

รหัสโครงการ SUT1-107-60-12-17



รายงานการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาระบบเชิงแสงของการวัดภูมิลักษณะความหนา
สำหรับการวิเคราะห์วัสดุฟิล์มบางแบบไม่สัมผัส
(Design and Development of Optical Thickness Topography
Technique for Non-contact Characterization of Thin Film
Materials)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาระบบเชิงแสงของการวัดภูมิลักษณะความหนา
สำหรับการวิเคราะห์วัสดุฟิล์มบางแบบไม่สัมผัส
(Design and Development of Optical Thickness Topography
Technique for Non-contact Characterization of Thin Film
Materials)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พนมศักดิ์ มีมนต์

สาขาวิชาฟิสิกส์

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร. โจโวโน วิตจาया

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2562

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสำนักงาน
คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ทีมวิจัย

สิงหาคม 2562



บทคัดย่อภาษาไทย

วัสดุฟิล์มบางที่มีความหนาในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรมีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในระดับงานวิจัย ระดับอุตสาหกรรม และการใช้งานในชีวิตประจำวัน คุณสมบัติที่สำคัญของการออกแบบระบบฟิล์มบางก็คือความสม่ำเสมอของความหนา (thickness uniformity) และดัชนีหักเหของวัสดุต่างๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการส่งผ่าน (transmittance) และการสะท้อน (reflectance) ของแสงผ่านฟิล์มบาง อย่างไรก็ตามการวัดความหนาของฟิล์มบางไม่สามารถทำได้ด้วยวิธีการวัดปกติซึ่งต้องอาศัยการสัมผัสตัววัสดุ ซึ่งนอกจากจะมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำแล้ว ยังอาจส่งผลให้ความหนาของวัสดุเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากเครื่องมือวัด การวัดความหนาของแผ่นฟิล์มบางที่มีประสิทธิภาพสูงจึงต้องอาศัยเทคนิคเชิงแสง ซึ่งไม่มีการสัมผัสชิ้นงานที่ต้องการวัด (non-contact) และไม่ทำลายคุณสมบัติของชิ้นงาน (non-destructive) ใช้เวลารวดเร็วในการวัด และมีต้นทุนต่ำ (low cost)

โครงการวิจัยนี้ เป็นการออกแบบและพัฒนากล้องจุลทรรศน์อินฟราเรดด้วยหลักการ OCT เพื่อการสร้างแผนภาพความหนาของฟิล์มบางแบบไม่สัมผัส โดยออกแบบให้สามารถวัดวัสดุฟิล์มบางได้ทั้งที่เป็นแก้ว พลาสติก โพลีเมอร์ สารกึ่งตัวนำ และที่สำคัญยังสามารถวัดความหนาของไบโอฟิล์มที่ยังมีชีวิตได้ด้วย ซึ่งสามารถวัดความหนาได้โดยไม่มีการสัมผัสแผ่นฟิล์มบาง ไม่ต้องมีการเตรียมตัวอย่างที่ซับซ้อน และไม่ต้องเปิดผิวชิ้นงาน ทำให้สามารถวัดได้เร็ว สามารถวัดตัวอย่างที่มีความหนาไม่สม่ำเสมอได้เป็นบริเวณกว้าง ทั้งยังใช้แสงอินฟราเรดที่พลังงานต่ำในระดับมิลลิวัตต์ ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของเซลล์สิ่งมีชีวิต เหมาะกับงานที่ต้องการติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนาของไบโอฟิล์มแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานได้

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

Thin film material with micrometer or nanometer thickness is widely used both at the research level, Industrial level and daily use. The important feature of thin film is consistency of thickness uniformity and refractive index of the thin film material, which directly affects the transmission and reflection properties of light through thin film. However, the measurement of thin film thickness is not possible with conventional measurement methods that require material contact, which lead to limitation in measurement precision. The measurement of the thickness of thin films with high accuracy would require the techniques that does not touch the workpiece that needs measurement and does not destroy the properties of the workpiece upon measurement, fast measurement and low cost. Making it able to measure quickly Can measure the grill that has an uneven thickness in a wide area It also uses infrared light at low power at milliwatts.

This research project aims for the design and development of infrared microscopes based on OCT principle for creating non-contact thin film thickness mapping. The prototype has been developed to be able to measure thin film materials, such as glass, plastic, polymer, semiconductor, and more importantly, can also measure the thickness of live biofilms. The prototype can measure the thickness without touching the thin film, no complicated sample preparation is required, no need to open the work surface of the sample. This enables for high speed measurement. In addition, it has ability to measure thin film with uneven thickness over a wide measurement area. Moreover, it uses near infrared wavelength with low power in order of a few milliwatt.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูปภาพ.....	จ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature).....	4
การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature).....	4
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	9
วิธีการดำเนินการวิจัย.....	9
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	16
คุณสมบัติของระบบต้นแบบ.....	16
ประสิทธิภาพของระบบ.....	19
ตัวอย่างการประยุกต์ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	23
สรุปรวมผลงานวิจัย.....	23
ผลผลิตของงานวิจัย.....	24
การเผยแพร่ผลงานวิจัยของโครงการ.....	25
การศึกษาวิจัยเพิ่มเติม.....	26
บรรณานุกรม.....	27
ประวัตินักวิจัย.....	31

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 Optical topography ของชั้นความหนาในวัสดุโพลีเมอร์ ¹¹	5
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการประยุกต์ Optical topography ในการวิเคราะห์ชั้นความหนาของซิลิกอนเวเฟอร์ ¹	5
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของระบบ Optical Thickness Topography	10
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายระบบหัวถ่ายภาพจาก (a) ด้านหน้า และ (b) ด้านข้าง	11
รูปที่ 3.3 ต้นแบบระบบสเปคโตรมิเตอร์ความเร็วสูงเพื่อการตรวจจับสัญญาณแทรกสอดแสงอินฟราเรด	12
รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงอัลกอริทึมในการวิเคราะห์แผนภาพความหนาของตัวอย่างจากข้อมูลสามมิติจากระบบไอซีที	13
รูปที่ 3.5 ภาพตัวอย่างการวิเคราะห์ความละเอียดของการถ่ายภาพในแนวระนาบ (lateral resolution) โดยใช้ 1951 USAF resolution target โดยจากรูระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแยกได้ขั้นต่ำประมาณ กลุ่มที่ 7 element 1 ซึ่งเทียบได้กับค่ากำลังแยกประมาณ 4 ไมโครเมตร	14
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการลดลงของสัญญาณที่ระดับความลึกต่างๆ กัน ซึ่งเป็นตัวกำหนดความลึกสูงสุดของการถ่ายภาพของระบบต้นแบบอยู่ที่ประมาณ 2.5 มิลลิเมตร โดยวัดจากตำแหน่งที่สัญญาณลดลงไป 10 เท่า จากตำแหน่งที่ขนาดสัญญาณสูงสุด	15
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายระบบต้นแบบ (a) และ (b) ส่วนสแกน XY stage (c) บอร์ดสำหรับควบคุม XY stage	17
รูปที่ 4.2 (a) ภาพภูมิลักษณะของพื้นผิวบนของไบโอฟิล์ม (b) ภาพภูมิลักษณะของพื้นผิวล่างของไบโอฟิล์ม (c) ภาพภูมิลักษณะของความหนาเชิงแสงไบโอฟิล์ม (d) ภาพด้านบนของความหนาเชิงแสงไบโอฟิล์ม	18
รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์การกระจายของความหนาและความสม่ำเสมอของความหนาของแผ่นฟิล์ม (a) แผนภาพความหนาที่ถ่ายโดยระบบต้นแบบ (b) ความหนาและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาในแต่ละพื้นที่ย่อยโดยแบ่งเป็น 25 พื้นที่ (c) แผนภาพแสดงความหนาเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่ย่อย และ(d) แผนภาพแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาในแต่ละพื้นที่ย่อย	19
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการถ่ายภาพไบโอฟิล์มโดยไม่ต้องนำชิ้นตัวอย่างออกจากระบบเพาะเลี้ยง	20
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างภาพถ่ายตัดขวางของไบโอฟิล์มที่ก่อตัวบนผิวของแผ่นทองแดงและสังกะสีที่ถ่ายโดยระบบต้นแบบเป็นเวลาต่อเนื่อง 14 วัน	21
รูปที่ 4.6 แสดงภาพพื้นผิวสามมิติของการเกิดไบโอฟิล์มบนผิวแผ่นทองแดงในสัปดาห์ที่ 3 (ภาพ a) และ 4 (ภาพ b) ตามลำดับ	21
รูปที่ 4.7 (a) และ (b) แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์การกระจายความหนาของไบโอฟิล์มบนผิวแผ่นทองแดงใน	22

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันการศึกษาทางด้านวัสดุศาสตร์ได้รับความสนใจอย่างมาก นำมาซึ่งการพัฒนาองค์ความรู้ และการพัฒนาเทคโนโลยีด้านต่างๆ ให้ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ ในการศึกษาทางด้านวัสดุศาสตร์ยังสามารถจำแนกย่อยลงไปได้อีกหลายแขนง อาทิ ด้านวัสดุนาโน ด้านวัสดุสารกึ่งตัวนำ และด้านวัสดุฟิล์มบาง เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญ ที่มีส่วนส่งเสริมพัฒนาการศึกษาทางด้านวัสดุศาสตร์ต่างๆ คือเครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุตัวอย่าง ซึ่งในส่วนของวัสดุฟิล์มบางนั้น คุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญอย่างมากคือ ความหนาและความสม่ำเสมอของความหนาของแผ่นฟิล์ม

ทั้งนี้ วัสดุฟิล์มบาง (ความหนาในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร) มีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในระดับงานวิจัย ระดับอุตสาหกรรม และการใช้งานในชีวิตประจำวัน คุณสมบัติที่สำคัญของการออกแบบระบบฟิล์มบางก็คือความสม่ำเสมอ (uniformity) ของความหนาและดัชนีหักเหของวัสดุต่างๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการส่งผ่าน (transmittance) และการสะท้อน (reflectance) ของแสงผ่านฟิล์มบาง อย่างไรก็ตามการวัดความหนาของฟิล์มบางไม่สามารถทำได้ด้วยวิธีการวัดปกติซึ่งต้องอาศัยการสัมผัสตัววัสดุ ซึ่งนอกจากจะมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำแล้ว ยังอาจส่งผลให้ความหนาของวัสดุเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากเครื่องมือวัด การวัดความหนาของแผ่นฟิล์มบางที่มีประสิทธิภาพสูงจึงต้องอาศัยเทคนิคเชิงแสงซึ่งไม่มีการสัมผัสชิ้นงานที่ต้องการวัด (non-contact) และไม่ทำลายคุณสมบัติของชิ้นงาน (non-destructive)

โครงการนี้มุ่งหวังที่จะออกแบบและสร้างระบบการถ่ายภาพภูมิลักษณะความหนา (optical thickness topography) สำหรับการวิเคราะห์วัสดุชนิดฟิล์มบาง ที่มีประสิทธิภาพสูงในด้านความเร็วในการบันทึกสัญญาณและความละเอียดของการวัด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นผิวและความหนาของชิ้นงานวัสดุชนิดฟิล์มบางโดยไม่มีการสัมผัสชิ้นงาน และยังสามารถพัฒนาไปสู่การประยุกต์ใช้งานตรวจสอบคุณภาพของแผ่นฟิล์มบางในงานวิจัยด้านต่างๆ อาทิ ด้านชีววิทยา ด้านชีวการแพทย์ ด้านการเกษตร และด้านอุตสาหกรรม ต่อไป โดยเทคนิคที่นำเสนอนี้ เป็นเทคนิคที่เน้นความสะดวกในการใช้งานในการวิเคราะห์พื้นผิว ความหนา และความสม่ำเสมอของความหนาของวัสดุไมโครฟิล์ม ซึ่งจะถูกออกแบบให้สามารถใช้ได้กับทั้งวัสดุทั่วไปและตัวอย่างทางชีวภาพ อีกทั้ง ยังเป็นเทคนิคที่ไม่ยุ่งยากในการเตรียมชิ้นงานวัสดุตัวอย่างในการทดสอบ และที่สำคัญคือไม่มีการสัมผัสชิ้นงานและไม่ทำลายพื้นผิวของชิ้นงานวัสดุตัวอย่าง ซึ่งทีมผู้วิจัยคาดหวังว่าต้นแบบระบบและเทคนิคการถ่ายภาพภูมิลักษณะความหนาที่พัฒนาขึ้นนี้ จะมีส่วนสำคัญที่จะช่วยในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางชนิด

ต่างๆ และช่วยสนับสนุนงานวิจัยด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง อาทิ งานวิจัยทางวัสดุศาสตร์ งานวิจัยทางชีวภาพและชีวการแพทย์ งานด้านอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ งานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมฟิล์มบางอื่นๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบการวัดภูมิลักษณะความหนา (Optical Thickness Topography) ของวัสดุชั้นงานชนิดฟิล์มบาง ได้อย่างแม่นยำโดยไม่ให้มีการสัมผัสชั้นงานตัวอย่าง
2. เพื่อนำระบบต้นแบบที่ได้ไปใช้ในงานวิจัยเพื่อพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ เพื่อการวิเคราะห์คุณลักษณะความหนาของวัสดุฟิล์มบางชนิดต่างๆ ในทั้งในด้านงานวิจัยและอุตสาหกรรม
3. เพื่อเป็นการให้ความรู้และฝึกฝนทักษะแก่นักศึกษาในการออกแบบและสร้างระบบเชิงแสง และให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้
4. เพื่อนำระบบที่พัฒนาขึ้นไปใช้เป็นสื่อในการฝึกอบรมและถ่ายทอดเทคโนโลยีเกี่ยวกับระบบเชิงแสงของการถ่ายภาพภูมิลักษณะความหนาสำหรับวัสดุชั้นงานชนิดฟิล์มบาง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เป็นการวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้ด้านเทคนิคและวิธีการเชิงแสงเพื่อการสร้างต้นแบบระบบถ่ายภาพพื้นผิวสามมิติสำหรับฟิล์มบาง ทั้งนี้ ระบบต้นแบบที่ได้จะเป็นต้นแบบในระดับปฏิบัติการ โดยการประยุกต์กล้องจุลทรรศน์ทั่วไป ประกอบร่วมกับอุปกรณ์เชิงแสงเป็นระบบนี้ เมื่อได้ระบบที่สมบูรณ์แล้วก็จะได้ออกแบบและดำเนินการทดลองเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบด้วย และมีขอบเขตของระบบต้นแบบดังนี้

- 1) แหล่งกำเนิดแสงแบบ super luminescent diode ปล่อยแสงอินฟราเรดในช่วง 800-900 นาโนเมตร กำลังแสงส่งออก 10 mW
- 2) ออกแบบและสร้างระบบการแทรกสอดแสงขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ
- 3) ออกแบบและสร้างระบบสเปคโตรมิเตอร์ความเร็วสูงโดยใช้เซ็นเซอร์แสงแบบแถวเดียวชนิด CMOS เพื่อตรวจจับสัญญาณสเปคตรัม
- 4) ความละเอียดของการถ่ายภาพในสามมิติอยู่ในช่วง 10-20 ไมโครเมตร
- 5) ออกแบบระบบสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างชนิดฟิล์มบาง
- 6) ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อการควบคุมการสแกนลำแสง การบันทึกสัญญาณ การประมวลผลสัญญาณ และส่วนติดต่อกับผู้ใช้ โดยโปรแกรมแล็บวิว (Labview)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ประโยชน์ที่ได้หลังจากเสร็จสิ้นโครงการวิจัยนี้คือ ต้นแบบระบบถ่ายภาพพื้นผิวสามมิติ ที่เป็นการพัฒนาและประยุกต์จากกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายภาพ โดยต้นแบบสามารถที่จะถ่ายภาพในลักษณะภาพตัดขวางสองมิติ และสามมิติ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ความหนาของตัวอย่างในลักษณะมุมสูง (topography) มีขีดความสามารถในการถ่ายภาพที่ความเร็ว 5 ภาพต่อวินาที ความละเอียดในการถ่ายภาพในระดับ 10-15 ไมโครเมตร ซึ่งปัจจุบันระบบต้นแบบดังกล่าวตั้งอยู่ ณ ห้องปฏิบัติการเชิงแสงของสาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้เริ่มเปิดโอกาสให้นักวิจัยในสาขาวิชาต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้เข้ามาศึกษาดูงานและประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง เช่น การวิเคราะห์ตัวอย่างวัสดุฟิล์มบาง การวิเคราะห์ตัวอย่างไบโอฟิล์มที่เกิดบนโลหะ เป็นต้น

นอกจากนี้ ผลของงานวิจัยครั้งนี้ได้ถูกนำไปเผยแพร่ในงานประชุมเชิงวิชาการระดับชาติและระดับนานาชาติรวม 3 ครั้ง รวมถึงมีการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยในรูปแบบบทความเต็มแล้ว 2 บทความ (รายละเอียดดังภาคผนวก ก) และได้รับรางวัลสภาวิจัยแห่งชาติ รางวัลสิ่งประดิษฐ์คิดค้นระดับเกียรติคุณ ประจำปี 2562 สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพและคณิตศาสตร์ อีกทั้ง ระบบต้นแบบเชิงปฏิบัติการและเทคนิคการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น จากผลของงานวิจัยครั้งนี้ จะได้ถูกนำไปพัฒนาต่อเนืองเพื่อเพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านต่างๆ ของตัวอย่าง เช่น วัสดุฟิล์มบาง และเนื้อเยื่อทางชีวภาพ ซึ่งจะเป็นประโยชน์และเพิ่มประสิทธิภาพ หรือขีดความสามารถของงานวิจัยให้ดียิ่งขึ้นไปในอนาคต

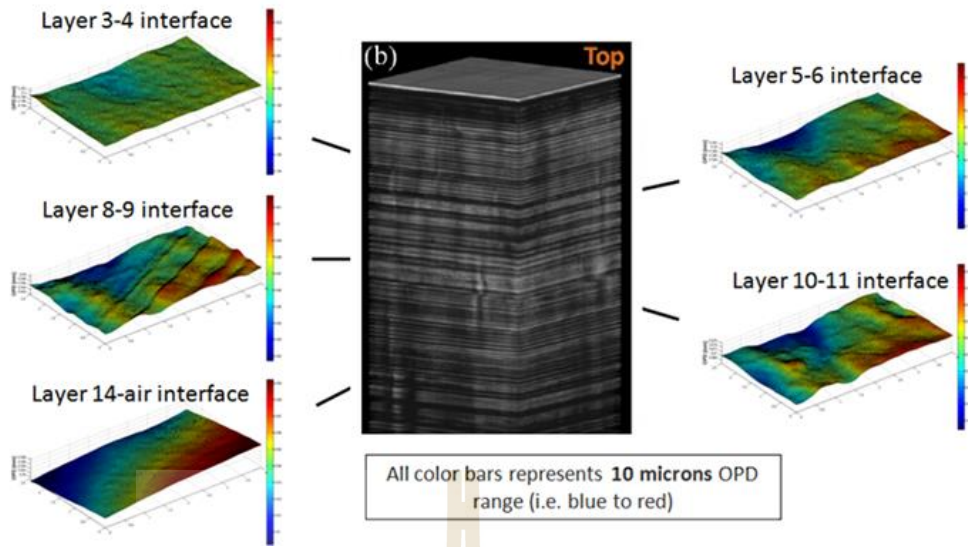
บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature)

2.1 การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature)

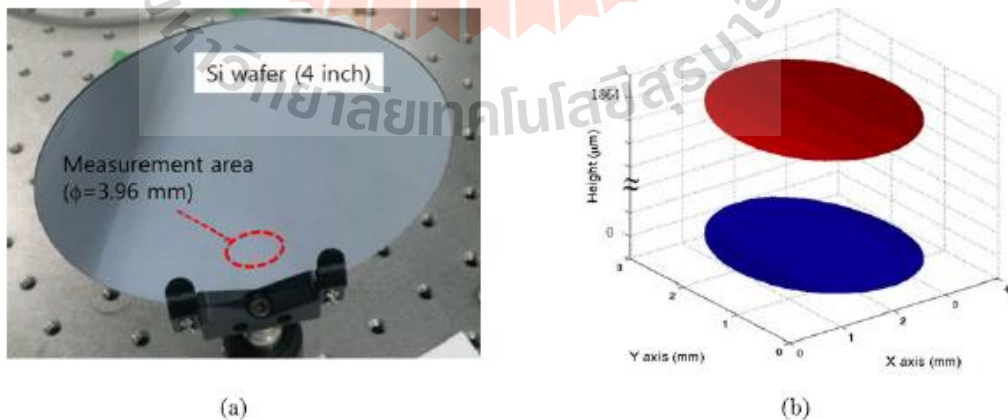
กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ทางด้านวัสดุศาสตร์ มีกระบวนการวัดเพื่อให้ได้ข้อมูลหลายหลายวิธี เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ถึงลักษณะโครงสร้าง หรือคุณสมบัติต่างๆของตัวอย่างนั้นๆ ซึ่งหนึ่งในข้อมูลที่ต้องการนำมาเพื่อการวิเคราะห์ก็คือ “ความหนา” โดยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ ที่ใช้ในการวัดความหนามีหลากหลายวิธี ทั้งกระบวนการวัดแบบพื้นฐาน เช่น ไม้มบรรทัด เวอร์เนียร์คาร์ปเปอร์ ไมโครมิเตอร์ เป็นต้น หรือกระบวนการขั้นสูง เช่น SEM และ Elipsometry เป็นต้น ซึ่งในแต่ละกระบวนการนั้นมีข้อดี และข้อด้อยที่แตกต่างกัน เช่น SEM และ Elipsometry สามารถให้ข้อมูลที่มีความละเอียดสูงในการวัด แต่เป็นกระบวนการวัดที่ทำลายตัวอย่างชิ้นงาน และขั้นตอนที่ซับซ้อนในการเตรียมตัวอย่างในการวัด รวมถึงให้ข้อมูลในลักษณะเพียงแค่อองศา ในส่วนของวัสดุฟิล์มบางนั้น คุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญอย่างมากคือ และความสม่ำเสมอของความหนาของแผ่นฟิล์ม^{1,2} ซึ่งหนึ่งในเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ก็คือ การวิเคราะห์ความหนาด้วยการแทรกสอดของแสง (Optical Interferometry) ได้มีการศึกษาและนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความหนาและพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างเริ่มในปี ค.ศ. 1982³ และได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน^{1,4-9}

ทั้งนี้ วัสดุฟิล์มบาง (ความหนาในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร)¹⁰ มีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในระดับงานวิจัย ระดับอุตสาหกรรม และการใช้งานในชีวิตประจำวัน คุณสมบัติที่สำคัญของการออกแบบระบบฟิล์มบางก็คือความสม่ำเสมอ (uniformity) ของความหนาและดัชนีหักเหของวัสดุนั้นๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการส่งผ่าน (transmittance) และการสะท้อน (reflectance) ของแสงผ่านฟิล์มบาง อย่างไรก็ตามการวัดความหนาของฟิล์มบางไม่สามารถทำได้ด้วยวิธีการวัดปกติซึ่งต้องอาศัยการสัมผัสตัววัสดุ ซึ่งนอกจากจะมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำแล้ว ยังอาจส่งผลให้ความหนาของวัสดุเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากเครื่องมือวัด การวัดความหนาของแผ่นฟิล์มบางที่มีประสิทธิภาพสูงจึงต้องอาศัยเทคนิคเชิงแสง¹¹ ซึ่งไม่มีการสัมผัสชิ้นงานที่ต้องการวัด (non-contact) และไม่ทำลายคุณสมบัติของชิ้นงาน (non-destructive)^{8,12} สามารถถ่ายภาพขึ้นได้ทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ ใช้เวลารวดเร็วในการถ่ายภาพชิ้นงาน และต้นทุนต่ำ (low cost)¹



รูปที่ 2.1 Optical topography ของชั้นความหนาในวัสดุโพลีเมอร์¹¹

อีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่สำคัญ ที่ต้องการการวัดความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์ม คือ อุตสาหกรรมการผลิตแผ่นชิพสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการทำวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ ไดโอดเปล่งแสง (LED) แผ่นเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ และ อุปกรณ์ MEMS เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญในการสร้างชั้นของสารกึ่งตัวนำคือ ความเรียบของพื้นผิวและความสม่ำเสมอของชั้นความหนาของซิลิกอนที่ปลูกลงไปบนวัสดุพื้น⁶ ยิ่งไปกว่านั้น ในอุตสาหกรรมปัจจุบันยังมีความต้องการวัดความเรียบของพื้นผิว² และความหนาที่ความละเอียดสูงขึ้น¹³ และไม่เพียงต้องการทราบข้อมูลดังกล่าว เฉพาะจุดเท่านั้น แต่ต้องการวัดตลอดทั้งพื้นผิว จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคของ topography และต้องการการวัดแบบไม่สัมผัส จึงต้องใช้เทคนิคเชิงแสง optical profilometry หรือ optical topography^{9,14,15}



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการประยุกต์ Optical topography ในการวิเคราะห์ชั้นความหนาของซิลิกอนเวเฟอร์¹

Optical Thickness Topography เป็นเทคนิคการถ่ายภาพภูมิลักษณะความหนาของตัวอย่างโดยสามารถถ่ายภาพตัวอย่างหรือชิ้นงาน โดยใช้แสงเลเซอร์ฉายในมุมสูง และใช้หลักการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนกลับจากผิวบนของตัวอย่างและแสงที่สะท้อนจากผิวล่างของตัวอย่าง สามารถวัดความหนาของชิ้นงานได้ ซึ่งความสามารถของการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Optical Thickness Topography นี้สามารถถ่ายภาพของตัวอย่างชิ้นงานได้ด้วยความเร็วสูง¹³ ได้ภาพที่มีลักษณะเป็นภาพตัดขวางในสองมิติ และสามมิติ¹⁶ สามารถวัดความหนาชิ้นงานและพื้นผิวทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งเหมาะกับการใช้เพื่อถ่ายภาพวัสดุชนิดฟิล์มบาง^{8,12,17} วัสดุโปร่งแสงต่างๆ^{11,16} และรวมไปจนถึงเนื้อเยื่อชีวภาพ (biological tissue)^{18,19} โดยความละเอียดในการถ่ายภาพอยู่ในระดับสูง ไม่ทำลายวัสดุตัวอย่าง (non-destructive) และไม่เป็นอันตรายต่อวัสดุตัวอย่าง (non-invasive) เนื่องจากใช้แสงเลเซอร์ระดับพลังงานต่ำ และเป็นแสงอินฟราเรดช่วงสั้น (near infrared หรือ NIR)

ทั้งนี้ ปัจจุบันได้มีอีกหนึ่งเทคนิคที่เข้ามามีบทบาทมากขึ้น ซึ่งก็คือ Optical Coherence Tomography (OCT) ซึ่งเป็นเทคนิคเชิงแสงที่สามารถให้ข้อมูลในลักษณะรูปภาพแบบตัดขวางสองมิติ และสามมิติ มีความละเอียดในระดับไมครอน มีความเร็วสูงในการถ่ายภาพ และไม่ทำลายตัวอย่างทั้งตัวอย่างทางวัสดุศาสตร์และทางชีวภาพ โดย OCT ถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1991 โดยทีมนักวิจัยของ MIT ซึ่งนำทีมโดย James Fujimoto²⁰ OCT เป็นเทคนิคของการถ่ายภาพตัดขวาง (tomography) โดยอาศัยคุณสมบัติ low temporal coherence ของคลื่นแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นแบบกว้าง (broadband light source)²¹ ในปัจจุบัน OCT ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็ว และได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ด้านการแพทย์²²⁻²⁴ ด้านชีววิทยา²⁵⁻²⁷ ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ²⁸ และด้านการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ^{29,30} เป็นต้น

หลักการทำงานของ OCT สามารถอธิบายโดยสังเขปได้ดังนี้ แสงจาก broadband laser จะถูกลำเลียงเข้าสู่ระบบการแทรกสอดของแสง ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นระบบแทรกสอดแบบไมเคลสัน (Michelson interferometer) ในระบบแทรกสอดแสงไมเคลสัน แสงจากแหล่งกำเนิดจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นแสงอ้างอิง (reference beam) ซึ่งจะถูกระบายกลับด้วยกระจก (reference mirror) และลำเลียงต่อไปยังอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง (photodetector) ที่เอาต์พุตของระบบแทรกสอด แสงส่วนที่สองจะถูกโฟกัสด้วยเลนส์ไปยังตัวอย่างที่ต้องการถ่ายภาพ ซึ่งเลนส์ตัวเดียวกันนี้ก็จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากตัวอย่าง (backscattering light) ซึ่งเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของค่าดัชนีหักเหของแสงที่ตำแหน่งต่างๆ ในชิ้นตัวอย่าง (refractive index variation) แสงสะท้อนจากตัวอย่างจะถูกแทรกสอดกับแสงอ้างอิง โดยการเลื่อนตำแหน่งของกระจกใน reference arm เป็นระยะทางที่ต้องการวัด ภาพตัดขวางของตัวอย่างสร้างจากแอมพลิจูดที่แตกต่างกันของการสะท้อนที่ความลึกต่างๆ จากผิวของตัวอย่าง³¹ ระบบ OCT ที่มีการสแกนของ reference beam แบบนี้ เรียกว่า Time Domain OCT (TD-OCT) ซึ่งมีข้อจำกัดในด้านของความเร็วในการถ่ายภาพ

ในเวลาต่อมา ได้มีการนำเอาความรู้เกี่ยวกับการแทรกสอดในโดเมนความถี่³² มาประยุกต์ใช้กับ OCT เรียกว่า Frequency Domain OCT (FD-OCT) หรือ Spectral Domain OCT (SD-OCT)³³ FD-OCT บันทึกค่าสัญญาณ spectral interference ที่เอาต์พุทของ interferometer ซึ่งมีจุดเด่นก็คือ ความไวต่อสัญญาณ และความเร็วของการวัด เนื่องจากไม่ต้องมีการสแกนของ reference beam อีกต่อไป³⁴⁻³⁶ FD-OCT สร้างภาพตัดขวางของตัวอย่างโดยการฉายแสงเลเซอร์ชนิด broadband ให้ไปตกกระทบลงบนผิวตัวอย่าง (sample) แล้ววัดสัญญาณ spectral interference ระหว่างสัญญาณที่สะท้อนมาจากตัวอย่างและแสงอ้างอิง ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้สเปกโตรมิเตอร์เชิงแสง (optical spectrometer) ซึ่งเมื่อนำไปผ่านการแปลงแบบฟูริเยร์แล้วจะได้สัญญาณเชิงเส้นในโดเมนพื้นที่ (spatial domain) ที่เทียบได้กับความสามารถในการสะท้อนที่ระดับความลึกต่างๆ (depth-resolved reflectivity profile) ภายใต้อพื้นที่ผิวของตัวอย่าง เมื่อประกอบกับการสแกนลำแสงในแนวขนานกับพื้นที่ผิวตัวอย่าง (lateral scan) แล้ว ก็จะสามารถสร้างภาพตัดขวางในแบบ 2 มิติ และสามมิติได้³¹

จนถึงปัจจุบัน OCT ได้รับการพิสูจน์และเป็นที่ยอมรับโดยแพทย์ผู้เชี่ยวชาญจำนวนมากจากทั่วโลกแล้วว่า เป็นเทคโนโลยีที่สามารถใช้ประโยชน์ในการถ่ายภาพเพื่อใช้ประกอบการวินิจฉัยทางการแพทย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อาทิ วงการจักษุแพทย์ แพทย์หัวใจ และแพทย์ผิวหนัง เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวงการจักษุแพทย์ ซึ่ง OCT ได้ถูกนำไปใช้ในการถ่ายภาพสามมิติของจอประสาทตา เพื่อใช้ประกอบการวินิจฉัยโรคเกี่ยวกับตาหลายๆ ชนิดแม้ในระยะเริ่มต้น (early detection) เช่น โรคต้อกระจก โรคต้อหิน และโรคตาเสื่อมในผู้ป่วยเบาหวานและในผู้สูงอายุ เป็นต้น ซึ่งโรคเหล่านี้มักจะไม่มีแสดงอาการที่ชัดเจนและยากต่อการตรวจพบได้ในระยะเริ่มต้นด้วยวิธีการอื่นๆ ซึ่งเป็นระยะที่สามารถรักษาให้หายได้หากมีการตรวจพบอย่างทันทั่วทั้งที่ ในทางกลับกันหากปล่อยให้ลุกลาม ก็จะนำไปสู่ภาวะตาบอดอย่างถาวรได้

ปัจจุบัน OCT ได้มีการพัฒนาความสามารถและคุณสมบัติในการถ่ายภาพอย่างต่อเนื่อง เพราะให้เหมาะสมกับการใช้งานในการวิเคราะห์ตัวอย่างในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นในด้านการแพทย์ ด้านวัสดุศาสตร์ และด้านชีววิทยา ซึ่งหนึ่งในตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน OCT ด้านวัสดุศาสตร์ ก็คือการวัดความหนาของฟิล์มบาง เนื่องด้วยในด้านวัสดุศาสตร์นั้นฟิล์มบางเป็นกระบวนการในการสร้างชั้นของวัสดุในลักษณะที่ความบางตั้งแต่ในระดับนาโนเมตรจนถึงไมโครเมตร เพื่อนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ดังนั้น OCT จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งาน เพื่อศึกษาความหนาของชั้นฟิล์ม รวมถึงลักษณะโครงสร้างของชั้นฟิล์มที่ผ่านกระบวนการเตรียมมา

งานวิจัยนี้ เป็นการออกแบบและสร้างระบบการถ่ายภาพภูมิลักษณะความหนาสำหรับการวิเคราะห์วัสดุชนิดฟิล์มบาง (Optical Thickness Topography) ที่มีประสิทธิภาพในด้านความเร็วในการถ่ายภาพและความละเอียดของการถ่ายภาพ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและความหนาของชั้นงานวัสดุชนิดฟิล์มบาง โดยที่เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ง่ายในการวิเคราะห์วัสดุในด้านพื้นผิวและความหนา เพราะเป็นเทคนิคที่ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการเตรียมชั้นงานวัสดุตัวอย่าง และไม่ทำลาย

ชิ้นงานวัสดุตัวอย่าง ซึ่งทีมผู้วิจัยความหวังว่าเทคนิคการถ่ายภาพภูมิลักษณะความหนาสำหรับวัสดุชนิดฟิล์มบางนี้ จะเป็นเทคนิคที่ช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะวัสดุต่างๆ และช่วยสนับสนุนงานวิจัยด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น งานวิจัยทางวัสดุศาสตร์ งานวิจัยทางชีวภาพการแพทย์ อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมจอแสดงผลแบบแอลซีดี (LCD display)³⁷ รวมถึงงานวิจัยและงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

เป็นในรูปแบบของการศึกษาและค้นคว้าทางทฤษฎี ซึ่งรวมถึงการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และนำองค์ความรู้ที่ได้มาปรับปรุงและพัฒนาเพื่อนำไปสู่การออกแบบและสร้างเป็นต้นแบบระบบเชิงแสงในระดับห้องปฏิบัติการทดลอง การพัฒนาเชิงฮาร์ดแวร์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของระบบต้นแบบ เช่น ความสามารถในการตรวจจับสัญญาณ (sensitivity), เสถียรภาพของระบบ (stability), ความละเอียดของการถ่ายภาพ (resolution), และความเร็วในการถ่ายภาพ (speed) รวมถึงการพัฒนา ระบบประมวลสัญญาณ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของต้นแบบ ในการนำไปใช้ในงานวิจัยด้านวัสดุศาสตร์ในการวิเคราะห์ความหนาพื้นผิวของฟิล์มบาง และงานวิจัยที่มีความต้องการประยุกต์ใช้งานในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

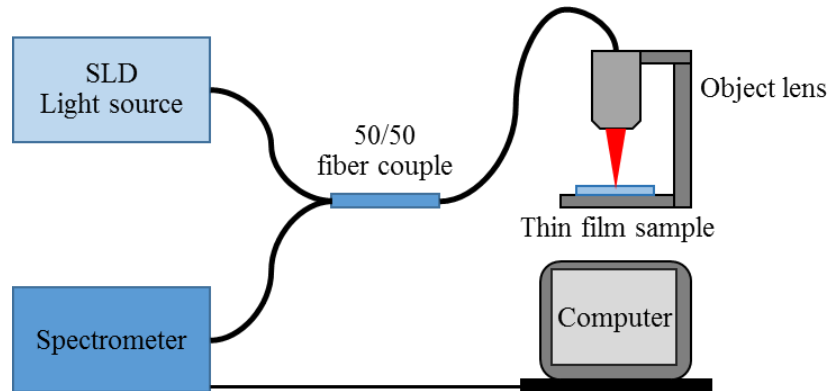
ระบบถ่ายภาพวิเคราะห์ความหนาแบบพื้นผิว ที่พัฒนาขึ้นมาในโครงการนี้ เป็นระบบที่มีหลักการทำงานแบบ FD-OCT ซึ่งเป็นระบบที่สร้างภาพตัดขวางของตัวอย่างโดยการฉายแสง broadband laser ที่ความยาวคลื่นในช่วง near infrared (NIR) โดยใช้ระบบแทรกสอดแสงในใยแก้วแบบไมเคลสัน (fiber-based Michelson interferometer) และการตรวจจับสัญญาณ spectral interference ด้วย grating based optical spectrometer โดยมุ่งออกแบบให้มีทั้งความเร็วและความละเอียดในการถ่ายภาพที่สูง และเพิ่มขีดความสามารถในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ในต้นทุนการสร้างที่ต่ำเมื่อเทียบกับระบบเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน โดยสามารถแยกอธิบายเป็นขั้นตอนดังนี้

3.1.1 ออกแบบและวางแผนการสร้างระบบ

- ดำเนินการศึกษาค้นคว้าทางทฤษฎี ซึ่งรวมถึงการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเน้นศึกษาพัฒนาการของเทคนิคและวิธีการใหม่ๆ ของการประยุกต์ใช้ OCT ทางด้านวัสดุศาสตร์
- นำองค์ความรู้ที่ได้มาปรับปรุงและพัฒนาเพื่อนำไปสู่การออกแบบระบบเชิงแสงในระดับห้องปฏิบัติการทดลอง รวมถึงการวางแผนและดำเนินการสั่งซื้อวัสดุ อุปกรณ์และชิ้นส่วนที่จำเป็นในการสร้างระบบเชิงแสงในระดับห้องปฏิบัติการทดลอง

3.1.2 ดำเนินการสร้างระบบในห้องปฏิบัติการเชิงแสง

- ดำเนินการประกอบชิ้นส่วนของระบบบนโต๊ะปฏิบัติการเชิงแสง โดยหัวใจสำคัญของขั้นตอนนี้อยู่ที่การทำ optical alignment ซึ่งต้องอาศัยทั้งความเชี่ยวชาญและระยะเวลาในการปฏิบัติงาน



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของระบบ Optical Thickness Topography

โดยสามารถแยกอธิบายได้เป็น 5 ส่วนหลักๆ ได้แก่

1) แหล่งกำเนิดแสง (Light source)

แสงเลเซอร์ชนิด low coherence หรือ broadband laser^{38,39} ถือได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญของระบบ OCT โดยเป็นตัวกำหนดความละเอียดของการถ่ายภาพในแนวลึก (depth resolution) ของระบบถ่ายภาพ OCT ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์³⁸

$$\Delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \left(\frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda} \right),$$

โดย λ_0 คือ central wavelength ของแหล่งกำเนิดแสง และ Δz และ $\Delta \lambda$ คือ full width at half-maximum (FWHM) ของ depth resolution และ power spectrum bandwidth ของแหล่งกำเนิดแสง ตามลำดับ นั่นคือ ความละเอียดเชิงลึกจะแปรผกผันกับความกว้างของสเปกตรัม ยิ่งแหล่งกำเนิดแสงมีความช่วงกว้างของสเปกตรัมมากขึ้น ก็จะทำให้ความละเอียดของการถ่ายภาพในแนวลึกมากขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับความสามารถในการแยกแยะความหนาของชั้นตัวอย่าง⁴⁰ ทั้งนี้ แหล่งกำเนิดแสงที่เลือกใช้ในโครงการนี้เป็นชนิด superluminescent diode หรือ SLD ซึ่งมีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับ broadband laser ชนิดอื่นๆ และยังคงให้ประสิทธิภาพที่เพียงพอต่อการถ่ายภาพ optical thickness topography โดยได้ออกแบบระบบและกำหนดคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงให้สามารถถ่ายภาพตัดขวาง 3 มิติ ที่มีความละเอียดเชิงลึก (depth resolution) อยู่ที่ประมาณน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร

2) ระบบแทรกสอดแสง (Interferometer)

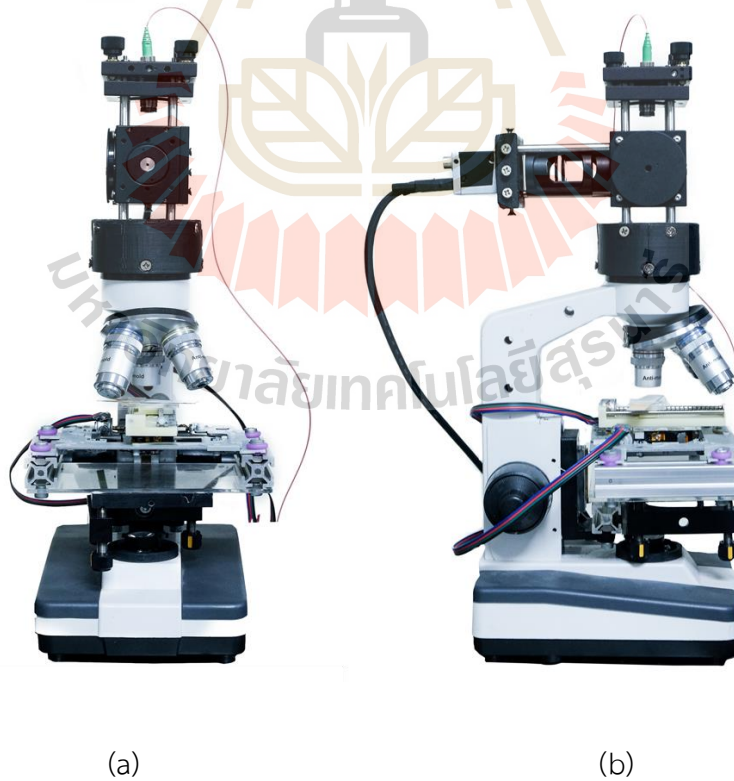
ระบบต้นแบบพัฒนาขึ้นอาศัยการแทรกสอดแสงของแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง โดยใช้ Fiber coupler แบบสองอินพุตสองเอาต์พุต (2x2) ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แบ่งลำแสง (beam splitter) และลำแสงจากแหล่งกำเนิดไปยังระบบกล้องจุลทรรศน์ โดยแสงจะถูกลำแสงเข้าที่ปลายด้านหนึ่งของอินพุต จากนั้นก็จะถูกแยกออกเป็นสองส่วนที่เอาต์พุต แสงส่วนหนึ่งจะถูกลำแสงไปยังระบบหัว

ถ่ายภาพที่ส่วนปลายของ Sample arm ซึ่งในระบบนี้เราจะตัดแสงในส่วนของกระจกอ้างอิง (Reference mirror) เราจะใช้หลักการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนกลับจากผิวบนของตัวอย่างและแสงที่สะท้อนจากผิวล่างของตัวอย่าง⁴¹ สิ่งที่ได้จากการตัดแสงในส่วนของกระจกอ้างอิง (Reference mirror)คือเราสามารถลด dispersion mismatch ในระบบ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความละเอียดในการถ่ายภาพ และลดผลกระทบโดยตรงต่อความไวในการตรวจจับสัญญาณของระบบ (system sensitivity)⁴²

3) ระบบหัวถ่ายภาพ (Imaging probe)

ระบบหัวถ่ายภาพแสดงในรูปที่ 3.2 ประกอบไปด้วย ไฟเบอร์คอลลิเมเตอร์ (fiber collimator) ที่ยิงแสงผ่านระบบกล้องจุลทรรศน์ที่นำมาดัดแปลงให้เป็นระบบหัวถ่ายภาพ โดยระบบสแกนเป็นสเตจมอเตอร์ที่วางอยู่ใต้ฐานวางตัวอย่างซึ่งถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์โดยการป้อนสัญญาณดิจิทัลให้กับบอร์ด Arduino เพื่อควบคุมสเตจมอเตอร์ในการสแกน สำหรับใช้ในงานถ่ายภาพสามมิติ

หัวใจสำคัญของการออกแบบระบบ XY สแกนต้องมีการควบคุมความเร็วของการเลื่อนสเตจมอเตอร์ให้สอดคล้องกับความเร็วในการบันทึกสัญญาณ (synchronization) โดยเน้นการออกแบบให้ระบบสามารถทำงานที่ความเร็วในการถ่ายภาพสูงสุดและให้มีความผิดพลาดของรูปแบบการสแกนน้อยที่สุด

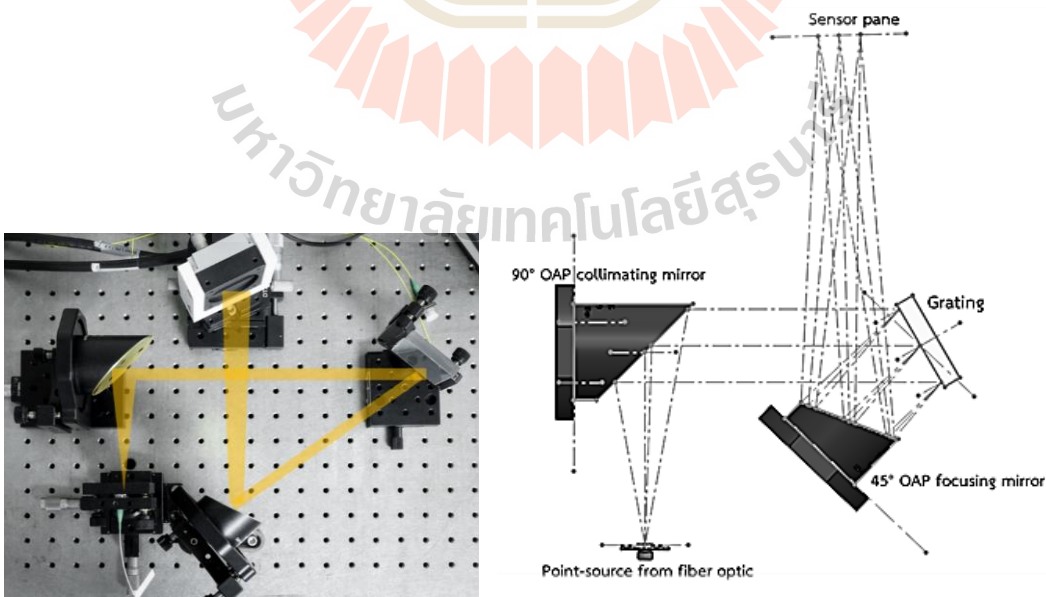


รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายระบบหัวถ่ายภาพจาก (a) ด้านหน้า และ (b) ด้านข้าง

4) ระบบตรวจจับและแปลงสัญญาณแสงอินฟราเรดแบบสเปคโตรมิเตอร์ความเร็วสูง (High speed infrared spectrometer)

ความเร็วในการตรวจจับและบันทึกสัญญาณของระบบถือเป็นหัวใจสำคัญที่จะกำหนดความเร็วในการถ่ายภาพของระบบ LCI topographic microscope ที่จะสร้างขึ้น การออกแบบระบบตรวจจับสัญญาณให้มีทั้งประสิทธิภาพในการตรวจจับสัญญาณและความเร็วในการบันทึกค่า นับได้ว่าเป็นงานที่ท้าทายที่สุดในโครงการนี้ ในส่วนของระบบตรวจจับสัญญาณนี้ จะประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือ 1) เซ็นเซอร์แสงทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอนุภาคแบบแถว (Array photo-receiver) และอุปกรณ์แปลงสัญญาณอนุภาคไปเป็นดิจิทัลชนิดความเร็วสูง (High speed frame grabber) อีกทั้ง ยังต้องสามารถถ่ายโอนข้อมูลสัญญาณแบบดิจิทัลไปยังคอมพิวเตอร์ได้ในความเร็วสูง⁴³

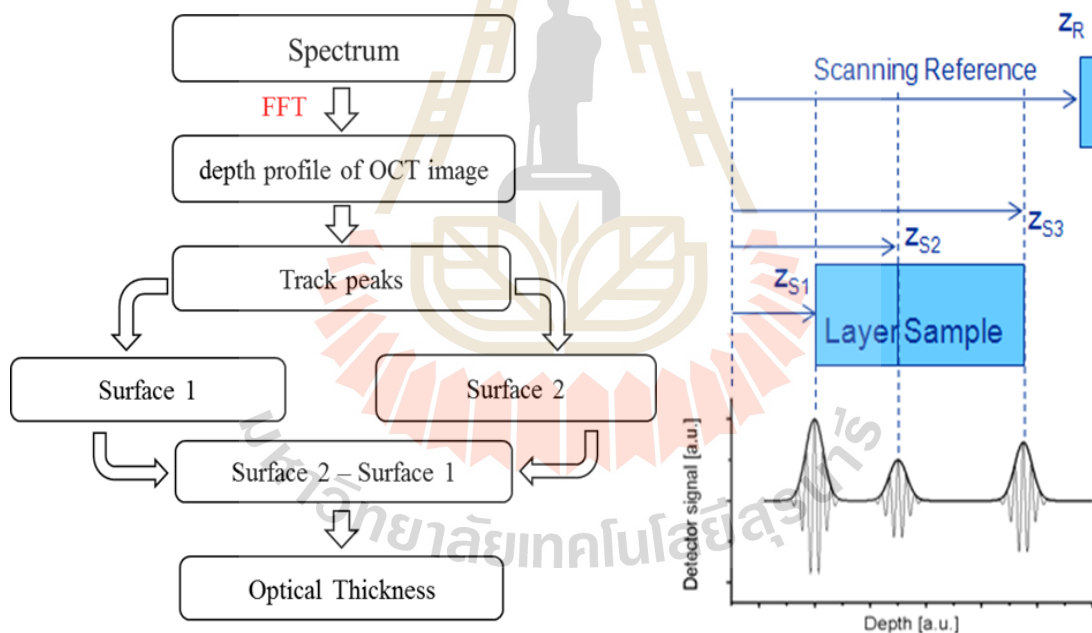
ในระบบต้นแบบนี้ ทีมผู้ประดิษฐ์ได้เลือกใช้เซ็นเซอร์แบบแถวเดี่ยวชนิด Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) รุ่น raL 6144-80 km ของบริษัท Basler Vision Technologies, Germany ที่มีขนาดพิกเซลเล็ก 7×7 ไมโครเมตร จำนวนทั้งสิ้น 6144 พิกเซล เพื่อให้สามารถตรวจจับสัญญาณสเปกตรัมที่มีความละเอียดสูง ทั้งนี้ การเลือกใช้เซ็นเซอร์ชนิด CMOS มีข้อดีในด้านความเร็วของการตรวจจับสัญญาณ ซึ่งเหมาะกับการพัฒนาเป็นสเปคโตรมิเตอร์ความเร็วสูง นอกจากนี้ ระบบเชิงแสงประกอบด้วยกระจกพาราโบลาโบริก 90 องศาในการสร้างแสงคอลลิเมเตอร์เกรตติง และกระจกพาราโบลาโบริก 45 องศาได้ออกแบบให้สอดคล้องกับแหล่งกำเนิดแสงและ CMOS sensor ซึ่งได้เลือกใช้เกรตติงแบบสะท้อนที่มีความหนาแน่นถึง 1200 เส้นต่อมิลลิเมตร ซึ่งได้แสดงแผนผังในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ต้นแบบระบบสเปคโตรมิเตอร์ความเร็วสูงเพื่อการตรวจจับสัญญาณแทรกสอดแสงอินฟราเรด

5) ระบบคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์เพื่อการประมวลผลข้อมูล

เนื่องด้วยระบบการถ่ายภาพสามมิติจำเป็นต้องมีการบันทึกและส่งถ่ายข้อมูลจำนวนมากจากระบบถ่ายภาพไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อการประมวลผล คอมพิวเตอร์ที่ใช้จึงควรที่จะสามารถรองรับการส่งถ่ายข้อมูลปริมาณมากๆ ได้ อีกทั้ง ยังต้องมีหน่วยความจำที่เพียงพอในการประมวลผลข้อมูลด้วย ในส่วนของการพัฒนาระบบต้นแบบภายใต้โครงการนี้ ระบบฮาร์ดแวร์และยูสเซอร์อินเตอร์เฟซจะถูกออกแบบและสร้างบนพื้นฐานของการโปรแกรมใน LabVIEW ซึ่งมีความเหมาะสมในแง่ของความสะดวกในการเชื่อมต่อและควบคุมกับอุปกรณ์ต่อพ่วง รวมถึงมีความง่ายต่อการตัดแปลง ปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำงานของระบบ ซึ่งเป็นปัจจัยที่จำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาระบบต้นแบบ ในส่วนของการออกแบบระบบซอฟต์แวร์ จะแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ 1) โปรแกรมควบคุมการถ่ายภาพ 2) โปรแกรมเพื่อการประมวลสัญญาณไปเป็นภาพแบบ สองมิติ และ สามมิติ 3) โปรแกรมและอัลกอริทึม (algorithm) ดังในรูปที่ เพื่อการประมวลผลภาพเพื่อวิเคราะห์โครงสร้าง คุณสมบัติ และ ความหนาของชิ้นตัวอย่างในสามมิติเช่น 3D surface profilometry, Thickness topography

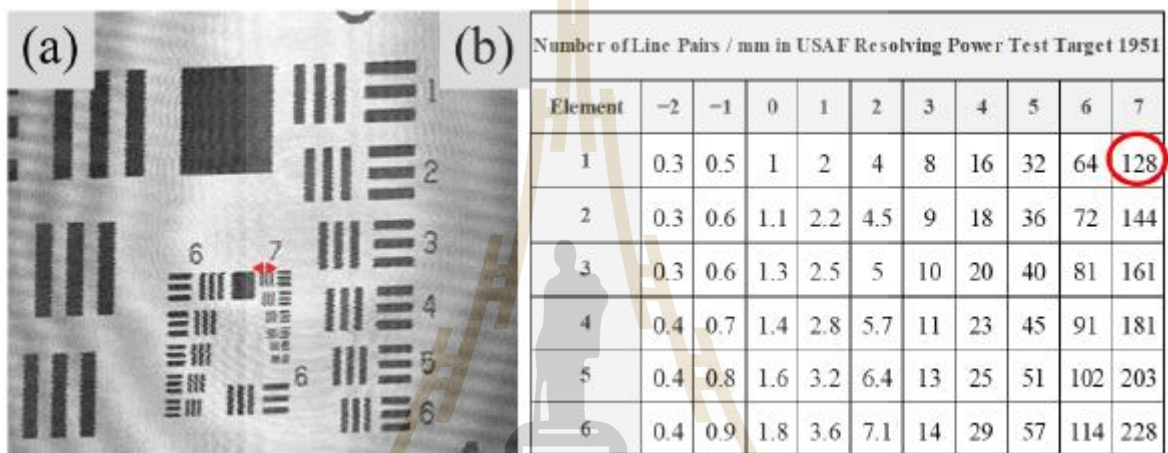


รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงอัลกอริทึมในการวิเคราะห์แผนภาพความหนาของตัวอย่างจากข้อมูลสามมิติจากระบบโอซีที

3.1.3 การตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบและวิธีการต้นแบบ

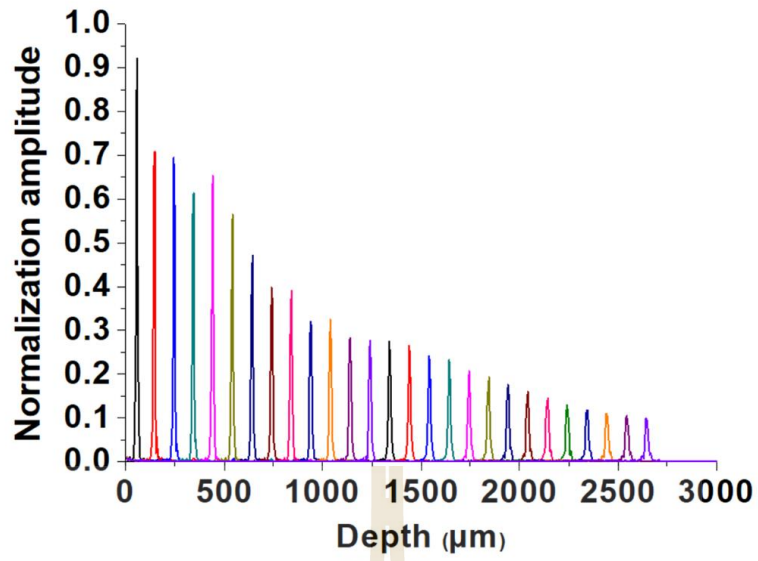
- ตรวจสอบความละเอียดของการถ่ายภาพ (resolution) โดยใช้ 1951 USAF resolution target การหาค่า lateral resolution สามารถทำได้จากการถ่ายภาพ target (Positive 1951 USAF Test Target) ซึ่ง Resolution target จะแบ่งออกเป็น

Group Number และ Element ซึ่ง Group Number จะมีค่าระหว่าง -2 ถึง 7 โดยเลขที่มีค่าน้อยจะเป็น Group ที่ใหญ่ที่สุด และ Group Number จะเป็นตัวเลขกำกับชุดของ Element ที่มีค่า 1 ถึง 6 โดยตัวเลขยิ่งมาก ขนาดความกว้างของ line pair (หมายถึงแถบขาวดำ) จะเล็กลง และขนาด lp/mm จะมากขึ้น ซึ่งจะบ่งบอกถึง resolution ที่ดี ซึ่งเมื่อได้ภาพถ่ายของ resolution target แล้ว ที่มิวจัดได้ทำการวัดค่า gray value ของแถบมืดและแถบสว่าง แล้วคำนวณเป็นค่า %contrast จากนั้นนำค่า %contrast ของแถบมืดสว่าง แต่ละความถี่ มาพลอตกราฟ MTF ทั้งนี้ ในการพิจารณาค่า lateral resolution ของระบบ จะพิจารณาที่ 20% contrast



รูปที่ 3.5 ภาพตัวอย่างการวิเคราะห์ความละเอียดของการถ่ายภาพในแนวระนาบ (lateral resolution) โดยใช้ 1951 USAF resolution target โดยจากรูประบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแยกได้ขั้นต่ำประมาณกลุ่มที่ 7 element 1 ซึ่งเทียบได้กับค่ากำลังแยกประมาณ 4 ไมโครเมตร

- ตรวจสอบความไวของการตรวจจับสัญญาณ (sensitivity) ที่ระดับความลึกต่างๆ กัน โดยใช้เทคนิคเดียวกับที่นำเสนอในเอกสารอ้างอิง [16]
- ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ (sensitivity) โดยใช้เทคนิคเดียวกับที่นำเสนอในเอกสารอ้างอิง [27]
- ตรวจสอบประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเมื่อทำงานที่ความเร็วสูงสุดของการถ่ายภาพ



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการลดลงของสัญญาณที่ระดับความลึกต่างๆ กัน ซึ่งเป็นตัวกำหนดความลึกสูงสุดของการถ่ายภาพของระบบต้นแบบอยู่ที่ประมาณ 2.5 มิลลิเมตร โดยวัดจากตำแหน่งที่สัญญาณลดลงไป 10 เท่าจากตำแหน่งที่ขนาดสัญญาณสูงสุด



บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 คุณสมบัติของระบบต้นแบบ

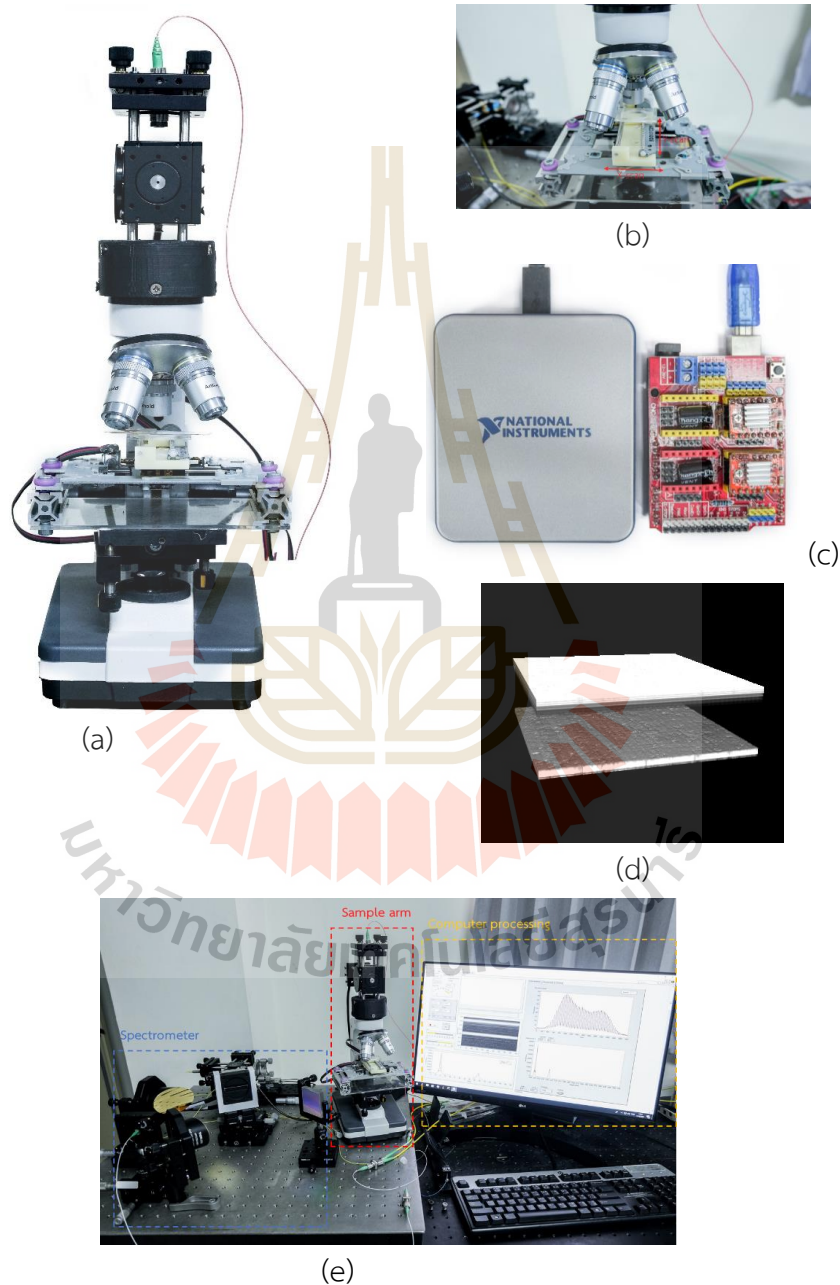
ระบบต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้นมา ได้มีการออกแบบและพัฒนาโดยการพัฒนาจากกล้องจุลทรรศน์แบบขาตั้ง ที่ในการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างขนาดเล็ก ซึ่งระบบที่พัฒนาขึ้นมาจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในระบบการถ่ายภาพจากรูปแบบการใช้กล้องจุลทรรศน์ธรรมดา เป็นการวิเคราะห์แบบเทคนิค OCT ซึ่งจะได้ทั้งข้อมูลแบบภาพตัดขวางสองมิติและสามมิติ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ความหนาเชิงพื้นผิวของตัวอย่างแบบสามมิติได้ โดยใช้ต้นทุนต่ำในการออกแบบและพัฒนา

ทั้งนี้ ระบบต้นแบบโดยรวมได้ถูกออกแบบภายใต้หลักการของระบบแทรกสอดแบบไมเคลสันโดยใช้ระบบใยแก้วนำแสงเป็นระบบลำแสง โดยเน้นออกแบบระบบให้มีความคล่องตัว มีเสถียรภาพต่อแรงสั่นสะเทือนสูง และพยายามให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด โดยต้องการให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า ในต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องเชิงพาณิชย์ ทั้งนี้ แหล่งกำเนิดแสงที่เลือกใช้เป็นแบบ Superluminescent Diode หรือ SLD ซึ่งให้แสงช่วงความยาวคลื่นแสงระหว่าง 800-900 นาโนเมตร โดยมีความยาวคลื่นเฉลี่ย 840 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่จะถูกดูดกลืนได้น้อยในเนื้อเยื่อชีวภาพ และวัสดุจำพวกฟิล์มบาง จึงไม่เกิดอันตรายจากความร้อนสะสมในระหว่างการถ่ายภาพ ทำให้มีความปลอดภัยสูง

ระบบสแกนลำแสงเพื่อการถ่ายภาพสามมิติถูกออกแบบโดยใช้ระบบ Dual-mirror galvanometer beam steering หรือเรียกสั้นๆ ว่า Galvo-mirror ซึ่งมีข้อดีในด้านการกวาดลำแสงที่ความเร็วสูงในระดับมากกว่า 100 รอบต่อวินาที ในส่วนของระบบตรวจจับสัญญาณนั้น ได้ประยุกต์ใช้สเปคโตรมิเตอร์ความเร็วสูงซึ่งทีมวิจัยได้พัฒนาขึ้นเองเช่นกัน ซึ่งถูกออกแบบและสร้างให้สามารถตรวจจับสัญญาณแสงในช่วงอินฟราเรดที่ความเร็วสูงกว่า 100,000 สเปคตรัมต่อวินาที ทำให้สามารถถ่ายภาพสามมิติของตัวอย่างได้ภายในเวลา 5-10 วินาทีเท่านั้น (ขึ้นอยู่กับขนาดของภาพสามมิติ)

ทั้งนี้ระบบต้นแบบได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้น ณ ห้องปฏิบัติการเชิงแสงของสาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยเป็นการนำชิ้นส่วนย่อยเชิงแสงและเชิงกลมาประกอบกันเป็นระบบ โดยประยุกต์ใช้กล้องจุลทรรศน์ราคาถูกที่มีขายในท้องตลาดมาปรับปรุงแก้ไข ออกแบบเป็นส่วนประกอบหนึ่งในระบบ โดยดัดแปลงจากกล้องจุลทรรศน์แบบมองด้วยตาเปล่าไปเป็นกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล และยังเพิ่มความสามารถในการตรวจวัดสัญญาณการแทรกสอดของแสงอินฟราเรดความอาพันธ์ต่ำ (low-coherence interferometer, LCI) เพื่อเพิ่มความสามารถของระบบ

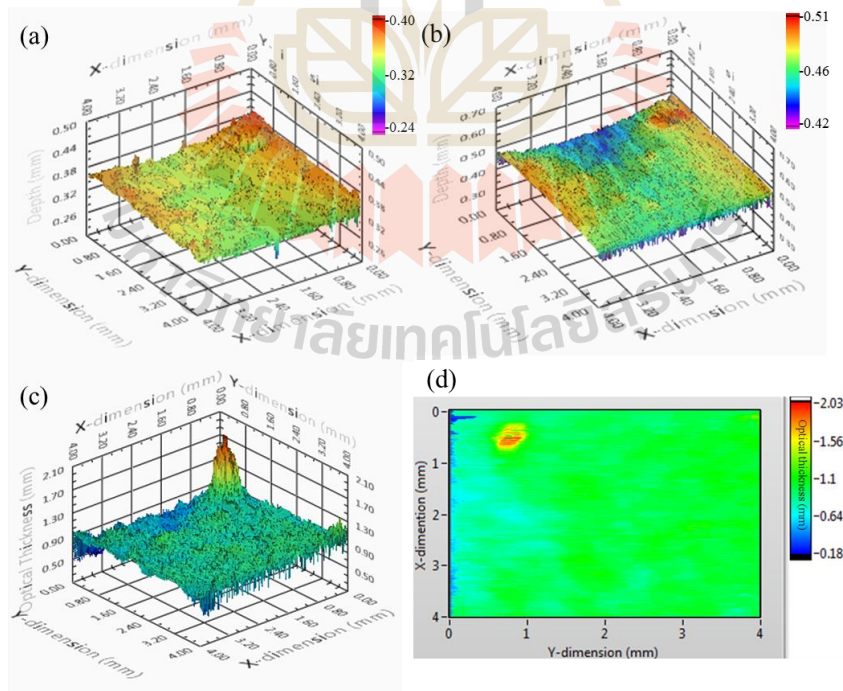
ในการวัดความหนาของฟิล์มบางแบบไม่สัมผัส โดยการวิเคราะห์สัญญาณการแทรกสอดแสงในโดเมนความถี่ (spectral interference) ทั้งนี้ ทีมผู้ประดิษฐ์ได้ออกแบบและสร้างระบบสเปกโตรมิเตอร์ความเร็วสูงขึ้นเองเพื่อใช้ในการบันทึกสัญญาณ พร้อมทั้งออกแบบระบบสแกนชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้ฐานเลื่อนสองแกนแบบขับเคลื่อนโดยสเต็ปมอเตอร์ซึ่งควบคุมโดยระบบ Arduino ที่มีราคาถูกลง เพื่อให้ใช้ต้นทุนในการสร้างระบบให้น้อยที่สุด โดยโครงสร้างของระบบทั้งหมดแสดงในรูปที่ 4.1



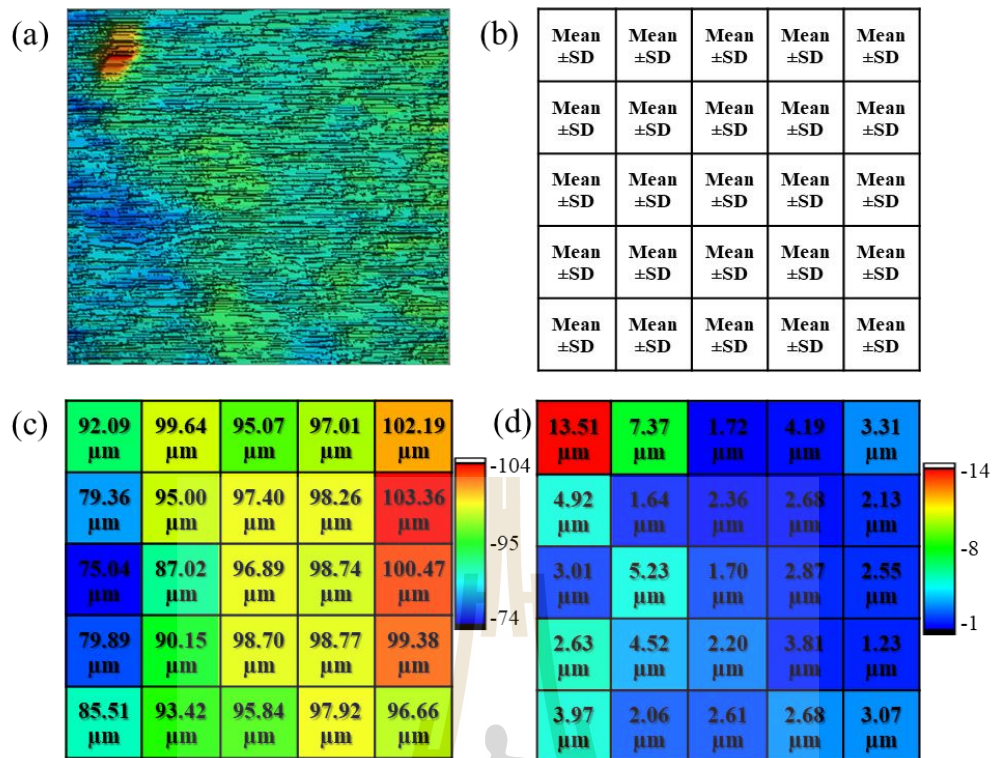
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายระบบต้นแบบ (a) และ (b) ส่วนสแกน XY stage (c) บอร์ดสำหรับควบคุม XY stage (d) ตัวอย่างภาพถ่าย 3 มิติของแผ่นแก้วบาง (e) ภาพรวมของระบบต้นแบบ

อีกทั้ง ทีมวิจัยยังได้ดำเนินการออกแบบและสร้างระบบควบคุมการบันทึกสัญญาณและการประมวลผลข้อมูล ตลอดจนระบบติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) เองทั้งหมด โดยใช้เทคนิคการโปรแกรมร่วมระหว่าง แล็บวิว (LabVIEW) และ Arduino ทั้งนี้ ระบบประมวลผลข้อมูลและประมวลผลภาพได้ถูกออกแบบให้สามารถถ่ายภาพแสดงโครงสร้างสองมิติและสามมิติของชิ้นตัวอย่าง

- 1) โหมตถ่ายภาพเคลื่อนไหว คือ การถ่ายภาพสองมิติและแสดงผลตามเวลาจริง (Real time) ซึ่งจะมี ขนาดภาพแบบ Full HD ประกอบด้วย 500 depth scans ต่อภาพ ซึ่งจะสามารถถ่ายภาพและแสดงผลแบบเวลาจริง (Real time)
- 2) โหมตถ่ายภาพสามมิติ เป็นการบันทึกสัญญาณสเปกตรัมของข้อมูลภาพสามมิติ แล้วจึงประมวลผลข้อมูลสเปกตรัม เพื่อแปลงเป็นภาพสามมิติ ซึ่งมีขนาดข้อมูล ประกอบด้วย 500x500 depth scans ต่อ volume โดยระบบจะสามารถบันทึกข้อมูลสเปกตรัมด้วยความเร็ว 5 ภาพต่อวินาที
- 3) โหมตถ่ายภาพ Thickness topography ซึ่งใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นผิวและภายใต้พื้นผิว และการวัดความหนาของชิ้นงานวัสดุชนิดฟิล์มบางโดยไม่มีการสัมผัสชิ้นงานและยังสามารถใช้ในงานตรวจสอบคุณภาพของแผ่นฟิล์มบาง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.2 ซึ่งในโหมตนี้ของเรายังสามารถวัดความหนาในแต่ละส่วนของพื้นผิวตัวอย่างได้ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 (a) ภาพภูมิลักษณะของพื้นผิวบนของโพลีฟิล์ม (b) ภาพภูมิลักษณะของพื้นผิวล่างของโพลีฟิล์ม (c) ภาพภูมิลักษณะของความหนาเชิงแสงโพลีฟิล์ม (d) ภาพด้านบนของความหนาเชิงแสงโพลีฟิล์ม



รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์การกระจายของความหนาและความสม่ำเสมอของความหนาของแผ่นฟิล์ม (a) แผนภาพความหนาที่ถ่ายโดยระบบต้นแบบ (b) ความหนาและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาในแต่ละพื้นที่ย่อยโดยแบ่งเป็น 25 พื้นที่ (c) แผนภาพแสดงความหนาเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่ย่อย และ (d) แผนภาพแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาในแต่ละพื้นที่ย่อย

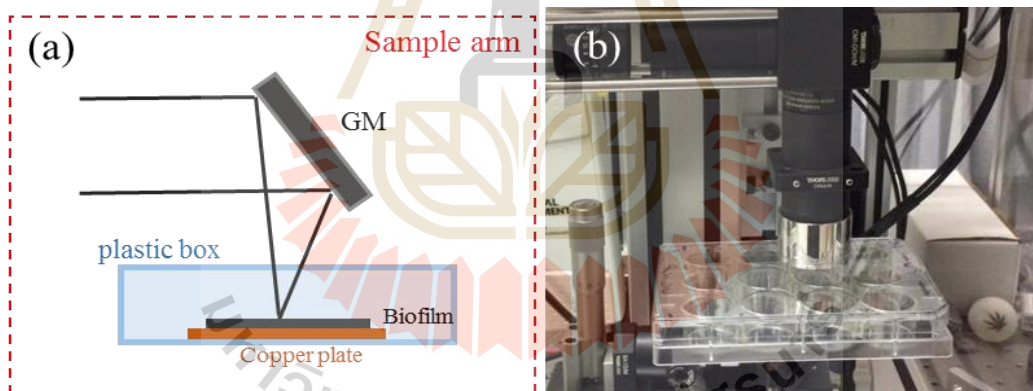
4.2 ประสิทธิภาพของระบบ

- 1) ใช้แสงอินฟราเรดในช่วง 800-900 นาโนเมตรในการถ่ายภาพ
- 2) กำลังแสงเฉลี่ยที่ตกกระทบบนผิวตัวอย่างไม่เกิน 5 mW
- 3) ความละเอียดเชิงลึกของการถ่ายภาพประมาณ 8-10 ไมโครเมตร
- 4) ความละเอียดในแนวระนาบพื้นผิวของการถ่ายภาพขนาด 5-10 ไมโครเมตร
- 5) ขนาดของภาพที่สามารถถ่ายได้สูงสุด 30 mm x 30 mm
- 6) ความลึกสูงสุดของการถ่ายภาพ 2 mm จากพื้นผิวของตัวอย่าง
- 7) ความเร็วในการวัดสัญญาณสเปกตรัมสูงสุดประมาณ 50,000 สเปกตรัมต่อวินาที
- 8) ความเร็วในการสแกนชิ้นงานประมาณ 5-10 ภาพต่อวินาที
- 9) ไม่มีขั้นตอนยุ่งยากในการเตรียมตัวอย่าง
- 10) ไม่มีการสัมผัสผิวตัวอย่างในระหว่างการถ่ายภาพ

4.3 ตัวอย่างการประยุกต์ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

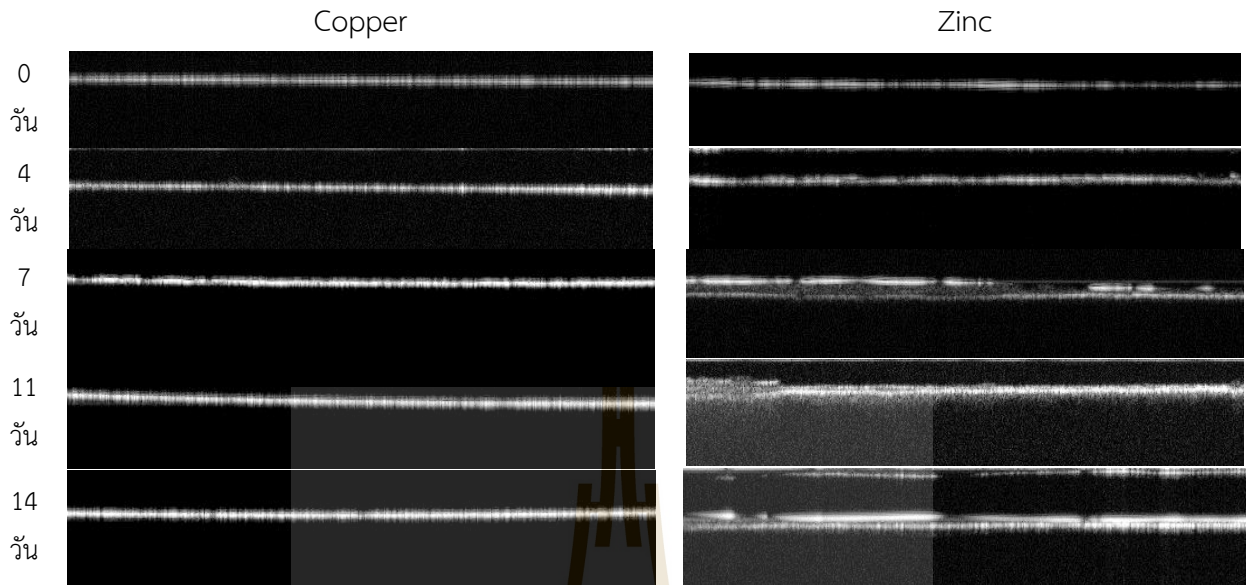
การติดตามการก่อตัวของไบโอฟิล์มบนผิวโลหะ

ความสามารถในการถ่ายภาพสามมิติของชิ้นงานแบบไม่ต้องสัมผัส นำไปสู่การประยุกต์ระบบต้นแบบเพื่อการติดตามและศึกษาการก่อตัวของไบโอฟิล์มบนพื้นผิวโลหะชนิดต่างๆ ซึ่งเป็นงานวิจัยร่วมกับกลุ่มวิจัยของ รศ.ดร. ทศนีย์ เสาวนะ สาขาวิชาจุลชีววิทยา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพสามมิติด้วยระบบต้นแบบโอซีทีและการวิเคราะห์ข้อมูลปริภูมิสามมิติของความหนาของไบโอฟิล์ม เพื่อการศึกษาพัฒนาการทางโครงสร้างของไบโอฟิล์มบนแผ่นพีวีซีและแผ่นโลหะชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาและสภาวะแวดล้อมต่างๆ กัน โดยไม่มีการสัมผัสหรือทำลายชิ้นตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงความสามารถของระบบต้นแบบในการถ่ายภาพไบโอฟิล์มบนพื้นผิวโลหะ โดยถ่ายเททะลุผ่านฝาปิดของระบบเพาะเลี้ยงได้โดยตรง จึงไม่เกิดการปนเปื้อนจากภายนอกตลอดระยะเวลาการทดลอง ทำให้สามารถตรวจติดตามการก่อตัวของไบโอฟิล์มได้แบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลาหลายสัปดาห์ติดต่อกัน โดยสามารถติดตามความเปลี่ยนแปลงของความหนาของชิ้นไบโอฟิล์มบนตัวอย่างชิ้นเดียวกัน

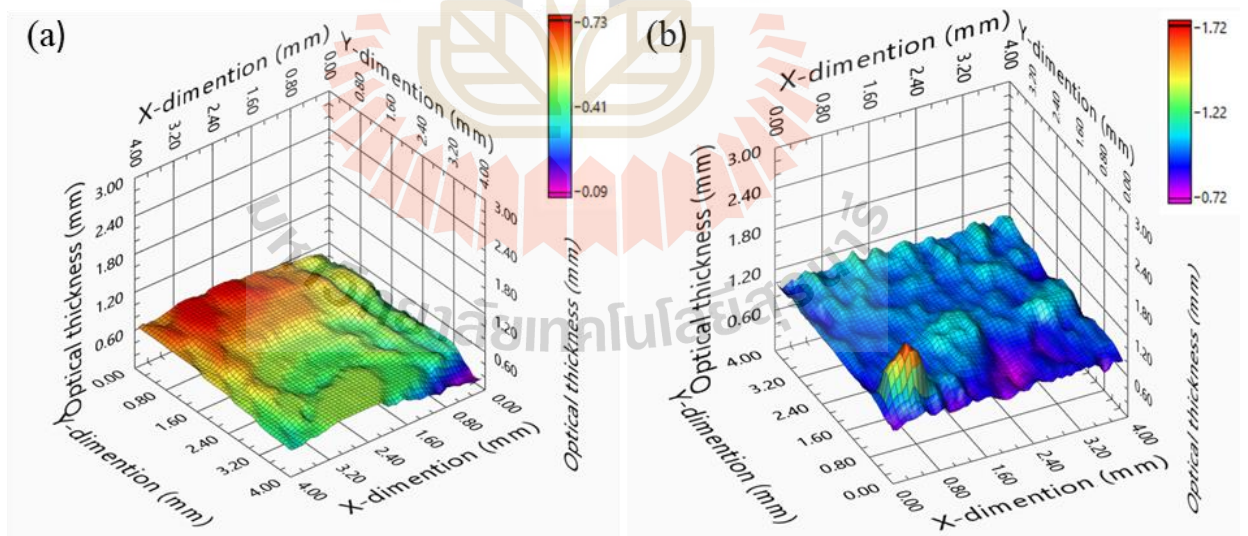


รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการถ่ายภาพไบโอฟิล์มโดยไม่ต้องนำชิ้นตัวอย่างออกจากระบบเพาะเลี้ยง

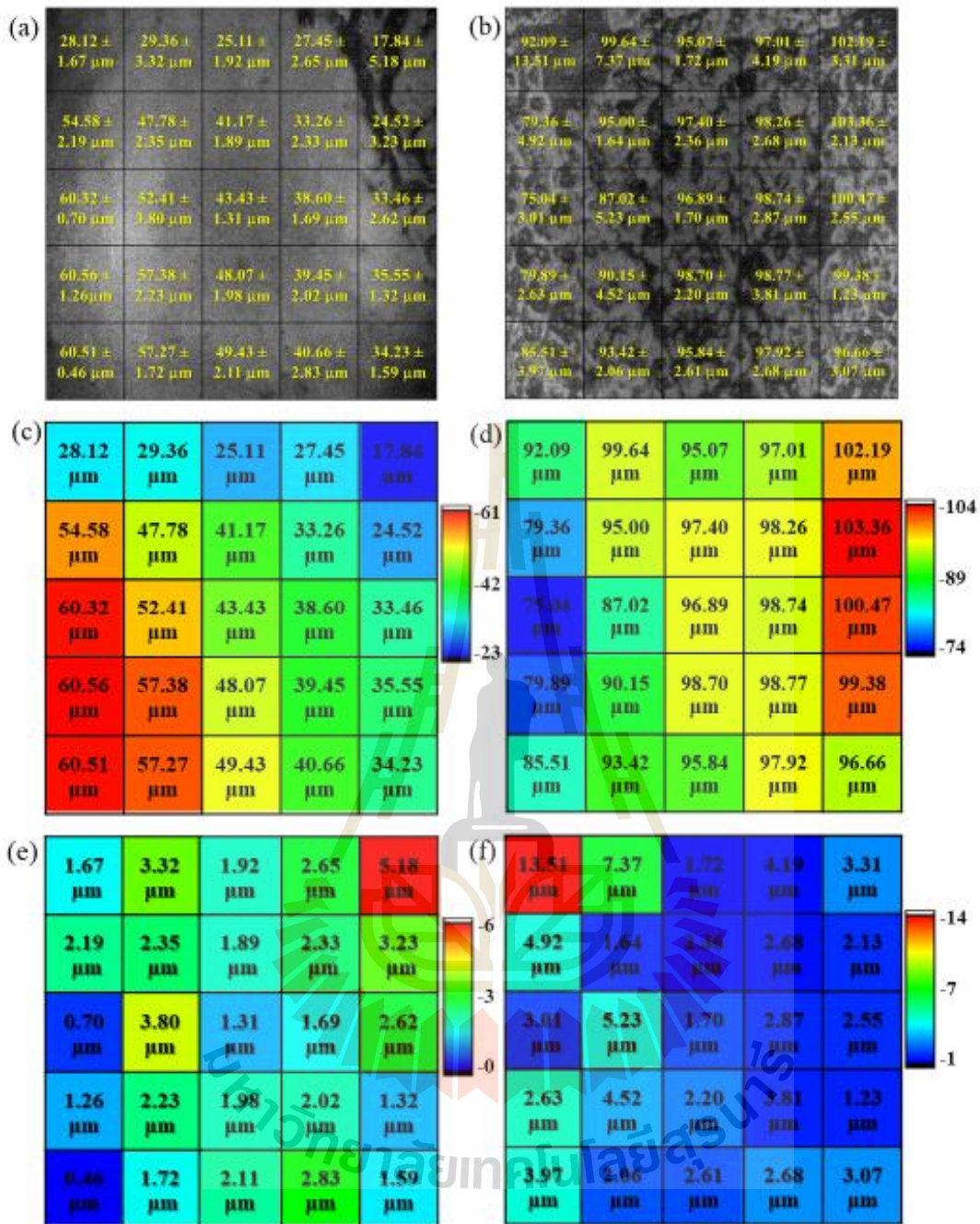
รูปที่ 4.5 แสดงภาพตัดขวางของไบโอฟิล์มบนแผ่นทองแดงและแผ่นสังกะสีที่เวลาต่างๆ นับจากวันที่เริ่มใส่เชื้อ โดยถ่ายทุกๆ 3 วัน เป็นเวลา 2 สัปดาห์ ซึ่งหากมีการก่อตัวของไบโอฟิล์มก็จะสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนดังแสดงในภาพตัดขวางของแผ่นสังกะสีในคอลัมน์ขวามือของรูปที่ 4.5 นอกจากนั้นแล้ว ข้อมูลภาพในสามมิติยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์เป็นแผนภาพการกระจายความหนาของไบโอฟิล์มในสามมิติได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และการวิเคราะห์แยกกระหว่างการกระจายของความหนาและการกระจายความสม่ำเสมอของความหนาของไบโอฟิล์มบนพื้นผิวดังในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างภาพถ่ายตัดขวางของไบโอฟิล์มที่ก่อตัวบนผิวของแผ่นทองแดงและสังกะสีที่ถ่ายโดยระบบต้นแบบเป็นเวลาต่อเนื่อง 14 วัน



รูปที่ 4.6 แสดงภาพพื้นผิวสามมิติของการเกิดไบโอฟิล์มบนผิวแผ่นทองแดงในสัปดาห์ที่ 3 (ภาพ a) และ 4 (ภาพ b) ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 (a) และ (b) แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์การกระจายความหนาของไปโอฟิล์มบนผิวแผ่นทองแดงใน สัปดาห์ที่ 3 และสัปดาห์ที่ 4 ตามลำดับ (c) และ (d) การกระจายของความหนาและ (e) และ (f) การกระจายความสม่ำเสมอของความหนาของไปโอฟิล์มบนพื้นผิวในสัปดาห์ที่ 3 และสัปดาห์ที่ 4 ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปประมวลผลงานวิจัย

ระบบถ่ายภาพพื้นผิวสามมิติสำหรับฟิล์มบาง เป็นเทคโนโลยีที่ยังไม่มีการพัฒนาและรู้จักอย่างแพร่หลายในประเทศไทย และจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศเพียงเท่านั้น ซึ่งมีมูลค่าที่สูงมากเมื่อเทียบต่อเครื่อง อีกทั้งเนื่องจากการเป็นการนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้สามารถใช้งานได้อย่างจำกัด เฉพาะงานในด้านนั้นๆ ยกที่จะประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ดังนั้นการที่พัฒนาและสร้างระบบที่มีขีดความสามารถหรือประสิทธิภาพที่สามารถทัดเทียมจากการนำเข้าได้นั้น จะเป็นการทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานในทางด้านวิจัยต่างๆ ได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นการสร้างองค์ความรู้ด้านวิทยาการซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนทั้งในแง่ของเศรษฐกิจ เทคโนโลยี และคุณภาพชีวิต

ระบบถ่ายภาพพื้นผิวสามมิติสำหรับฟิล์มบางที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นภายใต้โครงการนี้ เป็นการพัฒนาและออกแบบโดยการพัฒนาจากกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาทั่วไป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและขีดความสามารถในการวิเคราะห์ตัวอย่างด้านฟิล์มบาง ทั้งนี้ ทีมวิจัยได้ออกแบบระบบเองทั้งหมด ทั้งการออกแบบระบบเชิงแสง และการออกแบบระบบโครงสร้างเชิงกล รวมถึงการศึกษาเพิ่มเติมวิทยาการใหม่ๆ ที่เผยแพร่ในวารสารวิชาการในระดับนานาชาติที่เกี่ยวข้อง โดยเน้นออกแบบระบบให้มีความเร็วในการถ่ายภาพที่สูงกว่าเครื่องในเชิงพาณิชย์ ในราคาต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และยังสามารถปรับให้รองรับขั้นตอนการถ่ายภาพและเทคนิคการวิเคราะห์ผลข้อมูลที่หลากหลาย เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้หลายๆ ด้าน อาทิ ด้านภาพถ่ายทางการแพทย์ ด้านชีววิทยา รวมถึงด้านการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุฟิล์มบางอีกด้วย

คุณสมบัติของระบบต้นแบบ

- 1) ใช้แสงอินฟราเรดในช่วง 800-900 นาโนเมตรในการถ่ายภาพ
- 2) กำลังแสงเฉลี่ยที่ตกกระทบบนผิวตัวอย่างไม่เกิน 5 mW
- 3) ความละเอียดเชิงลึกของการถ่ายภาพประมาณ 8-10 ไมโครเมตร
- 4) ความละเอียดในแนวระนาบพื้นผิวของการถ่ายภาพขนาด 5-10 ไมโครเมตร
- 5) ขนาดของภาพที่สามารถถ่ายได้สูงสุด 30 mm x 30 mm
- 6) ความลึกสูงสุดของการถ่ายภาพ 2 mm จากพื้นผิวของตัวอย่าง
- 7) ความเร็วในการวัดสัญญาณสเปคตรัมสูงสุดประมาณ 50,000 สเปคตรัมต่อวินาที
- 8) ความเร็วในการสแกนชิ้นงานประมาณ 5-10 ภาพต่อวินาที
- 9) ไม่มีขั้นตอนยุ่งยากในการเตรียมตัวอย่าง

- 10) ไม่มีการสัมผัสผิวหนังตัวอย่างในระหว่างการถ่ายภาพ
- 11) ไม่มีผลข้างเคียงและสารตกค้างที่อาจเป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต

งานวิจัยที่ได้มีการใช้ระบบถ่ายภาพพื้นผิวสามมิติในการวิเคราะห์

งานวิจัยร่วมกับกลุ่มวิจัยของ รศ.ดร. ทศนีย์ เสาวนะ สาขาวิชาจุลชีววิทยา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพสามมิติด้วยระบบต้นแบบโอซีทีและการวิเคราะห์ข้อมูลปริภูมิสามมิติ (Topography) เพื่อการศึกษาพัฒนาการทางโครงสร้างของไบโอฟิล์มบนแผ่นโลหะชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาและสภาวะแวดล้อมต่างๆ กัน โดยไม่มีการสัมผัสหรือทำลายชิ้นตัวอย่าง

ทั้งนี้ ระบบต้นแบบที่ได้ ยังสามารถพัฒนาต่อไปได้อีกในด้านของความละเอียด ความเร็ว และฟังก์ชันการใช้งานในอนาคต ซึ่งคาดว่าจะสามารถนำต้นแบบที่ได้ไปประยุกต์ในการศึกษาวิจัยทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องได้ อาทิ ทางชีววิทยา ทางเทคโนโลยีเกษตรทั้งพืชและสัตว์ และทางการแพทย์ เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันได้เริ่มเปิดโอกาสให้นักวิจัยจากสาขาอื่นๆ ทั้งในและนอกมหาวิทยาลัยได้เข้ามาและนำตัวอย่างมาทดลองถ่ายบ้างแล้ว อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีนี้ยังถือว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ในประเทศไทย การตีความสัญญาณภาพและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ยังต้องอาศัยการฝึกฝนและเรียนรู้ร่วมกันระหว่างทีมวิจัยผู้พัฒนาระบบและทีมนักวิจัยจากภายนอกในสาขาวิชาอื่นๆ ที่ต้องการใช้งานระบบต่อไป ทั้งนี้ ระบบถ่ายภาพพื้นผิวสามมิติมีข้อได้เปรียบเทคนิคการถ่ายภาพอื่นๆ ในแง่ของความสะดวก รวดเร็วของการถ่ายภาพ มีขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างที่ไม่ซับซ้อน และสามารถถ่ายภาพสามมิติของตัวอย่างที่มีชีวิตได้โดยไม่เกิดอันตรายหรือผลข้างเคียง (Non-destructive and non-invasive) จึงเหมาะที่ใช้ในงานที่ต้องการตรวจติดตามการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก หรือการติดตามและเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อชีวภาพในสภาวะต่างๆ กันได้ รวมถึงความหนาของพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์

5.2 ผลผลิตของงานวิจัย

- 1) ต้นแบบภาคสนามของระบบถ่ายภาพพื้นผิวสามมิติ ที่สามารถวิเคราะห์ความหนาในลักษณะสามมิติได้
- 2) นักศึกษาผู้มีส่วนร่วมในงานวิจัยและได้รับการพัฒนาองค์ความรู้และทักษะในการออกแบบและสร้างระบบเชิงแสงในระดับห้องปฏิบัติการ จำนวน 3 คน ได้แก่
 - นายคุณากร พลวงค์ รหัส D6110505 นักศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- นายเจษฎา แซ่เตี่ยว รหัส M5710133 นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 - นางสาวจิราภรณ์ แสนแจ้ รหัส M5710157 นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 3) นำเสนอระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในการประชุมเชิงวิชาการทั้งระดับชาติและระดับนานาชาติ รวมทั้งสิ้นจำนวน 2 ครั้ง ซึ่งเป็นการเปิดช่องทางให้นักวิจัยในสาขาอื่นที่สนใจได้เข้ามามีส่วนร่วมในการใช้งานและพัฒนาระบบต่อไป
 - 4) ผลงานการตีพิมพ์แบบบทความเต็ม (Full paper) ใน conference proceeding ระดับนานาชาติที่ปรากฏในฐานข้อมูลสากลของ Scopus จำนวน 2 บทความ
 - 5) ได้รับรางวัลสภานักวิจัยแห่งชาติ รางวัลสิ่งประดิษฐ์คิดค้น ระดับเกียรติคุณ ประจำปี 2562 สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพและคณิตศาสตร์

5.3 การเผยแพร่ผลงานวิจัยของโครงการ

การนำเสนอผลงานในการประชุมเชิงวิชาการต่างๆ

- 1) นำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมเชิงวิชาการ International Conference on Experimental Mechanics 2017 (ICEM2017) ในหัวข้อ “Low cost digital microscope for non-contact high precision thickness topography of thin films” ณ the Imperial Pattaya Hotel พัทยา ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 8-10 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560
- 2) นำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมเชิงวิชาการ 10th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON) 2017 ในหัวข้อ “Optical topography technique for characterization and monitoring of biofilm thickness uniformity” ณ เมืองฮอกไกโด ประเทศญี่ปุ่น ระหว่างวันที่ 31 สิงหาคม - 2 กันยายน พ.ศ. 2560
- 3) นำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมเชิงวิชาการ 10th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON) 2017 ในหัวข้อ “Optical topography technique for characterization and monitoring of biofilm thickness uniformity” ณ เมืองฮอกไกโด ประเทศญี่ปุ่น ระหว่างวันที่ 31 สิงหาคม - 2 กันยายน พ.ศ. 2560

ผลงานตีพิมพ์ใน Full-Paper Conference Proceeding

- 1) Jadsada Saetiew, Panomsak Meemon, Sittichoke Ritpech, Tassanee Saovana" Optical topography technique for characterization and monitoring of biofilm thickness uniformity", IEEE, Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), 2017 10th, 8229105, pp 1-5 (2017).
- 2) Jiraporn Saenjae, Jadsada Saetiew, Kunakorn Palawong, and Panomsak Meemon, Sittichoke Ritpech, Tassanee Saovana" An experimental procedure for quantitative evaluation of spectral resolution of spectrometer-based spectral domain optical coherence tomography ", IEEE, Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), 2017 10th, 8229105, pp 1-5 (2017).

ผลงานรางวัลระดับประเทศ

- รางวัลสภาวิจัยแห่งชาติ รางวัลสิ่งประดิษฐ์คิดค้น ระดับเกียรติคุณ ประจำปี 2562 สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพและคณิตศาสตร์ ในผลงานเรื่อง “กล้องจุลทรรศน์อินฟราเรดเพื่อการสร้างแผนภาพความหนาของฟิล์มบางแบบไม่สัมผัส”

5.4 การศึกษาวิจัยเพิ่มเติม

ทีมวิจัยมีแผนงานที่จะพัฒนาระบบต้นแบบที่ได้จากโครงการนี้ต่อไป โดยเน้นการพัฒนา ระบบให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ประยุกต์ระบบต้นแบบของระบบการถ่ายภาพภูมิลักษณะความหนา (optical thickness topography) สำหรับการวิเคราะห์วัสดุชนิดฟิล์มบาง ที่มีประสิทธิภาพสูงในด้าน ความเร็วในการบันทึกสัญญาณและความละเอียดของการวัด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นผิว และความหนาของชิ้นงานวัสดุชนิดฟิล์มบางโดยไม่มีการสัมผัสชิ้นงาน และยังสามารถพัฒนาไปสู่การ ประยุกต์ใช้ในงานตรวจสอบคุณภาพของแผ่นฟิล์มบางในงานวิจัยด้านต่างๆ อาทิ ด้านชีววิทยา ด้านชีว การแพทย์ ด้านการเกษตร และด้านอุตสาหกรรม รวมถึงการแสวงหาความร่วมมือกับกลุ่มวิจัยอื่นๆ ที่ เกี่ยวข้องต่อไป

บรรณานุกรม

- 1 Kim, Y. G., Seo, Y. B. & Joo, K.-N. Low cost wafer metrology using a NIR low coherence interferometry. *Optics express* 21, 13648-13655 (2013).
- 2 Garratt, J. A new stylus instrument with a wide dynamic range for use in surface metrology. *Precision Engineering* 4, 145-151 (1982).
- 3 Takeda, M., Ina, H. & Kobayashi, S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *JosA* 72, 156-160 (1982).
- 4 de Groot, P. & Deck, L. Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms. *Optics letters* 18, 1462-1464 (1993).
- 5 de Groot, P. & Deck, L. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain. *Journal of Modern Optics* 42, 389-401 (1995).
- 6 Jansen, M. J., Haitjema, H. & Schellekens, P. H. in *Optical Systems Design*. 334-345 (International Society for Optics and Photonics).
- 7 Kalliadasis, S., Bielarz, C. & Homsy, G. Steady free-surface thin film flows over topography. *Physics of Fluids (1994-present)* 12, 1889-1898 (2000).
- 8 Kim, S.-W. & Kim, G.-H. Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry. *Applied Optics* 38, 5968-5973 (1999).
- 9 Schmitz, T. L., Davies, A., Evans, C. J. & Parks, R. E. Silicon wafer thickness variation measurements using the National Institute of Standards and Technology infrared interferometer. *Optical Engineering* 42, 2281-2290 (2003).
- 10 Baer, E., Hiltner, P. A. & Shirk, J. S. Multilayer polymer gradient index (GRIN) lenses. U.S. patent US7002754 B2 (2006).
- 11 Meemon, P. *et al.* Optical Coherence Tomography Enabling Non Destructive Metrology of Layered Polymeric GRIN Material. *Scientific reports* 3, 1709 (1701-1710) (2013).
- 12 Debnath, S. K., Kothiyal, M. P., Schmit, J. & Hariharan, P. in *SPIE Optics+ Photonics*. 629214-629214-629216 (International Society for Optics and Photonics).

- 13 Meemon, P., Yao, J. & Rolland, J. P. in *SPIE BiOS*. 89343L-89343L-89346 (International Society for Optics and Photonics).
- 14 Wang, Q., Griesmann, U. & Polvani, R. in *ICO20: Optical Devices and Instruments*. 602426-602426-602425 (International Society for Optics and Photonics).
- 15 Park, J., Chen, L., Wang, Q. & Griesmann, U. Modified Roberts-Langenbeck test for measuring thickness and refractive index variation of silicon wafers. *Optics express* 20, 20078-20089 (2012).
- 16 Yao, J., Meemon, P., Lee, K.-S. & Rolland, J. P. Nondestructive metrology by optical coherence tomography empowering manufacturing iterations of layered polymeric optical materials. *Optical Engineering* 52, 112111-112111 (2013).
- 17 Qin, Y., Zhao, H., Zhang, L. & Wang, L. Film thickness measurement and defect inspection using optical coherence tomography. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 124, 5293-5296 (2013).
- 18 Sun, M., Birkenfeld, J., de Castro, A., Ortiz, S. & Marcos, S. OCT 3-D surface topography of isolated human crystalline lenses. *Biomedical optics express* 5, 3547-3561 (2014).
- 19 Hee, M. R. *et al.* Topography of diabetic macular edema with optical coherence tomography. *Ophthalmology* 105, 360-370 (1998).
- 20 Huang, D. *et al.* Optical coherence tomography. *Science* 254, 1178-1181 (1991).
- 21 Fercher, A. F., Mengedoh, K. & Werner, W. Eye-length measurement by interferometry with partially coherent light. *Optics Letters* 13, 186-188 (1988).
- 22 Lee, E. C., de Boer, J. F., Mujat, M., Lim, H. & Yun, S. H. In vivo optical frequency domain imaging of human retina and choroid. *Optics Express* 14, 4403-4411 (2006).
- 23 Nelson, J. S., Kelly, K. M., Zhao, Y. & Chen, Z. Imaging blood flow in human port-wine stain in situ and in real time using optical Doppler tomography. *Archives of dermatology* 137, 741 (2001).
- 24 Lim, H. *et al.* High-speed imaging of human retina in vivo with swept-source optical coherence tomography. *Optics Express* 14, 12902-12908 (2006).

- 25 De Boer, J. F., Milner, T. E., van Gemert, M. J. C. & Nelson, J. S. Two-dimensional birefringence imaging in biological tissue by polarization-sensitive optical coherence tomography. *Optics Letters* 22, 934-936 (1997).
- 26 Schmitt, J. M., Lee, S. L. & Yung, K. M. An optical coherence microscope with enhanced resolving power in thick tissue. *Optics Communications* 142, 203-207 (1997).
- 27 Mariampillai, A. *et al.* Doppler optical cardiogram gated 2D color flow imaging at 1000 fps and 4D in vivo visualization of embryonic heart at 45 fps on a swept source OCT system. *Optics Express* 15, 1627-1638 (2007).
- 28 Ko, H. J., Tan, W., Stack, R. & Boppart, S. A. Optical coherence elastography of engineered and developing tissue. *Tissue Engineering* 12, 63-73 (2006).
- 29 Kim, S., Na, J., Kim, M. J. & Lee, B. H. Simultaneous measurement of refractive index and thickness by combining low-coherence interferometry and confocal optics. *Optics Express* 16, 5516-5526 (2008).
- 30 Lee, B., Park, S., Park, K. & Kim, Y. Simultaneous Measurements of Refractive Index and Thickness by Spectral-Domain Low Coherence Interferometry Having Dual Sample Probes. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 1-1 (2011).
- 31 Bouma, B. E. & Tearney, G. J. *Handbook of optical coherence tomography*. (Marcel Dekker, Inc., 2002).
- 32 Born, M. & Wolf, E. *Principles of Optics, seventh expanded edition*. (Cambridge University Press, 1999).
- 33 Fercher, A. F., Hitzinger, C. K., Kamp, G. & El-Zaiat, S. Y. Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry. *Optics Communications* 117, 43-48 (1995).
- 34 Choma, M., Sarunic, M., Yang, C. & Izatt, J. Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography. *Optics Express* 11, 2183-2189 (2003).
- 35 De Boer, J. F. *et al.* Improved signal-to-noise ratio in spectral-domain compared with time-domain optical coherence tomography. *Optics Letters* 28, 2067-2069 (2003).
- 36 Leitgeb, R., Hitzinger, C. & Fercher, A. Performance of fourier domain vs. time domain optical coherence tomography. *Optics Express* 11, 889-894 (2003).

- 37 Kim, S.-H., Kim, J.-H. & Kang, S.-W. Nondestructive defect inspection for LCDs using optical coherence tomography. *Displays* 32, 325-329 (2011).
- 38 Bouma, B. *Handbook of optical coherence tomography*. (CRC Press, 2001).
- 39 Lee, K.-S., Meemon, P., Dallas, W., Hsu, K. & Rolland, J. P. Dual detection full range frequency domain optical coherence tomography. *Optics letters* 35, 1058-1060 (2010).
- 40 Lee, K.-S., Thompson, K. P., Meemon, P. & Rolland, J. P. Cellular resolution optical coherence microscopy with high acquisition speed for in-vivo human skin volumetric imaging. *Optics letters* 36, 2221-2223 (2011).
- 41 Meemon, P. & Pongchalee, P. in *Propagation through and Characterization of Distributed Volume Turbulence and Atmospheric Phenomena*. JT5A. 22 (Optical Society of America).
- 42 Meemon, P., Lee, K.-S. & Rolland, J. P. Doppler imaging with dual-detection full-range frequency domain optical coherence tomography. *Biomedical optics express* 1, 537-552 (2010).
- 43 Schmoll, T., Kolbitsch, C. & Leitgeb, R. A. Ultra-high-speed volumetric tomography of human retinal blood flow. *Optics Express* 17, 4166-4176 (2009).



ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนมศักดิ์ มีมนต์ (Panomsak Meemon) เป็นอาจารย์สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า) จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2543 จากนั้นในปี พ.ศ. 2547 ได้รับทุนรัฐบาลซึ่งจัดสรรโดยกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เพื่อศึกษาต่อในระดับปริญญาโท (Master of Science) และปริญญาเอก (Ph.D.) ในสาขาวิชา Optics จาก College of Optics and Photonics, University of Central Florida, USA ปีที่สำเร็จการศึกษา พ.ศ. 2553 หลังจบการศึกษาระดับปริญญาเอกแล้วได้ทำงานเป็นนักวิจัยที่ Optical Diagnostics and Applications Laboratory, Institute of Optics, University of Rochester, USA เป็นเวลา 1 ปี สาขางานวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษคือ การออกแบบระบบเชิงแสง โดยเน้นการพัฒนาาระบบถ่ายภาพสามมิติด้วยแสงอินฟราเรดและการประยุกต์ในเชิงชีวการแพทย์และชีววิทยา

สถานที่ติดต่อ: อาคารวิชาการ 2 ชั้น 5 ห้อง C2-537 สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 โทร. 044 224 544 หรือ Email: panomsak@sut.ac.th

ศาสตราจารย์ ดร. โจโวโน วิดจายา (Joewono Widjaja) เป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จบการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) จาก Satya Wacana Christian University, Indonesia (1986) และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท (Master of Engineering) และปริญญาเอก (Doctor of Engineering) ในสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จาก Hokkaido University, Japan ในปี พ.ศ. 2534 และ 2537 ตามลำดับ สาขางานวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษคือ การประมวลผลสัญญาณเชิงแสง ดิจิตอลไฮโลแกรม และมาตรวิทยาเชิงแสง

สถานที่ติดต่อ: อาคารวิชาการ 2 ชั้น 5 ห้อง C2-542 สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 โทร. 044 224 194 หรือ Email: widjaja@sut.ac.th