



รายงานการวิจัย

การพัฒนาระบบสเปกโตรมิเตอร์เชิงคู่ด้วยเซ็นเซอร์ชุดเดียว  
(Development of a Dual Spectrometer in a Single Detection)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

# การพัฒนาระบบสเปกโตรมิเตอร์เชิงคู่ด้วยเซ็นเซอร์ชุดเดียว (Development of a Dual Spectrometer in a Single Detection)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อ.ดร. พนมศักดิ์ มีมนต์

สาขาวิชาเทคโนโลยีเลเซอร์และฟิสิกส์

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่ปรึกษาโครงการ

ศาสตราจารย์ ดร. ยูวโน วิตจาญา

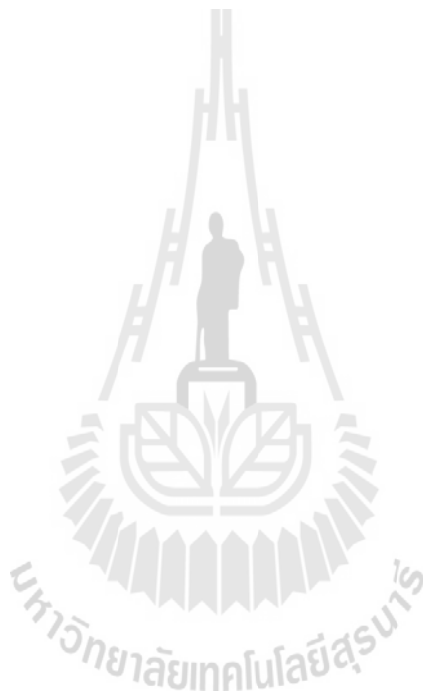
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปี  
งบประมาณ พ.ศ. 2556

ทีมวิจัย  
กันยายน 58



## บทคัดย่อภาษาไทย

สเปกโตรมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดแสงในย่านอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์เชิงแสงอย่างหนึ่งที่มีการนำไปประยุกต์ในงานวิจัยด้านต่างๆ กันอย่างแพร่หลาย เช่น ทางชีววิทยา ทางเคมี ทางการเกษตร และการวิเคราะห์วัสดุ เป็นต้น ทั้งนี้ ระบบสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้ในงานต่างๆ ไปนั้น โดยปกติมักจะไม่นับความเร็วในการวัดสัญญาณ อย่างไรก็ตาม วิทยาการที่ก้าวหน้าทำให้เกิดความต้องการในการใช้งานสเปกโตรมิเตอร์ที่ความเร็วสูงมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบถ่ายภาพตัดขวางสามมิติชนิด Frequency Domain Optical Coherence Tomography (FD-OCT) ซึ่งใช้สเปกโตรมิเตอร์ในย่านอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ ซึ่งความเร็วของสเปกโตรมิเตอร์มีส่วนสำคัญในการกำหนดความเร็วในการถ่ายภาพ

อย่างไรก็ตาม สเปกโตรมิเตอร์แบบความเร็วสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสเปกโตรมิเตอร์ที่มีการตอบสนองในย่านอินฟราเรดถือได้ว่าหาได้ยากและมักจะมีราคาสูงมาก อีกทั้ง พัฒนาการของการถ่ายภาพตัดขวางแบบ FD-OCT ได้ขยายขอบเขตไปสู่การถ่ายภาพคุณลักษณะความเป็น anisotropic ของวัสดุและเนื้อเยื่อชีวภาพ โดยใช้การวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อแสงโพลาไรซ์ของวัสดุที่ต้องการทดสอบ ที่เรียกว่า Polarization sensitive OCT (PS-OCT) ซึ่งเทคนิคดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยการตรวจจับสัญญาณการแทรกสอดบนสเปกตรัมของแสงที่มีโพลาไรเซชันมากกว่า 2 ชนิดไปพร้อมๆ กัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สเปกโตรมิเตอร์มากกว่า 1 ระบบในการถ่ายภาพ

โครงการนี้มุ่งเน้นการพัฒนาเทคนิคของระบบอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ในระดับปฏิบัติการที่สามารถตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมของแสงอินฟราเรดได้ที่ละสองสัญญาณควบคู่กันไปโดยใช้ระบบเซ็นเซอร์เพียงชุดเดียว โดยเป็นการศึกษาและพัฒนารอบแบบระบบเชิงแสง ระบบโครงสร้างเชิงกล และระบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการควบคุมการเก็บข้อมูลและการส่งถ่ายข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ ซึ่งต้นแบบผลลัพธ์ที่ได้จะถูกพัฒนาต่อยอดไปสู่การใช้งานเป็นระบบตรวจจับสัญญาณของระบบถ่ายภาพตัดขวางด้วยแสงโพลาไรซ์แบบ PS-OCT ในโอกาสต่อไป

## บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

Infrared spectrometer has played a crucial role in many applications, such as biology, chemistry, agriculture, and materials study. In general, the speed of spectral capturing of the spectrometer may not typically be important for applications that are only interested in composition of materials or biological samples. Nevertheless, the recent development of a new optical imaging technique called frequency domain optical coherence tomography (FD-OCT) that utilizes an infrared spectrometer as a detector leads to the demand for high speed and high resolution spectrometer designs.

However, high speed spectrometers, especially one that suitable for FD-OCT imaging, are not usually commercially available. Furthermore, there is an increasing interest in the use of FD-OCT to map anisotropic properties of materials and bio-tissues. This can be achieved by analyzing the response of the medium with polarized light. Nevertheless, the technique usually requires capturing of at least two spectra, having two orthogonal polarization states. This often demands two high speed and high resolution spectrometers to be used as detector of the system

This project aims to develop a laboratory prototype of an infrared spectrometer that is capable of detecting two spectra simultaneously, using a polarization beam splitter and a single line-scan detector. The project focus on literature study that leads to custom design of both optical system, mechanical structures, electronics, and software user interfaces and controls. As part of our future plan, the developed prototype will be used as a detector in the development of a polarization sensitive optical coherence tomography system.

## สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญรูปภาพ.....	จ
บทที่ 1. บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	2
บทที่ 2. วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
2.1 การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature).....	3
2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	4
2.3 การออกแบบระบบ .....	5
2.4 หลักการทำงานของระบบ .....	6
บทที่ 3. ผลการดำเนินงานวิจัย.....	8
3.1 การตรวจสอบประสิทธิภาพของการตรวจจับสเปกตรัมแบบคู่.....	8
3.2 การสอบเทียบสเกลตามแนวลึก.....	10
3.3 ความลึกสูงสุดของการถ่ายภาพ (Imaging Depth).....	11
บทที่ 4. สรุปผลการวิจัย.....	13
4.1 สรุปรวมผลงานวิจัย .....	13
4.2 ผลผลิตของงานวิจัย .....	14
4.3 การเผยแพร่ผลงานวิจัยของโครงการ.....	14
4.4 การศึกษาวิจัยเพิ่มเติม.....	15
บรรณานุกรม .....	16
ประวัตินักวิจัย.....	18
ภาคผนวก ก เอกสารการเผยแพร่ผลงาน .....	19

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 ภาพแสดงระบบโดยรวมของต้นแบบที่พัฒนาขึ้น.....	5
รูปที่ 2.2 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ของระบบสเปกโตรมิเตอร์.....	6
รูปที่ 2.3 แสดงโปรแกรมสำหรับการเก็บข้อมูลและประมวลผล .....	7
รูปที่ 2.4 แสดงภาพเปรียบเทียบสัญญาณสองสเปกตรัมที่ถูกแบ่งแล้ว.....	7
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการใช้งานสเปกโตรมิเตอร์เชิงคู่ในการตรวจจับสัญญาณการแทรกสอดของสเปกตรัม .....	8
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายระบบสเปกโตรมิเตอร์เชิงคู่เพื่อการตรวจจับสัญญาณการแทรกสอดของสเปกตรัม .....	9
รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบลักษณะของสเปกตรัมคู่ที่ตรวจจับได้โดยระบบต้นแบบ .....	9
รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบ PSF ที่ได้จากการแปลงสเปกตรัมแบบคู่ .....	10
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ PSF กับระยะทางที่กระจกเคลื่อนที่ไป .....	11
รูปที่ 3.6 กราฟแสดง SNR dropped off ของระบบซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ความลึกสูงสุดของการถ่ายภาพได้.....	12
รูปที่ 4.1 ภาพการใช้งานระบบสเปกโตรมิเตอร์เชิงคู่ในระบบถ่ายภาพแบบ PS-OCT .....	14



# บทที่ 1. บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ในปัจจุบันระบบสเปกโตรมิเตอร์มีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุต่างๆ โดยใช้คุณลักษณะเฉพาะทางด้านการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของวัสดุต่างชนิดกัน ซึ่งสามารถใช้แยกแยะโครงสร้างทางเคมีของวัสดุต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้ การประยุกต์อีกด้านหนึ่งของสเปกโตรมิเตอร์คือใช้ในการตรวจจับสัญญาณการแทรกสอดของแสงในโดเมนความถี่ นำมาซึ่งระบบถ่ายภาพสามมิติที่เรียกว่า Frequency Domain Optical Coherence Tomography หรือ FD-OCT ซึ่งเป็นการใช้งานที่ต้องการความเร็วในการวัดสัญญาณสเปกตรัมที่สูงมากๆ ในระดับที่มากกว่าหนึ่งหมื่นสเปกตรัมต่อวินาที

อย่างไรก็ตาม ระบบเซ็นเซอร์โดยทั่วไปจะมีข้อจำกัดทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ นั่นคือข้อจำกัดทางด้านความเร็วในการส่งถ่ายข้อมูล วิธีการหนึ่งที่สามารถเพิ่มจำนวนสเปกตรัมที่วัดได้โดยใช้ระบบเซ็นเซอร์ชุดเดิมคือการออกแบบระบบให้สามารถตรวจวัดสองสเปกตรัมควบคู่กันไป ซึ่งระบบสเปกโตรมิเตอร์ความเร็วสูงแบบคู่สามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางโพลาริเซชันของแสงที่เรียกว่า Birefringence ในวัสดุชนิดต่างๆ ซึ่งต้องอาศัยการวัดแบบควบคู่กันของสเปกตรัมของแสงที่มีโพลาริเซชันที่ต่างกันอย่างน้อยสองแบบ เช่น แนวตั้งกับแนวนอน เป็นต้น

โครงการนี้มุ่งเน้นพัฒนาเทคนิคของระบบอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ที่สามารถตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมของแสงอินฟราเรดได้ทีละสองสัญญาณควบคู่กันไปโดยใช้ระบบเซ็นเซอร์เพียงชุดเดียว โดยจะมีการออกแบบระบบเชิงแสง ระบบโครงสร้างเชิงกล และระบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการควบคุมการเก็บข้อมูลและการส่งถ่ายข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ จากนั้นจึงวางแผนเลือกและจัดซื้อวัสดุ อุปกรณ์ และชิ้นส่วนทางแสงที่จำเป็นในการสร้างระบบ และทำการประกอบระบบบนโต๊ะปฏิบัติการเชิงแสง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นระบบต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ และโปรแกรมเพื่อการบันทึกสัญญาณผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อการประมวลผลข้อมูลต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อออกแบบและสร้างระบบสเปกโตรมิเตอร์แบบคู่โดยใช้เซ็นเซอร์ชุดเดียว
- 2) เพื่อเป็นการให้ความรู้และฝึกฝนทักษะแก่นักศึกษาในการออกแบบและสร้างระบบเชิงแสง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้
- 3) เพื่อนำระบบต้นแบบที่ได้ไปประยุกต์ในงานวิจัยเพื่อพัฒนาเทคนิคใหม่ของการวิเคราะห์คุณสมบัติทางโพลาริเซชันของแสงต่อไป



- 4) เพื่อนำระบบที่พัฒนาขึ้นไปใช้เป็นสื่อในการฝึกอบรมและให้ความรู้เกี่ยวกับระบบการถ่ายภาพตัดขวางด้วยแสงเลเซอร์แก่นักศึกษาและบุคคลภายนอกที่สนใจ

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- ศึกษาและออกแบบระบบอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ที่สามารถตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมของแสงอินฟราเรดได้ที่ละสองสัญญาณควบคู่กันไปโดยใช้ระบบเซ็นเซอร์เพียงชุดเดียว
- สร้างต้นแบบในระดับปฏิบัติการของระบบอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์เชิงคู่
- พัฒนาโปรแกรมแล็บVIEWเพื่อการควบคุมการบันทึกสัญญาณ ประมวลผล และส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน
- วิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบที่สร้างขึ้น

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ผลสำเร็จที่ได้หลังจากเสร็จสิ้นโครงการงานวิจัยนี้คือ ต้นแบบอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ที่สามารถตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมของแสงอินฟราเรดได้ที่ละสองสัญญาณควบคู่กันไปโดยใช้ระบบเซ็นเซอร์เพียงชุดเดียว ซึ่งสามารถบันทึกสัญญาณสเปกตรัมแบบควบคู่สองสเปกตรัมไปพร้อมๆ กันด้วยความเร็วสูงสุด 70,000 คู่สเปกตรัมต่อวินาที หรือ 140,000 สเปกตรัมต่อวินาที ซึ่งปัจจุบันระบบต้นแบบดังกล่าวตั้งอยู่ ณ ห้องปฏิบัติการเชิงแสงของสาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งจะได้ถูกประยุกต์เข้ากับการพัฒนาระบบถ่ายภาพตัดขวางด้วยแสงโพลาไรซ์ต่อไป เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติ birefringence ของตัวอย่างทางชีวภาพ

ผลของงานวิจัยครั้งนี้ได้ถูกนำไปเผยแพร่ในงานประชุมเชิงวิชาการระดับนานาชาติแล้ว 1 ครั้ง และยังถูกใช้เป็นสื่อในการเรียนการสอนทั้งเชิงทฤษฎีและปฏิบัติการแก่นักศึกษาอีกด้วย อีกทั้ง ผลของงานวิจัยครั้งนี้ จะได้ถูกนำไปศึกษาต่อเพื่อเพิ่มองค์ความรู้ในแง่มุมอื่นๆ รวมถึงการปรับปรุงระบบต้นแบบให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นไปในอนาคต

## บทที่ 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature)

ระบบถ่ายภาพตัดขวางเชิงแสงแบบ Optical Coherence Tomography (OCT) ถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1991 [1] โดยอาศัยคุณสมบัติ low temporal coherence ของคลื่นแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นแบบกว้าง (broadband light source) [2] ในปัจจุบัน OCT ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็ว และได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ด้านการแพทย์ [3-5] ด้านชีววิทยา [6-8] ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ [9] และด้านการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ [10, 11] เป็นต้น ในเวลาต่อมา ได้มีการนำเอาความรู้เกี่ยวกับการแทรกสอดในโดเมนความถี่ [12] มาประยุกต์ใช้กับ OCT เรียกว่า Frequency Domain OCT (FD-OCT) หรือ Spectral Domain OCT (SD-OCT) [13] FD-OCT บันทึกค่าสัญญาณ spectral interference ที่เอาต์พุตของ interferometer ซึ่งมีจุดเด่นก็คือ ความไวต่อสัญญาณ และความเร็วของการวัด เนื่องจากไม่ต้องมีการสแกนของ reference beam อีกต่อไป [14-16] FD-OCT สร้างภาพตัดขวางของตัวอย่างโดยการฉายแสงเลเซอร์ชนิด broadband ให้ไปตกกระทบลงบนผิวตัวอย่าง (sample) แล้ววัดสัญญาณ spectral interference ระหว่างสัญญาณที่สะท้อนมาจากตัวอย่างและแสงอ้างอิง ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้สเปกโตรมิเตอร์เชิงแสง (optical spectrometer) ซึ่งเมื่อนำไปผ่านการแปลงแบบฟูริเยร์แล้วจะได้สัญญาณเชิงเส้นในโดเมนพื้นที่ (spatial domain) ที่เทียบได้กับความสามารถในการสะท้อนที่ระดับความลึกต่างๆ (depth-resolved reflectivity profile) ภายใต้พื้นผิวของตัวอย่าง เมื่อประกอบกับการสแกนลำแสงในแนวขนานกับพื้นผิวตัวอย่าง (lateral scan) แล้ว ก็จะสามารถสร้างภาพตัดขวางในแบบ 2 มิติและสามมิติได้ [17] ทั้งนี้ ปัจจัยสำคัญที่มีส่วนกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของ FD-OCT โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเร็วในการถ่ายภาพของระบบ ก็คือความสามารถในการวัด และบันทึกค่า spectral interference ที่ความเร็วสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของระบบสเปกโตรมิเตอร์นั่นเอง

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนา ออกแบบ และสร้างระบบสเปกโตรมิเตอร์ความเร็วสูงสำหรับ FD-OCT กันอย่างจริงจังมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งก็เป็นผลสืบเนื่องมาจากความต้องการความเร็วในการถ่ายภาพของระบบที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วในการพัฒนาความเร็วของระบบสเปกโตรมิเตอร์ในปัจจุบัน ก็เป็นผลมาจากการวิวัฒนาการด้านประสิทธิภาพและความไวต่อสัญญาณของเซ็นเซอร์แสง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซ็นเซอร์แสงชนิด CCD และ CMOS รวมถึงการพัฒนาในส่วนของการเชื่อมต่อและถ่ายโอนข้อมูลจากเซ็นเซอร์ไปสู่ระบบคอมพิวเตอร์เพื่อการประมวลผล [18-20] ยิ่งไปกว่านั้น ระบบ FD-OCT ในปัจจุบัน มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจวัดคุณสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุที่ต้องการทดสอบ นอกเหนือจากการถ่ายภาพสามมิติ ซึ่งบ่อยครั้งต้องอาศัยการเก็บข้อมูลด้วยสเปกโตรมิเตอร์สองตัวแบบควบคู่กันไปที่ความเร็วสูง เช่น การวัดโพลาไรเซชัน [21-24] และการวัดอัตราการใช้แสง [25-27] เป็นต้น

ถึงแม้ว่าวิธีการตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมสองสัญญาณควบคู่กันจะสามารถทำได้โดยง่ายโดยการใช้สเปกโตรมิเตอร์สองตัวในการบันทึกสัญญาณ [25-28] แต่ต้นทุนต่อตัวของระบบสเปกโตรมิเตอร์ค่อนข้างสูง จึงถือเป็นวิธีการที่ไม่เหมาะสมในเชิงพาณิชย์ ดังนั้น จึงมีนักวิจัยจำนวนมากที่สนใจออกแบบระบบสเปกโตรมิเตอร์ให้สามารถตรวจวัดสองสัญญาณด้วยกล้องเพียงตัวเดียว เพื่อลดต้นทุนการผลิต ซึ่งก็มีหลากหลายวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เช่น การใช้ polarization beam splitter [23] การใช้ 1x2 optical switch [22] การใช้เทคนิค optical modulation [24] และ การใช้ Wollaston prism [21] เป็นต้น

ด้วยความมุ่งหวังที่จะสร้างระบบถ่ายภาพสามมิติแบบ OCT แบบสามารถตรวจวัดโพลาไรเซชันของแสงในระดับห้องปฏิบัติการขึ้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี การพัฒนาระบบสเปกโตรมิเตอร์ความเร็วสูงที่มีการตอบสนองในย่านอินฟราเรด จึงเป็นส่วนสำคัญและจำเป็น เนื่องจากระบบสเปกโตรมิเตอร์ที่มีความเร็วสูงส่วนใหญ่จะมีใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น ซึ่งระบบในเชิงพาณิชย์ยังไม่มีปรากฏมากนัก ทั้งนี้ การออกแบบระบบสเปกโตรมิเตอร์ให้สามารถตรวจวัดสองสเปกตรัมควบคู่กันไป จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ รวมถึงขยายขยายความสามารถของระบบในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุต่อไป ซึ่งวิธีที่จะเลือกใช้คือเทคนิคการออกแบบโดยใช้ Wollaston prism [21].

## 2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานภายใต้โครงการนี้ เน้นที่การออกแบบและสร้างระบบสเปกโตรมิเตอร์ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยระบบที่สร้างขึ้นเป็นในลักษณะของการนำชิ้นส่วนย่อยต่างๆ มาประกอบขึ้นเป็นระบบ โดยมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญคือ Wollaston prism เกรตติ้ง เลนส์ และเซ็นเซอร์แสงแบบ Line-scan ที่มีจำนวนพิกเซลมากกว่า 4000 พิกเซล และสามารถตรวจวัดสัญญาณ แปลงสัญญาณไปเป็นดิจิตอล และถ่ายโอนข้อมูลสัญญาณแบบดิจิตอลไปยังคอมพิวเตอร์ได้ด้วยความเร็วสูง โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) แบบจำลองของระบบสเปกโตรมิเตอร์ถูกออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อกำหนดคุณสมบัติที่ต้องการของส่วนประกอบต่างๆ ของระบบสเปกโตรมิเตอร์ ได้แก่ Wollaston prism เกรตติ้ง และ เลนส์

- 2) เมื่อได้ระบบที่มีประสิทธิภาพตามต้องการแล้ว จึงดำเนินการเลือกวัสดุส่วนประกอบและวางแผนจัดซื้อชิ้นส่วนและอุปกรณ์ ตามคุณสมบัติที่ออกแบบไว้

- 3) นำชิ้นส่วนทั้งหมดมาประกอบขึ้นเป็นระบบจริงบนโต๊ะปฏิบัติการทดลองเชิงแสงตามแบบที่วางไว้ รวมถึงการจัดระเบียบลำแสง (Alignment) และการจัดวางตำแหน่งสเปกตรัมทั้งสองสเปกตรัมให้เหมาะสมที่สุด โดยจะพยายามให้มีความแตกต่างของรูปร่างสเปกตรัมน้อยที่สุด ไม่มีการเหลื่อมกันของสองสเปกตรัม และให้มีความไวของการตรวจวัดมากที่สุด

- 4) พัฒนาระบบเชื่อมต่อกับฮาร์ดแวร์ (Hardware Interface) และระบบติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) ให้มีความเหมาะสมทั้งในแง่ของความสะดวกในการเชื่อมต่อระบบและการควบคุมระบบด้วยคอมพิวเตอร์ รวมถึงความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสเปกตรัมที่วัดได้ไปยังคอมพิวเตอร์

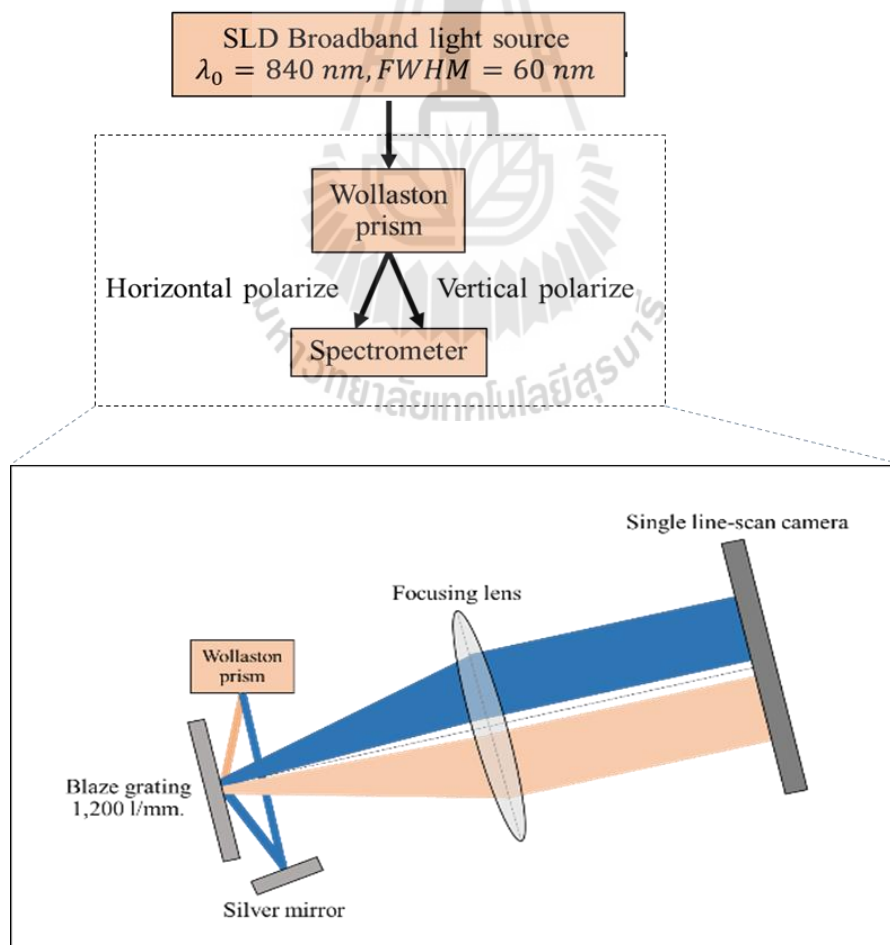
- 5) เมื่อระบบสเปกโตรมิเตอร์ถูกสร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว ก็จะดำเนินการทดสอบและยืนยันประสิทธิภาพของระบบว่าเป็นไปตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ ดังแสดงในบทต่อไป
- 6) จากนั้นระบบที่เสร็จสมบูรณ์จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

### 2.3 การออกแบบระบบ

ระบบต้นแบบสเปกโตรมิเตอร์เชิงคู่ได้ถูกออกแบบเพื่อการใช้งานร่วมกับแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดชนิด Superluminescent Diode หรือ SLD ของบริษัท Superlum, Inc., Ireland ซึ่งมีความยาวคลื่นแสงในย่านอินฟราเรดครอบคลุม 800-900 นาโนเมตร โดยมีความยาวคลื่นเฉลี่ย 840 นาโนเมตร ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงเดียวกันกับที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเป็นระบบถ่ายภาพตัดขวางสามมิติด้วยแสงโพลาไรซ์ต่อไป

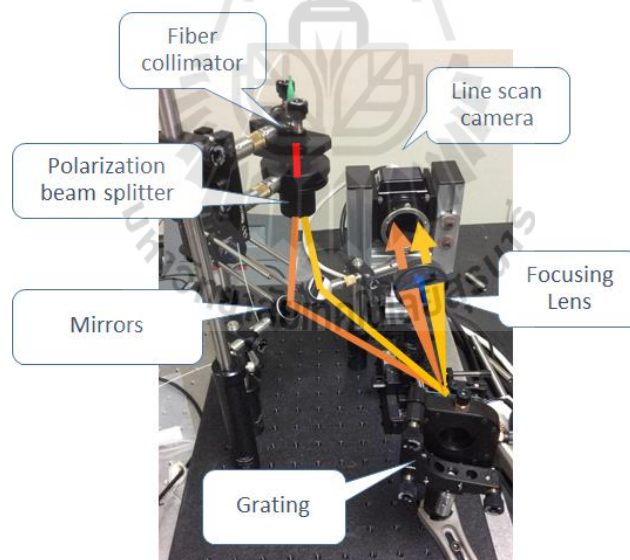
ระบบสเปกโตรมิเตอร์ประกอบด้วย (ดูรูปที่ 2.1 ประกอบ)

- 1) ไฟเบอร์คอลลิเมเตอร์ ทำหน้าที่รับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ต้องการวัดสเปกตรัม โดยออกแบบให้มีขนาดของคอลลิเมทอ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณ 7 มิลลิเมตร โดยคำนวณจากจุดโฟกัสสุดท้ายที่แต่ละพิกเซลของเซ็นเซอร์รับแสง ซึ่งมีขนาด 10 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงระบบโดยรวมของต้นแบบที่พัฒนาขึ้น

- 2) *Wallaston prism* ทำหน้าที่แยกลำแสงออกเป็นสองส่วนที่มีโพลาไรเซชันตั้งฉากกัน
- 3) *กระจกสะท้อนแสง* ทำหน้าที่สะท้อนแสงแต่ละบีมให้ไปตกกระทบที่ตำแหน่งเดียวกันหรือใกล้เคียงบนเกรตติ้งอันเดียวกัน แต่ให้มีมุมตกกระทบต่างกันดังในรูปที่ 2.2
- 4) *เกรตติ้ง* ทำหน้าที่กระจายแสงคอลลิเมทที่ความยาวคลื่นต่างๆ ออกไปด้วยมุมที่ต่างกัน ซึ่งได้เลือกใช้เกรตติ้งแบบสะท้อนที่มีความหนาแน่น 1200 เส้นต่อมิลลิเมตร เพื่อให้ได้การกระจายของความยาวคลื่นให้ได้มากที่สุด
- 5) *เลนส์รวมแสง* ทำหน้าที่รวมแสงทั้งสองบีมให้ไปโฟกัสที่แต่ละพิกเซลของเซ็นเซอร์แบบแถว โดยเลือกความยาวโฟกัสให้ได้จุดโฟกัสที่เล็กกว่าขนาด 1 พิกเซลของเซ็นเซอร์กล้อง ซึ่งประมาณค่าโดยใช้การคำนวณจุดโฟกัสตามทฤษฎี diffraction limit focus spot โดยคำนวณให้จุดโฟกัสเล็กกว่าขนาดพิกเซลครึ่งหนึ่ง เพื่อชดเชยความพร่าของเลนส์ในการใช้งานจริง ทั้งนี้ได้เลือกใช้เลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 75 mm
- 6) *เซ็นเซอร์แสงอินฟราเรด* ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณสเปกตรัมเพื่อส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล โดยในระบบต้นแบบนี้ ทีมวิจัยได้เลือกใช้เซ็นเซอร์แบบแถวชนิด complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) โมเดล spL4096-70km ของบริษัท Basler Vision Technologies, Germany ที่มีขนาดพิกเซลเล็ก 10×10 ไมโครเมตร จำนวนทั้งสิ้น 4096 พิกเซล เพื่อให้ได้สเปกตรัมที่มีความละเอียดสูง ทั้งนี้ การเลือกใช้เซ็นเซอร์ชนิด CMOS มีข้อดีในด้านความเร็วของการตรวจจับสัญญาณ ซึ่งเหมาะกับการพัฒนาเป็นสเปกโตรมิเตอร์ความเร็วสูง

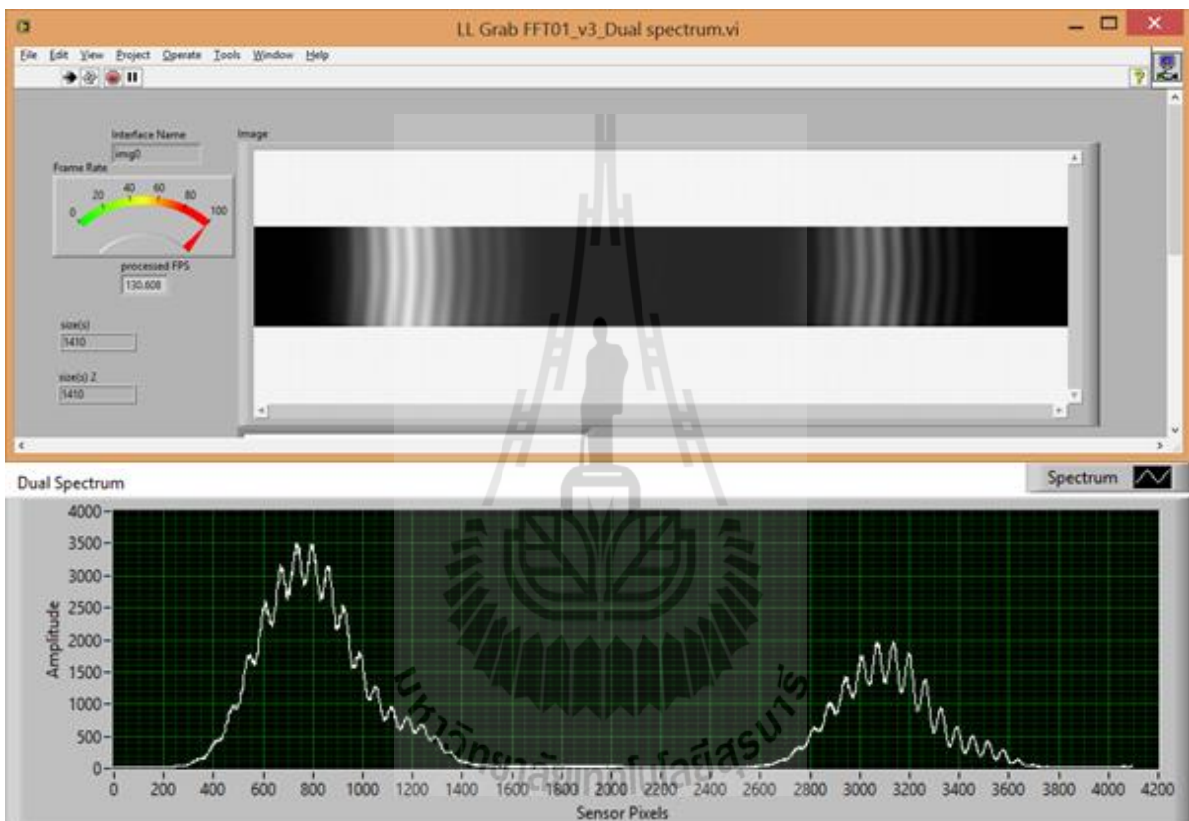


รูปที่ 2.2 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ของระบบสเปกโตรมิเตอร์

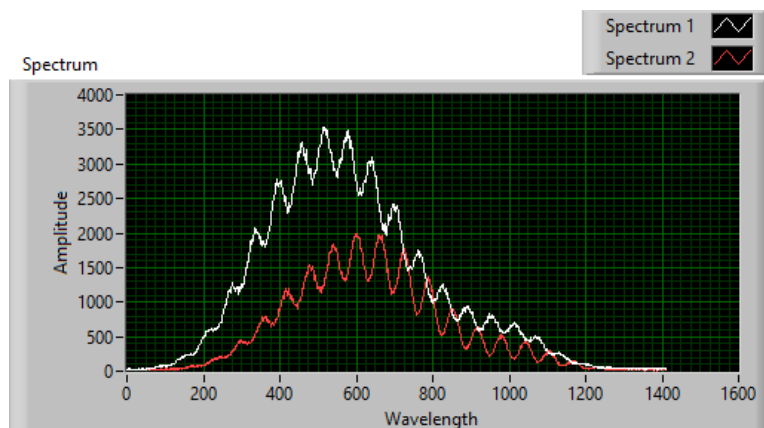
## 2.4 หลักการทำงานของระบบ

ระบบต้นแบบถูกออกแบบโดยเลือกใช้หลักการให้ลำแสงจากคอลลิเมเตอร์ถูกแยกออกจากกันตามชนิดของโพลาไรเซชันผ่าน wallaston prism (Thorlabs, WP10-B, 20° Beam Separation, 650 - 1050 nm AR Coating) ซึ่งลำแสงจะแยกออกจากกันด้วยมุมประมาณ 20 องศา จากนั้น ใช้กระจกสะท้อนแสงทั้ง

สองให้ไปตกกระทบที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันบนแผ่นเกรตติ้งแบบสะท้อน ด้วยมุมตกกระทบที่ต่างกัน โดยจัดวางลำแสงให้แสงสะท้อนจากเกรตติ้งเป็นสองสเปกตรัมที่ไม่มีส่วนซ้อนทับกันดังในรูปที่ 2.1 จากนั้น เลนส์รวมแสงจะทำหน้าที่โฟกัสลำแสงให้ไปตกกระทบบนแต่ละฟิสิกเซลของเซ็นเซอร์รับแสง สัญญาณสเปกตรัมแสงจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลและส่งไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณ ซึ่งระบบทั้งหมดจะถูกควบคุมโดยการโปรแกรมแบบแล็บวิว ซึ่งทีมวิจัยได้พัฒนาขึ้นเองเพื่อใช้ร่วมกับเสเปกโตรมิเตอร์แบบสัญญาณคู่ โดยเฉพาะดังแสดงรูปที่ 2.3 ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวยังทำหน้าที่แบ่งสัญญาณสเปกตรัมออกเป็นสองสัญญาณอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 แสดงโปรแกรมสำหรับการเก็บข้อมูลและประมวลผล



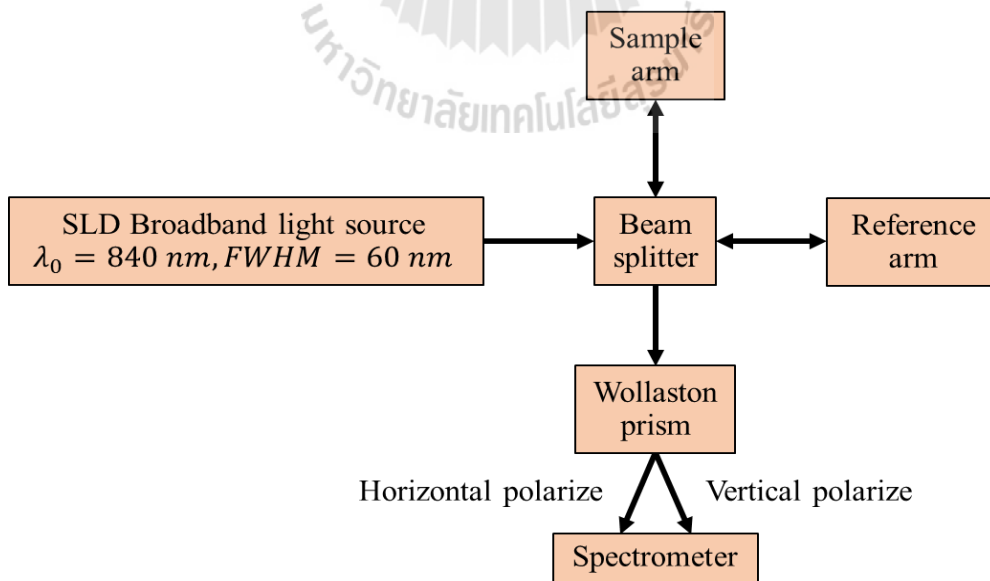
รูปที่ 2.4 แสดงภาพเปรียบเทียบสัญญาณสองสเปกตรัมที่ถูกแบ่งแล้ว

### บทที่ 3. ผลการดำเนินงานวิจัย

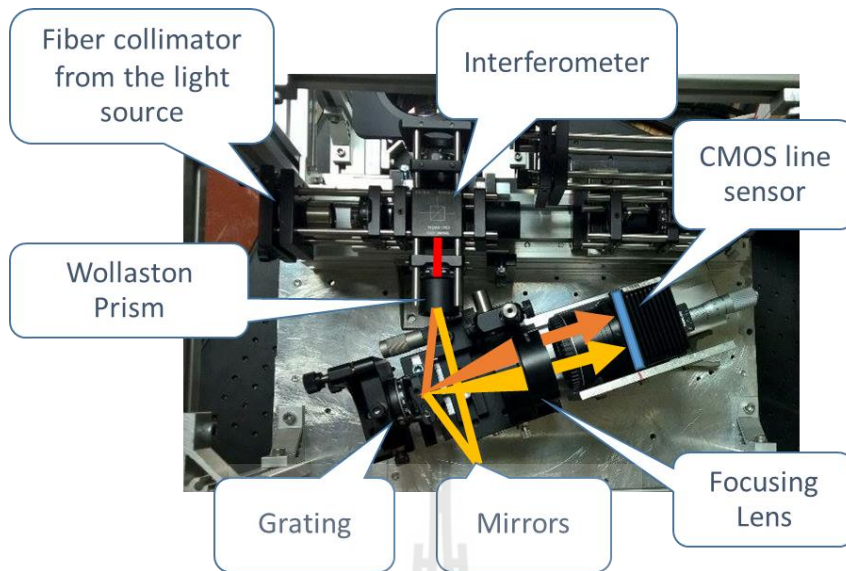
#### 3.1 การตรวจสอบประสิทธิภาพของการตรวจจับสเปกตรัมแบบคู่

ระบบสเปกโตรมิเตอร์คู่แบบคู่เพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณการแทรกสอดบนสเปกตรัมแสงดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ซึ่งทำให้สัญญาณสเปกตรัมที่วัดได้ประกอบไปด้วยสัญญาณความถี่สูงซ้อนทับอยู่บนสัญญาณสเปกตรัมของแหล่งกำเนิด เรียกว่า สัญญาณการแทรกสอดในโดเมนความถี่ (spectral interference) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าสัญญาณเชิงคู่ที่วัดได้มีขนาดความกว้างของรูปร่างของสัญญาณที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ ตำแหน่งกึ่งกลางของสัญญาณทั้งสองสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการเลือกช่วงของพิกเซลของเซ็นเซอร์แบบแถว ซึ่งในที่นี้สัญญาณทั้งสองได้ถูกวางให้เหลื่อมกันโดยความตั้งใจเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตและเปรียบเทียบ

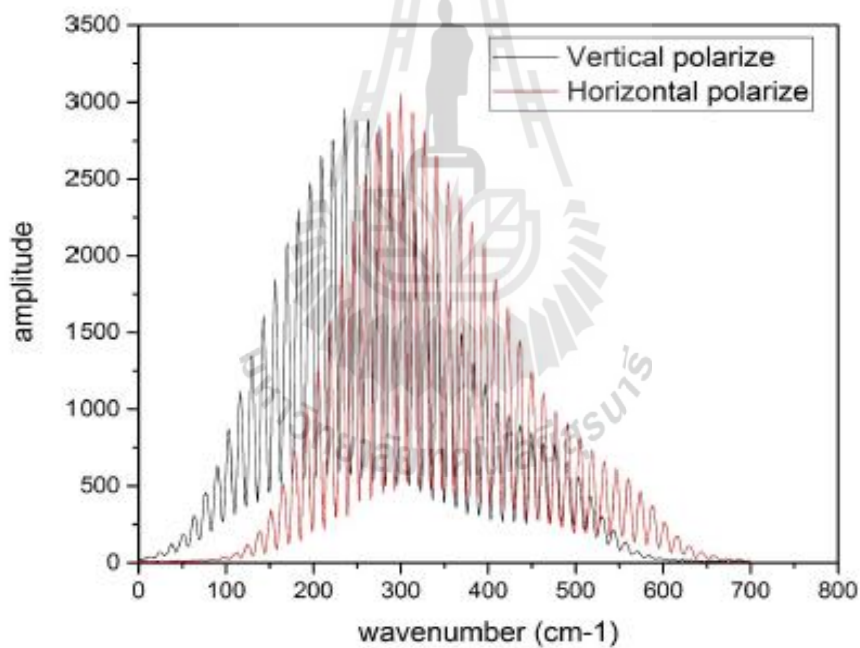
สัญญาณสเปกตรัมที่ระบบสามารถวัดได้มีความละเอียดของข้อมูลแต่ละสเปกตรัมโดยประมาณเท่ากับ 600 จุดต่อหนึ่งสเปกตรัม และได้ความกว้างของสัญญาณที่ใกล้เคียงกับพิกัดจากโรงงานของแหล่งกำเนิดแสง และใกล้เคียงกับสัญญาณที่สอบเทียบโดยสเปกโตรมิเตอร์ระดับพาณิชย์ สัญญาณการแทรกสอดที่ความถี่สูงที่ตรวจจับได้โดยระบบต้นแบบแสดงถึงความสามารถของระบบในการตรวจจับสเปกตรัมแสงที่มีความละเอียดของสเปกตรัมสูง ซึ่งความสามารถดังกล่าวได้ถูกตรวจสอบอีกครั้ง เมื่อประยุกต์ใช้ระบบสเปกโตรมิเตอร์สำหรับระบบการถ่ายภาพตัดขวางในโอกาสต่อไป



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการใช้งานสเปกโตรมิเตอร์เชิงคู่ในการตรวจจับสัญญาณการแทรกสอดของสเปกตรัม



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายระบบสเปกโตรมิเตอร์เชิงคู่เพื่อการตรวจจับสัญญาณการแทรกสอดของสเปกตรัม

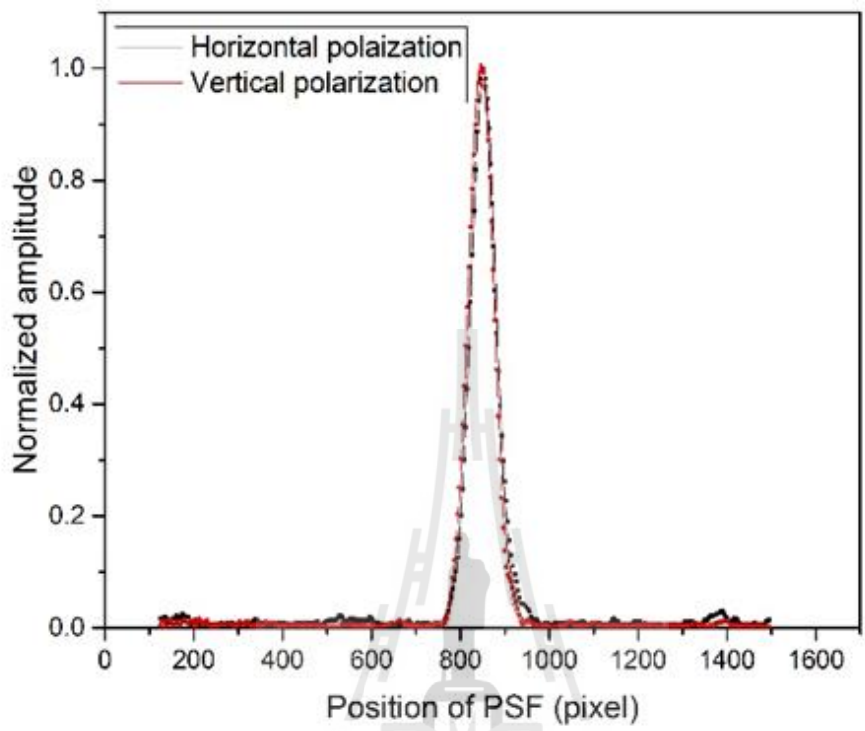


รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบลักษณะของสเปกตรัมคู่ที่ตรวจจับได้โดยระบบต้นแบบ

ในระบบถ่ายภาพตัดขวางแบบ OCT สัญญาณสเปกตรัมแทรกสอดจะถูกนำไปผ่านการแปลงฟูริเยร์เพื่อนำไปสร้างเป็นสัญญาณภาพต่อไป ซึ่งผลลัพธ์ของการแปลงฟูริเยร์ของสเปกตรัมคู่ที่ตรวจจับได้โดยระบบต้นแบบมีลักษณะใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งแสดง Point Spread Function (PSF) ของสองสัญญาณที่สัมพันธ์กับสเปกตรัมทั้งสองที่มีโพลาไรเซชันแบบตั้งฉากกัน ซึ่งขนาดความกว้างของ PSF จะเป็น



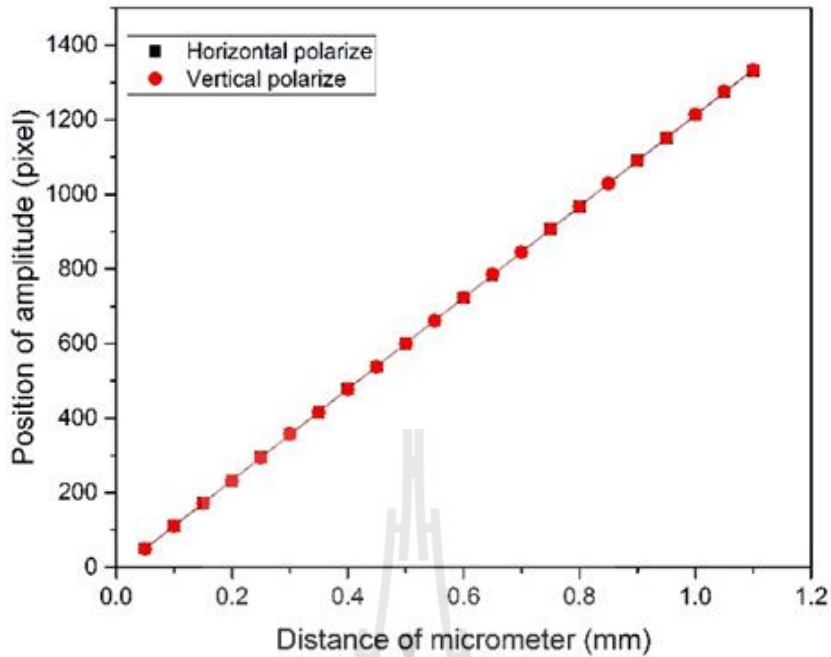
ตัวกำหนดกำลังแยกของระบบถ่ายภาพต่อไป โดยสัญญาณที่ตรวจวัดได้ทั้งคู่มีขนาดความกว้างที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะมีผลต่อความแม่นยำของการคำนวณโพลาไรซ์เซชันของภาพที่ถ่ายได้



รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบ PSF ที่ได้จากการแปลงสเปกตรัมแบบคู่

### 3.2 การสอบเทียบสเกลตามแนวลึก

ในการใช้งานสเปกโตรมิเตอร์ในระบบถ่ายภาพแบบ FD-OCT นั้น จำเป็นต้องรู้ขนาดความลึกจริงที่สัมพันธ์กับขนาด 1 พิกเซลของสัญญาณในรูปที่ 3.4 ซึ่งการหาขนาดจริงของ depth pixel สามารถทำได้โดยการวัดตำแหน่งของ PSF ของสเปกตรัมที่ได้จากการทำ Fast Fourier Transform (FFT) ของสัญญาณแทรกสอดเชิงสเปกตรัม ที่บันทึกจากระยะความลึกที่แตกต่างกันโดยให้มีการกำหนดระยะความลึกได้อย่างแม่นยำจากการปรับไมโครมิเตอร์ จากนั้นทำการพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งของ PSF และระยะจากไมโครมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ทั้งนี้ จากกราฟความสัมพันธ์สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแกนตั้ง (จำนวนพิกเซล) กับแกนนอน (ระยะทางตามแนวลึก) จะสามารถหาขนาดของ pixel จากค่าความชันของกราฟ ซึ่งค่าที่ได้ดังกล่าวจะถูกใช้ในการปรับสเกลของแกนนอนจากพิกเซลไปเป็นความลึกที่แท้จริง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า สเกลตามแนวลึกของทั้ง 2 สัญญาณมีขนาดเท่ากัน นั่นคือให้กราฟเส้นตรงที่เกือบจะเป็นเส้นเดียวกัน นั่นคือเท่ากับ 0.82 ไมโครเมตรต่อพิกเซล ซึ่งจะการันตีว่าสัญญาณ PSF ที่วัดได้จะซ้อนทับกันพอดีที่ทุกตำแหน่งความลึก ซึ่งคาดว่าจะทำให้สามารถใช้งานต้นแบบในการวิเคราะห์โพลาไรเซชันที่แต่ละตำแหน่งความลึกต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ

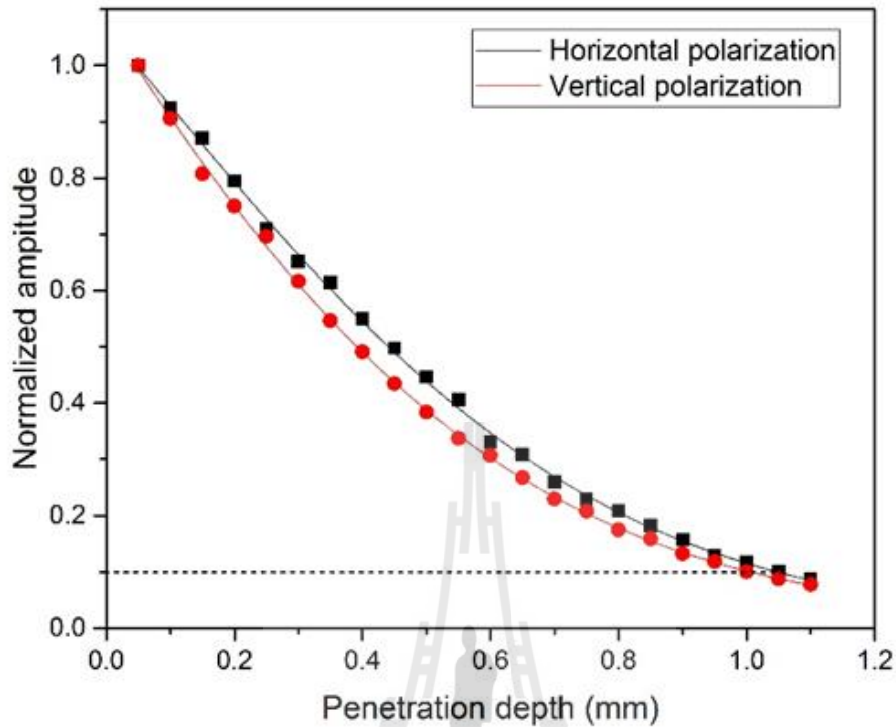


รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ PSF กับระยะทางที่กระจกเคลื่อนที่ไป

### 3.3 ความลึกสูงสุดของการถ่ายภาพ (Imaging Depth)

ในการประยุกต์ระบบต้นแบบเพื่อการตรวจจับสัญญาณของระบบถ่ายภาพตัดขวางด้วยแสงโพลาไรซ์ นั้น สัญญาณสเปกตรัมที่วัดได้จะถูกซ้อนทับด้วยสัญญาณความถี่สูงที่เรียกว่า spectral fringes ทำให้ประสิทธิภาพด้าน spectral resolution ของระบบมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นปัจจัยที่กำหนดความลึกสูงสุดของการถ่ายภาพ ซึ่งเป็นไปตามข้อจำกัดของการวัดรอบของสัญญาณรูปไซน์ตามทฤษฎีของ Nyquist sampling limit นั่นคือ สัญญาณการสะท้อนที่มาจากตำแหน่งที่ลึกมากๆ จะสัมพันธ์กับความถี่ที่สูงขึ้นบนสเปกตรัม จึงจำเป็นต้องใช้กำลังแยกของสเปกตรัมที่สูงขึ้นตามไปด้วย เพื่อให้การวัดสัญญาณยังมีความถูกต้องอยู่

ในโครงการนี้ ความลึกของการถ่ายภาพหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของ PSF และระยะความลึก (จากการเลื่อนตำแหน่งของกระจกในส่วนอ้างอิง) ซึ่งจากความสัมพันธ์ในกราฟ จะสามารถหาค่าความลึกของการถ่ายภาพได้จากการพิจารณาความสูงของ PSF ที่มีค่าลดลง 10 dB หรือ 10 เท่าของความสูงมากสุดของ PSF (เนื่องจากถ้าน้อยกว่า 10 dB จะไม่สามารถแยกแยะระหว่างสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณรบกวนได้) ซึ่งจากการความสัมพันธ์สามารถหาค่าความลึกของการถ่ายภาพได้จากการแปลงฟูริเยร์ของสัญญาณสเปกตรัมทั้งคู่ ซึ่งพบว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยมีความลึกสูงสุดประมาณ 1.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 กราฟแสดง SNR dropped off ของระบบซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ความลึกสูงสุดของการถ่ายภาพได้

ทั้งนี้ ความลึกสูงสุดที่ถ่ายได้ยังไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งเดิมคาดว่าจะสามารถถ่ายลงไปได้ลึกถึง 2 มิลลิเมตรจากพื้นผิว ซึ่งจะได้ดำเนินการแก้ไขและปรับปรุงต่อไป โดยการเพิ่มประสิทธิภาพด้านกำลังแยกของสเปกโตรมิเตอร์ให้ดียิ่งๆ ขึ้นไป ซึ่งต้องอาศัยการจล้าแสงให้มีประสิทธิภาพกว่าเดิม อย่างไรก็ตาม ระบบต้นแบบในปัจจุบัน นับว่าเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุในบริเวณใกล้ๆ พื้นผิว ที่ความลึกไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์คุณสมบัติการหักเหสองแนวที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุได้

## บทที่ 4. สรุปผลการวิจัย

### 4.1 สรุปรวมผลงานวิจัย

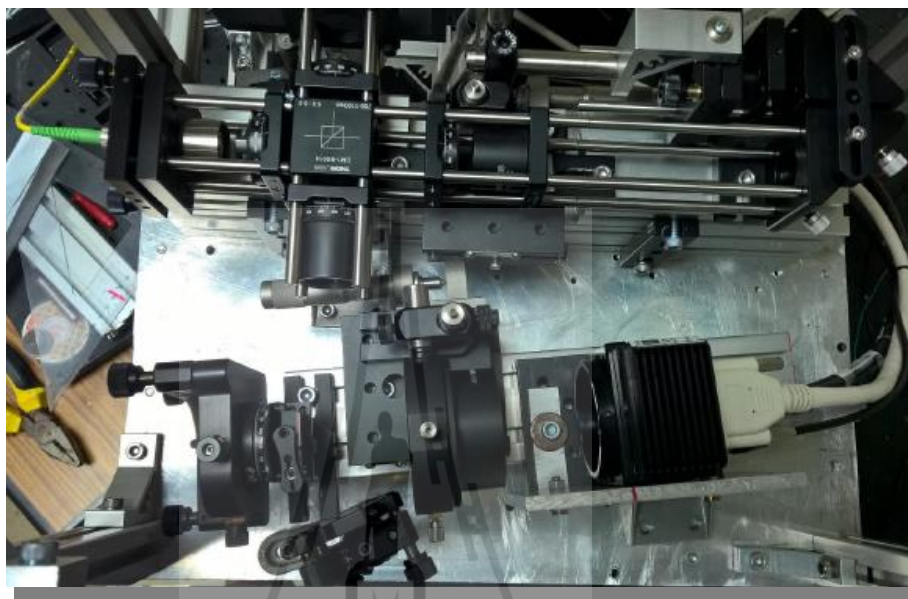
ภายใต้โครงการวิจัยนี้ ทีมวิจัยได้ดำเนินการศึกษา ออกแบบ และพัฒนาระบบสเปกโตรมิเตอร์สำหรับการตรวจจับสัญญาณแสงในย่านอินฟราเรดช่วงสั้น (800-900 นาโนเมตร) ซึ่งสามารถตรวจจับและบันทึกสัญญาณสเปกตรัมได้ที่ละสองสัญญาณไปพร้อมๆ กัน ด้วยความเร็วกว่า 50,000 คู่สเปกตรัมต่อวินาที ทั้งนี้ระบบสเปกโตรมิเตอร์เชิงสัญญาณคู่ที่พัฒนาขึ้น ใช้หลักการแยกลำแสงที่ทางเข้าของสเปกโตรมิเตอร์โดยใช้อุปกรณ์แบ่งลำแสงชนิด Wollaston prism ซึ่งสามารถแยกลำแสง 2 ลำที่มีโพลาไรเซชันตั้งฉากกันได้ โดยออกแบบระบบให้ลำแสงที่แยกกันแล้วไปตกกระทบที่บริเวณใกล้เคียงกันบนพื้นผิวของเกรตติ้งอันเดียวกัน โดยจัดลำแสงให้มุมตกกระทบมีค่าไม่เท่ากัน เพื่อให้ลำแสงที่สะท้อนจากเกรตติ้งแยกจากกันเป็น 2 สเปกตรัมที่ไม่มีส่วนซ้อนทับกัน จากนั้นใช้เลนส์รวมแสงแต่ละสเปกตรัมให้ไปตกบนเซ็นเซอร์รับแสงแบบแถวเดียว ซึ่งสามารถอ่านสัญญาณสเปกตรัมพร้อมกันได้ทีละ 2 สัญญาณ

จากการทดลองเก็บข้อมูลเพื่อตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณสเปกตรัมเปรียบเทียบกัน 2 สัญญาณพบว่า สัญญาณทั้งสองสามารถออกแบบให้มีความกว้างและรูปร่างได้ใกล้เคียงกันมาก โดยมีขนาดสัญญาณโดยประมาณ 600 จุดต่อสเปกตรัม โดยบันทึกได้ครอบคลุมช่วงสเปกตรัมทั้งหมดของแหล่งกำเนิดแสง นั่นคือประมาณ 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังได้รับการยืนยันว่า เมื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณของระบบถ่ายภาพสามมิติแบบ FD-OCT ระบบจะสามารถถ่ายภาพได้ความลึกสูงสุดประมาณ 1.1 มิลลิเมตร ทั้งนี้ ระบบต้นแบบจะถูกพัฒนาต่อขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้านความเร็ว กำลังแยก และความลึกของสัญญาณต่อไป

ทั้งนี้ คาดว่า จะสามารถนำต้นแบบสเปกโตรมิเตอร์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างระบบถ่ายภาพตัดขวางสามมิติโดยใช้แสงโพลาไรซ์ที่เรียกว่า Polarization sensitive optical coherence tomography (PS-OCT) ต่อไป ซึ่งระบบถ่ายภาพดังกล่าวสามารถใช้ประโยชน์ในการศึกษาวิจัยทางชีวภาพที่ต้องการศึกษาคุณสมบัติของเนื้อเยื่อที่ตอบสนองต่อแสงโพลาไรซ์ได้ อาทิ ทางชีววิทยา ทางเทคโนโลยีเกษตรทั้งพืชและสัตว์ และทางการแพทย์ เป็นต้น ซึ่งระบบ PS-OCT จะมีจุดเด่นในแง่ของความสะดวก รวดเร็วของการถ่ายภาพ มีขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างที่ไม่ซับซ้อน และสามารถถ่ายภาพสามมิติของตัวอย่างที่มีชีวิตได้โดยไม่เกิดอันตรายหรือผลข้างเคียง (Non-destructive and non-invasive) จึงเหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องการตรวจติดตามการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก หรือการติดตามและเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อชีวภาพในสถานะต่างๆ กันได้

## 4.2 ผลผลิตของงานวิจัย

- 1) ต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการทดลอง จำนวน 1 ระบบ ซึ่งเป็นระบบสเปกโตรมิเตอร์ความเร็วสูงเพื่อการตรวจจับสัญญาณสเปกตรัมแสงอินฟราเรดแบบพร้อมกันสองสเปกตรัม ที่มีความเร็วในการบันทึกสัญญาณสเปกตรัมแบบคู่ประมาณ 55,000 คู่สเปกตรัมต่อวินาที



รูปที่ 4.1 ภาพการใช้งานระบบสเปกโตรมิเตอร์เชิงคู่ในระบบถ่ายภาพแบบ PS-OCT

- 2) นักศึกษาผู้มีส่วนร่วมได้มีการพัฒนาองค์ความรู้และทักษะในการออกแบบและสร้างระบบเชิงแสงในระดับห้องปฏิบัติการ จำนวน 1 คน ได้แก่
  - นายคุณากร พลวงษ์ รหัส D5510146 นักศึกษาระดับปริญญาเอกสาขาวิชาเทคโนโลยีเลเซอร์และโฟตอนิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 3) นำเสนอระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในการประชุมเชิงวิชาการระดับนานาชาติ 1 ครั้ง เพื่อเป็นการเปิดช่องทางให้นักวิจัยในสาขาอื่นที่สนใจ ได้เข้ามามีส่วนร่วมในการใช้งานและพัฒนาระบบต่อไป

## 4.3 การเผยแพร่ผลงานวิจัยของโครงการ

นำเสนอผลงานวิจัยในรูปแบบโปสเตอร์ในการประชุมเชิงวิชาการระดับนานาชาติ International Conference on Photonics Solutions (ICPS) 2015 ในหัวข้อ “A High Speed Dual Spectrometer Design by using a Single Line Scan Camera and a Polarization Beam Splitter” ณ หัวหิน ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 6-8 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

#### 4.4 การศึกษาวิจัยเพิ่มเติม

ทีมวิจัยมีแผนงานที่จะพัฒนาระบบต้นแบบที่ได้จากโครงการนี้ต่อไป โดยเน้นการพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น รวมถึงการแสวงหาความร่วมมือกับกลุ่มวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ ของการประยุกต์ใช้ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในการสนับสนุนงานวิจัยทางด้านการถ่ายภาพและวิเคราะห์ตัวอย่างชีวภาพ การถ่ายภาพทางชีวการแพทย์ งานวิจัยทางเทคโนโลยีเกษตร รวมถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ ด้วย ซึ่งมีแผนงานที่วางไว้โดยสังเขป ดังนี้

- 1) พัฒนาเทคนิคการประมวลสัญญาณที่วัดได้โดยระบบต้นแบบ เพื่อให้สัญญาณสเปกตรัมเชิงคู่ที่วัดได้มีลักษณะใกล้เคียงกันให้มากที่สุด โดยวิเคราะห์จากภาพตัดขวางที่ถ่ายโดยระบบถ่ายภาพแบบ FD-OCT ที่ใช้ต้นแบบในโครงการนี้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ
- 2) ประยุกต์ใช้ต้นแบบสเปกโตรมิเตอร์เพื่อพัฒนาระบบถ่ายภาพตัดขวางสามมิติโดยใช้แสงโพลาไรซ์แบบ PS-OCT เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะความเป็น birefringence ของวัสดุ หรือ เนื้อเยื่อชีวภาพ



## บรรณานุกรม

1. Huang, D., et al., *Optical coherence tomography*. Science, 1991. **254**(5035): p. 1178-1181.
2. Fercher, A.F., K. Mengedoht, and W. Werner, *Eye-length measurement by interferometry with partially coherent light*. Optics Letters, 1988. **13**(3): p. 186-188.
3. Lee, E.C., et al., *In vivo optical frequency domain imaging of human retina and choroid*. Optics Express, 2006. **14**(10): p. 4403-4411.
4. Nelson, J.S., et al., *Imaging blood flow in human port-wine stain in situ and in real time using optical Doppler tomography*. Archives of dermatology, 2001. **137**(6): p. 741.
5. Lim, H., et al., *High-speed imaging of human retina in vivo with swept-source optical coherence tomography*. Optics Express, 2006. **14**(26): p. 12902-12908.
6. De Boer, J.F., et al., *Two-dimensional birefringence imaging in biological tissue by polarization-sensitive optical coherence tomography*. Optics Letters, 1997. **22**(12): p. 934-936.
7. Schmitt, J.M., S.L. Lee, and K.M. Yung, *An optical coherence microscope with enhanced resolving power in thick tissue*. Optics Communications, 1997. **142**(4-6): p. 203-207.
8. 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, 2007. **15**(4): p. 1627-1638.
9. Ko, H.J., et al., *Optical coherence elastography of engineered and developing tissue*. Tissue Engineering, 2006. **12**(1): p. 63-73.
10. Kim, S., et al., *Simultaneous measurement of refractive index and thickness by combining low-coherence interferometry and confocal optics*. Optics Express, 2008. **16**(8): p. 5516-5526.
11. Lee, B., et al., *Simultaneous Measurements of Refractive Index and Thickness by Spectral-Domain Low Coherence Interferometry Having Dual Sample Probes*. Photonics Technology Letters, IEEE, 2011(99): p. 1-1.
12. Born, M. and E. Wolf, *Principles of Optics, seventh expanded edition*. Cambridge, England. 1999: Cambridge University Press.
13. Fercher, A.F., et al., *Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry*. Optics Communications, 1995. **117**(1-2): p. 43-48.
14. Choma, M., et al., *Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography*. Optics Express, 2003. **11**(18): p. 2183-2189.
15. De Boer, J.F., et al., *Improved signal-to-noise ratio in spectral-domain compared with time-domain optical coherence tomography*. Optics Letters, 2003. **28**(21): p. 2067-2069.
16. Leitgeb, R., C. Hitzenberger, and A. Fercher, *Performance of fourier domain vs. time domain optical coherence tomography*. Optics Express, 2003. **11**(8): p. 889-894.
17. Bouma, B.E. and G.J. Tearney, *Handbook of optical coherence tomography*. 2002: Marcel Dekker, Inc.
18. Lee, K.S., K.P. Thompson, and J.P. Rolland, *Broadband astigmatism-corrected Czerny–Turner spectrometer*. Optics Express, 2010. **18**(22): p. 23378-23384.
19. Schmoll, T., C. Kolbitsch, and R.A. Leitgeb, *Ultra-high-speed volumetric tomography of human retinal blood flow*. Optics Express, 2009. **17**(5): p. 4166-4176.

20. Potsaid, B., et al., *Ultra-high speed Spectral/Fourier domain OCT ophthalmic imaging at 70,000 to 312,500 axial scans per second*. Optics Express, 2008. **16**(19): p. 15149-15169.
21. Cense, B., et al., *Polarization-sensitive spectral-domain optical coherence tomography using a single line scan camera*. Optics Express, 2007. **15**(5): p. 2421-2431.
22. Lee, S.W., H.W. Jeong, and B.M. Kim, *High-speed spectral domain polarization-sensitive optical coherence tomography using a single camera and an optical switch at 1.3  $\mu\text{m}$* . Journal of biomedical optics, 2010. **15**(1): p. 010501-010501-3.
23. Baumann, B., et al., *Single camera based spectral domain polarization sensitive optical coherence tomography*. Optics Express, 2007. **15**(3): p. 1054-1063.
24. Fan, C., Y. Wang, and R.K. Wang, *Spectral domain polarization sensitive optical coherence tomography achieved by single camera detection*. Optics Express, 2007. **15**(13): p. 7950-7961.
25. Zotter, S., et al., *Visualization of microvasculature by dual-beam phase-resolved Doppler optical coherence tomography*. Optics Express, 2011. **19**(2): p. 1217-1227.
26. Iftimia, N.V., et al., *Dual-beam Fourier domain optical Doppler tomography of zebrafish*. Optics Express, 2008. **16**(18): p. 13624-13636.
27. Makita, S., et al., *Dual-beam-scan Doppler optical coherence angiography for birefringence-artifact-free vasculature imaging*. Optics Express, 2012. **20**(3): p. 2681-2692.
28. An, L., et al., *High speed spectral domain optical coherence tomography for retinal imaging at 500,000 A-lines per second*. Biomedical optics express, 2011. **2**(10): p. 2770-2783.





## ประวัตินักวิจัย

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 ก่อนมารับตำแหน่งเป็นอาจารย์ ในสาขาวิชาเทคโนโลยีเลเซอร์และโฟโตนิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2554 จนถึงปัจจุบัน สาขางานวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษคือ การออกแบบระบบเชิงแสง โดยเน้นการพัฒนาาระบบถ่ายภาพสามมิติด้วยแสงอินฟราเรดและการประยุกต์ในเชิงชีวการแพทย์และชีววิทยา

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

ภาคผนวก ก เอกสารการเผยแพร่ผลงาน



# A High Speed Dual Spectrometer Design by using a Single Line Scan Camera and a Polarization Beam Splitter



Kunakorn Palawong, Jadsada Saetiew, Jiraporn saenjaj, Pomthep Pongchalee, and Panomsak Meemon\*  
 School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology,  
 Nakhon Ratchasima, Thailand 30000  
 Corresponding author: [panomsak@sut.ac.th](mailto:panomsak@sut.ac.th)



## ABSTRACT

We describe the design and implementation of a dual beam spectrometer, consisting of a single line-scan camera, reflection grating, focusing optics, and Wollaston prism. In our design, two orthogonal polarizations of an input broadband collimated light beams was separated by using a Wollaston prism. The two beam paths were controlled and directed to incident on the same reflection grating but at different incident angles, aiming for two diffracted angles that were not overlapped. By passing through the same focusing lens, the two beams were then focused on a single line-sensor of a CMOS camera. The two spectra were aligned to be completely separated and located next to each other on the same line of the sensor. The spectra of two orthogonal polarizations were imaged on 2800 pixels of the sensor array, exactly 700 pixels per spectrum. The technique for optical alignment of the spectrometer will be presented and discussed. The properties and similarity of the two spectra were measured and compared. In the current implementation, the two orthogonally polarized spectra can be simultaneously captured at a speed of 55,000 spectra per second. The development of the high speed dual spectrometer that is capable of simultaneous detection of two orthogonal polarization is an important part to be used for the implementation of a spectrometer-based polarization sensitive optical coherence tomography that will be further investigated in the future.

## INTRODUCTION

Spectrometer is an important optical equipment for measuring properties of samples or materials. It is applied in many researches such as biology, chemistry, agriculture, and material. In addition, it is also frequently used as a detector of Frequency-Domain Optical Coherence Tomography (FD-OCT) [1]. FD-OCT is an optical imaging technology that is capable of non-invasive high speed high resolution cross-sectional imaging of both biological and non-biological materials [2,3]. FD-OCT captures the interference between light from sample arm and reference arm of Michelson interferometer in frequency domain by using a spectrometer. Consequently, spectrometer is the important part of FD-OCT, which defines the performance and high speed detection of interference signal.

In this research, we have designed and implemented a high speed spectrometer that can simultaneously detect vertical and horizontal polarized spectra by using a polarization beam splitter and single line scan camera. The characteristics of the two spectra, such as axial resolution and penetration depth, were measured and analyzed.

## EXPERIMENTAL SETUP

The FD-OCT system was built on the Michelson interferometer as illustrated in Figure 1. A superluminescent diode (Superlum, S840-B-I-20) was used as the light source with a central wavelength of 840 nm and a FWHM spectral bandwidth of 60 nm. The output light from the light source was split by 50/50 beam splitter cube (Thorlabs, CM1-BS014), where 50% of light power go to the reference arm and another 50% to the sample arm. In the reference arm, a silver mirror was used for reflect the collimated light from the light source. The sample arm consisted a collimator, a dual axes galvanometer mirrors (Thorlabs, GVS012) for control area scanning, and a focusing lens (Thorlabs, LSM05-BB) for focusing the sample beam on the sample. The light backscattered from the reference mirror and sample were combined at the beam splitter cube and delivered to the high speed spectrometer. The spectrometer consisted of a Wollaston prism (Thorlabs, WP10-B) for splitting vertical and horizontal polarized beams [4], a reflection Blaze grating with 1200 lines-pairs/nm (Thorlabs, GR25-1208), a focusing lens of 75 mm focal length (Thorlabs, AC508-075-B-ML), and a high speed line scan CMOS camera (Basler, Sprint sPL4096-70km).

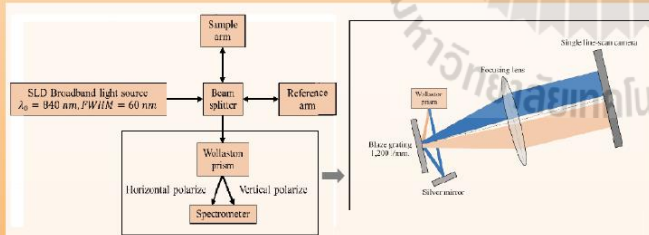


Figure 1 Optical coherence tomography based on free-space Michelson interferometer with high speed dual spectrometer.



Figure 2 Photograph of an experimental setup.

## REFERENCE

- [1] A. F. Fercher, C. K. Hitzinger, G. Kamp, and S. Y. El-Zaiat, "Measurement of intracocular distances by backscattering spectral interferometry," *Optics Communications* 117, 43-48 (1995).
- [2] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, and J. G. Fujimoto, "Optical coherence tomography," *Science* 254, 1178-1181 (1991).
- [3] K. S. Lee, K. P. Thompson, P. Meemon, and J. P. Rolland, "Cellular resolution optical coherence microscopy with high acquisition speed for in-vivo human skin volumetric imaging," *Optics letters* 36, 2221-2223 (2011).
- [4] Cense, B. Mujat, M., Chen, T. C., Park, B. H. & de Boer, J. F. Polarization-sensitive spectral-domain optical coherence tomography using a single line scan camera. *Optics Express* 15, 2421-2431 (2007).

## RESULT AND DISCUSSION

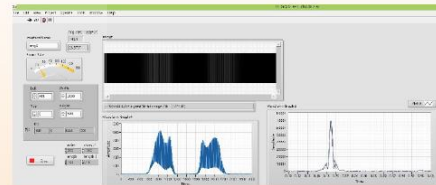


Figure 3 LabVIEW interface for capturing spectrum.

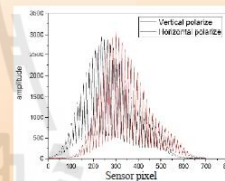


Figure 4 Interference spectrum of horizontal and vertical polarized beams as detected by the implemented high speed dual spectrometer.

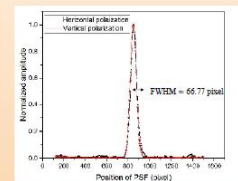


Figure 5 Axial point spread function (PSF) obtained by Fourier transformation of each interference spectrum in Figure 4.

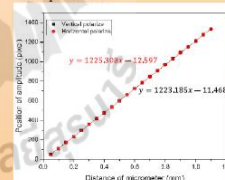


Figure 6 The relation between position of the axial PSF and distance of micrometer for calibrate scale

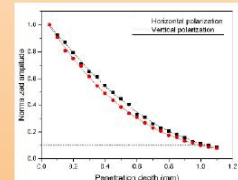


Figure 7 The relation between amplitude and penetration depth of horizontal and vertical polarized PSFs.

Specific	Horizontal polarize	Vertical polarize
Pixel size ( $\mu\text{m}$ )	$\approx 0.82 \mu\text{m}$	$\approx 0.82 \mu\text{m}$
Axial resolution	$\approx 55 \mu\text{m}$	$\approx 55 \mu\text{m}$
Penetration depth (10dB)	$\approx 1.1 \text{ mm}$	$\approx 1.1 \text{ mm}$

Table 1 The performance of Optical coherence tomography (OCT) with high speed dual spectrometer.

## CONCLUSION

In this works, we have designed and implemented a free-space FD-OCT with high speed dual spectrometer. The spectrometer is capable of simultaneous capturing two spectra by using a single line scan CMOS camera. Each detected spectrum corresponds with horizontal and vertical polarization that has been separated by Wollaston prism before entering the spectrometer. The characteristics of each spectrum, such as axial resolution and penetration depth, are similarly. However, the characteristics of both spectra is still poor as compared with theoretical values, which will be further investigated and optimized in the future. The developed spectrometer will be used for developing a Polarization Sensitive OCT (PS-OCT).

## ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by Suranaree University of Technology and the Higher Education Research Promotion and National Research University Project of Thailand, Office of the Higher Education Commission.

