



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของวัสดุในระดับจุลภาคด้วยแสงอาพันธ์ต่ำ

Analysis of Material Morphology in Microscopic Scale Using Low
Coherent Light

โดย: ดร. มนต์เทียน เทียนประทีป และคณะ

สิงหาคม 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของวัสดุในระดับจุลภาคด้วยแสงอาพันธ์ต่ำ

Analysis of Material Morphology in Microscopic Scale Using Low Coherent Light

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ดร. มนต์เทียน เทียนประทีป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุกคเณศ ตุงคะสมิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยภายใต้ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่นี้ สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบคุณนักวิจัยที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุกคณศ ตุงคะสมิต เป็นอย่างสูงสำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำอันทรงคุณค่า รวมถึงให้ความกรุณาเสียสละเวลาดูแลงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดีตลอดระยะเวลาโครงการวิจัย ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ด้วยดีมาตลอด อีกทั้งยังได้จัดเวทีให้นักวิจัยมีโอกาสพบปะและรับคำแนะนำจากเมธีวิจัยอาวุโส สกว. จนทำให้ผลงานวิจัยที่ได้รับจากโครงการวิจัยนี้มีโอกาสเผยแพร่ในการประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ และส่งตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่มีรายชื่ออยู่ในฐานข้อมูล scopus ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยในการพัฒนาผลงานวิจัยในอนาคตและต่อประเทศชาติต่อไป ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกๆ ท่านที่ยังไม่ได้เอ่ยนาม ผู้เป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกให้กับการทำโครงการวิจัยนี้ จนทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5280177

ชื่อโครงการ: การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของวัสดุในระดับจุลภาคด้วยแสงอาพันธ์ต่ำ

ชื่อนักวิจัย: ดร. มนต์เทียน เทียนประทีป จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail Address: Montian.T@chula.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 16 มีนาคม 2552 ถึง 15 มีนาคม 2554

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องมือวัดเชิงแสงสำหรับวัดความขรุขระและสร้างโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุในระดับจุลภาค โดยพัฒนาขึ้นจากระบบการสร้างภาพอาพันธ์เชิงแสง (OCT) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากการใช้อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดไมเคลสันแบบปรับระยะ (VSI) และซูเปอร์ลูมิเนสเซนซ์ไดโอด (SLD) งานวิจัยนี้เลือกปรับลำแสงที่ใช้ในระบบ VSI ให้เป็นลำแสงขนานและกล้องซีซีดีเก็บภาพวีร่อยการแทรกสอดที่เกิดขึ้นเพื่อลดเวลาการเก็บข้อมูล ด้วยวิธีการนี้แต่ละพิกเซลของกล้องซีซีดีจะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัดแสงที่แยกกันอย่างเป็นเอกเทศ ทำให้อินเตอร์เฟอแกรมซึ่งได้จากพิกเซลแต่ละจุดของกล้องซีซีดีจะถูกนำไปวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีวิเคราะห์สัญญาณแบบการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (CWT) จากการเปรียบเทียบผลการวัดพื้นผิวของชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก $1.8\ \mu\text{m}$ ของบริษัท VLSI กับการวิเคราะห์สัญญาณแบบการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (DFT) พบว่า ภาพพื้นผิวที่สร้างจาก CWT มีลักษณะใกล้เคียงกับพื้นผิวจริงของชิ้นงานมาตรฐานมากกว่าภาพพื้นผิวที่สร้างขึ้นจาก DFT เมื่อนำวิธี VSI และ CWT ทดสอบวัดความขรุขระของพื้นผิวสแตนเลส 316 จำนวน 3 ชิ้น และเทียบกับผลการวัดความขรุขระที่ได้จากเครื่องมือมาตรฐานรุ่น SP-500 ของบริษัท TORAY พบว่าค่าอัตราส่วนอีเอ็น (E_n) ซึ่งเป็นค่าแสดงระดับการยอมรับตามมาตรฐาน ISO/IEC Guide 43-1 ของความขรุขระที่ได้จากการวัดตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้น ด้วยวิธีทั้งสองมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จาก VSI และ CWT จึงยอมรับได้ในตอนท้ายของงานวิจัยนี้ยังนำวิธี VSI และ CWT ไปสร้างภาพพื้นผิวของตัวอย่างทั้งสามชิ้นในกรณีที่พื้นผิวของตัวอย่างทั้งหมดมีแผ่นปิดชิ้นตัวอย่างปิดทับ เมื่อเปรียบเทียบภาพพื้นผิวที่ถูกปิดทับกับพื้นผิวที่ไม่ถูกปิดทับแล้วพบว่าภาพพื้นผิวของตัวอย่างทั้งสองชนิดมีผลที่สอดคล้องกัน

คำหลัก: ความขรุขระ, ซูเปอร์ลูมิเนสเซนซ์ไดโอด, อินเตอร์เฟอเมตริแบบปรับระยะ, วิธีการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง

Abstract

Project Code: MRG5280177

Project Title: Analysis of Material Morphology in Microscopic Scale Using Low Coherent Light

Investigator: Dr. Montian TIANPRATEEP; Chulalongkorn University

E-mail Address: Montian.T@chula.ac.th

Project Period: Mar. 16th, 2009. – Mar. 15th, 2011.

An objective for this research is to develop an optical measurement tool for measuring the surface roughness and constructing the surface profile of materials in microscopic scale. This tool is developed from an optical coherence tomography (OCT), based on a vertical scanning Michelson interferometer (VSI) with a superluminescent diode (SLD). To reduce time-consuming process, a parallel light beam is set in this VSI and a CCD camera is used to take an interference fringe. With this technique, each pixel of CCD camera acted as a separated light detector. Interferogram, taken by each pixel of CCD camera, was finally analyzed by a continuous wavelet transform (CWT) analysis method. By comparing the result from measuring a 1.8 μm step-height standard plate of VLSI with the one, analyzed by a discrete Fourier transform (DFT), the surface profile, constructed by CWT, was more closed to a real sample surface than the one constructed by DFT. By applying this VSI and CWT to measure the surface roughness of three 316-stainless steel artifacts and comparing their results with ones measured from standard equipment (TORAY's SP-500). According to the measuring results of these three samples, the calculated values of E_n 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. Finally, this VSI and CWT are applied to construct surface profiles of these three samples, while their surfaces were covered with a cover slide. By comparing the profiles of covered surfaces with the uncovered ones, consistencies of their surface profiles were existed.

Keywords: Roughness, Superluminescence Diode (SLD), Vertical Scanning Interferometry (VSI), Continuous Wavelet Transform (CWT)

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญ.....	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	2
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	4
1.3 ระเบียบวิธีวิจัยและขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 แสงอาทิตย์ต่ำและอินเตอร์ฟิรอมิเตอร์แบบไมเคิลสัน	9
2.2 การวิเคราะห์รบกวนการแทรกสอดด้วยการแปลงเวฟเลขแบบต่อเนื่องและการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง	11
2.3 ค่าความไม่แน่นอนของการวัด	12
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	14
3.1 เครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการวิจัย.....	14
3.2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง.....	16
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	17
บทที่ 4 ผลการทดลอง	20
บทที่ 5 บทวิจารณ์.....	30
บทที่ 6 เอกสารอ้างอิง	33
บทที่ 7 ผลงานที่ได้จากโครงการวิจัย	34
ภาคผนวก ก	35
ผลงานที่เข้าร่วมการประชุมระดับนานาชาติ.....	35
ภาคผนวก ข.....	43
ผลงานที่คาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ	43

บทที่ 1 บทนำ

นับแต่เทคโนโลยีนาโน (Nanotechnology) เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างและการศึกษาสมบัติเฉพาะของวัสดุในระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรก็เพิ่มมากขึ้นในทุกๆ สาขาวิชา ทั้งวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ เน้นอนว่าลักษณะทางกายภาพ อาทิ ขนาด (Size) ความราบเรียบ (Flatness) และความขรุขระ (Roughness) ที่ค่าความละเอียดอยู่ในระดับจุลภาคของวัสดุดังกล่าวก็เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทราบควบคู่ไปกับการสร้างและศึกษาสมบัติเฉพาะของวัสดุนั้นๆ ด้วย นอกจากนี้ลักษณะทางกายภาพของวัสดุดังกล่าวยังสำคัญยิ่งต่อมาตรฐานการถ่ายค่าปริมาณของหน่วยพื้นฐานในระบบเอสไอ (International System of Units; SI Units) ตามข้อกำหนดขององค์การมาตรวิทยากฎหมายสากล (International Organization of Legal Metrology; OIML)[1] ซึ่งกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของหน่วยพื้นฐานต่างๆ อาทิ รูปร่าง โครงสร้าง ความหนาแน่น รวมถึงความหยาบของวัสดุที่ใช้เป็นตัวถ่ายค่าปริมาณต่างๆ เหล่านั้น อีกด้วย

แม้การวัดสัญญาณวิทยาของวัสดุในระดับจุลภาคมีหลากหลายวิธี เช่น การวัดด้วยเครื่องมือเชิงกลที่ใช้เครื่องมือปลายแหลม (Stylus Profile Instrument) สัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุ หรือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ที่ใช้การฉายลำอิเล็กตรอนลงบนพื้นผิวของวัสดุ แต่เครื่องมือดังกล่าวก็มีข้อจำกัดในเรื่องขนาดของวัสดุที่วัด หรือการเตรียมชิ้นงานด้วยวิธีพิเศษ ซึ่งอาจทำให้ชิ้นงานเสียหายและไม่สามารถนำไปใช้งานต่อได้ รวมถึงค่าใช้จ่ายที่มีราคาค่อนข้างแพง ในกรณีของชิ้นงานที่จำเป็นต้องนำไปใช้ในงานต่อ เช่น อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับถ่ายค่าปริมาณพื้นฐานในระบบเอสไอนั้น การใช้เครื่องมือวัดข้างต้นจะไม่เหมาะสมนัก ด้วยเหตุนี้ เครื่องมือวัดที่ใช้แสง ซึ่งเป็นหนึ่งในเครื่องมือที่ไม่ทำความเสียหายต่อชิ้นงานจึงจำเป็นต่อการวัดประเภทนี้

เพื่อให้ได้เครื่องมือวัดสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ไม่ทำลายชิ้นงาน และไม่มีข้อจำกัดเรื่องขนาดชิ้นงานและวิธีเตรียมชิ้นงาน รวมถึงได้เครื่องมือวัดที่ราคาไม่แพง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องมือวัดเชิงแสงสำหรับนำประยุกต์วัดความขรุขระของพื้นผิวในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร ซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพของวัสดุอย่างหนึ่งที่สำคัญยิ่งต่อการผลิตและการศึกษาสมบัติเฉพาะของวัสดุนาโนเมตรและไมโครเมตร และสำคัญต่อมาตรฐานการถ่ายค่าปริมาณพื้นฐานในระบบเอสไอตามข้อกำหนดของ OIML

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์แบบอาพันธ์ต่ำ (Low Coherence Interferometry: LCI) เป็นระบบวัดเชิงแสงประเภทหนึ่งที่ใช้แสงอาพันธ์ต่ำเป็นแหล่งกำเนิดแสงและได้รับความนิยมสูงในปัจจุบัน จากการอาศัยสมบัติของความกว้างแถบสเปกตรัมของแสงขาว (White Light) หรือแสงอาพันธ์ต่ำที่ได้จากหลอดฮาโลเจน (Halogen Lamp) หรือ แสงเลเซอร์ชนิดเฟมโตวินาที (femto-second laser) และอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ชนิดไมเคิลสัน (Michelson Interferometer: MI) ทำให้ P. Pavlíček[2] วัดค่าความขรุขระของพื้นผิวและโครงร่างความสูง (Height Profile) ในระดับไมโครเมตรของกระจก รวมถึงเหรียญยูโร และซิลิกอนเวเฟอร์ได้ แม้ว่าหลอดฮาโลเจนจะผลิตแสงขาวซึ่งเป็นแสงอาพันธ์ต่ำที่มีความเข้มสูงได้ แต่ขนาดของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิดเฟมโตวินาทีและความร้อนที่เกิดจากหลอดฮาโลเจนก็เป็นอุปสรรคต่อการใช้งาน รวมถึงราคาที่ค่อนข้างแพงทำให้งานวิจัยดังกล่าวจำกัดอยู่ในวงแคบและไม่แพร่หลายในประเทศไทยเท่าใดนัก

ข้อจำกัดที่เกิดจากการใช้หลอดฮาโลเจนและแสงเลเซอร์ชนิดเฟมโตวินาทีในระบบ LCI นั้นได้ลดลงไปเป็นอันมาก เมื่อผู้ผลิตได้พัฒนาไดโอดที่มีชื่อว่า Superluminescence Diode (SLD) ซึ่งเป็นไดโอดที่ให้แสงอาพันธ์ต่ำที่มีราคาถูกลง นอกจากนี้ SLD ยังทำให้ระบบ LCI เล็กลงมากด้วยการที่ SLD มีระยะอาพันธ์ (Coherent Length) ในระดับสิบล้านไมโครเมตร เมื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงของระบบอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ชนิดไมเคิลสันแบบปรับระยะ (Vertical Scanning Michelson Interferometer: VSI) ซึ่งเป็นระบบที่สร้างภาพอาพันธ์เชิงแสง (Optical Coherence Tomography: OCT) ทำให้ K. Divakar Rao และคณะ[3] สร้างภาพตัดขวางของกระจกตาปลา Zebrafish ที่มีความหนา 26 mm และ B. Choi และคณะ[4] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผิวหนังของหนูแฮมสเตอร์ขณะนำไปแช่แข็งโดยถ่ายภาพตัดขวางของผิวหนังได้

จากการศึกษางานวิจัยของ C. J. Tay และคณะ[5] เกี่ยวกับการสร้างภาคตัดขวางของกระจกเงาเรียบและหาความหนาของวัสดุโปร่งใสซึ่งมีค่าดัชนีหักเห 1.65 ด้วยการใช้นระบบ VSI ซึ่งใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสงขาวและใช้ระบบแสงขนานที่เสมือนว่าความเข้มแสงที่วัดได้ในแต่ละพิกเซลของกล้องซีซีดีที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงขนาดเล็กที่สะท้อนจากพื้นผิวของชิ้นงานแต่ละจุด พบว่า การวิเคราะห์สัญญาณของรีวอยการแทรกสอดที่ได้จาก VSI ด้วยวิธีการแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform: CWT) ช่วยให้คณะวิจัยวัดความหนาของวัสดุโปร่งแสงได้แม่นยำกว่าวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform: DFT)

นอกจากนี้ M. Li และคณะ[6] ยังเปรียบเทียบผลการวัดความสูงต่ำของเกรตติงจากการใช้ระบบ VSI และวิธีวิเคราะห์รีวอยการแทรกสอดแบบ CWT และ DFT กับผลที่ได้จากเครื่องวัด WYKO NT1100 Profiler ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ พบว่า ความสูงต่ำที่วัดได้จากการวิเคราะห์แบบ CWT เมื่อเทียบกับเครื่องวัด WYKO มีความแตกต่างกันเพียง 0.5 เปอร์เซ็นต์

ในขณะที่ความสูงต่ำที่วัดได้จากการวิเคราะห์แบบ DFT เมื่อเทียบกับเครื่องวัด WYKO แล้วมีความแตกต่างกัน 1.6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความขรุขระของพื้นผิวเกรตติงแบบรากที่สองของผลเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Roughness: RMS Roughness) ที่คำนวณได้จากทั้งสามวิธี พบว่าความขรุขระของพื้นผิวเกรตติงที่ใช้วิธีวิเคราะห์แบบ CWT DFT และเครื่อง WYKO มีค่าเป็น 182 นาโนเมตร 200 นาโนเมตร และ 125 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดโดยอาศัยหลักการพื้นฐานของ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) ของทั้งสามวิธีแล้วพบว่า ค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ CWT มีค่าน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์

ด้วยเหตุผลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะศึกษาและพัฒนากระบวนการวัดความขรุขระและสร้างโครงร่างพื้นผิว (Surface Profile) ของวัสดุ โดยใช้ระบบ VSI ที่มี SLD เป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ต่ำแทนแสงขาวจากหลอดฮาโลเจนและเลเซอร์ชนิดเฟมโตวินาที และใช้วิธีวิเคราะห์สัญญาณแบบ CWT นอกจากนี้เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการวัดปริมาณดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะจัดแสงที่ใช้ในระบบเป็นแสงขนานแทนการโฟกัสแสงไปยังตำแหน่งต่างๆ บนพื้นผิวของวัสดุที่ละเอียด

เนื่องจากความขรุขระของพื้นผิวเป็นหนึ่งในตัวแปรที่มีผลต่อความเสถียรเชิงมวลของตุ้มน้ำหนักมาตรฐานที่ใช้ถ่วงค่ามวลของระบบเอสไอตามมาตรฐานของ OIML ซึ่งตุ้มน้ำหนักมาตรฐานนี้ทำจากสแตนเลส 316 (316-Stainless) ดังนั้นจึงงานตัวอย่างจำนวน 3 ชิ้น ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงสร้างขึ้นจากสแตนเลส 316 ที่มีความขรุขระของพื้นผิวต่างกัน เพื่อใช้ทดสอบระบบการวัดเชิงแสงที่สร้างขึ้นและศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้ระบบดังกล่าวทดสอบความขรุขระพื้นผิวของตุ้มน้ำหนักมาตรฐานแทนการใช้เครื่องมือปลายแหลมที่สร้างความเสียหายแก่พื้นผิวของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน และแทนการใช้เครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ที่มีราคาแพง โดยผลการวัดความขรุขระที่ได้จากระบบการวัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ของบริษัท TORAY รุ่น SP-500 และจะถูกนำไปคำนวณค่าความไม่แน่นอนตามหลักการพื้นฐานของ GUM และ European Cooperation for Accreditation of Laboratories (EAL)[7]

สมบัติพิเศษอย่างหนึ่งของแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ต่ำที่ต่างไปจากแสงอาพันธ์สูงอื่นๆ เช่น แสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออน (He-Ne Laser) คือ การมีระยะอาพันธ์ที่ต่ำ สมบัติพิเศษนี้เมื่อใช้ร่วมกับ MI จะทำให้สังเกตการแทรกสอดของพื้นผิวที่อยู่ใต้ชั้นวัสดุโปร่งใสบางๆ ได้ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบดังกล่าวไปวิเคราะห์พื้นผิวที่ถูกปิดทับโดยไม่ทำลายวัสดุที่ปิดทับ งานวิจัยนี้จึงนำวิธี VSI และการวิเคราะห์แบบ CWT ไปประยุกต์สร้างโครงร่างพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งสามชิ้นทั้งก่อนและหลังการปิดทับด้วยกระจกปิดชิ้นตัวอย่าง (Cover Slide) มาตรฐานที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการและมีความหนา 162.95 นาโนเมตร

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการวิจัยนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1.2.1 สร้างเครื่องมือวัดแบบไม่ทำลายโดยใช้แสงอาพันธ์ต่ำที่เกิดจากไดโอดชนิด SLD และระบบ VSI ในการวัดสัญญาณวิทยาของวัสดุในระดับจุลภาค

1.2.2 พัฒนารูปแบบการวิเคราะห์หรือการแทรกสอดแบบ CWT ที่มี SLD ซึ่งให้แสงอาพันธ์ต่ำเป็นแหล่งกำเนิดแสง เพื่อวัดสัญญาณวิทยาของวัสดุในระดับจุลภาค

1.2.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระบบการวัดโดยใช้แสงอาพันธ์ต่ำและความถูกต้องแม่นยำของเครื่องมือวัด

1.2.4 ประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดแบบไม่ทำลายโดยใช้แสงอาพันธ์ต่ำที่เกิดจากไดโอดชนิด SLD และระบบ VSI กับพื้นผิวที่มีวัสดุโปร่งใสบางปิดทับ โดยไม่ทำลายชิ้นงาน

1.3 ระเบียบวิธีวิจัยและขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เน้นการวิเคราะห์ค่าความขรุขระของวัสดุในระดับจุลภาคโดยไม่ทำลายชิ้นงาน ด้วยระบบ VSI ซึ่งเป็นพื้นฐานของระบบ OCT แบบแสงขนานและมีแสงอาพันธ์ต่ำที่สร้างขึ้นจาก SLD เป็นแหล่งกำเนิดแสง ร่วมกับการวิเคราะห์หรือการแทรกสอดแบบ CWT

ชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำขึ้นจากสแตนเลส 316 ซึ่งมีความขรุขระของพื้นผิวแตกต่างกัน จำนวน 3 ชิ้น โดยผลการวัดความขรุขระที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ของบริษัท TORAY รุ่น SP-500 และคำนวณค่าความไม่แน่นอนตามหลักการพื้นฐานของ GUM และ EAL แล้วจึงนำข้อมูลความขรุขระพื้นผิวดังกล่าวไปสร้างโครงสร้างพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทั้งสามชิ้น เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการนำระบบ VSI และวิธีวิเคราะห์สัญญาณแบบ CWT ดังกล่าว ไปวัดชิ้นงานตัวอย่างเดิมทั้งสามชิ้นขณะที่มีกระจกปิดชิ้นตัวอย่างปิดทับ ทั้งนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำแหล่งกำเนิดแสงที่มีระยะอาพันธ์สั้นไปสร้างโครงสร้างพื้นผิวของชิ้นงาน ขณะที่วัสดุโปร่งแสงบางๆ ปิดทับได้โดยไม่ต้องทำลายวัสดุปิดทับนั้น การทำงานวิจัยนี้สรุปได้เป็นลำดับขั้นดังนี้

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีของการวัดแบบ OCT ที่มีพื้นฐานมาจากระบบ VSI โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ต่ำจาก SLD พร้อมทั้งความเป็นไปได้ในการจัดตั้งเครื่องมือเพื่อการวัดแบบดังกล่าว

1.3.2 ศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงแบบ CWT รวมถึงการแปลงแบบ DFT

1.3.3 จัดตั้งระบบการวัดแบบ VSI พร้อมทั้งทดสอบการวิเคราะห์สัญญาณแบบ CWT และ DFT ด้วยชิ้นงานพื้นฐานที่ไม่มีความซับซ้อน เพื่อเตรียมความพร้อมในการวัดจริง

1.3.4 เตรียมชิ้นงานสแตนเลส 316 ที่มีความขรุขระพื้นผิวแตกต่างกัน

1.3.5 นำสัญญาณที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยการแปลงแบบ CWT และวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนตามมาตรฐานของ GUM และ EAL พร้อมกับสร้างภาพโครงร่างพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งสาม

1.3.6 นำชิ้นงานไปวัดด้วยเครื่องมือวัดของบริษัท TORAY รุ่น SP-500 เพื่อเปรียบเทียบผล

1.3.7 นำกระจกปิดชิ้นตัวอย่างปิดชิ้นงานสแตนเลส 316 แล้วใช้เครื่องมือวัดสร้างภาพโครงร่างพื้นผิวของชิ้นงานสแตนเลส 316 เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากข้อ 1.3.5

1.3.8 สรุปผลและเผยแพร่ผลงานในการประชุมและวารสารวิชาการนานาชาติ

1.3.9 เขียนรายงาน

1.4 แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ

กิจกรรม	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ปีที่ 1												
ศึกษาทฤษฎีของระบบ การวัดแบบ OCT												
ศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์ สัญญาณด้วยการแปลง แบบ CWT และ DFT												
จัดตั้งระบบการวัดแบบ OCT พร้อมทั้งทดสอบการ วิเคราะห์สัญญาณแบบ CWT และ DFT												
เตรียมชิ้นงานสแตนเลส 316 สำหรับวัดความขรุขระ												
คำนวณค่าความขรุขระของ พื้นผิวด้วยวิธี CWT และค่า ความไม่แน่นอน												

กิจกรรม	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ปีที่ 2												
นำข้อมูลสร้างภาพโครงสร้างพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง												
นำชิ้นงานไปวัดค่าความขรุขระด้วยเครื่องมือรุ่น SP-500 เพื่อเปรียบเทียบ												
สร้างภาพโครงสร้างพื้นผิวของชิ้นงานสเตนเลส 316 ที่มีกระจกปิดชิ้นตัวอย่างปิดทับ พร้อมกับเปรียบเทียบผล												
สรุปผลและเผยแพร่ผลงานในการประชุมและวารสารวิชาการนานาชาติ												
เขียนรายงาน												

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้เครื่องมือที่ใช้วัดค่าความขรุขระของวัสดุในระดับจุลภาคที่ราคาไม่แพง และมีความแม่นยำสูงโดยไม่ต้องทำลายชิ้นงานที่ต้องการวัด

1.5.2 ได้องค์ความรู้พื้นฐานของการวัดในระบบ VSI และการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงแบบ CWT

1.5.3 พัฒนาเทคนิคที่ใช้วัดค่าความขรุขระของวัสดุในระดับจุลภาค เพื่อสร้างภาพโครงสร้างพื้นผิวแบบสามมิติเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ในงานวิจัยอื่นๆ

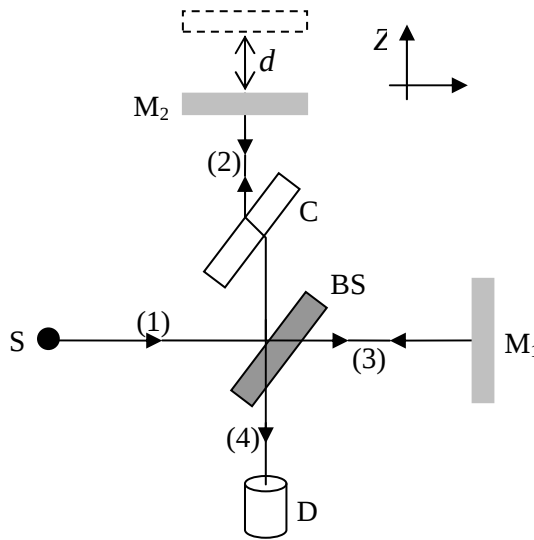
1.5.4 นำไปเป็นความรู้ต่อยอดเพื่อช่วยในงานวิจัยสาขาอื่นๆ อาทิ ทางชีววิทยา เพื่อศึกษาการทำงานของอวัยวะขนาดเล็กภายในของสิ่งมีชีวิต หรือสร้างภาพตัดขวางของอวัยวะขนาดเล็กของสิ่งมีชีวิต เป็นต้น

1.5.5 นำไปประยุกต์ในภาคอุตสาหกรรมอื่นๆ อาทิ การสร้างระบบตรวจสอบ
เครื่องหมายการค้าขนาดเล็กที่มีวัสดุโปร่งแสงปิดทับ เพื่อป้องกันการลอกเลียนแบบ เป็นต้น

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แสงอาพันธ์ต่ำและอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคิลสัน

อินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคิลสัน (Michelson Interferometer: MI) เป็นเครื่องมือสร้างริ้วการแทรกสอดของแสงแบบแบ่งแอมพลิจูดที่นำเสนอโดย อัลเบิร์ต ไมเคิลสัน (Albert Michelson) เมื่อปี ค.ศ. 1881 ระบบ MI ที่แสดงในรูป 2-1 เริ่มต้นด้วยการให้แสงเคลื่อนผ่านไปยังอุปกรณ์แยกลำแสง (Beamsplitter: BS) เพื่อแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดออกเป็นสองลำ ลำแสงลำหนึ่งจะเคลื่อนไปตกกระทบบนกระจกแผ่นที่หนึ่ง (M_1) และลำแสงอีกลำหนึ่งจะไปตกกระทบบนกระจกแผ่นที่สอง (M_2) หลังจากทีลำแสงทั้งสองสะท้อนและมารวมกันอีกครั้งที่อุปกรณ์แยกลำแสงเดิม พบว่าริ้วรอยการแทรกสอดจะเกิดขึ้นที่อุปกรณ์รับภาพ (D) เมื่อระยะห่างระหว่างกระจกทั้งสองถึงแผ่นแยกลำแสงต้องมีระยะต่างกันหรือระยะ d ไม่เกินระยะอาพันธ์ของแสงจากแหล่งกำเนิด



รูป 2-1 ระบบอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคิลสัน

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่ได้จากริ้วรอยการแทรกสอดกับระยะที่กระจกเคลื่อนที่เข้าและออกหรือระยะตามแนวแกน Z เขียนได้เป็น

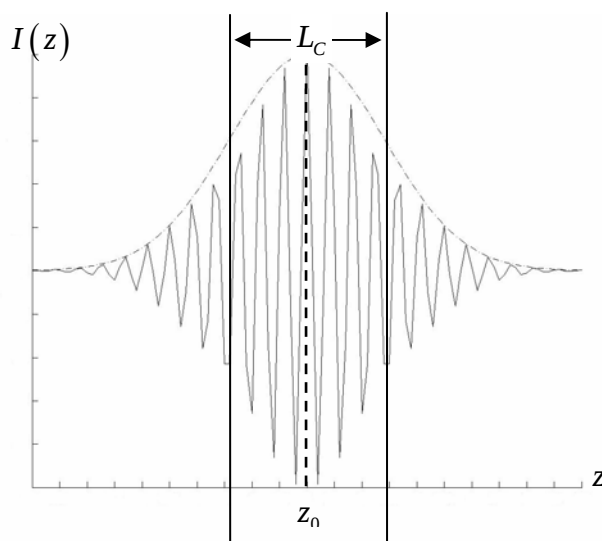
$$I_D(z) = I_0 + I_0 \exp \left[- \left(\frac{z - z_0}{L_C} \right)^2 \right] \cos \left[\frac{4\pi(z - z_0)}{\lambda_0} \right] \quad (2-1)$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบกับกระจกทั้งสอง

z_0 คือ ระยะที่กระจกทั้งสองด้านเท่ากัน

และ z คือ ระยะกระจกใดๆ

และมีกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง I และระยะกระจก z ซึ่งเป็นรีวิการแทรกสอดในโดเมนเวลา ดังแสดงในรูป 2-2



รูป 2-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง I กับระยะกระจก z ใดๆ

ระยะอาพันธ์ L_C แสงจากแหล่งกำเนิดสัมพันธ์กับกราฟรีวิการแทรกสอดในโดเมนเวลาดังแสดงในรูป 2-2 และสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$L_C = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda} \quad (2-2)$$

เมื่อ c คือ อัตราเร็วแสงในสุญญากาศ

λ_0 คือ ความยาวคลื่นศูนย์กลาง (Central Wavelength) ของแหล่งกำเนิดแสง

และ $\Delta \lambda$ คือ ความกว้างแถบสเปกตรัม (Spectral Width) ของแหล่งกำเนิดแสง

กรณีแสงอาพันธ์ต่ำที่มีระยะอาพันธ์สั้น พบว่า ระยะที่เกิดรีวิการแทรกสอดในโดเมนของเวลาจะสั้นไปด้วย จากเหตุผลดังกล่าว ในกรณีที่ระบบ MI มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงอาพันธ์ต่ำ และเปลี่ยนกระจกด้านหนึ่งใน MI ด้วยตัวกลางโปร่งใสบางๆ ซ้อนกัน เมื่อบันทึกค่าความเข้มแสงที่เปลี่ยนไปกับระยะทางตามแนวแกน Z ในแต่ละจุดของพื้นที่ผิว ซึ่งเป็นการบันทึกแบบปรับ

ระยะ (Vertical Scanning) ที่เรียกรวมว่า ระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดไมเคิลสันแบบปรับระยะ (Vertical Scanning Michelson Interferometer: VSI) ริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นเนื่องจากระยะที่พื้นผิวของตัวกลางชั้นต่างๆ แตกต่างจากระยะของกระจกอีกด้านหนึ่งที่เหลือที่ต่อไปจะเรียกว่า กระจกอ้างอิง (Reference Mirror) ไม่เกินระยะอาพันธ์ของแหล่งกำเนิดแสง ก็จะแยกจากกันออกอย่างชัดเจน และถ้าการหาตำแหน่ง z_0 ของริ้วการแทรกสอดดังกล่าว ซึ่งแทนระยะที่เท่ากันของพื้นผิวดังกล่าวในแต่ละชั้นกับกระจกอ้างอิง มีความแม่นยำ การหาความหนาของตัวกลางชั้นต่างๆ ก็มีค่าแม่นยำด้วยเช่นกัน[8]

2.2 การวิเคราะห์ริ้วรอยการแทรกสอดด้วยการแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่องและการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง

จากความต้องการหาตำแหน่ง z_0 ที่แม่นยำในการวัดด้วยระบบ VSI ที่ใช้แสงอาพันธ์ต่ำเป็นแหล่งกำเนิดแสง ได้นำไปสู่การวิเคราะห์ริ้วการแทรกสอดที่ได้จากรูป 2-2 ที่ปกตินิยมนำสัญญาณดังกล่าวไปแปลงฟูเรียร์เพื่อหาความเข้มของริ้วรอยการแทรกสอดในโดเมนความถี่ แล้วแปลงกลับมาเป็นความเข้มในโดเมนเวลาอีกครั้งเพื่อหาตำแหน่งของความเข้มขอบ (envelop) สูงสุดของสัญญาณที่วัดได้ แต่เนื่องจากสัญญาณที่วัดได้เป็นสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องเราจึงใช้การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง และเรียกวิธีหาตำแหน่งของความเข้มขอบของสัญญาณที่วัดได้นี้ว่า การวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform: DFT)

แต่การวิเคราะห์สัญญาณแบบ DFT นี้อาจผิดพลาดได้เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของข้อมูลที่วิเคราะห์ เพื่อให้การคำนวณตำแหน่งความเข้มขอบสูงสุดของสัญญาณมีความแม่นยำขึ้น ความต่างเฟส φ ที่แตกต่างกันระหว่างตำแหน่งที่ความเข้มขอบของสัญญาณสูงสุดจริง (z_R) กับตำแหน่งที่ความเข้มขอบของสัญญาณที่วัดได้ (z_M) เมื่อใช้การแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform: CWT) กับสัญญาณที่วัดได้ จึงถูกนำไปแก้ไขตำแหน่ง z_M ให้แม่นยำขึ้น[5]

เนื่องจากสัญญาณริ้วการแทรกสอดมีลักษณะเป็นแบบเกาส์เซียน (Gaussian Shape) และเวฟเลทแบบมอร์เลท (Morlet Wavelet) เป็นเวฟเลทแม่ (Mother Wavelet) ที่มีรูปร่างคลื่นอ้างอิงจากรูปร่างเกาส์เซียน ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เวฟเลทแม่แบบมอร์เลทกับการแปลงแบบ CWT ซึ่งสมการเวฟเลทแบบมอร์เลทเขียนได้เป็น

$$h(\eta) = \left[\exp(i\omega_0\eta) - \exp\left(-\frac{\omega_0^2}{2}\right) \right] \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) \quad (2-3)$$

เมื่อ η คือ พารามิเตอร์เวลาที่ไม่มิตติ (Nondimensional Time Parameter)

และ ω_0 คือ ความถี่ที่ไม่มิตติ (Nondimensional Frequency)

หลังจากการนำสัญญาณซึ่งเขียนแทนด้วยสมการ (2-1) มาแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่องโดยอาศัยเวฟเลทมอร์เลทแล้ว พบว่า มุมเฟส φ ของค่าสัญญาณที่ได้จากการแปลงเวฟเลทที่ตำแหน่ง z ใดๆ ($W_{a,b}(z)$) จะหาได้จากสมการ

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}\{W_{a,b}(z)\}}{\text{Re}\{W_{a,b}(z)\}} \right) \quad (2-4)$$

เมื่อ $\text{Re}\{W_{a,b}(z)\}$ และ $\text{Im}\{W_{a,b}(z)\}$ คือ จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของ $W_{a,b}(z)$ ตามลำดับ โดยมุมเฟส φ ของสัญญาณดังกล่าวสัมพันธ์กับตำแหน่งความเข้มสูงสุด (z_R) ที่ได้จากสัญญาณที่วัด (z_M) ดังสมการ

$$z_R = z_M - \frac{\lambda_0}{4\pi}(\varphi) \quad (2-5)$$

2.3 ค่าความไม่แน่นอนของการวัด

ในปี ค.ศ. 1990 องค์การชั่ง ตวง วัด ระหว่างประเทศ (Bureau International des Poids et Measures: BIPM) ร่วมกับองค์กรระบบคุณภาพ (International Organization for Standardization: ISO) แนะนำให้ใช้ความไม่แน่นอนของการวัดเป็นตัวแปรบอกความน่าเชื่อถือของผลการวัดตามหลักการพื้นฐานของ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) และ European Cooperation for Accreditation of Laboratories (EAL) ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้[7]

ถ้ากำหนดให้ปริมาณ Y เป็นผลที่ได้จากการวัดที่ขึ้นอยู่กับปริมาณอินพุต x_i ใดๆ แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติค่าความไม่แน่นอนของปริมาณอินพุตเหล่านี้วัดไม่ได้ ดังนั้น ปริมาณ Y จึงประมาณด้วยค่า y และค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded Uncertainty) U หรือ $Y = y \pm U$ โดยค่าความไม่แน่นอนขยาย U จะคำนวณได้จากค่าความไม่แน่นอนรวม (Combined Standard Uncertainty) $u_c(y)$ และตัวประกอบครอบคลุม (Coverage Factor) k ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการ ดังสมการ

$$U = ku_c(y) \quad (2-6)$$

เมื่อ $u_c(y)$ หาได้จากค่าความไม่แน่นอนย่อยของแต่ละสาเหตุ $u(x_i)$ แบบรากที่สองของผลรวมของค่าที่ยกกำลังสอง (Root Sum of the Square) ดังสมการ

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)} \quad (2-7)$$

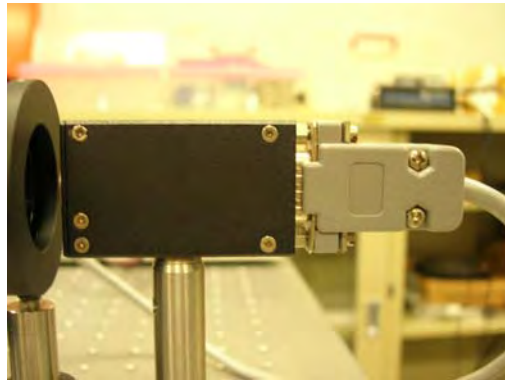
โดยที่ $u(x_i)$ ต้องมีหน่วยเดียวกันและมีระดับความเชื่อมั่นเท่ากัน และ c_i คือ สัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity Coefficient)

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 แหล่งกำเนิดแสงซูเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอด

แหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ต่ำในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ซูเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอด (Superluminescent diode: SLD) ของบริษัท Superlum[9] ที่มีความยาวคลื่น 830 nm ความกว้างของสเปกตรัมมีค่าเท่ากับ 15 nm ความยาวคลื่นอาพันธ์ (Coherence length) 20 μm และกำลัง (Power) เท่ากับ 17.5 mW



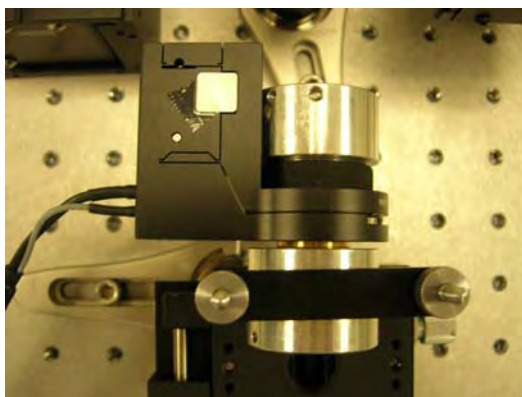
รูป 3-1 แหล่งกำเนิดแสงซูเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอด

3.1.2 อุปกรณ์แยกลำแสง

อุปกรณ์แยกลำแสง (Beam Splitter: BS) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบไมโพลาไรซ์และแบ่งลำแสงแบบ 50:50

3.1.3 เพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์

เพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ (Piezoelectric Actuator; PZT) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับยึดกระจกหรือชิ้นงานที่ต้องการทดสอบเพื่อเลื่อนระยะหาความเข้มแสงในแต่ละพิกเซล ซึ่งมีลักษณะดังรูป 3-2



รูป 3-2 เพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์

3.1.4 ชั้นงานตัวอย่าง

ชั้นงานตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสองชุด ชุดแรกเป็นชั้นงานมาตรฐานขนาดความลึก $1.8\ \mu\text{m}$ ของบริษัท VLSI ทำจากซิลิกอนออกไซด์เคลือบผิวด้วยโครเมียม สำหรับใช้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Discrete Fourier Transform: DFT) และการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform: CWT) ชั้นงานมาตรฐานดังกล่าวมีลักษณะดังแสดงไว้ในรูป 3-3



รูป 3-3 ชั้นงานมาตรฐานขนาดความลึก $1.8\ \mu\text{m}$

ชุดที่สองเป็นชั้นตัวอย่างที่สร้างขึ้นจากสแตนเลส 316 ผิวขัดมัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $25.4\ \text{mm}$ หนา $6.0\ \text{mm}$ จำนวน 3 ชั้น ดังรูป 3-4 ชั้นงานตัวอย่างชุดนี้ใช้สำหรับวัดความขรุขระพื้นผิวและทดสอบความแม่นยำของเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ด้วยการเปรียบเทียบกับค่าความขรุขระพื้นผิวที่วัดได้จากชั้นตัวอย่างเดียวกันด้วยเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ของบริษัท TORAY รุ่น SP-500



รูป 3-4 ชิ้นงานตัวอย่างสแตนเลส 316

3.1.5 กล้องซีซีดี

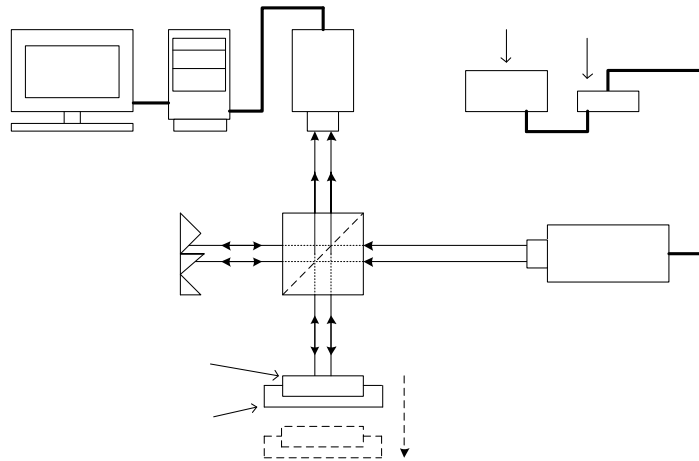
กล้องซีซีดี (CCD Camera) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัท Sony รุ่น XCD-50CR ที่มีความละเอียดในการเก็บภาพนิ่งขนาด 640x480 พิกเซล

3.1.6 กระจกปิดชิ้นตัวอย่าง

กระจกปิดชิ้นตัวอย่าง (Cover Slide) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัท MENSEL-GLASER และมีค่าดัชนีหักเหเป็น 1.5

3.2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

ระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดไมเคลสันแบบปรับระยะ (Vertical Scanning Michelson Interferometer: VSI) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ติดตั้งอยู่บนโต๊ะทดลองทางแสงดังแผนภาพในรูป 3-5 โดยลำแสงจาก SLD จะเคลื่อนผ่านช่องรูเข็มเพื่อปรับระดับความเข้มแสง และผ่านต่อมายังเลนส์นูนเพื่อทำให้ลำแสงขนานก่อนเข้า BS แล้วแยกลำแสงออกเป็น 2 ลำ โดยลำแสงที่หนึ่งจะสะท้อนทำมุม 90 องศา เข้าสู่กระจกที่ทำหน้าที่เป็นกระจกอ้างอิงซึ่งติดตั้งอยู่บน PZT ที่เลื่อนเข้าออกตามแนวแกน Z เพื่อหาตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุดของแต่ละพิกเซลที่ขึ้นกับระยะ z ส่วนลำแสงที่สองจะตกกระทบกับชิ้นงานตัวอย่าง จากนั้นลำแสงทั้งสองจะสะท้อนกลับมาสู่ BS อีกครั้งจนเกิดเป็นรบกวนการแทรกสอดซึ่งบันทึกได้ด้วยกล้องซีซีดี



รูป 3-5 แผนภาพการติดตั้งระบบการวัดแบบ vsi

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

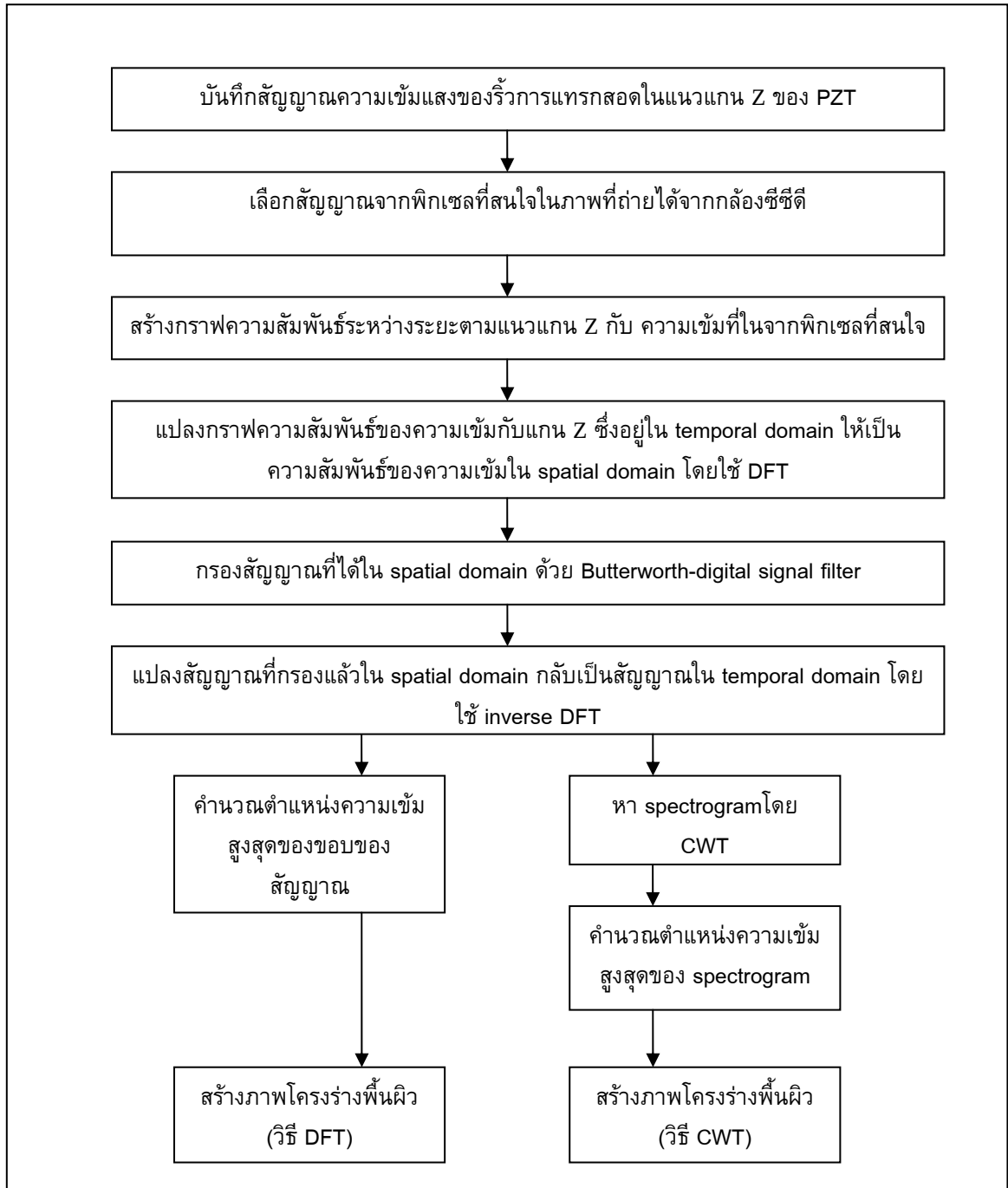
การหาค่าความขรุขระและสร้างโครงร่างพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนสรุปได้ดังแผนภาพในรูป 3-6 โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสามตอน กล่าวคือ

3.3.1 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สัญญาณแบบ DFT และ CWT

การทดลองตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณแบบ DFT และ CWT โดยนำวิธีวิเคราะห์สัญญาณทั้งสองมาวิเคราะห์วีรรอยการแทรกสอดที่ถ่ายได้จากการใช้ชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก $1.8 \mu\text{m}$ ของบริษัท VLSI เป็นชิ้นงานตัวอย่าง

3.3.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สัญญาณแบบ CWT กับเครื่องมือวัดของบริษัท TORAY รุ่น SP-500

การทดลองตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณแบบ CWT กับเครื่องมือวัดของบริษัท TORAY รุ่น SP-500 ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ อีกทั้งยังเป็นการยืนยันความเป็นไปได้ที่จะนำกระบวนการวัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไปใช้กับการวัดความขรุขระของตุ่มน้ำหนักมาตรฐานที่ผลิตขึ้นจากสแตนเลส 316 ดังนั้นการทดลองตอนนี้จะเลือกใช้ชิ้นตัวอย่างที่สร้างขึ้นจากสแตนเลส 316 ที่มีความขรุขระพื้นผิวต่างกันจำนวน 3 ชิ้น



รูป 3-6 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง

3.3.3 การเปรียบเทียบผลการวัดชิ้นงานตัวอย่างที่มีและไม่มีวัสดุโปรงใสบางปิดทับ

การทดลองตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ในการนำเอากระบวนการวัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไปใช้หาค่าความขรุขระและโครงสร้างของพื้นผิวของวัสดุที่มีวัสดุโปรงใสบางปิดทับ ดังนั้นการทดลองตอนนี้จึงเลือกใช้แผ่นกระจกปิดชิ้นตัวอย่าง (Cover Slide) มาปิดทับผิวหน้าของชิ้นงานตัวอย่างที่สร้างขึ้นจากสแตนเลส 316 ทั้งสามชิ้นที่ใช้ในการทดลองข้อ 3.3.2 จากนั้นจึงใช้ระบบการวัดที่ใช้เดิมสร้างภาพโครงสร้างพื้นผิวและหาค่าความขรุขระพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งสามอีกครั้งแล้วนำไปเปรียบเทียบผลที่ได้จากข้อ 3.3.2

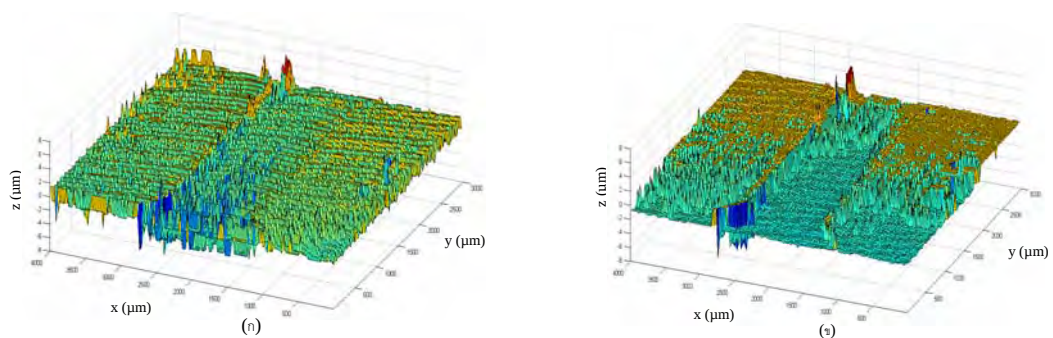
เมื่อคำนวณค่าความขรุขระพื้นผิวที่วัดได้ในการทดลองทั้งสามตอนแล้ว ค่าความขรุขระและพารามิเตอร์ต่างๆ จะถูกนำไปคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดตามหลักการพื้นฐานของ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) และ European Cooperation for Accreditation of Laboratories (EAL)[7] เพื่อยืนยันผลที่คำนวณได้ต่อไป

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สัญญาณแบบ DFT และ CWT

การเปรียบเทียบค่าความขรุขระพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณแบบ DFT และ CWT ในงานวิจัยนี้จะใช้การแทรกสอดที่ได้จากความสัมพันธ์ของความเข้มแสงที่จุดต่างๆ ของพื้นผิวของชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ของบริษัท VLSI กับระยะตามแนวแกน Z ซึ่งอยู่ในโดเมนเวลาและวัดได้จากระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดไมเคิลสันแบบปรับระยะ (Vertical Scanning Michelson Interferometer: VSI) ที่มีซูเปอร์ลูมิเนสเซนส์ไดโอด (Superluminescent Diode: SLD) เป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ต่ำ

สัญญาณความเข้มในแต่ละจุดของพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้เกิดจากการเฉลี่ยค่าความเข้มในพื้นที่ 4x4 พิกเซล เพื่อลดผลกระทบจากการกระเจิงของแสงที่ตกกระทบกับ CCD ในแต่ละจุด จากนั้นจึงนำผลการแทรกสอดที่วัดได้ในโดเมนเวลา (temporal domain) ที่ขึ้นกับระยะ z ของการเลื่อนกระจกอ้างอิงของ PZT ในแต่ละจุดของพื้นผิวมาวิเคราะห์สัญญาณแบบ DFT และ CWT ดังที่กล่าวถึงในตอนต้น แล้วจึงนำผลลัพธ์ความสูงต่ำของพื้นผิวในแต่ละจุดมาเขียนภาพโครงร่างพื้นผิว (Surface Profile) แบบสามมิติ ด้วยวิธีดังกล่าวภาพโครงร่างพื้นผิวของชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ของบริษัท VLSI ที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณแบบ DFT และ CWT ของพื้นที่ขนาด 4000x3000 μm แสดงได้ดังรูป 4-1



รูป 4-1 โครงร่างพื้นผิวของชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก 1.8 μm ของบริษัท VLSI ด้วยการวิเคราะห์แบบ (ก) DFT (ข) CWT

จากโครงร่างพื้นผิวของชิ้นงานมาตรฐานที่แสดงในรูป 4-1 จะเห็นว่าแม้จะใช้สัญญาณของรีเวอร์บที่ถ่ายด้วยกล้องซีซีดีในคราวเดียวกัน แต่การวิเคราะห์แบบ DFT ให้โครงร่างพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างในรูป 4-1 (ก) ได้ไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์แบบ CWT ซึ่งแสดงไว้ในรูป 4-1 (ข) และเมื่อเทียบกับพื้นผิวของชิ้นงานมาตรฐานจึงพบว่า โครงร่างพื้นผิวในรูป 4-1 (ข) ให้ภาพโครงร่างพื้นผิวที่ใกล้เคียงกว่า จากการคำนวณความลึกของร่องในชิ้นงานมาตรฐานจากโครงร่างพื้นผิวที่ได้จากรูป 4-1 (ข) 20 ตำแหน่ง พบว่า ค่าเฉลี่ยของความลึกที่ได้มีค่า $2.064\text{ }\mu\text{m}$

สำหรับการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดนี้มีพื้นฐานมาจาก Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) และ European Cooperation for Accreditation of Laboratories (EAL)[7] พบว่า ในงานวิจัยนี้มีแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนจากสมการการคำนวณค่าความสูงต่ำที่แท้จริงที่เขียนได้เป็น

$$z_R = z_M - \frac{\lambda_0}{4\pi} \phi$$

ซึ่งจะเห็นว่าในสมการดังกล่าวมีแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนมีด้วยกัน 2 แหล่ง คือ ค่าการคำนวณมุมเฟส (Phase Angle, ϕ) และค่าความยาวคลื่นศูนย์กลาง (Central Wavelength, λ_0) ส่วนแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนจากระบบการวัดในงานวิจัยนี้มีอีก 2 แหล่ง คือ ค่าความขรุขระพื้นผิวของกระจกอ้างอิง และค่าความไม่เป็นเส้นตรงของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ (PZT) แหล่งที่มาค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัดในการวิจัยนี้ทั้งหมดสรุปได้ดังตาราง 4-1

ตาราง 4-1 แสดงแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน สัมประสิทธิ์ความไว และค่าความไม่แน่นอนของปริมาณอื่นๆ

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

เมื่อ ค่า $SD_{\Delta\phi}$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างระหว่างมุมเฟสจากทฤษฎีกับมุมเฟสจากการคำนวณ พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.0023 rad

ค่า $\Delta\lambda$ คือ ค่าความกว้างของสเปกตรัมมีค่าเท่ากับ 15 nm

ค่าความขรุขระของกระจกอ้างอิง ซึ่งวัดโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (National Institute of Metrology (Thailand): NIMT) พบว่า มีค่าเป็น 0.0006 μm

ค่าความคลาดเคลื่อนของ PZT คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของเพียโซอิเล็กทริก แอคทูเอเตอร์ มีค่าเท่ากับ 54 nm

จากแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนและสัมประสิทธิ์ความไวทั้งหมดที่แสดงในตาราง 4-1 พบว่า ความไม่แน่นอนเนื่องจากการคำนวณมุมเฟส u_ϕ มีค่าเป็น 0.0001 μm ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความกว้างของแถบสเปกตรัม $u_{\Delta\lambda}$ มีค่าเป็น 0.0022 μm ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจาก PZT u_{PZT} มีค่าเป็น 0.031 μm และค่าความไม่แน่นอนของกระจกอ้างอิง u_{mirror} มีค่าเป็น 0.0004 μm

เมื่อนำค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากตัวแปรต่างๆ มาคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนรวม u_C พบว่ามีค่าเป็น 0.032 μm เมื่อเลือกระดับความเชื่อมั่นที่ 95.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่า $k = 2$ พบว่า ค่าความไม่แน่นอนขยาย U ของการวัดนี้ ซึ่งคำนวณจากสมการ $U = k \times u_C$ มีค่าเป็น 0.062 μm หรือค่าความลึกที่ได้จากการใช้วิธีวิเคราะห์แบบ CWT นี้มีค่าเป็น $2.064 \pm 0.062 \mu\text{m}$

4.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สัญญาณแบบ CWT กับเครื่องมือวัดของบริษัท TORAY รุ่น SP-500

การทดลองตอนนี้เริ่มจากการนำชิ้นงานตัวอย่างที่ทำจากสแตนเลส 316 ซึ่งมีความขรุขระพื้นผิวต่างกันจำนวน 3 ชิ้น ไปวัดค่าความสูงต่ำเฉลี่ย (R_a) ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยความสูงต่ำยกกำลังสอง (R_q) และ ค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุด (R_z) พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแทรกสอดแบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดไมเคิลสัน (Interference microscope : 3D Non-contact surface profiler) รุ่น SP-500 ของบริษัท TORAY เพื่อเป็นเครื่องมือมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบกับผลการวัดที่ได้ในงานวิจัยนี้

จากการวัดชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้น ด้วยเครื่องมือมาตรฐาน พบว่า R_a R_q และ R_z รวมถึงค่าความไม่แน่นอนขยายที่คำนวณตามมาตรฐานของ GUM และ EAL ของชิ้นงานตัวอย่างสแตนเลสชิ้นที่ 1, 2 และ 3 ของปริมาณทั้งสาม ซึ่งได้จากการเฉลี่ยผลของการวัด 20 ตำแหน่ง มีผลดังตาราง 4-2

ตาราง 4-2 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย (R_a) ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง (R_q) และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุด (R_z) และค่าความไม่แน่นอนขยายของชิ้นงานตัวอย่างสแตนเลสชั้นที่ 1, 2 และ 3 ของปริมาณทั้งสามที่วัดจากเครื่องมือมาตรฐาน

ชิ้นงานที่	R_a (nm)		R_q (nm)		R_z (nm)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน (k=2)	ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน (k=2)	ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน (k=2)
1	54.234	12.697	64.931	14.567	242.745	69.290
2	72.008	15.842	84.207	18.088	168.683	48.615
3	101.135	21.277	121.327	25.147	410.759	116.555

เมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างมาบันทึกภาพผิวการแทรกสอดที่ได้จากระบบ VSI และแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ต่ำจาก SLD แล้วคำนวณค่าความขรุขระพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทั้งสาม โดยหาค่าความสูงต่ำของพื้นผิวที่ละเอียดๆ ด้วยวิธีวิเคราะห์สัญญาณแบบ CWT จากค่าความเข้มแสงแต่ละจุดของพื้นที่ที่ได้จากการเฉลี่ยค่าความเข้มของพื้นที่ในภาพที่ถ่ายด้วยกล้องซีซีดีขนาด 2x2 พิกเซล ค่าความขรุขระที่คำนวณได้นี้คิดจากพื้นที่ขนาด 3x4 mm พบว่าค่า R_a , R_q และ R_z ของชิ้นตัวอย่างทั้งสามที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นและการวิเคราะห์แบบ CWT มีค่าดังตาราง 4-3

ตาราง 4-3 แสดงค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดของชิ้นงานสแตนเลสทั้ง 3 ชั้น 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

ส่วนของการคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยาย พบว่า คำนวณได้เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.1 แต่เนื่องจากการทดลองในตอนนี้อาจการหาค่าความขรุขระพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างที่มีความขรุขระพื้นผิวแตกต่างกัน ดังนั้นแหล่งความไม่แน่นอนของการวัดในกรณีนี้จึงเพิ่มความไม่แน่นอนเดียวกันของชิ้นงาน หรือ ค่าโฮโมเจเนอิตี (Homogeneity) ขึ้นอีกหนึ่งแหล่ง โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความไว c_i ในกรณีนี้จะมีค่าเป็น 1 และค่าความไม่แน่นอนของโฮโมเจเนอิตีของชิ้นงาน

หาได้จาก $\frac{Max - Min}{\sqrt{3}}$ เมื่อค่า $Max - Min$ คือ ผลต่างของค่าความขรุขระพื้นผิวที่มีค่ามากที่สุดกับค่าน้อยที่สุดของชิ้นงานตัวอย่าง ด้วยเหตุนี้ค่าความไม่แน่นอนของโฮโมเจเนิตีของชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละชิ้นจึงมีค่าไม่เท่ากัน และเนื่องจากงานวิจัยในตอนนี้ต้องการหาค่าความขรุขระพื้นผิวของชิ้นงานที่มีนิยามการคำนวณแตกต่างกัน คือ R_a , R_q และ R_z ดังนั้น ค่าความขรุขระของกระจกอ้างอิงที่ใช้คำนวณหาค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากกระจกอ้างอิงจึงมีค่าต่างกัน และส่งผลให้ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากกระจกอ้างอิงในกรณีที่ค่าความขรุขระพื้นผิวต่างชนิดกันมีค่าแตกต่างกันไปด้วย

จากการเปรียบเทียบผลที่คำนวณจากการวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐาน SP-500 กับผลการวัดในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ISO/IEC Guide 43-1[10] ที่กำหนดว่าค่าการเปรียบเทียบผล E_n ซึ่งหาจากสมการ

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

เมื่อ lab_{result} คือ ผลของการวัดของค่าที่ต้องการเปรียบเทียบ
 ref_{value} คือ ผลของการวัดของค่าที่อ้างอิง
 $U_{95}lab$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัดของค่าที่ต้องการเปรียบเทียบ
 $U_{95}ref$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัดของค่าที่อ้างอิง

นั้น จะยอมรับได้เมื่อ $|E_n| \leq 1$ แล้ว พบว่า มีค่าต่าง ๆ สรุปได้ดังตาราง 4-4 ถึงตาราง 4-6

ตาราง 4-4 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดสเตนเลสชิ้นที่ 1 ระหว่าง SP-500 กับ CWT

	SP-500		CWT		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

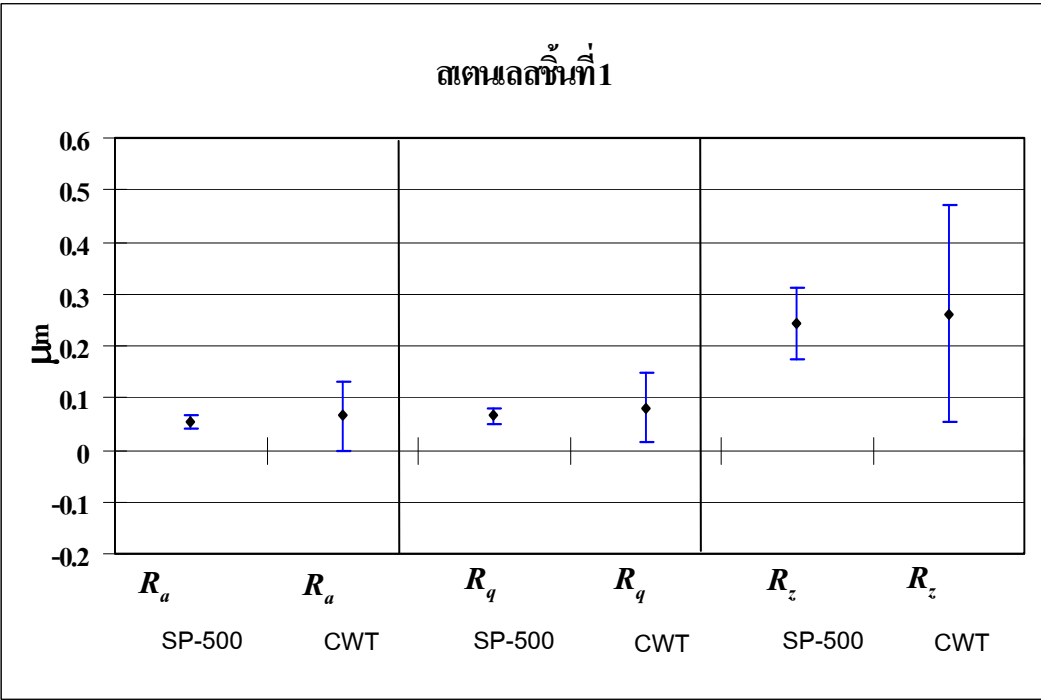
ตาราง 4-5 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดสเตนเลสชั้นที่ 2 ระหว่าง SP-500 กับ CWT

	SP-500		CWT		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

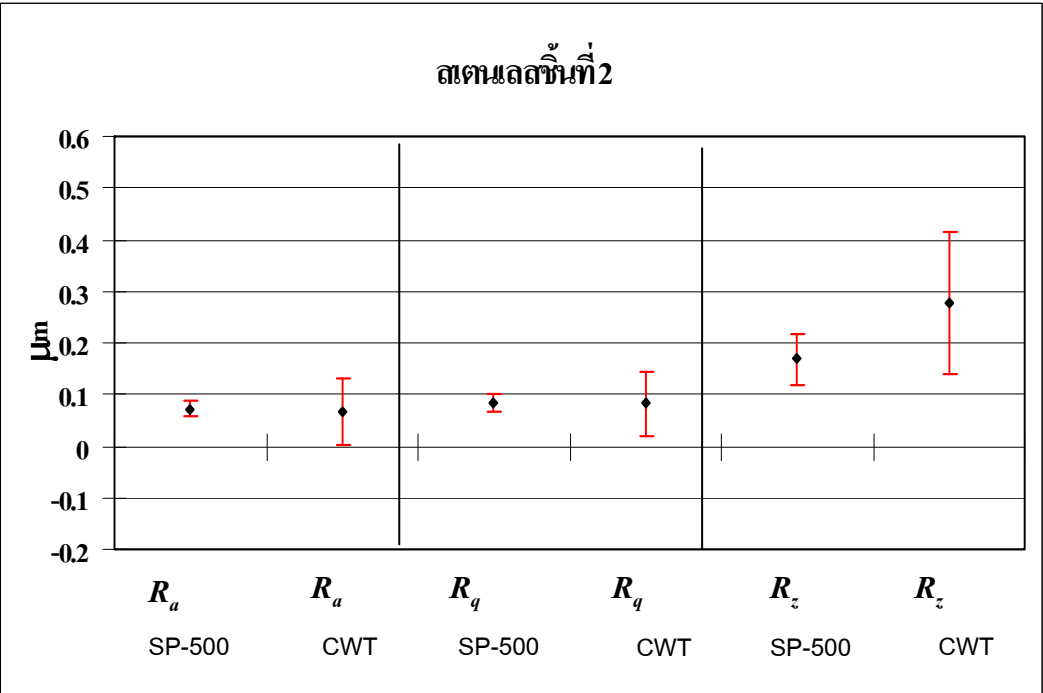
ตาราง 4-6 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดสเตนเลสชั้นที่ 3 ระหว่าง SP-500 กับ CWT

	SP-500		CWT		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

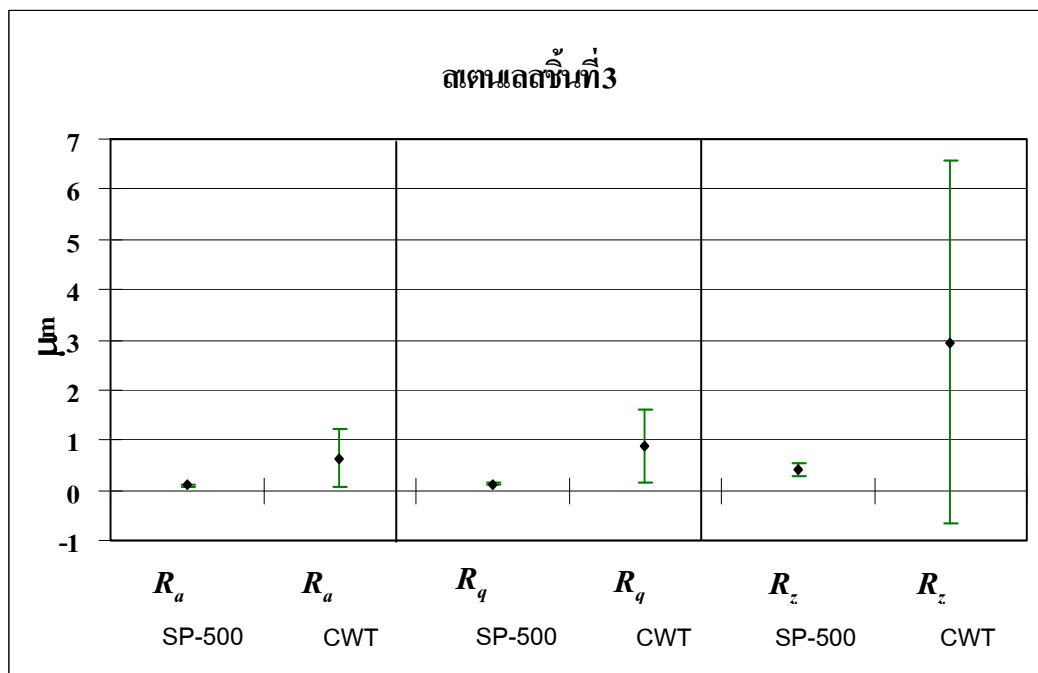
เมื่อนำค่าความสูงต่ำเฉลี่ย ค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง และค่าระยะห่างระหว่างความสูงต่ำมากที่สุดที่วัดได้จาก SP-500 เทียบกับการวิเคราะห์แบบ CWT พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนขยายของชั้นงานทั้ง 3 ชั้น มาเขียนกราฟซึ่งแสดงได้ดังรูป 4-2 ถึงรูป 4-4 ซึ่งค่าความไม่แน่นอนขยายที่ได้จะสัมพันธ์กับค่า E_n ที่คำนวณได้ โดยที่ค่า E_n ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าเท่ากับ 1 เพราะฉะนั้นกราฟที่เขียนได้จะมีความคาบเกี่ยวกันอยู่ในแต่ละคู่



รูป 4-2 แสดงค่าที่วัดได้พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของสแตนเลสชนิดที่ 1



รูป 4-3 แสดงค่าที่วัดได้พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของสแตนเลสชนิดที่ 2



รูป 4-4 แสดงค่าที่วัดได้พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของสotenเลสชั่นที่ 3

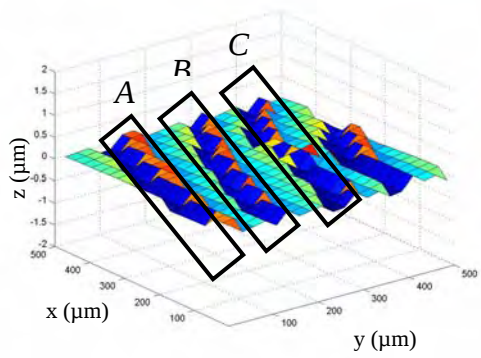
4.3 การเปรียบเทียบผลการวัดชิ้นงานตัวอย่างที่มีและไม่มีวัสดุโปรงใสบางปิดทับ

เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ในการนำเอาระบบ VSI ที่มีแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ต่ำจาก SLD และการวิเคราะห์สัญญาณความเข้มแสงแบบ CWT ไปหาค่าความขรุขระและโครงสร้างพื้นผิวของพื้นผิวที่มีวัสดุโปรงใสบางปิดทับ การทดลองตอนนี้จึงเลือกใช้แผ่นกระจกปิดชิ้นตัวอย่าง (Cover Slide) มาปิดทับผิวหน้าของชิ้นงานตัวอย่างที่สร้างขึ้นจากสotenเลส 316 ทั้งสามชิ้นที่ใช้ในการทดลองหัวข้อ 4.2 แล้วจึงใช้กระบวนการวัดเดียวกันกับที่ใช้ในหัวข้อ 4.2 สร้างภาพโครงสร้างพื้นผิวและหาค่าความขรุขระพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งสามขณะมีกระจกปิดชิ้นตัวอย่างปิดทับอีกครั้ง จากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบผลจากหัวข้อ 4.2

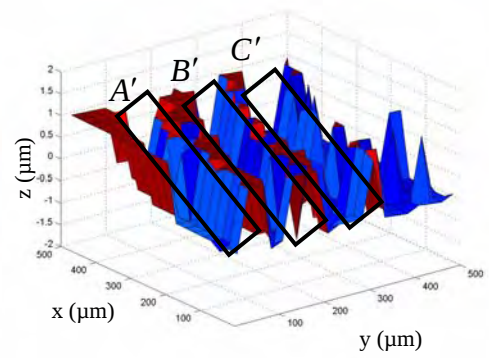
ผลจากการสร้างโครงสร้างพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งสามขณะที่มีและไม่มีกระจกปิดชิ้นตัวอย่างปิดทับแสดงได้ดังรูป 4-5 ถึงรูป 4-7 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าที่ตำแหน่ง A และ A' ในรูปทั้งหมดเป็นตำแหน่งที่โครงสร้างพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทั้งสองกรณีมีลักษณะเดียวกันแม้ว่าจะมีกระจกปิดชิ้นตัวอย่างปิดอยู่หรือไม่ก็ตาม

ส่วนกราฟแสดงค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง (R_q) ของชิ้นงานตัวอย่างพร้อมค่าความไม่แน่นอนรวมก่อนและหลังการปิดทับของกระจกปิดชิ้นตัวอย่างแสดงไว้ใน

รูป 4-8

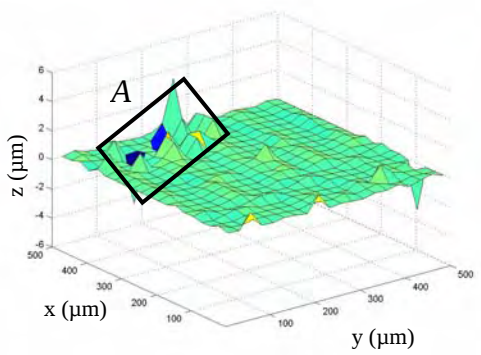


(ก)

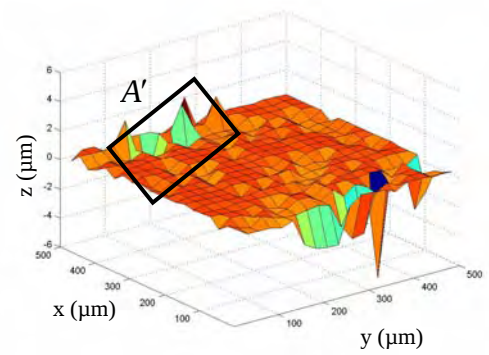


(ข)

รูป 4-5 เปรียบเทียบโครงร่างพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างที่ 1 เมื่อ (ก) ไม่มี (ข) มีกระจกปิดชิ้นตัวอย่างปิดทับ

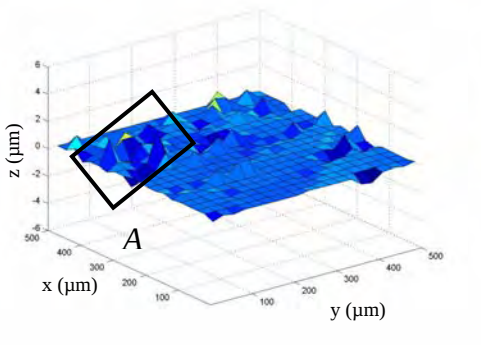


(ก)

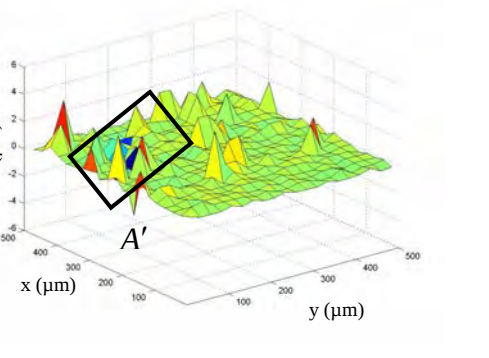


(ข)

รูป 4-6 เปรียบเทียบโครงร่างพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างที่ 2 เมื่อ (ก) ไม่มี (ข) มีกระจกปิดชิ้นตัวอย่างปิดทับ

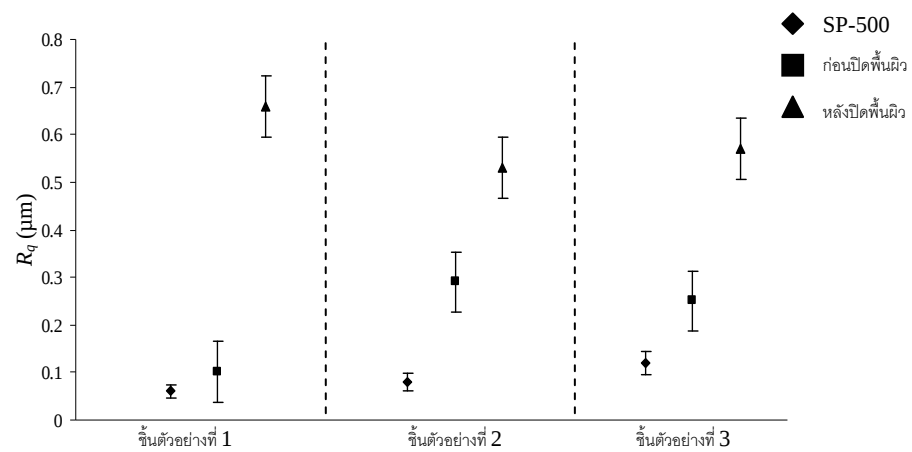


(ก)



(ข)

รูป 4-7 เปรียบเทียบโครงร่างพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างที่ 3 เมื่อ (ก) ไม่มี (ข) มีกระจกปิดชิ้นตัวอย่างปิดทับ



รูป 4-8 กราฟแสดงค่ารากที่สองของผลเฉลี่ยของความสูงต่ำยกกำลังสอง (R_q) ของชิ้นงานตัวอย่างพร้อมค่าความไม่แน่นอนรวมก่อนและหลังจากการมีกระจกปิดชิ้นตัวอย่าง

บทที่ 5 บทวิจารณ์

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาและสร้างเครื่องมือวัดเชิงแสงแบบไม่ทำลายโดยใช้แสงอาพันธ์ต่ำที่ได้จากซูเปอร์ลูมินเนสเซนต์ไดโอด (Superluminescent Diode: SLD) และระบบอินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ชนิดไมเคิลสันแบบปรับระยะ (Vertical Scanning Michelson Interferometer: VSI) สำหรับวัดค่าความขรุขระพื้นผิวของวัสดุในระดับจุลภาค โดยเน้นที่การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์รื้อรอยการแทรกสอดแบบ DFT และ CWT ว่าให้ผลในการวัดแตกต่างกันเช่นไร รวมถึงการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำสมบัติของระบบ VSI และการวิเคราะห์สัญญาณแบบ CWT ดังกล่าวไปหาค่าความขรุขระพื้นผิวและโครงสร้างพื้นผิวของพื้นผิวที่มีวัสดุโปร่งใสปิดทับ

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็นสามตอน โดยในตอนแรกเป็นการเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณแบบ DFT และ CWT โดยใช้รื้อการแทรกสอดในโดเมนของเวลาชุดเดียวกัน รื้อการแทรกสอดที่ใช้ในการทดลองตอนนี้ได้จากการใช้ชิ้นตัวอย่างเป็นชิ้นงานมาตรฐานขนาดความลึก $1.8\ \mu\text{m}$ ของบริษัท VLSI จากผลการทดลองพบว่า การวิเคราะห์รื้อการแทรกสอดแบบ CWT ให้โครงสร้างพื้นผิวที่สอดคล้องกับชิ้นงานมาตรฐานที่ใช้มากกว่าการวิเคราะห์สัญญาณแบบ DFT ซึ่งจากการหาค่าเฉลี่ยของความลึกของร่องที่วัดได้จากการวิเคราะห์สัญญาณแบบ CWT จำนวน 20 จุด และค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัด พบว่า ค่าความลึกของชิ้นงานมาตรฐานที่วัดได้ในงานวิจัยนี้มีค่าเป็น $2.064 \pm 0.062\ \mu\text{m}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความลึกของชิ้นงานมาตรฐาน คือ $1.8\ \mu\text{m}$ สาเหตุที่ทำให้ได้ผลที่แตกต่างกันนี้ ส่วนหนึ่งอาจเป็นเพราะการวางชิ้นงานของผู้วิจัยที่อาจจะวางอยู่บนฐานที่ปรับระดับความเรียบไม่ดีพอ หรืออาจมีสาเหตุมาจากความคลาดบริเวณขอบของลำแสงที่ถ่ายได้จากกล้องซีซีดี ส่วนโครงสร้างพื้นผิวที่เกิดจากการวิเคราะห์สัญญาณแบบ DFT นั้นเนื่องจากโครงสร้างพื้นผิวดังกล่าวไม่มีลักษณะของร่องลึกเกิดขึ้นจึงไม่ได้แสดงไว้ในผลการทดลองตอนนี้

ในการทดลองตอนที่สองเป็นการนำระบบ VSI ที่มี SLD เป็นแหล่งกำเนิดแสงไปวัดค่าความขรุขระพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างที่สร้างขึ้นจากสแตนเลส 316 และมีความขรุขระพื้นผิวต่างกันจำนวน 3 ชั้น เนื่องจากต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอาระบบดังกล่าวไปใช้วัดความขรุขระพื้นผิวของตุ่มน้ำหนักมาตรฐานที่ใช้เป็นตัวอย่างค่ามวลในระบบเอสไอ ซึ่งสร้างขึ้นจากสแตนเลส 316 เช่นเดียวกัน ผลการวัดค่าความขรุขระที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าความขรุขระพื้นผิวที่วัดได้ด้วยการวิเคราะห์รื้อการแทรกสอดแบบ CWT ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดด้วยเครื่องมือมาตรฐานซึ่งเป็นเครื่องมือที่ผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ของบริษัท TORAY รุ่น SP-500 โดยค่า

ความไม่แน่นอนขยายของเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้กับค่า E_{μ} ที่คำนวณได้มีความสอดคล้องกัน และอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

ส่วนการทดลองตอนที่สามซึ่งมีขึ้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบ VSI ที่มี SLD เป็นแหล่งกำเนิดแสงและการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ CWT ไปประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่าความขรุขระและการสร้างโครงร่างพื้นผิวของพื้นผิวที่มีวัสดุโปร่งใสปิดทับโดยไม่ทำลายวัสดุที่ปิดทับ พื้นผิวนั้น ในการทดลองตอนนี้ใช้กระจกปิดชิ้นตัวอย่าง (Cover Slide) ปิดทับพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองตอนที่สองแล้วนำโครงร่างพื้นผิวที่ได้ทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โครงร่างพื้นผิวที่ได้จากชิ้นตัวอย่างทั้งสองลักษณะมีลักษณะที่สอดคล้องกัน แต่การคำนวณค่าความขรุขระของพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างที่มีกระจกปิดชิ้นตัวอย่างปิดทับ พบว่า ค่าที่ได้แตกต่างจากกรณีที่พื้นผิวไม่มีการปิดทับมากแม้ว่าจะใช้ค่าดัชนีหักเหของกระจกปิดชิ้นตัวอย่างแก้ไขค่าความขรุขระแล้วก็ตาม ที่เป็นเช่นนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากฟิล์มอากาศที่อยู่ระหว่างผิวกระจกปิดชิ้นตัวอย่างและพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างมีความหนาบางไม่เท่ากัน ซึ่งความหนาบางของฟิล์มอากาศดังกล่าวไม่อาจวัดได้ในการทดลองนี้ ทำให้การแก้ไขค่าความขรุขระโดยใช้เพียงค่าดัชนีหักเหของกระจกปิดชิ้นตัวอย่างเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ ในกรณีนี้ควรแก้ไขด้วยการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีวัสดุโปร่งใสที่ทราบค่าดัชนีหักเหชนิดเดียวปิดทับ ชิ้นตัวอย่างดังกล่าวจะต้องใช้กระบวนการพิเศษในการเตรียมชิ้นงาน ผู้วิจัยคาดว่า การใช้ชิ้นงานตัวอย่างในลักษณะดังกล่าวจะทำให้ค่าความขรุขระพื้นผิวที่คำนวณได้มีความแม่นยำขึ้น

จากผลการทดลองและปัญหาที่พบจากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์วัดค่าความหนาของฟิล์มบางโปร่งใส ความขรุขระในระดับจุลภาคของพื้นผิวตัวอย่างที่ทำจากวัสดุประเภทอื่นทั้งที่มีวัสดุโปร่งใสและไม่มีวัสดุโปร่งใสปิดทับ ซึ่งการกระทำดังกล่าวอาจนำไปสู่การประยุกต์ในภาคอุตสาหกรรมอื่นๆ อาทิ การสร้างระบบตรวจสอบเครื่องหมายการค้าขนาดเล็กแลดสามมิติที่มีวัสดุโปร่งใสแสงปิดทับ เพื่อป้องกันการลอกเลียนแบบ เป็นต้น รวมถึงประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ ที่ใกล้เคียง อีกทั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องมือวัดนี้สามารถหาค่าความขรุขระพื้นผิวที่มีวัสดุโปร่งใสปิดทับได้ ผู้วิจัยจึงควรหาชิ้นงานตัวอย่างที่มีวัสดุโปร่งใสที่เกิดจากวัสดุชนิดเดียวกันปิดทับมาทดลองต่อไป

แม้ว่าเครื่องมือวัดที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์อื่นๆ จะให้ผลที่แม่นยำกว่า แต่ชิ้นงานที่ต้องการวัดในงานวิจัยบางอย่างอาจไม่เหมาะที่จะใช้งานกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด อีกทั้งเครื่องมือวัดเหล่านั้นมีราคาค่อนข้างสูง ซึ่งในการวัดบางอย่างไม่จำเป็นต้องใช้ผลการวัดที่แม่นยำมากนัก นอกจากนี้ในการวัดด้วยเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้จัดแสงที่อยู่ในระบบเป็นแสงขนาน ซึ่งจะทำให้ครอบคลุมพื้นที่ในการวัดได้มากกว่าเครื่องมือวัดทั่วไป ด้วยเหตุ

เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงอาจมีประโยชน์ต่องานที่ต้องการวัดความขรุขระของพื้นผิวในพื้นที่
มากมาย ในคราวเดียว

บทที่ 6 เอกสารอ้างอิง

- [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] P. Pavlíček. *Height Profile Measurement by Means of White Light Interferometry*. Proceedings of the SPIE, 5259 (2003): 139-144.
- [3] K. Divakar Rao, Y. Verma, H. S. Patel and P. K. Gupta. *Non-invasive Ophthalmic Imaging of Adult Zebrafish Eye Using Optical Coherence Tomography*. Current Science, 90 (2006): 1506-1510.
- [4] B. Choi, T. E. Milner, J. Kim, J. N. Goodman, G. Vargas, G. Aguilar and J. S. Nelson. *Use of Optical Coherence Tomography to Monitor Biological Tissue Freezing During Cryosurgery*. Journal of Biomedical Optics, 9 (2004): 282-286.
- [5] C. J. Tay, C. Quan and M. Li. *Investigation of a Dual-layer Structure Using Vertical Scanning Interferometer*. Optics and Lasers in Engineering. 45 (2007): 907-913.
- [6] 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.
- [7] United Kingdom Accreditation Service. The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement. 2nd ed. London: UKAS, 2007.
- [8] K. J. Gasvik. Optical Metrology. 3rd ed. England: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [9] Superlum. [Online] Available from: <http://www.superlumdiodes.com> [2009, March 6th].
- [10] ISO/IEC Guide 43-1. Proficiency Testing by Interlaboratory Comparisons, 1999.

บทที่ 7 ผลงานที่ได้จากโครงการวิจัย

7.1 ผลงานที่เข้าร่วมการประชุมระดับนานาชาติ

- Laopornpichayanuwat, W., Visessamit, J., and Tianprateep, M. “3-D Surface Roughness Profile of 316-Stainless Steel Using Vertical Scanning Interferometry with a Superluminescent Diode,” IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22 Conferences, Chonburi, Thailand, Nov. 22nd-25th, 2010. (Best Oral Presentation Award)

7.2 ผลงานที่คาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

- Laopornpichayanuwat, W., Visessamit, J., and Tianprateep, M. *3-D Surface Roughness Profile of 316-Stainless Steel Using Vertical Scanning Interferometry with a Superluminescent Diode.*, Measurement: Special Issue. Submitted.

ภาคผนวก ก

ผลงานที่เข้าร่วมการประชุมระดับนานาชาติ

- Laopornpichayanuwat, W., Visessamit, J., and Tianprateep, M. “3-D Surface Roughness Profile of 316-Stainless Steel Using Vertical Scanning Interferometry with a Superluminescent Diode,” IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22 Conferences, Chonburi, Thailand, Nov. 22nd-25th, 2010. (Best Oral Presentation Award)

IMEKO

International Measurement Confederation



Home of IMEKO

- [About IMEKO](#)
- [E-Mail](#)
- [Downloads](#)
- [Bulletin #48](#) 
- [Home](#)

Organization

- [Members](#)
- [Officers](#)
- [Organs](#) | [Dates](#)
- [IMEKO Board](#) 
- [Committees \(TCs\)](#)
- [TC Homepages](#)

Services

- [Event Finder](#)
- [Publications](#)
- [Proceedings](#)
- [E-mail service](#)
- [Search](#)
- [Jobs](#) | [Training](#)
- [Links](#)

Events

- [Congresses](#)
- [Conferences](#)
- [Symposia](#)
- [Workshops](#)
- [Co-sponsorships](#)
- [Other events](#)
- [Past Congresses](#)
- [Past Conferences](#)
- [Awards](#)

Updated: Mar 03, 2011

Symbols 

PROCEEDINGS

Year of event TC Event

Authors/Title

Keyword(s)

Abstract

☐ Hide abstracts

Search results: 1 of 2800 papers selected

Author(s)
Title (as link)
Abstract
Event
Wirun Laopornpichayanuwat, Jakkapol Visessamit, Montian Tianprateep 3-D SURFACE ROUGHNESS PROFILE OF 316-STAINLESS STEEL USING VERTICAL SCANNING INTERFEROMETRY WITH A SUPERLUMINESCENT DIODE Surface roughness is one of many parameters that influences on mass stability of standard weight, commonly used as a transfer standard of mass SI unit. One of the most famous non-invasive methods for determining surface roughness from a surface profile of material is a vertical scanning interferometry (VSI) with a white light source. In this research, 3-D surface profiles of 316-stainless steel, usually used as a material for standard weights, are constructed by using VSI, based on Michelson interferometer (MI). Because of its low-coherent properties, low cost, and compact light source, a superluminescent diode (SLD) is chosen as a low-coherence light source in our interferometry system. Since a continuous wavelet transform (CWT) algorithm provides accuracy results, it is also used as a numerical analyzing method for the interferogram signals, taking from our VSI. The surface roughness and measurement uncertainty, calculated from the constructed 3-D surface roughness profiles of 316-stainless steel samples, are discussed. 21st Conference on Measurement of Force, Mass and Torque (together with HARDMEKO 2010 and 2nd Meeting on Vibration Measurement), Pattaya, THAILAND, 2010

ภาคผนวก ข

ผลงานที่คาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

- Laopornpichayanuwat, W., Visessamit, J., and Tianprateep, M. *3-D Surface Roughness Profile of 316-Stainless Steel Using Vertical Scanning Interferometry with a Superluminescent Diode.*, Measurement: Special Issue. Submitted.

IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22 Conferences
Metrology in Modern Context
November 22–25, 2010, Pattaya, Chonburi, Thailand

3-D SURFACE ROUGHNESS PROFILE OF 316-STAINLESS STEEL USING VERTICAL SCANNING INTERFEROMETRY WITH A SUPERLUMINESCENT DIODE

Wirun Laopornpichayanuwat¹, Jakkapol Visessamit², Montian Tianprateep³

¹National Institute of Metrology (Thailand), Pathumthani, Thailand, wirun@nimt.or.th
^{2&3}Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, Montian.T@chula.ac.th

Abstract – Surface roughness is one of many parameters that influences on mass stability of standard weight, commonly used as a transfer standard of mass SI unit. One of the most famous non-invasive methods for determining surface roughness from a surface profile of material is a vertical scanning interferometry (VSI) with a white light source. In this research, 3-D surface profiles of 316-stainless steel, usually used as a material for standard weights, are constructed by using VSI, based on Michelson interferometer (MI). Because of its low-coherent properties, low cost, and compact light source, a superluminescent diode (SLD) is chosen as a low-coherence light source in our interferometry system. Since a continuous wavelet transform (CWT) algorithm provides accuracy results, it is also used as a numerical analyzing method for the interferogram signals, taking from our VSI. The surface roughness and measurement uncertainty, calculated from the constructed 3-D surface roughness profiles of 316-stainless steel samples, are discussed.

Keywords: Roughness, Vertical scanning interferometry (VSI), Continuous wavelet transform (CWT)

1. INTRODUCTION

Optical interferometry is a popular noncontact measurement technique, used for constructing a high resolution 3-D surface profile[1]. Recently, an optical coherence tomography (OCT), based on vertical scanning interferometry (VSI) with a low-coherent light source, is one of the most famous non-invasive and non-contact method for determining the microscopic properties, such as thickness, roughness, and surface profile, of materials, detecting subsurface deflection area, and constructing a cross-section image of both living tissue and non-living substance sample[2,3,4].

Because of its coherence length, which is only a few micrometer scales, the low-coherence light source is a key of OCT's success. Two low-coherent light sources, widely used in OCT, are halogen lamp and superluminescent diode (SLD)[5,6]. Although, the halogen lamp produces a high intensity light, it has a large size and produces more heat. So, the SLD is more suitable for using in a compact measuring system than the halogen lamp, because of its compact size and less heat production. It is also not expensive. However, because the SLD is a low intensity light source, a sample

having poor reflected surface, is almost impossible to measuring without consuming time. A conservative way to construct this kind of sample is gradually moving both x-, y- and z- axis of a reference mirror in the interferometer system.

With the halogen light source, VSI, that beam of light source was set as a parallel beam and CCD camera was applied as a detector of the system, could decrease constructing time[7]. With this method, the beam is approximated as a set of a small light source. Thus, the intensity, detected in each pixel of the CCD camera, is represented as the intensity of the small light source, reflected from each point of the sample surface. Because surface roughness of a standard weight, commonly used as a transfer standard of mass SI unit and made from 316-stainless steel, is very low, it almost reflect all of incident light, even through those light is came from a low intensity light source, such as, SLD. Therefore, the possibility of constructing 3-D profiles of two well polished 316-stainless steel surfaces by setting SLD to be parallel beam and using CCD camera as a detector in VSI, will be confirmed in this research.

One important thing for 3-D surface profile construction is a method for analyzing the interferogram signal. As a continuous wavelet transform (CWT) provided an accuracy result for VSI with halogen light source[8], CWT will also used as analytical tools for constructing 3-D surface profiles of our samples.

2. TECHNICAL DETAILS

The concept of a VSI system, used in this research, is seen in Fig.1. A parallel beam from a SLD light source propagates through a beamsplitter (BS) and is divided into two beams. One, called sample arm goes straight to a sample, another, called reference arm, goes straight to a reference mirror. The reflected sample and reference arms are recombined at BS to produce an interference fringe pattern, detected by CCD camera. By fixing the sample and moving the reference mirror in z-direction, each pixel of CCD can detect the intensity, depending on z-position of reference arm as;

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

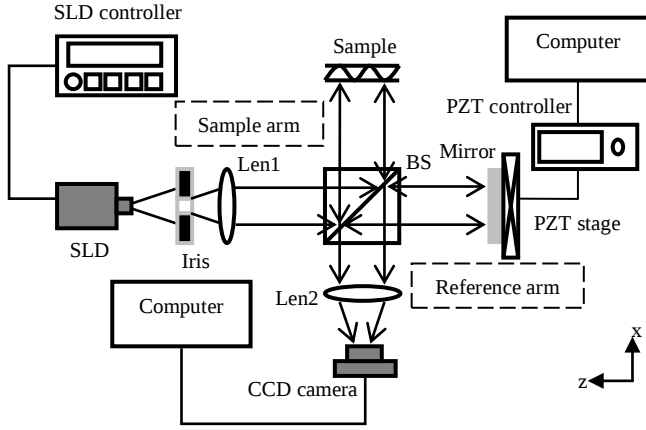


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

where I_0 is the background intensity, V is the visibility, z is the vertical scanning position along the optical axis, z_0 is the zero-order fringe position, l_c is the coherence length of a light source, and λ_0 is the central wavelength of a light source.

In order to analyze the interferogram that consists of the discrete signals, CWT is scoped to use in this research. The result, getting from CWT, will lead to find an actual position, having the maximum intensity. Because the interferogram has a Gaussian shape, the Morlet wavelet, having a plane wave modulated by a Gaussian, is chosen as a mother wavelet in this research. It is expressed by [9]

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

where η is a nondimensional time parameter and ω_0 is the nondimensional frequency [10].

For the interferogram with the discrete signals in z direction, the wavelet transform function becomes [10]

$$W_{a,b}(z) = \sqrt{\frac{\Delta z}{|a|}} \sum_{z=0}^{N-1} I(z) h^* \left[\left(\frac{z-b}{a} \right) \Delta z \right] \quad (3)$$

where $h^*(z)$ is the complex conjugation of mother wavelet from (2) by replacing η with z , a is a scale parameter (compression or expansion the mother wavelet), b is a translation parameter, Δz is an increasing step, and N is a number of signals.

Due to the discrete signals of the interferogram, an actual peak may place between an experimental peak and an adjacent point, as shown in Fig. 2. By using CWT, a phase of each peak can be used to calculate the distance between the experimental peak and the actual peak. Because the wavelet transform function $W_{a,b}(z)$ consists of real part and imaginary part, the phase ϕ of the wavelet transform can be calculated by

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}\{W_{a_{\max}, b_{\max}}(z)\}}{\text{Re}\{W_{a_{\max}, b_{\max}}(z)\}} \right) \quad (4)$$

where $a_{\max}$ and $b_{\max}$ are a position that the amplitude $|W_{a,b}(z)|$ has a maximum value.

Thus, a relation of the actual peak and the experimental peak can be written as [7]

$$z_R = z_M - \frac{\lambda_0}{4\pi} \phi \quad (5)$$

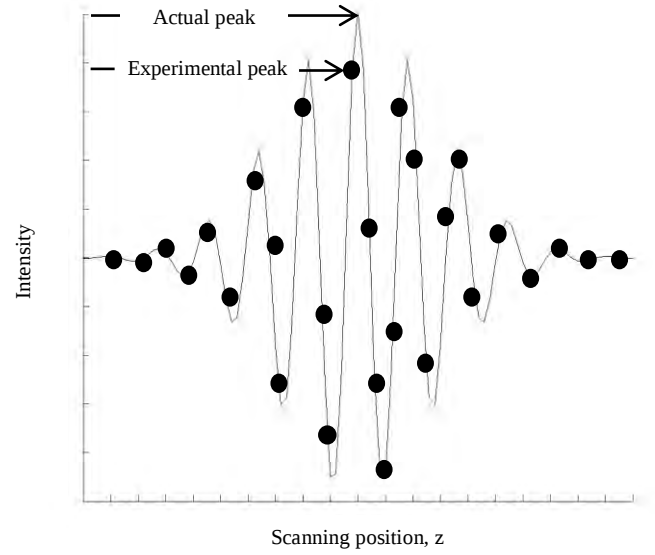


Fig. 2. Definition of actual peak and experiment peak of interferogram

where z_R is a real maximum position, z_M is a maximum position, ϕ is a phase of the maximum position from a wavelet analysis.

3. MEASUREMENT

In this research, the Michelson interferometer and the SLD were used to characterize the surface profile of samples. Two circular shape plates of stainless steel with a diameter of 25 mm were used as samples. These samples were well polished to make a good reflect of light. The experimental system was arranged as shown in Fig. 1. The SLD generated a light beam, collimated by len 1 to become a parallel beam. Then, this light beam was split into two arms; a reference arm and a sample arm, by BS. Each beam reflected from the end of each arm, combined together and traveled to len 2, and was detected by a 640×480 pixels SONY XCD-V50CR CCD camera. Because this combination beam contained path differences between two arms, thus, the interference patterns could be observed. As the parallel beam can be assumed as an array of small light sources, each CCD pixel also can detect the interferogram of a small area of the sample surface.

For recording the interferogram, a reference mirror, mounted on the PZT stage at the end of reference arm, was gradually moved along the z -direction by computer controlling. Because a central wavelength of the SLD was 830 nm, a step of PZT stage was chosen as 100 nm (0.1 μm) in order to obey the sampling theorem. A series of intensity signals, detected by each pixel of CCD, in every step produced an individual interferogram. The example of interferogram, collected by one pixel of CCD, shows in Fig. 3. Then, CWT was applied to that interferogram for defining its actual peak, represented as a height of the surface at that pixel area. The CWT spectrogram of interferogram, shown in Fig. 3, is represented in Fig. 4. By combining the results calculated from every pixels of CCD, 3-D surface profile could be constructed.

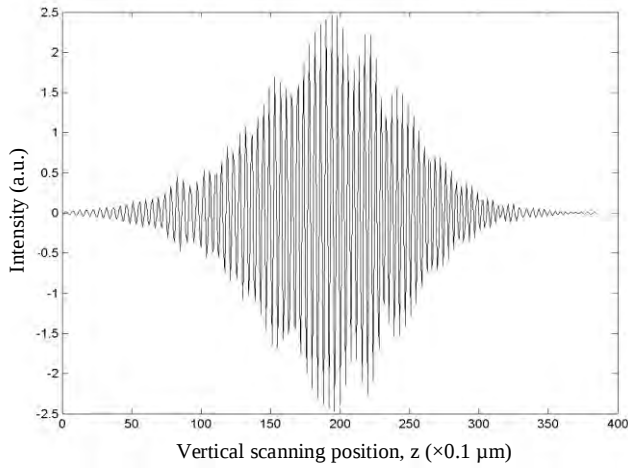


Fig. 3. An example of intensity signals in each vertical scanning step of one pixel.

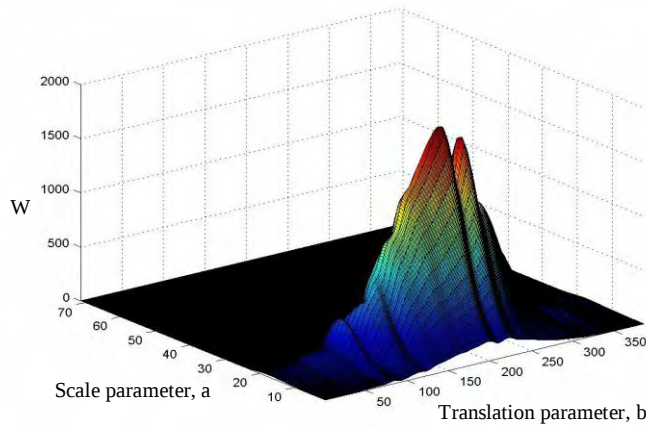


Fig. 4. CWT spectrogram of intensity signal shown in Fig. 3

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

The mean height of roughness (R_a), root-mean-square height of roughness (R_q), and maximum height of roughness (R_z) of two stainless steel plates were calculated by using the light beam, recorded by CCD camera. Light beam, used in this research, had a size of 4×3 mm in x-axis and y-axis, respectively. Since the CCD camera had 640 x-axis pixels and 480 y-axis pixels; therefore, each pixel of the CCD camera represented $6.25 \times 6.25 \mu\text{m}$ image sizes. To avoid flare light, which reflected from neighbour CCD pixels, an average of 4×4 pixels would be considered as a surface area. Thus, the whole image had 160×120 values and each value contained an area size of $25 \times 25 \mu\text{m}$. In this research, a cross-section of each stainless steel sample was measured from 101st-104th (line 1), 201st-204th (line2), 301st-304th (line 3) and 401st-404th (line 4) y-axis pixels, as shown in Fig. 5a and 5b respectively.

After applied CWT method with the interferogram of every sampling area of CCD camera, a set of maximum $W_{a_{\max}, b_{\max}}(z)$ of the CWT spectrogram and real position of surface height, z_R could be calculated by (5). Then, 3-D surface roughness profile of two stainless steel plates could be constructed from all z_R .

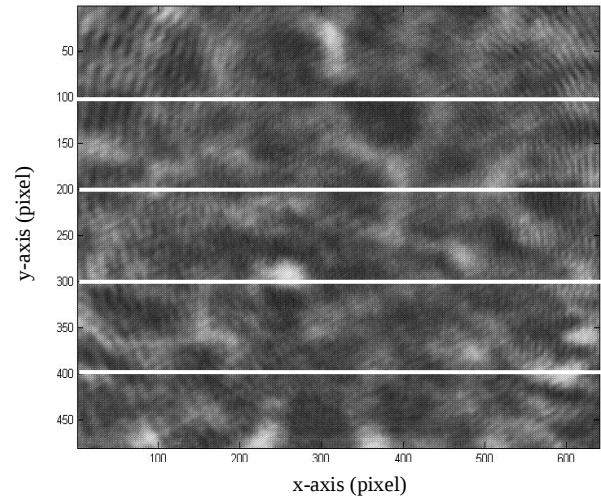


Fig. 5a. Selection lines for constructing cross-section and surface image of Sample No.1

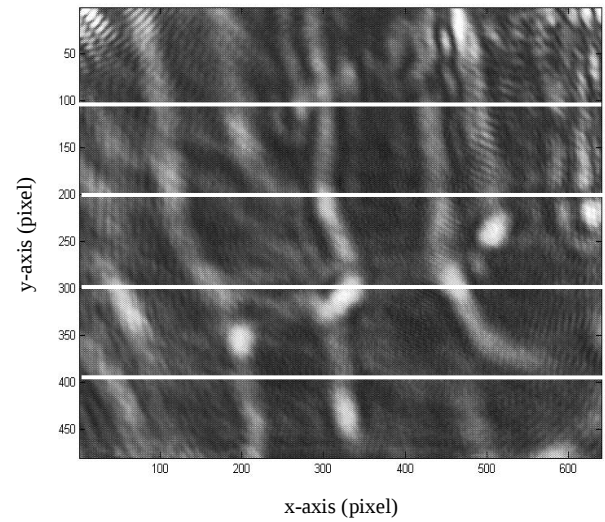


Fig. 5b. Selection lines for constructing cross-section and surface image of Sample No.2

The example of 3-D surface roughness profile of $500 \times 500 \mu\text{m}$ area for each 316-stainless steel plate (Sample No. 1 and No. 2) are shown in Fig. 6a and 6b, respectively.

From the experimentally obtained the mean height of roughness (R_a), root-mean-square height of roughness (R_q), and maximum height of roughness (R_z) of 316-stainless steel is averaged from 4 lines.

In this experiment, the measurement uncertainty is calculated according to M3003 [11], the source of uncertainty of a system, as shown in Table 1.

Table 1. Source of uncertainty

Source of uncertainty	c_i	$u(x_i)$
Repeatability (u_A)	1	$SD / \sqrt{n}$
Wavelength bandwidth ($u_{\Delta\lambda}$)	$\pi/4\pi$	$\Delta\lambda / \sqrt{3}$
Error of the PZT (u_{PZT})	1	$error \text{ of } PZT / \sqrt{3}$
Roughness of reference mirror (u_R)	1	$roughness \text{ of } reference \text{ mirror } / \sqrt{3}$
Homogeneity of sample (u_{homo})	1	$(Max - Min) / \sqrt{3}$
Phase difference (u_ϕ)	$\lambda_0/4\pi$	$(Max - Min) / \sqrt{3}$

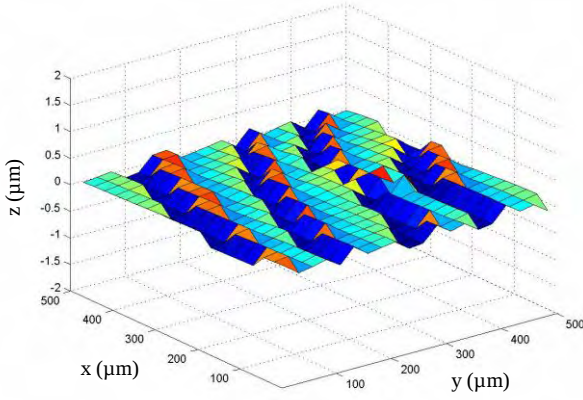


Fig. 6a. 3-D Surface roughness profile of Sample No.1

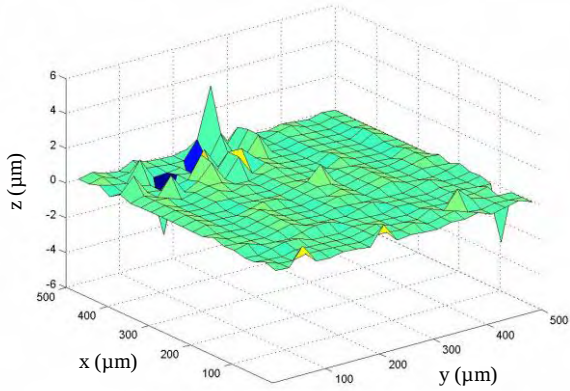


Fig. 6b. 3-D Surface roughness profile of Sample No.2

The uncertainty of a system is classified as types A and B. Type A uncertainty is obtained from a series of measurements on the repeatability of the system. Based on a series of measurements ($n=10$), type A uncertainty (u_A) due to random is less than 0.003 μm .

According to manufacture data, the wavelength bandwidth ($\Delta\lambda$) of SLD was 0.015 μm . So, assuming a rectangular distribution and based on (5), the distributed standard uncertainty was given by $u_{\Delta\lambda} = (0.015/\sqrt{3})(\pi/4\pi) = 0.002$ μm .

An error of the PZT stage could be compared with an input voltage that supply to this PZT stage. The maximum error in a distance, measured by manufacturer was 0.054 μm . The standard uncertainty using the rectangular distribution for this PZT stage was given by $u_{PZT} = 0.054/\sqrt{3} = 0.031\mu\text{m}$.

The mean height of roughness (R_a) of reference mirror, root-mean-square height of roughness (R_q) of reference mirror and maximum height of roughness (R_z) of reference mirror were 0.0005 μm , 0.0006 μm and 0.0014 μm respectively. The standard uncertainty of the reference mirror roughness using the rectangular distribution was given by u_{R_a} of mirror = 0.0003 μm , u_{R_q} of mirror = 0.0003 μm and u_{R_z} of mirror = 0.0008 μm .

A homogeneity of each sample was different of surface roughness (Max-Min). The standard uncertainty of the homogeneity using the rectangular distribution was given by $u_{homo} = (\text{Max-Min})/\sqrt{3}$ μm .

The phase difference has a type B uncertainty contributed by the algorithm. An ideal signal is given by

$$I(z) = 120 + 80 \exp \left[- \left(\frac{z - z_0}{l_c} \right)^2 \right] \cos \left(4\pi \frac{z - z_0}{\lambda_0} \right) \quad (6)$$

for $z_0 = 20$ μm , $l_c = 20$ μm and $\lambda_0 = 830$ nm (selected based on the natural characteristics of the illuminating light). Some prescribed phases are retrieved using CWT [7], the difference between maximum and minimum value of the phase difference is 0.0248 rad. Assuming a rectangular distribution and based on (5) the standard uncertainty is given by $u_\phi = [(0.0248)/\sqrt{3}](\lambda_0/4\pi) = 0.0009\mu\text{m}$.

From the M3003 the expression of uncertainty and confidence in measurement, a combined uncertainty was given by

$$u_c = \sqrt{c_A^2 u_A^2 + c_{\Delta\lambda}^2 u_{\Delta\lambda}^2 + c_{PZT}^2 u_{PZT}^2 + c_R^2 u_R^2 + c_{homo}^2 u_{homo}^2 + c_\phi^2 u_\phi^2} \quad (7)$$

For a level of confidence of 95.5% with coverage factor $k=2$, an expanded uncertainty (U) of this system was expressed by

$$U = k \times u_c \quad (8)$$

The measurement uncertainty of surface roughness of 316-stainless steel samples, are listed in Table 2.

Table 2. The measurement uncertainty of surface roughness of samples

Source of uncertainty	Sample No.1			Sample No.2		
	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)
u_A	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
$u_{\Delta\lambda}$	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022
u_{PZT}	0.0312	0.0312	0.0312	0.0312	0.0312	0.0312
u_R	0.0003	0.0003	0.0008	0.0003	0.0003	0.0008
u_{homo}	0.0110	0.0104	0.0675	0.0040	0.0058	0.0635
u_ϕ	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
u_c	0.0333	0.0331	0.0745	0.0317	0.0320	0.0709
U	0.0666	0.0662	0.1490	0.0634	0.0639	0.1417

These samples were re-measured R_a , R_q and R_z by 3-D Non-Contact Surface Profiler SP-500 Series from Toray Engineering Co., Ltd. The light source is a halogen lamp. A comparison of roughness from SP-500 Series and this CWT method is shown in Table 3 and 4.

Table 3. Roughness of Sample No.1 from SP-500 Series and CWT

	SP-500		CWT		E_n
	Value	Uncertainty ($k=2$)	Value	Uncertainty ($k=2$)	
R_a	0.054 μm	0.013 μm	0.066 μm	0.067 μm	0.2
R_q	0.065 μm	0.015 μm	0.081 μm	0.066 μm	0.2
R_z	0.243 μm	0.069 μm	0.262 μm	0.149 μm	0.1

Table 4. Roughness of Sample No.2 from SP-500 Series and CWT

	SP-500		CWT		E_n
	Value	Uncertainty ($k=2$)	Value	Uncertainty ($k=2$)	
R_a	0.072 μm	0.016 μm	0.067 μm	0.063 μm	0.1
R_q	0.084 μm	0.018 μm	0.082 μm	0.064 μm	0.0
R_z	0.169 μm	0.049 μm	0.278 μm	0.142 μm	0.7

The E_n numbers is typically used in measurement comparison schemes, which is defined by [12]

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (9)$$

In this case, x is the value of CWT, X is the value of SP-500, U_{lab} is the expanded uncertainty of CWT and U_{ref} is the expanded uncertainty of SP-500. For E_n numbers, when $|E_n| \leq 1.0$ the result is satisfactory.

From Table 4, the E_n of R_z of Sample No.2 is nearly 1.0. Due to the measurement's results of SP-500 Series, light beam was focused to twenty small areas of sample surface. By comparing with CWT method, measuring area, covered by parallel beam, was 4 lines of $25 \times 4000 \mu\text{m}$, which was larger than the area, measured by SP-500 Series. In case the smooth surface sample, such as Sample No.1, the size of measuring area had no effect on R_z because values of surface roughness in almost every different area were close together. For Sample No.2, its surface was rougher than Sample No.1, then, the size of measuring size affected to its R_z . The smaller measuring area brought to smaller R_z than the larger one. Therefore, R_z , calculated from larger area, was suitable to represent the roughness of the whole sample surface.

5. CONCLUSIONS

This paper describes a method based on VSI for 3-D surface roughness profile measurement of 316-stainless steel. In addition, surface roughness of 316-stainless steel was measured by using a MI with SLD. Because of a micro-scale of SLD's coherence length and a VSI with CWT algorithm, an accuracy micro-scale of position in z-direction could be determined from a highest intensity position of interferogram. Two 316-stainless steel were tested by applying this VSI technique, and their surface roughness values were compared with ones measured from 3-D Non-Contact Surface Profiler SP-500 Series. According to the measuring results of these two samples, the calculated values of E_n numbers, which is an acceptable level based on ISO/IEC 17043[9], between surface roughness of these two methods were less than or equal to 1. In this research, it was found that the expanded uncertainty is depended on uncertainty

from the error of the PZT stage and the homogeneity of sample. To reduce the dominant source of uncertainty, the expanded uncertainty will be decreased. The results suggest that this method can be applied to investigate the surface roughness of standard weight which more homogeneous than the sample.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported in part by Thailand Research Fund (Contact Number: MRG5280177)

REFERENCES

- [1] N. Metchkarov, V. Sainov and P. Boone, "High-accuracy surface measurement using laser-diode phase-stepping interferometry", *Vacuum*, vol. 58, pp. 464-469, 2000.
- [2] E. Jonathan, "Non-contact and non-destructive testing of silicon V-grooves: A non-medical application of optical coherence tomography (OCT)", *Optics and Lasers in Engineering*, vol.44, pp.1117-1131, 2006.
- [3] M. D. Duncan and M. Bashkansky, "Subsurface defect detection in materials using optical coherence tomography", *Optics Express*, vol.2, no.13, pp.540-545, 1998.
- [4] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Shuman, W. G. Stington, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito and J. G. Fujimoto, "Optical Coherence Tomography", *Science*, vol. 254, no. 5035, pp. 1178-1181, 1991.
- [5] P. Pavlíček, "Height profile measurement by means of white light interferometry", *Proceedings of the SPIE*, vol. 5259, pp. 139-144, 2003.
- [6] R. Onodera, H. Wakaumi and Y. Ishii, "Measurement technique for surface profiling in low-coherence interferometry", *Optics Communications*, vol. 254, pp. 52-57, 2005.
- [7] M. Li, C. Quan and C. J. Tay, "Continuous wavelet transform for micro-component profile measurement using vertical scanning interferometry", *Optics & Laser Technology*, vol.40, pp.920-929, 2008.
- [8] C. J. Tay, C. Quan and M. Li, "Investigation of a dual-layer structure using vertical scanning interferometry", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 45, pp. 907-913, 2007.
- [9] L. Chongchun and Q. Zhengding, "A method based Morlet wavelet for extracting vibration signal envelope", *Proceedings of ICSP2000*, pp.337-340, 2000.
- [10] C. Torrence and G. P. Compo, "A practice guide to wavelet analysis", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol.79, pp.61-78, 1998.
- [11] United Kingdom Accreditation Service, "The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement", 2nd ed., London, 2007.
- [12] ISO/IEC 17043, "Conformity assessment - General requirements for proficiency testing", 2010.