเฉลี่ยอีกครั้ง จะได้ค่าความสูงต่ำเฉลี่ยและค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองในแถวของพิกเซลที่พิจารณาจากนั้นทำอีก 5 แถวให้ครอบคลุมภาพถ่ายแล้วนำค่าทั้ง 6 แถวมาเฉลี่ยอีกครั้ง ซึ่งผลการทดลองชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น แสดงดังตารางที่ 4.6-4.21

ชิ้นงานสแตนเลสชิ้นที่ 1

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชิ้นที่ 1 ในแถวของพิกเซลที่ 1-2

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_a (μm)	0.064	0.072	0.042	0.059
R_q (μm)	0.083	0.084	0.048	0.072
R_z (μm)	0.285	0.241	0.136	0.221

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชิ้นที่ 1 ในแถวของพิกเซลที่ 101-102

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_a (μm)	0.060	0.077	0.058	0.065
R_q (μm)	0.085	0.091	0.082	0.086
R_z (μm)	0.285	0.279	0.283	0.282

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชนิดที่ 1 ในแถวของพิกเซลที่ 201-202

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_a (μm)	0.064	0.075	0.088	0.076
R_q (μm)	0.082	0.089	0.095	0.089
R_z (μm)	0.239	0.214	0.197	0.217

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชนิดที่ 1 ในแถวของพิกเซลที่ 301-302

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_a (μm)	0.047	0.059	0.064	0.057
R_q (μm)	0.065	0.074	0.074	0.071
R_z (μm)	0.252	0.268	0.245	0.255

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชนิดที่ 1 ในแถวของพิกเซลที่ 401-402

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_a (μm)	0.076	0.078	0.063	0.072
R_q (μm)	0.093	0.094	0.079	0.089
R_z (μm)	0.334	0.339	0.327	0.333

ชิ้นงานสแตนเลสชิ้นที่ 2

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความสูงค่าเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชิ้นที่ 2 ในแถวของพิกเซลที่ 1-2

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_a (μm)	0.076	0.072	0.063	0.070
R_q (μm)	0.095	0.093	0.078	0.089
R_z (μm)	0.352	0.369	0.238	0.320

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความสูงค่าเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชิ้นที่ 2 ในแถวของพิกเซลที่ 101-102

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_a (μm)	0.068	0.072	0.050	0.063
R_q (μm)	0.083	0.082	0.070	0.078
R_z (μm)	0.302	0.256	0.314	0.291

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความสูงค่าเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชิ้นที่ 2 ในแถวของพิกเซลที่ 201-202

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_a (μm)	0.076	0.056	0.070	0.067
R_q (μm)	0.088	0.064	0.091	0.081
R_z (μm)	0.261	0.185	0.349	0.265

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสเตนเลสชั้นที่ 2 ในแถวของพิกเซลที่ 301-302

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_a (μm)	0.037	0.079	0.077	0.064
R_q (μm)	0.052	0.093	0.092	0.079
R_z (μm)	0.203	0.300	0.280	0.261

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสเตนเลสชั้นที่ 2 ในแถวของพิกเซลที่ 401-402

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_a (μm)	0.094	0.061	0.049	0.068
R_q (μm)	0.102	0.082	0.063	0.082
R_z (μm)	0.255	0.291	0.221	0.256

ชิ้นงานสเตนเลสชั้นที่ 3

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสเตนเลสชั้นที่ 3 ในแถวของพิกเซลที่ 1-2

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1			
R_a (μm)	0.943			
R_q (μm)	1.260			
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_z (μm)	4.484	4.334	4.473	4.430

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชนิดที่ 3 ในแถวของพิกเซลที่ 101-102

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1			
R_a (μm)	0.668			
R_q (μm)	0.879			
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_z (μm)	2.960	4.357	2.982	3.433

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชนิดที่ 3 ในแถวของพิกเซลที่ 201-202

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1			
R_a (μm)	0.640			
R_q (μm)	0.944			
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_z (μm)	2.598	3.001	2.811	2.803

ตารางที่ 4.19 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชนิดที่ 3 ในแถวของพิกเซลที่ 301-302

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1			
R_a (μm)	0.451			
R_q (μm)	0.633			
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_z (μm)	2.224	2.048	2.386	2.219

ตารางที่ 4.20 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชั้นที่ 3 ในแถวของพิกเซลที่ 401-402

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1			
R_a (μm)	0.541			
R_q (μm)	0.701			
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_z (μm)	2.597	2.658	1.784	2.346

ตารางที่ 4.21 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชั้นที่ 3 ในแถวของพิกเซลที่ 479-480

ค่าความขรุขระ	ช่วงที่ 1			
R_a (μm)	0.605			
R_q (μm)	0.808			
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ค่าเฉลี่ยจาก 3 ช่วง
R_z (μm)	1.700	3.866	1.780	2.449

เมื่อนำค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น จากตารางที่ 4.6 – 4.21 มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย ได้ดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของชิ้นงานสแตนเลสทั้ง 3 ชิ้น โดยกำหนดพื้นที่ 2x2 พิกเซล

ค่าความขรุขระ	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
R_a (μm)	0.066	0.067	0.641
R_q (μm)	0.081	0.082	0.871
R_z (μm)	0.262	0.278	2.947

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยาย

ในส่วนของการคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยาย พบว่าในงานวิจัยนี้มีแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนจากสมการการคำนวณค่าความสูงต่ำที่แท้จริงดังสมการ (2-27)

$$h = h' - \frac{\lambda_0}{4\pi} \varphi$$

จากสมการ (2-27) จะเห็นว่าแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนมีด้วยกัน 2 แหล่ง คือ ค่าการคำนวณมุมเฟส (φ) และค่าความยาวคลื่น (λ_0) ซึ่งจากระบบการวัดในงานวิจัยนี้ยังมีแหล่งที่มาเพิ่มเติมอีก 3 แหล่ง คือ ค่าโฮโมเจเนอิตี (Homogeneity) ค่าความขรุขระของกระจก และค่าความไม่เป็นเส้นตรงของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ แหล่งที่มาค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัดในการวิจัยนี้สรุปได้ดังแสดงตามตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 แสดงแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน สัมประสิทธิ์ความไว และค่าความไม่แน่นอนของปริมาณอินพุต [22]

แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน	c_i	$u(x_i)$
ค่าการคำนวณมุมเฟส	$\frac{\lambda_0}{4\pi}$	$\frac{SD_{\Delta\varphi}}{\sqrt{3}}$
ค่าความยาวคลื่น	$\frac{\pi}{4\pi}$	$\frac{\Delta\lambda}{\sqrt{3}}$
ค่าโฮโมเจเนอิตี	1	$\frac{Max - Min}{\sqrt{3}}$
ค่าความขรุขระของกระจก	1	ค่าความขรุขระของกระจก / $\sqrt{3}$
ค่าความไม่เป็นเส้นตรงของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์	1	ค่าความคลาดเคลื่อนของ PZT / $\sqrt{3}$

จากตารางที่ 4.23

ค่า $SD_{\Delta\varphi}$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างระหว่างมุมเฟสจากทฤษฎีกับมุมเฟสจากการคำนวณ แสดงดังตารางที่ 4.24

ค่า $\Delta\lambda$ คือ ค่าความกว้างของสเปกตรัมมีค่าเท่ากับ 15 nm

ค่า $Max - Min$ คือ ผลต่างของค่าความขรุขระที่มีค่ามากที่สุดกับค่าน้อยที่สุดของชิ้นงานตัวอย่าง ค่าความขรุขระของกระจก คือ ค่าความสูงต่ำเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.453 nm ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองมีค่าเท่ากับ 0.579 nm และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.393 nm

ค่าความคลาดเคลื่อนของ PZT คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์มีค่าเท่ากับ 54 nm

ตารางที่ 4.24 แสดงค่ามุมเฟสจากทฤษฎีกับมุมเฟสจากการคำนวณ

มุมเฟสจากทฤษฎี (rad)	มุมเฟสจากการคำนวณ (rad)	ค่าความแตกต่าง (rad)
-0.0606	-0.0568	0.0038
-0.4693	-0.4668	0.0025
-0.7267	-0.7286	0.0019
-0.6207	-0.6283	0.0076
-0.5299	-0.5236	0.0063
-0.3936	-0.3927	0.0009
-0.3482	-0.3491	0.0008
-0.3179	-0.3142	0.0038
-0.2574	-0.2618	0.0044
0.0000	0.0000	0.0000
0.2574	0.2618	0.0044
0.3179	0.3142	0.0038
0.3482	0.3491	0.0008
0.3936	0.3927	0.0009
0.5299	0.5236	0.0063
0.6207	0.6283	0.0076
0.7267	0.7286	0.0019
0.4693	0.4668	0.0025
0.0606	0.0568	0.0038
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0023

จากแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนสามารถทำการคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยายของค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของชิ้นงานสแตนเลสทั้ง 3 ชิ้นได้แสดงดังตารางที่ 4.25-4.33 [18]

ตารางที่ 4.25 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความสูงต่ำเฉลี่ยของสแตนเลสชิ้นที่ 1

แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน ¹	ค่าจากแหล่งที่มา	ลักษณะการกระจายของข้อมูล ²	ตัวหาร ³	สัมประสิทธิ์ความไว ⁴	ค่าความไม่แน่นอนของแต่ละลักษณะพัว (µm)	ค่าองศาแห่งความอิสระ ⁶
ค่าการคำนวณมุมเฟส	0.0023	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.066	0.0001	18
ค่าความยาวคลื่น	0.015	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.25	0.0022	∞
ค่าโซโมเจนิตี้	0.019	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0110	∞
ค่าความขรุขระของกระจก	0.0005	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0003	∞
ค่าความไม่เป็นเส้นตรงของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์	0.054	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0312	∞
ค่าความไม่แน่นอนรวม ⁷		ปกติ			0.0331	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย ⁸		$k = 2$			0.066	>500

¹ Source of uncertainty

² Probability distribution

³ Divisor

⁴ Sensitivity coefficient

⁵ Standard uncertainty

⁶ Effective degree of freedom

⁷ Combined standard uncertainty

⁸ Expanded uncertainty

ตารางที่ 4.26 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองของสแตนเลสชนิดที่ 1

แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน	ค่าจากแหล่งที่มา	ลักษณะการกระจายของข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ความไว	ค่าความไม่แน่นอนของแต่ละค่าอินพุต (μm)	ค่าองค์แห่งความอิสระ
ค่าการคำนวณมุมเฟส	0.0023	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.066	0.0001	18
ค่าความยาวคลื่น	0.015	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.25	0.0022	∞
ค่าไฮโมเจนิตี	0.018	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0102	∞
ค่าความขรุขระของกระจก	0.0006	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0003	∞
ค่าความไม่เป็นเส้นตรงของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์	0.054	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0312	∞
ค่าความไม่แน่นอนรวม		ปกติ			0.0329	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย		$k = 2$			0.066	>500

ตารางที่ 4.27 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชนิดที่ 1

แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน	ค่าจากแหล่งที่มา	ลักษณะการกระจายของข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ความไว	ค่าความไม่แน่นอนของแต่ละค่าอินพุต (μm)	ค่าองค์แห่งความอิสระ
ค่าการคำนวณมุมเฟส	0.0023	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.066	0.0001	18
ค่าความยาวคลื่น	0.015	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.25	0.0022	∞
ค่าไฮโมเจนิตี	0.117	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0674	∞
ค่าความขรุขระของกระจก	0.0014	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0008	∞
ค่าความไม่เป็นเส้นตรงของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์	0.054	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0312	∞
ค่าความไม่แน่นอนรวม		ปกติ			0.1050	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย		$k = 2$			0.210	>500

ตารางที่ 4.28 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความสูงต่ำเฉลี่ยของสแตนเลสชั้นที่ 2

แหล่งที่มาของ ค่าความไม่แน่นอน ¹	ค่าจากแหล่งที่มา	ลักษณะการ กระจาย ของข้อมูล ²	ตัวหาร ³	สัมประสิทธิ์ความ ไว ⁴	ค่าความไม่ แน่นอนของแต่ละ อินพุต (μm)	ค่าองศาแห่ง ความอิสระ ⁶
ค่าการคำนวณมุมเฟส	0.0023	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.066	0.0001	18
ค่าความยาวคลื่น	0.015	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.25	0.0022	∞
ค่าไฮโมเจนิตี ⁵	0.007	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0040	∞
ค่าความขรุขระของ กระจก	0.0005	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0003	∞
ค่าความไม่เป็นเส้นตรงของ เพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์	0.054	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0312	∞
ค่าความไม่แน่นอนรวม ⁷		ปกติ			0.0315	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย ⁸		$k = 2$			0.063	>500

ตารางที่ 4.29 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองของสแตนเลสชั้นที่ 2

แหล่งที่มาของ ค่าความไม่แน่นอน	ค่าจากแหล่งที่มา	ลักษณะการ กระจายของ ข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ ความไว	ค่าความไม่ แน่นอนของแต่ละ อินพุต (μm)	ค่าองศาแห่ง ความอิสระ
ค่าการคำนวณมุมเฟส	0.0023	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.066	0.0001	18
ค่าความยาวคลื่น	0.015	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.25	0.0022	∞
ค่าไฮโมเจนิตี ⁵	0.010	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0060	∞
ค่าความขรุขระของ กระจก	0.0006	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0003	∞
ค่าความไม่เป็นเส้นตรงของ เพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์	0.054	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0312	∞
ค่าความไม่แน่นอนรวม		ปกติ			0.0318	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย		$k = 2$			0.064	>500

ตารางที่ 4.30 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของ
สแตนเลสชั้นที่ 2

แหล่งที่มาของ ค่าความไม่แน่นอน	ค่าจาก แหล่งที่มา	ลักษณะการ กระจายของ ข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ ความไว	ค่าความไม่ แน่นอนของแต่ละ ละอินพุท (μm)	ค่าองศาแห่ง ความอิสระ
ค่าการคำนวณมุมเฟส	0.0023	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.066	0.0001	18
ค่าความยาวคลื่น	0.015	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.25	0.0022	∞
ค่าไฮโมเจนเนอิตี	0.064	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0370	∞
ค่าความขรุขระของ กระจก	0.0014	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0008	∞
ค่าความไม่เป็นเส้นตรงของ เพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์	0.054	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0312	∞
ค่าความไม่แน่นอนรวม		ปกติ			0.0684	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย		$k = 2$			0.137	>500

ตารางที่ 4.31 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความสูงต่ำเฉลี่ยของสแตนเลสชั้นที่ 3

แหล่งที่มาของ ค่าความไม่แน่นอน ¹	ค่าจากแหล่งที่มา	ลักษณะการ กระจาย ของข้อมูล ²	ตัวหาร ³	สัมประสิทธิ์ความ ไว ⁴	ค่าความไม่ แน่นอนของแต่ละ อินพุท (μm)	ค่าองศาแห่ง ความอิสระ ⁶
ค่าการคำนวณมุมเฟส	0.0023	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.066	0.0001	18
ค่าความยาวคลื่น	0.015	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.25	0.0022	∞
ค่าไฮโมเจนเนอิตี	0.492	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.2841	∞
ค่าความขรุขระของ กระจก	0.0005	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0003	∞
ค่าความไม่เป็นเส้นตรงของ เพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์	0.054	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0312	∞
ค่าความไม่แน่นอนรวม ⁷		ปกติ			0.2858	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย ⁸		$k = 2$			0.572	>500

ตารางที่ 4.32 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสองของสแตนเลสชนิดที่ 3

แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน	ค่าจากแหล่งที่มา	ลักษณะการกระจายของข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ความไว	ค่าความไม่แน่นอนของแต่ละลักษณะอินพุต (μm)	ค่าองค์แห่งความอิสระ
ค่าการคำนวณมุมเฟส	0.0023	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.066	0.0001	18
ค่าความยาวคลื่น	0.015	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.25	0.0022	∞
ค่าไฮโมเจนเนิตี	0.627	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.3620	∞
ค่าความขรุขระของกระจก	0.0006	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0003	∞
ค่าความไม่เป็นเส้นตรงของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์	0.054	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0312	∞
ค่าความไม่แน่นอนรวม		ปกติ			0.3633	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย		$k=2$			0.727	>500

ตารางที่ 4.33 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของสแตนเลสชนิดที่ 3

แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน	ค่าจากแหล่งที่มา	ลักษณะการกระจายของข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ความไว	ค่าความไม่แน่นอนของแต่ละลักษณะอินพุต (μm)	ค่าองค์แห่งความอิสระ
ค่าการคำนวณมุมเฟส	0.0023	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.066	0.0001	18
ค่าความยาวคลื่น	0.015	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.25	0.0022	∞
ค่าไฮโมเจนเนิตี	2.211	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	1.2765	∞
ค่าความขรุขระของกระจก	0.0014	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0008	∞
ค่าความไม่เป็นเส้นตรงของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์	0.054	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.0312	∞
ค่าความไม่แน่นอนรวม		ปกติ			1.8058	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย		$k=2$			3.612	>500

4.3 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลจากโปรแกรม VSI

ผลการเปรียบเทียบข้อมูลจากโปรแกรม VSI : อินเตอร์ฟีรอมเมตรีแบบปรับระยะ จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม VSI นี้ได้ทำเปรียบเทียบผลการวัดกับทางห้องปฏิบัติการความเรียบผิว สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (มว.) ซึ่งในการเปรียบเทียบผลการวัดจะทำการคำนวณค่า E_n ตามมาตรฐาน ISO/IEC Guide 43-1 [23] ตามสมการ (4-1)

$$E_n = \frac{lab_{result} - ref_{value}}{\sqrt{(U_{95}lab)^2 + (U_{95}ref)^2}} \quad (4-1)$$

เมื่อ E_n คือ ค่าการเปรียบเทียบผล ซึ่งผลที่ได้จะยอมรับได้ก็ต่อเมื่อ $|E_n| \leq 1$

lab_{result} คือ ผลของการวัดของค่าที่ต้องการเปรียบเทียบ

ref_{value} คือ ผลของการวัดของค่าที่อ้างอิง

$U_{95}lab$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัดของค่าที่ต้องการเปรียบเทียบ

$U_{95}ref$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัดของค่าที่อ้างอิง

ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.34-4.36

ตารางที่ 4.34 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดสเตนเลสซันที่ 1 ระหว่าง มว. กับ โปรแกรม VSI

	มว.		โปรแกรม VSI		E_n
	ค่าที่วัด (μm)	ค่าความไม่แน่นอนขยาย, $k=2$ (μm)	ค่าที่วัด (μm)	ค่าความไม่แน่นอนขยาย, $k=2$ (μm)	
R_a	0.054	0.013	0.066	0.066	0.2
R_q	0.065	0.015	0.081	0.066	0.2
R_z	0.243	0.069	0.262	0.210	0.1

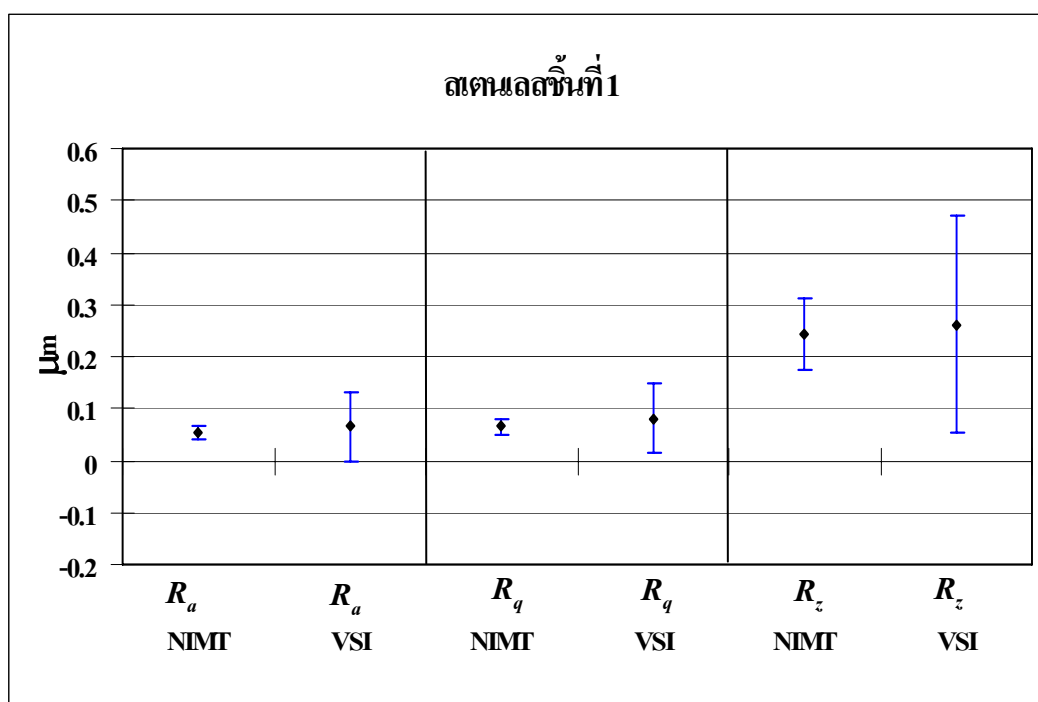
ตารางที่ 4.35 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดสเตนเลสซันที่ 2 ระหว่าง มว. กับ โปรแกรม VSI

	มว.		โปรแกรม VSI		E_n
	ค่าที่วัด (μm)	ค่าความไม่แน่นอนขยาย, $k=2$ (μm)	ค่าที่วัด (μm)	ค่าความไม่แน่นอนขยาย, $k=2$ (μm)	
R_a	0.072	0.016	0.067	0.063	0.1
R_q	0.084	0.018	0.082	0.064	0.0
R_z	0.169	0.049	0.278	0.137	0.7

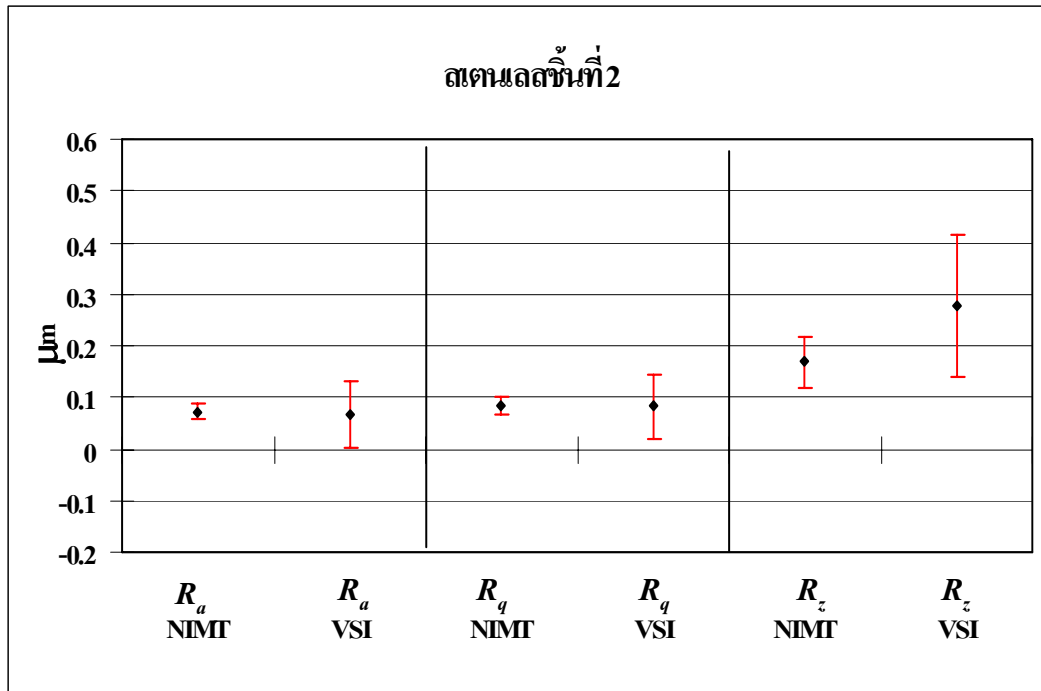
ตารางที่ 4.36 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดสเตนเลสชั้นที่ 3 ระหว่าง มว. กับ โปรแกรม VSI

	มว.		โปรแกรม VSI		E_n
	ค่าที่วัด (μm)	ค่าความไม่แน่นอนขยาย, $k=2$ (μm)	ค่าที่วัด (μm)	ค่าความไม่แน่นอนขยาย, $k=2$ (μm)	
R_a	0.101	0.021	0.641	0.572	0.9
R_q	0.121	0.025	0.871	0.727	1.0
R_z	0.411	0.117	2.947	3.612	0.7

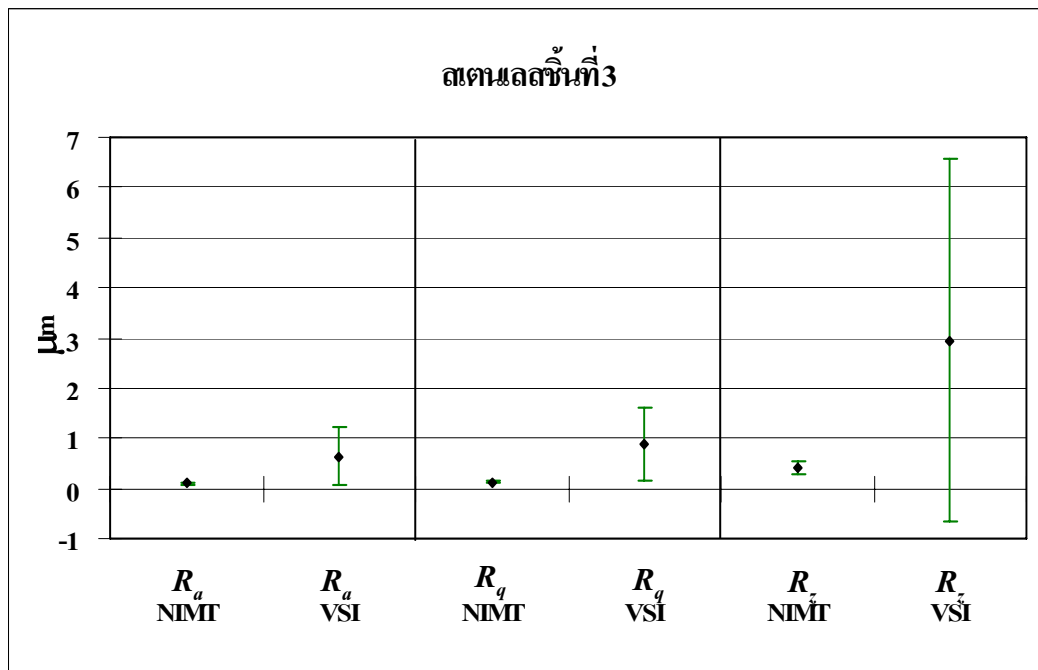
เมื่อนำค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดที่วัดได้จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติเทียบกับโปรแกรม VSI พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนขยายของชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น มาเขียนกราฟซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.8-4.10 ซึ่งค่าความไม่แน่นอนขยายที่ได้จะสัมพันธ์กับค่า E_n ที่คำนวณได้ โดยที่ค่า E_n ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าเท่ากับ 1 เพราะฉะนั้นกราฟที่เขียนได้จะมีความคาบเกี่ยวกันอยู่ในแต่ละคู่



รูปที่ 4.8 แสดงค่าที่วัดได้พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของสเตนเลสชั้นที่ 1



รูปที่ 4.9 แสดงค่าที่วัดได้พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของสทนแลสชั้นที่ 2



รูปที่ 4.10 แสดงค่าที่วัดได้พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของสทนแลสชั้นที่ 3

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดขนาดพื้นที่ในการประมวลผลขนาด 1x1 พิกเซล และ 3x3 พิกเซล เพื่อเปรียบเทียบกับผลการประมวลผลขนาด 2x2 พิกเซล แสดงดังตารางที่ 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ โดยวิธีการแบ่งช่วงความยาวในการวิเคราะห์เหมือนกับการประมวลผลขนาด 2x2 พิกเซล

ตารางที่ 4.37 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และ ค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของชิ้นงานสแตนเลสทั้ง 3 ชั้น โดยกำหนดพื้นที่ 1x1 พิกเซล

ค่าความขรุขระ	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
R_a (μm)	0.071	0.069	0.632
R_q (μm)	0.089	0.084	0.866
R_z (μm)	0.285	0.291	2.854

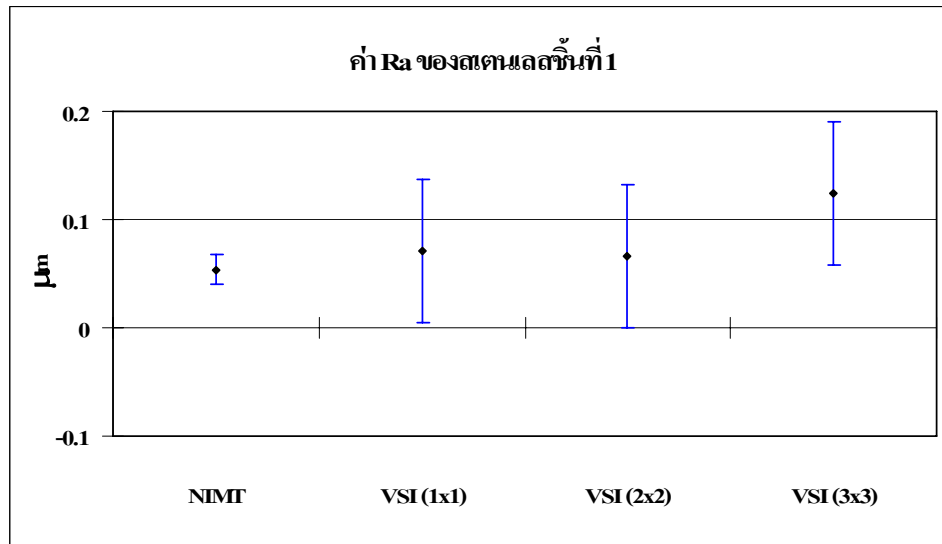
ตารางที่ 4.38 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และ ค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของชิ้นงานสแตนเลสทั้ง 3 ชั้น โดยกำหนดพื้นที่ 3x3 พิกเซล

ค่าความขรุขระ	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
R_a (μm)	0.124	0.146	0.927
R_q (μm)	0.145	0.162	1.168
R_z (μm)	0.512	0.528	3.973

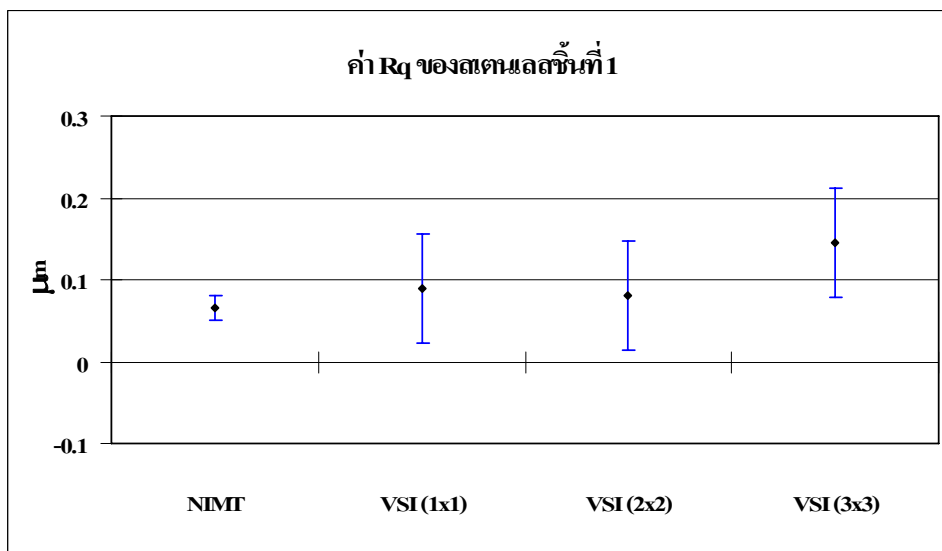
จากผลของตารางที่ 4.37 และ 4.38 เปรียบเทียบกับตารางที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าการประมวลผลพื้นที่ขนาด 1x1 พิกเซลนั้นให้ค่าต่างจากการประมวลผลกับการคำนวณด้วยพื้นที่ขนาด 2x2 พิกเซลไม่มากเท่าใดนัก แต่การคำนวณด้วยขนาดพื้นที่ 1x1 พิกเซลจะใช้เวลาค่อนข้างนานกว่า และถ้ากำหนดขนาดพื้นที่ขนาด 3x3 พิกเซลค่าจากการประมวลผลที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อน เพราะว่าพื้นที่ในการวิเคราะห์การเฉลี่ยความเข้มแสงมีพื้นที่ค่อนข้างใหญ่

นำค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของชิ้นงานสแตนเลสชั้นที่ 1 มาเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ระหว่างค่าที่วัดได้จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 1x1 พิกเซล

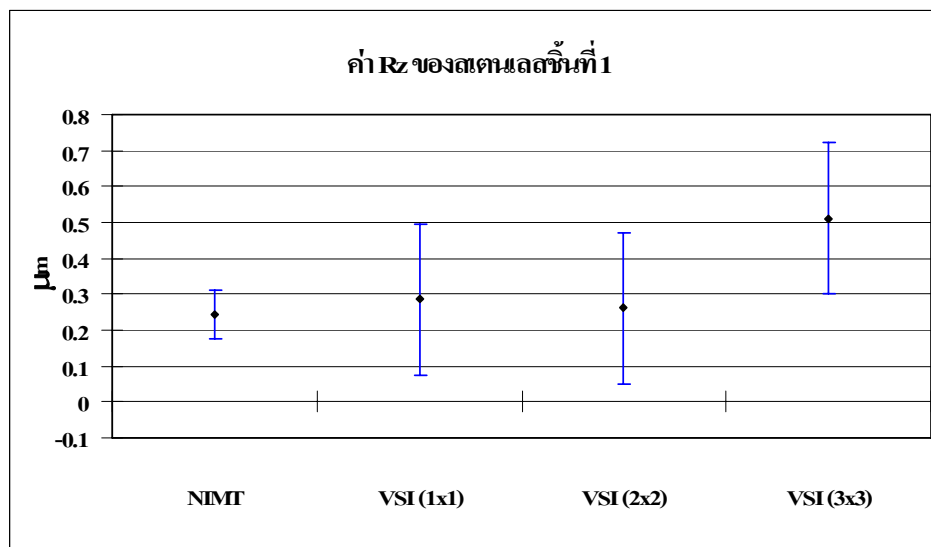
ค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 2x2 พิกเซล และ ค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 3x3 พิกเซล ดังแสดงในรูปที่ 4.11-4.13



รูปที่ 4.11 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ยที่วัดได้พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของสเตนเลสชั้นที่ 1 เทียบระหว่างค่าที่วัดได้จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 1x1 พิกเซล ค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 2x2 พิกเซล และค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 3x3 พิกเซล



รูปที่ 4.12 แสดงค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง ที่วัดได้พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของสเตนเลสชั้นที่ 1 เทียบระหว่างค่าที่วัดได้จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 1x1 พิกเซล ค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 2x2 พิกเซล และค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 3x3 พิกเซล



รูปที่ 4.13 แสดงค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดที่วัดได้พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของสแตนเลสชั้นที่ 1 เทียบระหว่างค่าที่วัดได้จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 1x1 พิกเซล ค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 2x2 พิกเซล และค่าที่วัดได้จากการกำหนดพื้นที่ 3x3 พิกเซล

บทที่ 5

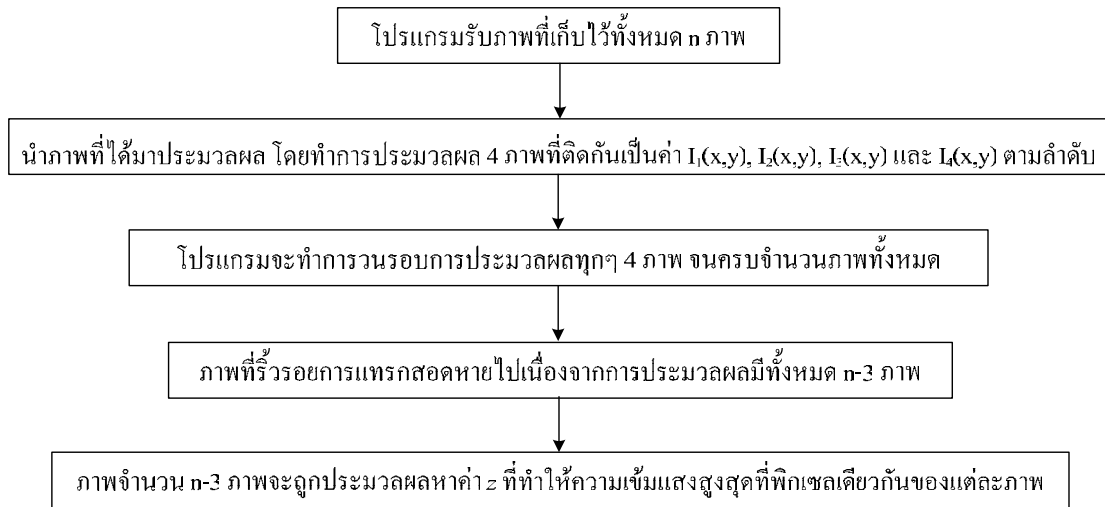
วิธีการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม PSI

5.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม PSI

การทดลองตอนนี้เป็นการนำภาพที่บันทึกจากชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm มาประมวลผลด้วยโปรแกรมวิเคราะห์รีจรอยการแทรกสอดแบบ PSI : อินเตอร์ฟีรอมตรีแบบเลื่อนเฟส

โปรแกรมจะนำภาพทั้งหมดที่เก็บไว้มาประมวลผลตามสมการ (2-36) โดยในรอบที่ 1 จะใช้ภาพที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$, $I_3(x, y)$ และ $I_4(x, y)$ ตามลำดับ จากนั้นโปรแกรมจะย้อนกลับมาทำรอบที่ 2 โดยจะใช้ภาพที่ 2, 3, 4 และ 5 เป็น $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$, $I_3(x, y)$ และ $I_4(x, y)$ ตามลำดับ ไปเรื่อยๆ จนถึงรอบที่ $n-3$ จะใช้ภาพที่ $n-3$, $n-2$, $n-1$ และ n เป็น $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$, $I_3(x, y)$ และ $I_4(x, y)$ ตามลำดับ ซึ่งโปรแกรมจะประมวลผลจนครบจำนวนภาพที่รับมา รีจรอยในภาพที่ผ่านการประมวลผลด้วยวิธีนี้จะหายไปจากภาพและภาพที่ลบรีจรอยแล้วจะมีเพียง $n-3$ ภาพเท่านั้น ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดว่าจะนำค่าความเข้มแสงบริเวณพื้นที่เดียวกันหรือที่พิกเซลเดียวกันของภาพทุกภาพมาวิเคราะห์ก็น่าจะคำนวณหาค่าความลึกของชิ้นงานได้ โดยการวิเคราะห์จะนำความเข้มแสงที่อยู่ในพิกเซลเดียวกันของทุกภาพที่ลบรีจรอยการแทรกสอดแล้วมาเขียนกราฟระหว่างความเข้มแสงกับระยะตามแนวแกน z จะได้กราฟที่เป็นการเปลี่ยนแปลงของของสหสัมพันธ์ของแนวการแทรกสอดดังรูปที่ 2.12 ระยะตามแนวแกน z ที่ให้ค่าความเข้มแสงสูงสุดจึงเป็นระยะความสูงของผิวที่จุดนั้นๆ ซึ่งระยะดังกล่าวจะนำมาใช้หาความลึกของพื้นผิวชิ้นงาน

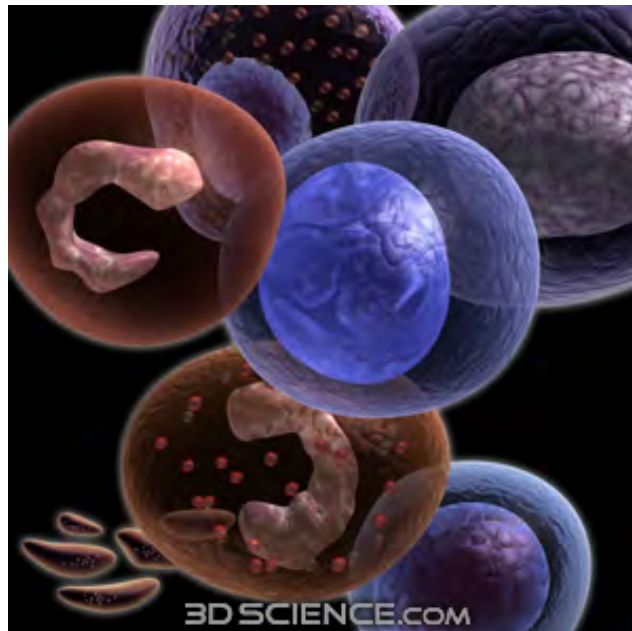
การทำงานของโปรแกรม PSI เขียนเป็นแผนผังการทำงานได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรม PSI

5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม PSI

งานวิจัยตอนนี้เริ่มจากการสร้าง (Simulate) รีร้อยการแทรกสอดขึ้นบนภาพเพื่อทดลองโปรแกรมลบรีร้อยการแทรกสอด โดยโปรแกรมจะรับภาพแรกเริ่มก่อน ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงภาพแรกเริ่ม

ต่อมาโปรแกรมจะสร้างรีวรอยการแทรกสอดขึ้นมาบนภาพ โดยแต่ละภาพจะให้รีวรอยการแทรกสอดเลื่อนไปทีละ 45 องศา ดังรูปที่ 5.3 จากนั้นโปรแกรมจะวิเคราะห์ภาพทั้งหมดตามสมการ (2-36) เพื่อลบรีวรอยการแทรกสอด ดังแสดงในรูปที่ 5.4 จากภาพจะเห็นว่าด้วยวิธีการดังกล่าวจะทำให้รีวรอยการแทรกสอดบนภาพที่จำลองการเกิดรีวรอยไว้หายไปหมดได้

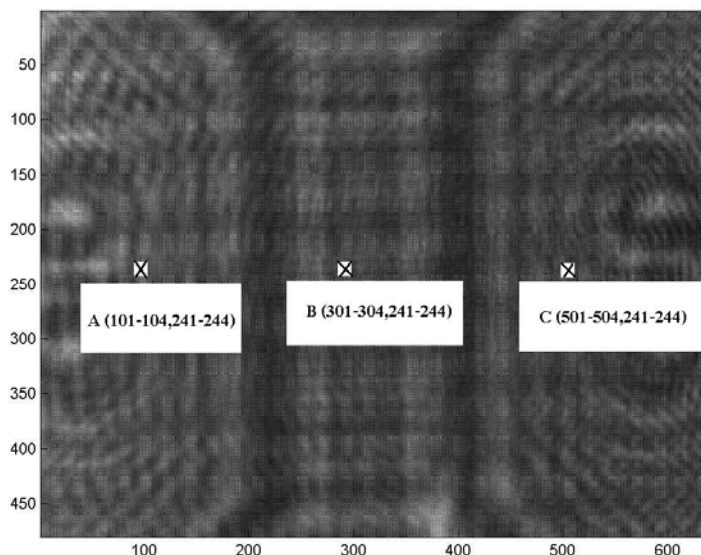


รูปที่ 5.3 แสดงรีวรอยการแทรกสอดที่เกิดบนภาพจากการสร้าง (Simulate)



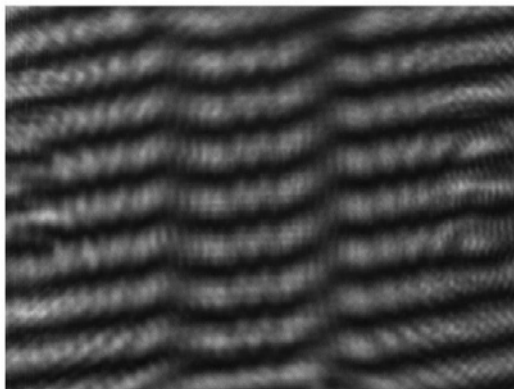
รูปที่ 5.4 แสดงภาพที่โปรแกรมได้ลบรีวรอยการแทรกสอด

ขั้นต่อมาเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพซึ่งงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ด้วยโปรแกรม PSI เพื่อลบรบกวนของการแทรกสอด ซึ่งภาพซึ่งงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ที่บันทึกได้จากกล้องซีซีดีในตอนแรกขณะยังไม่เกิดรบกวนการแทรกสอด แสดงดังรูปที่ 5.5



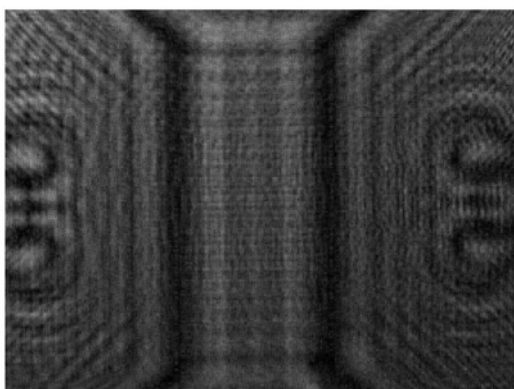
รูปที่ 5.5 แสดงภาพซึ่งงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ที่บันทึกได้จากกล้องซีซีดีในตอนแรกยังไม่เกิดรบกวนการแทรกสอด

จากนั้นหาระยะที่ทำให้เกิดรบกวนการแทรกสอด เมื่อพบรบกวนการแทรกสอดแล้วจึงเริ่มบันทึกภาพที่ระยะต่างๆ กัน โดยตั้งให้เพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์เปลี่ยนครั้งละ 0.1 μm ซึ่งเท่ากับการเลื่อนระยะให้ต่างกันครั้งละ 45 องศา การบันทึกภาพจะเริ่มตั้งแต่เริ่มเกิดรบกวนการแทรกสอดจนกระทั่งรบกวนการแทรกสอดค่อยๆ จางหายไป ซึ่งภาพซึ่งงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ที่บันทึกได้จากกล้องซีซีดีในขณะที่เกิดรบกวนการแทรกสอด แสดงดังรูปที่ 5.6

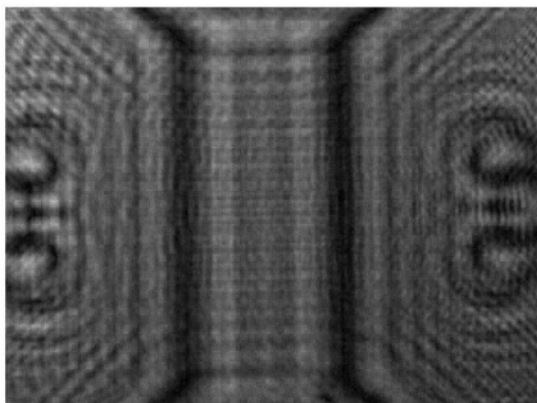


รูปที่ 5.6 แสดงภาพชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ที่บันทึกได้จากกล้องซีซีดีในตอนที่เกิดรีวรอยการแทรกสอด

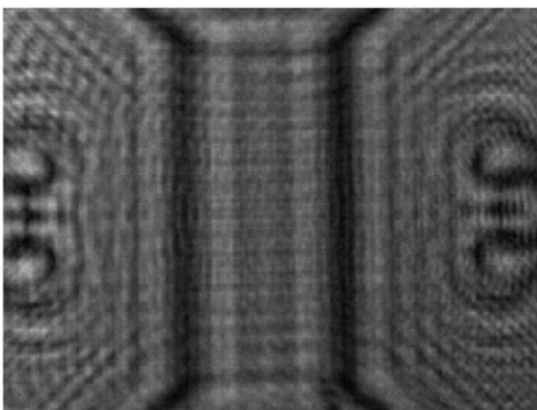
จากนั้นโปรแกรมจะรับภาพที่บันทึกไว้ซึ่งมีจำนวน 200 ภาพมาประมวลผลตามสมการ (2-36) ภาพที่ลบรีวรอยการแทรกสอดจะมีจำนวนทั้งสิ้น 197 ภาพ ซึ่งแสดงเป็นตัวอย่างดังรูปที่ 5.7-5.9 จากรูปทั้ง 3 จะเห็นได้ว่าภาพที่ได้จากการลบรีวรอยการแทรกสอดนั้นชัดเจนขึ้นกว่าตอนที่ถ่ายครั้งแรกขณะที่ยังไม่เกิดรีวรอยการแทรกสอดจึงนับว่าเป็นการสร้างโครงสร้างของพื้นผิว 3 มิติในรูป 2 มิติได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และความเข้มแสงของภาพทั้ง 3 ที่พื้นที่ของพิกเซลเดียวกันมีความเข้มแสงไม่เท่ากัน ซึ่งในงานวิจัยนี้มีแนวคิดว่าจะนำค่าความเข้มแสงที่พิกเซลเดียวกันของแต่ละภาพที่ลบรีวรอยการแทรกสอดมาวิเคราะห์ก็ควรจะคำนวณหาค่าความลึกของชิ้นงานได้



รูปที่ 5.7 แสดงภาพชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ที่บันทึกได้จากกล้องซีซีดีในตอนที่ได้ลบรีวรอยการแทรกสอด ภาพที่ 1



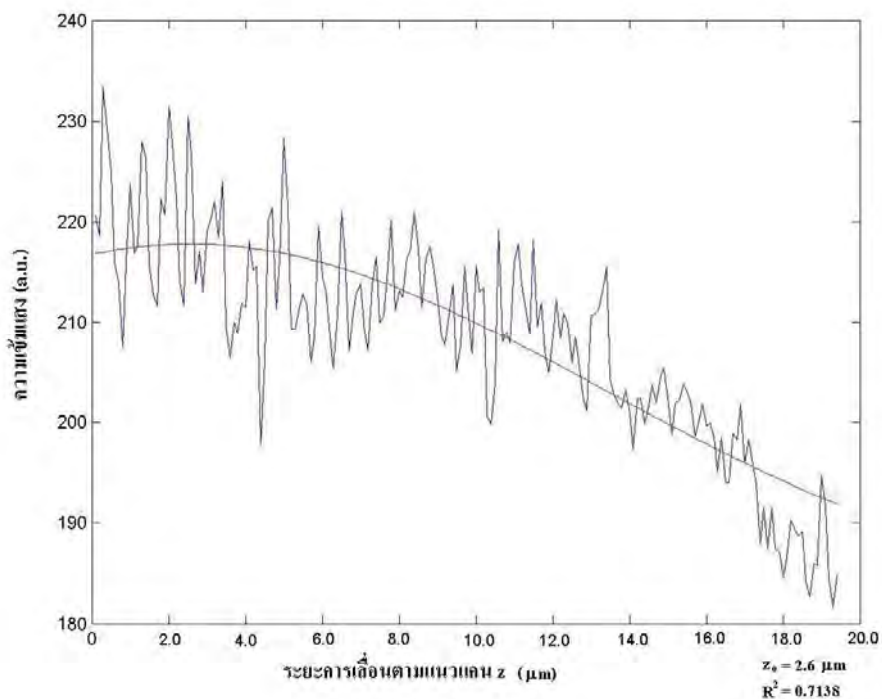
รูปที่ 5.8 แสดงภาพชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก $1.8 \mu\text{m}$ ที่บันทึกได้จากกล้องซีซีดีในตอนที่ได้ลบรื้อรอยการแทรกสอด ภาพที่ 2



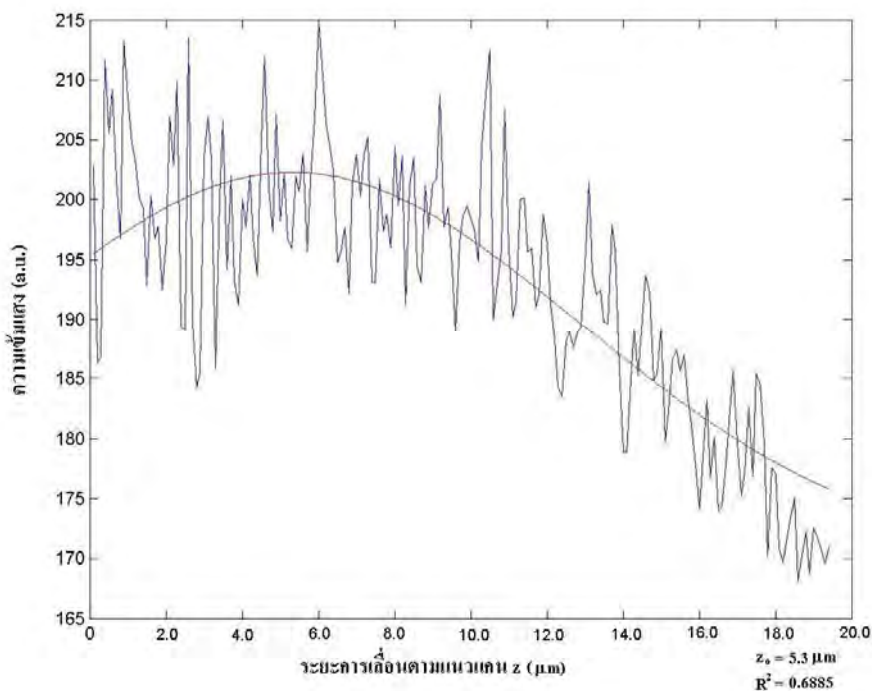
รูปที่ 5.9 แสดงภาพชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก $1.8 \mu\text{m}$ ที่บันทึกได้จากกล้องซีซีดีในตอนที่ได้ลบรื้อรอยการแทรกสอด ภาพที่ 3

ถ้าสังเกตจากภาพถ่ายจะเห็นว่าพื้นผิวของชิ้นงานส่วนตรงกลางจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นร่องลึกลงไป ที่ตำแหน่ง A, B และ C ตามแกนความยาวของภาพคือช่วงพิกเซลที่ 100, 300 และ 500 ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.5 โดยที่ช่วงพิกเซลที่ 100 และ 500 จะไม่มีความลึก ส่วนที่ช่วงพิกเซลที่ 300 จะมีความลึก $1.8 \mu\text{m}$ ซึ่งค่าความลึกนี้ได้จากการสอบเทียบของโรงงานผู้ผลิต (บริษัท VLSI) จากการวัดความเข้มแสงที่ 3 ตำแหน่งนี้ที่พื้นที่ของพิกเซลเดียวกันของแต่ละภาพที่ลบรื้อรอยการแทรกสอดโดยเลือกเส้นตามแกนความกว้างของภาพที่พิกเซลที่ 241-244 ซึ่งมีตำแหน่ง A อยู่ที่พิกัด

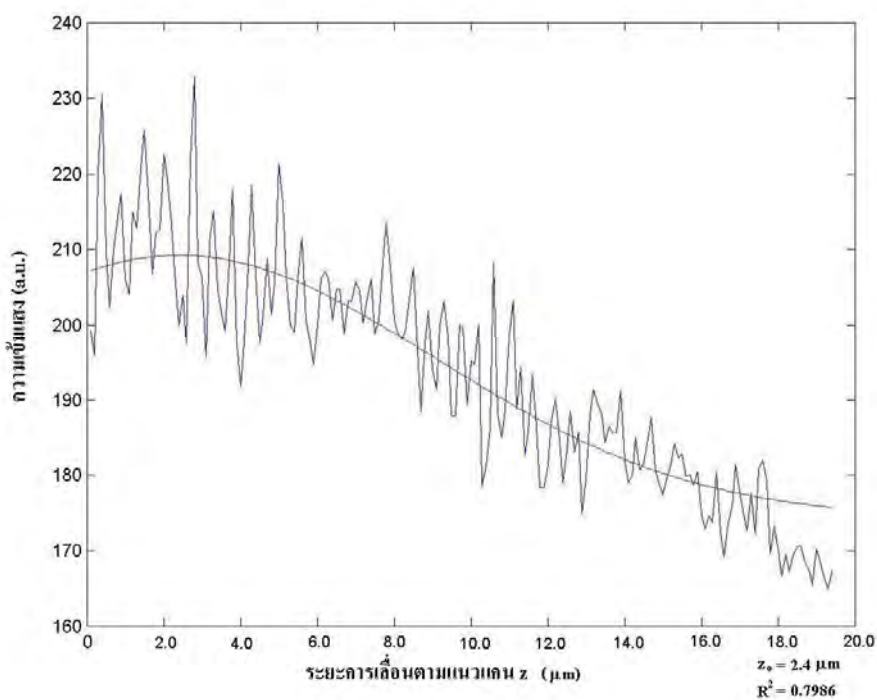
พิกเซลที่ (101-104,241-244) ตำแหน่ง B อยู่ที่พิกัดพิกเซลที่ (301-304,241-244) ตำแหน่ง C อยู่ที่พิกัดพิกเซลที่ (501-504,241-244) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.5 จะได้กราฟระหว่างระยะความลึกตามแนวแกน z และความเข้มแสงที่พิกเซลนั้นๆ ดังรูปที่ 5.10-5.12 ตามลำดับ



รูปที่ 5.10 แสดงความเข้มแสงในแต่ละภาพที่ถูกลบรีจอยการแทรกสอด ณ ตำแหน่ง A โดยที่ความเข้มแสงที่กระจายคือข้อมูลที่เก็บได้จากการวัดและเส้นโค้งคือการเปลี่ยนแปลงของสหสัมพันธ์



รูปที่ 5.11 แสดงความเข้มแสงในแต่ละภาพที่ถูกลบรี้วรอยการแทรกสอด ณ ตำแหน่ง B โดยที่ความเข้มแสงที่กระจายคือข้อมูลที่เก็บได้จากการวัดและเส้นโค้งคือการเปลี่ยนแปลงขอบของสหสัมพันธ์



รูปที่ 5.12 แสดงความเข้มแสงในแต่ละภาพที่ถูกลบรี้วรอยการแทรกสอด ณ ตำแหน่ง C โดยที่ความเข้มแสงที่กระจายคือข้อมูลที่เก็บได้จากการวัดและเส้นโค้งคือการเปลี่ยนแปลงขอบของสหสัมพันธ์

จากภาพที่ได้ทั้ง 3 ภาพที่ช่วงพิกเซลต่างๆ กัน จะเห็นได้ว่าความเข้มแสงในแต่ละภาพของช่วงพิกเซลเดียวกันมีค่าความเข้มแสงสูงบ้างต่ำบ้างสลับกัน ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกับสมการ $E_r(x, y)A_i(x, y)$ คือ การเปลี่ยนแปลงของขอบของสหสัมพันธ์ (Envelop of autocorrelation) ของวีวรอยการแทรกสอดที่มีความสัมพันธ์เป็น $\exp\left[-\left(\frac{z-z_0}{l_c}\right)^2\right]$ ตามสมการ (2-20) ซึ่งในงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่ว่าเมื่อเลื่อนระยะของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ ให้มีระยะทางเดินแสงด้านกระจกเท่ากับด้านชิ้นงานมาตรฐานที่จุด B ซึ่งเป็นช่วงที่ชิ้นงานเป็นร่องลึก ค่า $E_r(x, y)A_i(x, y)$ ก็จะแสดงความเข้มแสงที่สูงสุดที่ตำแหน่งหนึ่งของภาพ ซึ่งจากการสร้างสมการให้สอดคล้องกับข้อมูลในรูปที่ 5.11 พบว่าตำแหน่ง z_0 เท่ากับ $5.3 \mu\text{m}$ มีค่าอาร์กำลังสอง (R-square) เท่ากับ 0.6885 และเมื่อเลื่อนระยะของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ ให้มีระยะทางเดินแสงด้านกระจกเท่ากับด้านชิ้นงานมาตรฐานที่จุด A และ C ซึ่งเป็นช่วงที่อยู่บนร่องลึก ค่า $E_r(x, y)A_i(x, y)$ ก็จะแสดงความเข้มแสงสูงสุดอีกตำแหน่งหนึ่งของภาพ ซึ่งจากการสร้างสมการให้กับข้อมูลดังรูปที่ 5.10 สำหรับจุด A และรูปที่ 5.12 สำหรับจุด C พบว่าตำแหน่ง z_0 ของจุด A เท่ากับ $2.6 \mu\text{m}$ และตำแหน่ง z_0 ของจุด C เท่ากับ $2.4 \mu\text{m}$ โดยสมการดังกล่าวให้ค่าอาร์กำลังสองเท่ากับ 0.7138 และ 0.7986 ตามลำดับ ดังนั้นค่าเฉลี่ย z_0 ของจุด A และ C มีค่าเป็น $2.5 \mu\text{m}$ และเมื่อเทียบค่าความต่างกับค่า z_0 ของจุด B แล้วจะมีค่าเท่ากับ $2.8 \mu\text{m}$ หรือเป็นค่าความลึกที่คำนวณได้จากการทดลองนี้ ซึ่งต่างกับค่าที่วัดได้จากทางโรงงานผู้ผลิต ไป $1 \mu\text{m}$ ซึ่งคลาดเคลื่อนไปเท่ากับ 55.6 เปอร์เซ็นต์ ในการทดลองนี้จะเห็นว่าผลที่ได้นั้นมีแนวโน้มตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ แต่ค่าความลึกที่วัดได้จากการทดลองนี้เป็นค่าเพียงการประมาณเพราะค่าอาร์กำลังสองของแต่ละข้อมูลยังมีค่าที่ยอมรับได้ไม่เกิน 80 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

บทที่ 6

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองวัดระยะความลึกของพื้นผิวระดับไมโครเมตร 2 วิธี คือ วิธีอินเตอร์เฟอเมตรีแบบปรับระยะ และวิธีอินเตอร์เฟอเมตรีแบบเลื่อนเฟส ในส่วนของอินเตอร์เฟอเมตรีแบบปรับระยะนั้น เหมาะกับชิ้นงานที่มีพื้นผิวที่ระดับต่างกันน้อย และจะเกิดริ้วรอยการแทรกสอดได้เมื่อความต่างของทางเดินเชิงแสงด้านอ้างอิงและด้านวัตถุมีค่าน้อยกว่าระยะอาพันธ์ ในกรณีที่ทางเดินเชิงแสงด้านอ้างอิงเท่ากับทางเดินเชิงแสงด้านวัตถุแล้วความเข้มที่ได้ก็จะมีค่าสูงสุด จากการทดลองและทฤษฎีพบว่าความเข้มแสงของแต่ละพื้นที่บนพื้นผิวของชิ้นงานนั้นจะสัมพันธ์กับการเลื่อนของทางเดินเชิงแสง และแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ควรจะมีระยะอาพันธ์สั้นเพื่อที่จะวัดระยะให้อยู่ในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรได้

ในส่วนของอินเตอร์เฟอเมตรีแบบเลื่อนเฟส จะเหมาะสมกับชิ้นงานที่มีความแตกต่างของความสูงต่ำพื้นผิวมาก โดยใช้วิธีพิจารณาการเลื่อนของริ้วรอยการแทรกสอด ในกรณีนี้แหล่งกำเนิดที่ใช้จะเป็นได้ทั้งแสงที่มีระยะอาพันธ์สั้นและแสงที่มีระยะอาพันธ์ยาว สำหรับแหล่งกำเนิดแสงที่มีระยะอาพันธ์ยาวนั้น ถึงแม้ว่าค่าความกว้างของสเปกตรัมที่น้อยจะส่งผลให้ผลการวัดแม่นยำมากกว่าแต่แหล่งกำเนิดแสงที่มีระยะอาพันธ์สั้น ก็จะช่วยให้อัตราการถ่ายภาพที่ซ่อนอยู่ในผิวบางที่กระเจิงแสงได้ดีกว่า

ในงานวิจัยนี้จึงใช้ซูเปอร์ลูมินิสเซนส์ไดโอด ที่มีความยาวคลื่น $0.83 \mu\text{m}$ เป็นแหล่งกำเนิดแสงกับระบบอินเตอร์เฟอเมตรีแบบไมเคลสัน โดยวิธีที่ใช้ในการเก็บข้อมูลมีทั้งที่เป็นแบบอินเตอร์เฟอเมตรีแบบปรับระยะและแบบเลื่อนเฟส

6.1 การวัดด้วยวิธีอินเตอร์เฟอเมตรีแบบปรับระยะ

ในการวัดแบบอินเตอร์เฟอเมตรีแบบปรับระยะนั้น มีการเก็บข้อมูลโดยเลื่อนระยะของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ไปครั้งละ $0.1 \mu\text{m}$ ดังนั้นตำแหน่งที่วัดได้จะห่างกันครั้งละ $0.1 \mu\text{m}$ ด้วย แต่ตำแหน่งที่วัดดังกล่าวอาจจะไม่ใช่ตำแหน่งความสูงต่ำที่แท้จริงของพื้นผิวชิ้นงานก็ได้ ดังนั้นเราจึงใช้การแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่องเข้ามาช่วยประมวลผลเพื่อที่จะหาตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับความสูงต่ำที่แท้จริงของพื้นผิวมากยิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งพื้นที่ในการประมวลผลเป็น 3 แบบ คือ แบบพื้นที่ 1x1 พิกเซล แบบพื้นที่ 2x2 พิกเซล และ แบบพื้นที่ 3x3 พิกเซล โดยวัดชิ้นงานสแตนเลส 316 ชั้นที่ 1 เพื่อหาขนาดของพื้นที่ในการคำนวณที่เหมาะสมของพื้นที่ขนาดต่างกันทั้ง 3 แบบ จากการประมวลผลพบว่าแบบพื้นที่ 1x1 พิกเซล และ 2x2 พิกเซล จะให้ค่าความสูงต่ำเฉลี่ย (R_a) ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง (R_q) และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุด (R_z) ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติด้วยเครื่องมือมาตรฐานที่เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดแทรกสอดแบบอินเทอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคลสัน รุ่น SP-500 ของบริษัท TORAY จากการทดลองพบว่า ค่า R_a ของสแตนเลสชั้นที่ 1 แบบพื้นที่ 1x1 พิกเซล และ 2x2 พิกเซล เท่ากับ 0.071 μm และ 0.066 μm ตามลำดับ ในขณะที่ค่า R_a ที่ได้จากเครื่องมือมาตรฐานวัดได้เท่ากับ 0.054 μm แต่การคำนวณแบบพื้นที่ 1x1 พิกเซลใช้เวลาการประมวลผลนานกว่าแบบพื้นที่ 2x2 พิกเซล ส่วนแบบพื้นที่ 3x3 พิกเซล ค่า R_a ของสแตนเลสชั้นที่ 1 ที่วัดได้มีค่า 0.124 μm ซึ่งต่างกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือมาตรฐาน เพราะว่าพื้นที่ในการประมวลผลมีพื้นที่ค่อนข้างใหญ่เกินไป สำหรับค่า R_q และ R_z ของการประมวลผลแบบพื้นที่ 1x1 พิกเซล แบบพื้นที่ 2x2 พิกเซล และ แบบพื้นที่ 3x3 พิกเซล ก็เป็นไปในทำนองเดียวกับค่า R_a ที่กล่าวข้างต้นด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกการประมวลผลแบบพื้นที่ 2x2

ในการทดลองวัดค่า R_a , R_q และ R_z ของสแตนเลสชั้นที่ 1, 2 และ 3 ด้วยวิธีการประมวลผลแบบพื้นที่ 2x2 พิกเซล เพื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จากห้องปฏิบัติการความเรียบผิวของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติด้วยเครื่องมือมาตรฐานชนิดเดียวกัน จากการสุ่มวัด 20 จุด พบว่าค่าที่ได้จากชิ้นงานชั้นที่ 1 และ 2 มีค่าใกล้เคียงกับเครื่องมือมาตรฐานมาก คือมีค่าต่างกันไม่เกิน 0.1 μm เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้นมีค่าความขรุขระของพื้นผิวใกล้เคียงกันทั้งพื้นผิว หรือมีค่าไฮโมเจนอิตีที่ต่ำ เพราะฉะนั้นไม่ว่าการวัดจะสุ่มไปบนตำแหน่งใดของพื้นผิวชิ้นงานก็จะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนผลการวัดชิ้นงานชั้นที่ 3 พบว่าค่า R_a , R_q และ R_z ที่ได้จากงานวิจัยนี้เทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือมาตรฐานโดยการสุ่มวัด 20 จุด พบว่าค่าที่ได้มีค่าต่างกัน มากกว่า 0.5 μm และเมื่อนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟค่าที่วัดได้รวมกับค่าความไม่แน่นอนขยาย พบว่าช่วงของค่าความไม่แน่นอนขยายเกือบจะไม่คาบเกี่ยวกับค่าที่ได้จากเครื่องมือมาตรฐาน เนื่องจากชิ้นงานมีค่าความขรุขระบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ หรือมีความเป็นไฮโมเจนอิตีที่ต่ำ เพราะฉะนั้นค่าที่แตกต่างกันอาจเกิดมาจากการสุ่มวัดคนละตำแหน่งบนพื้นผิวชิ้นงาน

สำหรับแหล่งที่มาหรือตัวแปรของค่าความไม่แน่นอนขยาย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นั้นประกอบไปด้วย ค่าการคำนวณมุมเฟส ค่าความยาวคลื่น ค่าไฮโมเจนอิตี ค่าความขรุขระของ

กระจก และค่าความไม่เป็นเส้นตรงของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ โดยที่ค่าความไม่แน่นอนของการคำนวณมุมเฟส ค่าความยาวคลื่น และค่าความไม่เป็นเส้นตรงของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ ของทุกชิ้นงานเท่ากัน ส่วนค่าความไม่แน่นอนของค่าความขรุขระของกระจกจะขึ้นอยู่กับค่าที่ต้องการคำนวณว่าเป็น R_a , R_q หรือ R_z โดยจะต้องเลือกใช้ค่า R_a , R_q หรือ R_z ของกระจกให้ตรงกันด้วย สุดท้ายคือค่าความไม่แน่นอนของค่าไฮโมเจนเนอิตีซึ่งจะขึ้นกับชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาวัด ถ้าชิ้นงานที่มีค่าไฮโมเจนเนอิตีจะมีค่าความไม่แน่นอนของค่าไฮโมเจนเนอิตีอยู่ในระดับน้อยกว่าเท่ากับ $0.1 \mu\text{m}$ แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนที่ได้ส่วนใหญ่จึงส่งผลมาจากค่าความไม่เป็นเส้นตรงของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ มีค่าเท่ากับ $0.0312 \mu\text{m}$ แต่ถ้าชิ้นงานมีค่าไฮโมเจนเนอิตีอยู่ในระดับมากกว่า $0.1 \mu\text{m}$ แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนที่ได้ส่วนใหญ่จึงเกิดจากค่าไฮโมเจนเนอิตีทำให้ค่าความไม่แน่นอนขยายมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งผลจากที่วัดได้จากงานวิจัยนี้ค่าไฮโมเจนเนอิตีของชิ้นงานสแตนเลสทั้ง 3 มีค่าอยู่ในช่วง $0.0040 - 1.2765 \mu\text{m}$ เมื่อพิจารณาการวัดอินเตอร์ฟีรอมетรีแบบปรับระยะแล้วพบว่า เราวัดค่าความขรุขระของผิวสแตนเลส 316 รวมทั้งค่าความไม่แน่นอนขยาย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95.5 % ของผิวสแตนเลสได้ จากตารางที่ 4.34-4.36 ผลการวัดชิ้นงานสแตนเลส 316 เมื่อเทียบกับผลที่วัดได้จากเครื่องมือมาตรฐานรุ่น SP-500 จะมีค่า E_n น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ซึ่งถือว่าผ่านเกณฑ์การยอมรับ

6.2 การวัดด้วยวิธีอินเตอร์ฟีรอมетรีแบบเลื่อนเฟส

ในส่วนแบบอินเตอร์ฟีรอมетรีแบบเลื่อนเฟสนั้น ในการทดลองพบว่าวิธีดังกล่าววัดและลบร็วรอยการแทรกสอดของภาพถ่ายจากพื้นผิว 3 มิติของชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก $1.8 \mu\text{m}$ ในรูปแบบของ 2 มิติได้โดยให้ภาพโครงร่างที่ได้มีความชัดเจนขึ้น ซึ่งการวิเคราะห์หลักคุณลักษณะพื้นฐานมาจากความคิดของ N. Yokoi และ Y. Aizu [24] ซึ่งเป็นแนวความคิดเกี่ยวกับการสร้างภาพ 2 มิติของพื้นผิวที่ปิดทับด้วยแผ่นตัวกลางที่ทำให้เกิดการกระเจิงของแสง แต่ในส่วนของสมมติฐานที่ตั้งไว้ตอนแรกว่าถ้านำค่าความเข้มแสงที่พิกเซลเดียวกันของแต่ละภาพที่ลบร็วรอยการแทรกสอดมาวิเคราะห์หน้าจะคำนวณหาค่าความลึกของชิ้นงานได้นั้น พบว่าผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มตามสมมติฐาน กล่าวคือ กราฟที่ได้มีลักษณะตามสหสัมพันธ์ของรีจการแทรกสอดและจากการคำนวณหาผลต่างของตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุดพบว่าค่าความลึกของชิ้นงานมาตรฐานที่วัดได้ต่างจากการวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐาน รุ่น SP-500 อยู่ $1 \mu\text{m}$ ซึ่งคลาดเคลื่อนไปเท่ากับ 55.6 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าที่วัดได้จากงานวิจัยนี้เป็นเพียงค่าที่ประมาณเท่านั้นเพราะค่าอาร์กกำลังสองสำหรับสมการที่เหมาะสมกับข้อมูลมีค่าไม่เกิน 80 เปอร์เซ็นต์ แต่วิธีนี้มีข้อดีอยู่ที่ให้การวิเคราะห์และประมวลผลได้รวดเร็วกว่าวิธีอินเตอร์ฟีรอมетรีแบบปรับระยะ

6.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลค่าความไม่แน่นอนขยายของชิ้นงานสแตนเลสชิ้นที่ 1 และ 2 พบว่าถ้าต้องการลดค่าความไม่แน่นอนขยาย จำเป็นต้องเปลี่ยนเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ที่มีความแม่นยำและถูกต้องในการเลื่อนมากขึ้น

จากผลการทดลองพบว่าการวัดชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ยังไม่สอดคล้องกับค่าความลึกของชิ้นงาน เนื่องจากอุปกรณ์ในการจับยึดชิ้นงานมาตรฐานไม่ดีพอทำให้พื้นผิวของชิ้นงานมาตรฐานมีระนาบเอียง จึงทำให้ความเข้มแสงที่วัดได้อาจผิดพลาดเพราะเกิดการหักเหของแสงที่อยู่ในตำแหน่งพิกเซลที่ใกล้เคียงกับที่สนใจ ฉะนั้นถ้าเปลี่ยนอุปกรณ์ในการจับยึดชิ้นงานมาตรฐานที่ทำให้พื้นผิวของชิ้นงานมีระนาบตรงค่าที่วัดได้น่าจะแม่นยำยิ่งขึ้น

อีกทั้งความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงในงานวิจัยนี้ มีความเข้มแสงไม่ค่อนสูงมาก ทำให้สัญญาณรบกวนกับสัญญาณที่เราสนใจมีค่าใกล้เคียงกัน โดยซูเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอดที่ใช้มีกำลังเพียง 17.5 mW จึงอาจมีผลให้การวัดผิดพลาดได้ ถ้าเราเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงไปใช้ซูเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอดที่มีกำลังมากกว่านี้ หรือเปลี่ยนเป็นแหล่งกำเนิดแสงอื่นที่มีความเข้มแสงมากขึ้น เช่น หลอดฮาโลเจน ผลที่ได้น่าจะให้ผลแม่นยำยิ่งขึ้น อันจะเป็นแนวทางของงานวิจัยต่อไปในอนาคต ในส่วนข้อดีของการเลือกใช้ซูเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอดเป็นแหล่งกำเนิดแสงเช่นในงานวิจัยนี้เนื่องจาก ซูเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอดเป็นแหล่งกำเนิดที่มีขนาดเล็ก ปรับเปลี่ยนตำแหน่งการวางในการติดตั้งระบบการวัดได้ง่าย และมีความร้อนในตัวแหล่งกำเนิดเองไม่สูงมาก ดังนั้นซูเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอดจึงเหมาะสมกับการใช้งานในห้องที่ไม่ต้องควบคุมอุณหภูมิ

รายการอ้างอิง

- [1] OIML R 111-1. International Recommendation Weights of classes $E_1, E_2, F_1, F_2, M_1, M_{1-2}, M_2, M_{2-3}$ and M_3 , 2004(E).
- [2] A. F. Fercher, W. Drexler, C. K. Hitzenberger and T. Lasser. Optical coherence tomography-principles and applications. Rep. Prog. Phys 66 (2003): 239-303.
- [3] B. E. Bouma and G. J. Tearney. Handbook of Optical Coherence Tomography. 1st ed. USA: Informa HealthCare, 2001.
- [4] P. Pavlíček. Height profile measurement by means of white light interferometry. Proceedings of the SPIE. 5259 (2003): 139-144.
- [5] S. Chang, X. Liu, X. Cai and C. P. Grover. Full-field optical coherence tomography and its application to multiple-layer 2D information retrieving. Optics Communications 246 (2005): 579–585.
- [6] C. J. Tay, C. Quan and M. Li. Investigation of a dual-layer structure using vertical scanning interferometry. Optics and Lasers in Engineering 45 (2007): 907–913.
- [7] E. Hecht. Optics. 4th ed. USA: Addison Wesley, 2001.
- [8] สุวรรณ คูสำราญ. ทัศนศาสตร์กายภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : 2537.
- [9] F. L. Pedrotti and L. S. Pedrotti. Introduction to Optics. 2nd ed. USA: Prentice Hall, 1993.
- [10] D.J. Whitehouse. Handbook of Surface Metrology. England : Rank Taylor Hobson Ltd, 1994.
- [11] D.J. Whitehouse. Surfaces and their Measurement. England : Rank Taylor Hobson Ltd, 2002.
- [12] K. J. Gasvik. Optical Metrology. 3rd ed. England : John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [13] M. Farge. Wavelet transforms and their applications to turbulence. Annu. Rev. Fluid Mech 24 (1992): 395-457.
- [14] L. Chongchun and Q. Zhengding. A method based Morlet wavelet for extracting vibration signal envelope. Proceeding of ICSP 2000 1 (2000): 337-340.

- [15] R. Büssov. An algorithm for the continuous Morlet wavelet transform. Mechanical Systems and Signal Processing 21 (2007): 2970-2979.
- [16] C. Torrence and G. P. Compo. A practice guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological Society 79 (1998): 61-78.
- [17] S. Chang, X. Cai and C. Flueraru. An efficient algorithm used for full-field optical coherence tomography. Optics and Lasers in Engineering 45 (2007): 1170–1176.
- [18] United Kingdom Accreditation Service. The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement. 2nd ed. London: UKAS, 2007.
- [19] Superlum.[Online] Available from:
<http://www.superlumdiodes.com> [2009, March 6].
- [20] ISO 4287. Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface texture : Profile method-Terms, definitions and surface texture parameters., 1997.
- [21] ISO 4288. Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface texture : Profile method-Rules and procedures for the assessment of surface texture., 1996(E).
- [22] M. Li, C. Quan and C.J. Tay. Continuous wavelet transform for micro-component profile measurement using vertical scanning interferometry. Optics & Laser Technology 40 (2008): 920-929.
- [23] ISO/IEC Guide 43-1. Proficiency Testing by Interlaboratory Comparisons., 1999.
- [24] N. Yokoi, Y. Aizu. Motion imaging of objects in layers hidden by scattering media using low-coherence speckle interferometry. Optics & Laser Technology 40 (2008): 52-57.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

โปรแกรมการประมวลผล : โปรแกรม VSI

```

%%%%%%%% THIS IS A PROGRAM FOR CALCULATE A HEIGHT PROFILE OF SURFACE
%%%%%%%% 1. INPUT A START ROW (Y START) IN starow PARAMETER
%%%%%%%% 2. INPUT A STOP ROW (Y STOP) IN endrow PARAMETER
%%%%%%%% 3. INPUT A START COLUMN (X START) IN stacol PARAMETER
%%%%%%%% 4. INPUT A STOP COLUMN (X STOP) IN endcol PARAMETER
%%%%%%%% 5. INPUT THE BLOCKSIZE OF SELECTED AREA FOR CALCULATE IN
           blocksize
%%%%%%%%  PARAMETER NOTE: BLOCK SIZE IS SQUARE
%%%%%%%% 6. dj AND dz PARAMETER ARE THE RESOLUTION OF SCALE AND THE
%%%%%%%%  RESOLUTION OF EXPERIMENT, RESPECTIVELY.

clear all
clc

display('Select a file in the folder');
[fname,pname] = uigetfile('*.','Please select a file in the
folder');
filelist = dir(pname);
L = length(filelist);
FList = cell(L-2,1);
ResultList = cell(L-2,1);
filename = filelist(3).name;
fullname = [pname,filename];
rgbdata = imread(fullname);
graydata = rgb2gray(rgbdata);
[row,col] = size(graydata);

display(['The image file size is ',num2str(row),'x',num2str(col)]);

starow = input('Please input start point of row : ==> ');
endrow = input('Please input end point of row : ==> ');
stacol = input('Please input start point of column : ==> ');
endcol = input('Please input end point of column : ==> ');
blocksize = input('Please input the block size : ==> ');
dz = input('Please input vertical resolution : ==> ');
dj = input('Please input frequency resolution : ==> ');

```


ภาคผนวก ก (ต่อ)

```

display('Getting data from files...please wait.')
scan = 0;

M = floor((endrow-(starow-1))/blocksize);

for rowscan = 1:M;
    selectline = ((rowscan-1)*blocksize)+starow;
    count = 0;

    for n = 1:length(filelist);
        filename = filelist(n).name;
        if isdir(filename),
            else
                count = count+1;
                FList{count} = filename;
                fullname = [pname,filename];
                rgbdata = imread(fullname);
                graydata = rgb2gray(rgbdata);
                [row,col] = size(graydata);
                A = graydata(selectline:selectline+blocksize-1,:);
                N = floor((endcol-(stacol-1))/blocksize);
                result = [];
                for j = 1:N;
                    B = A(:,(j-1)*blocksize+stacol:(blocksize*j)+(stacol-1));
                    C = 255-mean(mean(B));
                    result = [result;C];
                end
                ResultList{count} = result;
            end
        end
    end
    ResultMat = zeros(length(result),count);
    for n = 1:count;
        ResultMat(:,n) = ResultList{n};
    end
    ResultTable = ResultMat';
    number_of_frame = count;

```

ภาคผนวก ก (ต่อ)

```

omg_k = [1:floor(number_of_frame/2)];
omg_k = omg_k.*((2.*pi)/(number_of_frame*dz));
omg_k = [0., omg_k, -omg_k(floor((number_of_frame-1)/2):-1:1)];

n = 5;
Wn = [62.5 125]/500;
[b,a] = butter(n,Wn);
[Filter,tF] = impz(b,a,number_of_frame);
fouFil = fft(Filter);

timevec = clock;
yearstr_ = sprintf('%4d',timevec(1));
monthstr_ = sprintf('%02d',timevec(2));
datestr_ = sprintf('%02d',timevec(3));
hourstr_ = sprintf('%02d',timevec(4));
minstr_ = sprintf('%02d',timevec(5));
curr = cd;
folder_name = [yearstr_,monthstr_,datestr_,hourstr_,minstr_,'Line
',sprintf('%3d',selectline)];
mkdir(folder_name);
cd(folder_name);

DelCwt = zeros(length(result),1);
MAXSUM = zeros(length(result),1);
MAXSUM2 = zeros(length(result),1);
MAXSUM3 = zeros(length(result),1);
MaxFil = zeros(length(result),1);
TotalIndData = zeros(length(result),1);
TotalIndFou = zeros(length(result),1);
TotalIndCwt = zeros(length(result),1);
MaxPosData = zeros(length(result),1);
MaxPosFou = zeros(length(result),1);
MaxPosCwt = zeros(length(result),1);

for k = 1:length(result);
    dispstr = ['analyzing line ',num2str(selectline),' block#
',num2str(k),' of ',num2str(length(result))];
    display(dispstr);

```

ภาคผนวก ก (ต่อ)

```

filename = ['Line- ',sprintf('%3d',selectline),' Block-
',sprintf('%3d',k)];

x = [1:1:count];
y = ResultMat(k,:);
yleft = mean(y(1:5));
yright = mean(y(length(y)-4:length(y)));
xleft = 1;
xright = length(y);
slope = (yleft-yright)/(xleft-xright);
intercept = yleft-slope*xleft;
offset = slope*x+intercept;
y_c = y-offset;

variance = std(y_c)^2;
y_cn = (y_c - mean(y_c))/sqrt(variance);

x_k = fft(y_cn);
xFil = fouFil.*x_k;
ifxFil = ifft(xFil);
realyFil = real(ifxFil);
[MaxFil(k),index_3] = max(realyFil);

%%%%%%%%%%%%% MAX INDEX OF DFT %%%%%%%%%%%%%%
TotalIndFou(k,1) = index_3;
%%%%%%%%%%%%%

x_k2 = fft(realyFil);

omg_o = 2*pi/0.83;
log_2 = floor(log2(number_of_frame*dz/2/dz));
Jreal = (1/dj)*log_2;
J = floor(Jreal);
fou_para = 4*pi/(omg_o+sqrt(2+(omg_o^2)));
s = 0;
t = 0;

Sum1 = zeros(J+1,number_of_frame);
Sum2 = zeros(J+1,number_of_frame);

```

ภาคผนวก ก (ต่อ)

```

for scale = 0:1:J;
    s = s+1;
    s_j(s) = 2*dz*(2^(scale*dj));
    for time = 0:1:(number_of_frame-1);
        t = t+1;
        g = [0:1:(number_of_frame-1)];
        expomg = (s_j(s).*omg_k(g+1))-omg_o;
        Lam(s,t) = fou_para*s_j(s);
        Lam2(s,t) = 2*Lam(s,t);
        H = sqrt(2*pi.*s_j(s)./dz.*(1/(pi^(1/4)))).*
            exp(-((expomg./sqrt(10)).^2));
        W = x_k2(g+1).*H.*exp(i*omg_k(g+1).*time*dz);
        Sum1(s,t) = sum(W);
        Sum2(s,t) = abs(Sum1(s,t));
    end
    t = 0;
end
[r,c] = size(Sum1);
Sum1 = reshape(Sum1,r*c,1);
Sum2 = reshape(Sum2,r*c,1);
Lam2 = reshape(Lam2,r*c,1);
[MAXSUM(k),index] = max(Sum2);
Sum1Max = Sum1(index);
Lamda = Lam2(index);
R = imag(Sum1Max)/real(Sum1Max);
PHI = atan(R);

%%%%%%%%%%%%% MAX INDEX OF CWT %%%%%%%%%%%%%%
TotalIndCwt(k,1) = fix((index/r))+1;
%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%% DEL OF CWT %%%%%%%%%%%%%%
DelCwt(k,1) = (Lamda*PHI)/(4*pi);
%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%% MAX INDEX OF DATA %%%%%%%%%%%%%%
[MAXSUM3(k,1),TotalIndData(k,1)] = max(y_c);
%%%%%%%%%%%%%

```

ภาคผนวก ก (ต่อ)

```

Sum1 = reshape(Sum1,r,c);
Sum2 = reshape(Sum2,r,c);
Lam2 = reshape(Lam2,r,c);
end

Block_Number=[1:1:length(result)]';

%%%%%%%%%%%%% MAX POSITION OF DATA %%%%%%%%%%%%%%
MaxPosData = TotalIndData.*dz;
%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%% MAX POSITION OF DFT %%%%%%%%%%%%%%
MaxPosFou = TotalFouData.*dz;
%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%% MAX POSITION OF CWT %%%%%%%%%%%%%%
MaxPosCwt = TotalIndCwt.*dz;
%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%% HEIGHT POSITION OF DFT %%%%%%%%%%%%%%
hDFT = MaxPosFou;
%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%% HEIGHT POSITION OF CWT %%%%%%%%%%%%%%
hCwt = MaxPosCwt - DelCwt;
%%%%%%%%%%%%%

Report_ = [Block_Number,MaxPosData,hDFT,MaxPosCwt,hCwt];
basename = ['Line- ',sprintf('%3d',selectline),'_'];
fname1 = [basename,'raw_report.csv'];
fname2 = [basename,'summary_report.csv'];

fid = fopen(fname2,'a+');
[r,c] = size(Report_);
str2print = ['Line#,',sprintf('%3d',selectline)];

```

ภาคผนวก ก (ต่อ)

```

fprintf(fid,'%s\n',str2print);

fprintf(fid,'%s\n','HBlock#,MaxData,MaxFourier,MaxCwt,HeightCwt');
    for n = 1:r;
        fprintf(fid,'%04d,%04d,%04d,%04d,%5.4e\n',Report_(n,:));
    end
fclose(fid);
fid = fopen(fname1,'a+');
[r,c] = size(ResultTable);
fprintf(fid,'%s\n',str2print);
str='Block#001';
fmtstr='%03d';
for m = 1:c-1;
    str=[str,',Block#',sprintf('%03d',m+1)];
    fmtstr=[fmtstr,',%03d'];
end
str=[str];
fprintf(fid,'%s\n',str);
for n=1:r;
    fprintf(fid,fmtstr,ResultTable(n,:));
    fprintf(fid,'%s\n','');
end
fclose(fid);
cd(curr);

scan = scan+1;
HData{scan} = MaxPosData;
HFou{scan} = hDFT;
HCwt{scan} = hCwt;

end
%%% HMatData IS THE SURFACE PROFILE OF EXPERIMENTAL DATA
%%% HMatFou IS THE SURFACE PROFILE OF DFT DATA BY BUTTERWORTH FILTER
%%% HMatCwt IS THE SURFACE PROFILE OF CWT DATA

HMatData = zeros(length(MaxPosData),scan);
HMatFou = zeros(length(hDFT),scan);
HMatCwt = zeros(length(hCwt),scan);
for r = 1:scan;

```

ภาคผนวก ก (ต่อ)

```

HMatData(:,r) = HData{r};
HMatFou(:,r) = HFou{r};
HMatCwt(:,r) = HCwt{r};
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% RMS CALCULATION %%%%%%%%%%
RmsData = mean(std(HMatData));
fprintf('RMS_Data = %5.4f\n',RmsData);

RmsFou = mean(std(HMatFou));
fprintf('RMS_Fourier = %5.4f\n',RmsFou);

RmsCwt = mean(std(HMatCwt));
fprintf('RMS_Cwt = %5.4f\n',RmsCwt);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% SURFACE PROFILE OF SAMPLE %%%%%%%%%%
[rowSur,colSur] = size(HMatData);
xn = [1:1:colSur];
yn = [1:1:rowSur];
xSur = xn*blocksize*6.24;
ySur = yn*blocksize*6.24;

figure('color','white');
surf(xSur,ySur,HMatData);
title('Surface Profile of Experimental Data');
xlabel('x (micron)');
ylabel('y (micron)');
zlabel('z (micron)');
filename=['surface profile of experimental data'];
saveas(gcf,filename,'jpg');
saveas(gcf,filename,'fig');
close(gcf)

figure('color','white');
surf(xSur,ySur,HMatFou);

```


ภาคผนวก ข

โปรแกรมการประมวลผล : โปรแกรม PSI

```

%%%%%%%% THIS IS A PROGRAM FOR DELETE INTERFERENCE FRINGE

close all
clear all;

current_path=cd;
pathname=uigetdir(current_path,'Please select the folder for images
to be analyzed');
cd(pathname);
filelist=dir('*.jpg');
G=cell(length(filelist),1);
R=[];
C=[];

    for n=1:length(filelist);
        fname=filelist(n).name;
        fullname=[pathname,'\',fname];
        rgbdata=imread(fullname);
        graydata=rgb2gray(rgbdata);
        G{n}=graydata;
        [r,c]=size(graydata);
        R=[R;r];
        C=[C;c];
    end

maxR=max(R);
maxC=max(C);
Gray_Frames=zeros(maxR,maxC,length(filelist));

    for n=1:length(filelist);
        Gray_Frames(:, :, n)=G{n};
    end
end

```


ภาคผนวก ค
คุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์

PZT Performance Test Document

Job No.:5040695002

Quality Control Document No.: QD8

11:55:18 06-08-2005

Order Data

Customer:
Customer Ref No.: PPO-6501-05
PI Order No.:

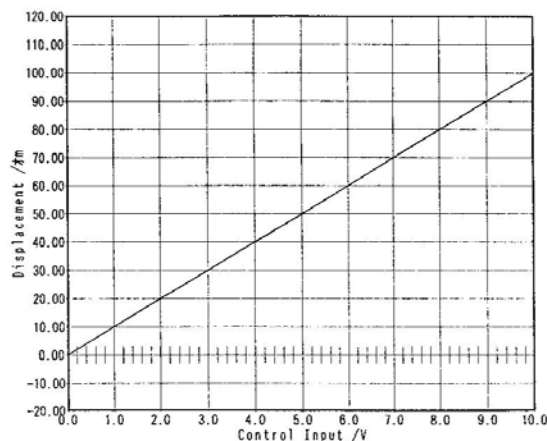
PZT/Driver Specifications

PZT Model: P-721CLQ
Ser. No.: 5040695002
Nominal Oper. Voltage: 100
Nominal Expansion: 100
Feed Back Sensor: CAP SENSOR
Driver Model: E-665.CF/7040664009-3
Design Modifications: Standard
Opt: 1
Option2:

Measurement Setup

Measurement Device: ZMI 2000
Measurement Range:
Min. Ctrl Input: 0.000 V
Max. Ctrl Input: 10.000 V
Step Size: 1.0 V
Time Delay: 1.5 s
Temperature: 23.0 °C
Air Pressure: 1000.0 mbar
Humidity: 45.0 %
Source Date: 11:52:14,06-08-2005
Prog. ID: PZT-Calib 6.35
Tested by: Administrator

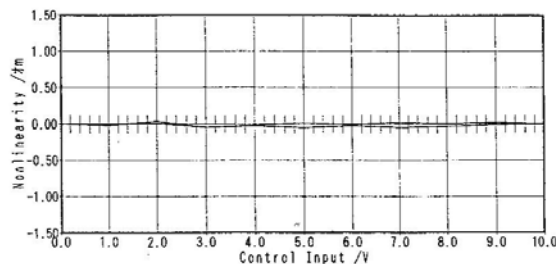
Displacement Curves



Measurement Results

Ctrl In /V	Output + /µm	Output - /µm	nonlin /µm	nonlin /µm
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.000	9.967	9.975	-0.004	-0.025
2.000	20.009	20.039	0.006	0.036
3.000	29.949	29.949	-0.052	-0.052
4.000	39.984	39.974	-0.017	-0.027
5.000	50.014	49.948	0.013	-0.054
6.000	59.964	59.978	-0.008	-0.024
7.000	70.024	69.954	0.022	-0.048
8.000	80.005	79.968	0.002	-0.034
9.000	90.024	89.988	0.021	-0.015
10.000	100.003	100.003	0.000	0.000

Nonlinearity



Control Function:

Displacement/µm = 1.000035*Ctrl_In - 0.0000

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล	นายวิรุณ เล้าพรพิชยานุวัฒน์
วัน เดือน ปี และสถานที่เกิด	24 พฤศจิกายน พ.ศ.2519 กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	
ระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2541
ประสบการณ์ทำงาน	นักมาตรวิทยา ห้องปฏิบัติการมวลและความหนาแน่น ฝ่ายมาตรวิทยาเชิงกล สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พ.ศ. 2543 ถึง ปัจจุบัน