



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ทุนวิจัยพระจอมเกล้าธนบุรี

การพัฒนาอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์
เพื่อต่อยอดสู่การพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงแสงขั้นสูง
Development of Fabry-Perot Interferometer
for Advance Optical Spectrum Analyzer Instrument

จัดทำโดย
ดร.บัญญัติ เล็กประเสริฐ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มิถุนายน 2562

รายงานโครงการวิจัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

- รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ ระหว่างเดือน พ.ศ. ถึง เดือน พ.ศ.
- รายงานฉบับสมบูรณ์ ระหว่างเดือน มิ.ย. พ.ศ. 2560 ถึง เดือน พ.ค. พ.ศ. 2562

1. **ชื่อโครงการ (ไทย)** การพัฒนาอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์เพื่อต่อยอดสู่การพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงแสงขั้นสูง
(อังกฤษ) Development of Fabry-Perot Interferometer for Advance Optical Spectrum Analyzer Instrument

2. **ชื่อหัวหน้าโครงการ** ดร.บัญญัติ เล็กประเสริฐ
สถานที่ติดต่อ มจร.ราชบุรี
โทรศัพท์ 0815308184

3. **ระยะเวลาตลอดโครงการ** 2 ปี
เริ่มโครงการวิจัยเมื่อเดือน 1 มิ.ย. พ.ศ. 2560 ถึง **เดือน** 31 พ.ค. พ.ศ. 2562

- | | | |
|----------------------------------|---------|-----|
| 4. งบประมาณรวมตลอดโครงการ | 150,000 | บาท |
| ปีที่ 1 (2560) | 150,000 | บาท |
| ปีที่ 2 (2561) | - | บาท |

5. **เป้าหมาย / ผลงานหลักของโครงการ**

1. เพื่อออกแบบและสร้างอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ ที่ใช้งานได้ในช่วงความยาวคลื่นแสง 532 นาโนเมตร รวมถึงระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการทำงานและการแสดงผลสัญญาณของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่สร้างขึ้น
2. เพื่อหาค่าวิสัย (Characteristics) ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าพิแนสส์ ค่าอำนาจจำแนก และความไม่แน่นอนของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบ เพบริ-เพโรต์ที่สร้างขึ้น
3. เพื่อประเมินลักษณะงานประยุกต์ต่อยอดที่เหมาะสมกับคุณสมบัติของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

6. **การพัฒนาเทคโนโลยี**

ออกแบบ สร้าง อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ที่ทำงานได้ในช่วงความยาวคลื่นแสง 532 นาโนเมตร และพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของอุปกรณ์ รวมทั้งหาค่าวิสัย คือ ความละเอียด (ค่าพิแนสส์และอำนาจจำแนก) ของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ที่สร้างขึ้น

การวิจัยนี้ มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ สำหรับทดแทนอุปกรณ์ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง โดยการพัฒนาอุปกรณ์ขึ้นเอง จะเป็นการระดมองค์ความรู้ ทำให้สามารถปรับแต่งการทำงานของอุปกรณ์ได้อย่างอิสระ สำหรับการต่อยอดสู่การเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงต่อไป

7. รายละเอียดทางวิชาการที่ได้รับจากการวิจัย

1. ความก้าวหน้าของการวิจัย ณ ช่วงเวลารายงาน

รายละเอียดอยู่ในรายงาน

2. ตารางแสดงความก้าวหน้าของผลงานวิจัย

ตารางที่ 7.1 ความก้าวหน้าของผลงานวิจัย ณ ช่วงรายงานเมื่อเทียบกับแผนงานวิจัยทั้งโครงการ

รายละเอียดของแผนงาน	ความก้าวหน้าผลงานวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม				ผลงานที่ได้ (ระบุเทคโนโลยีหรือวิธีการ หรือผลิตภัณฑ์)
	ปีที่ 1 (ปี 2560)		ปีที่ 2 (ปี 2561)		
	เดือนที่ 1-6	เดือนที่ 7-12	เดือนที่ 1-6	เดือนที่ 7-12	
1. การออกแบบและสร้าง อินเตอร์เฟซโรบิเตอร์ ฐานติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง ตัวจับยึดอุปกรณ์เชิงทัศน ศาสตร์	←-----→		←-----→		เกิดอินเตอร์เฟซโรบิเตอร์ แบบเพรี-เพโรต์ ตัวจับยึด อุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถ ออกแบบและสร้างได้ใน ประเทศ
2. ออกแบบและสร้างวงจร และส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ เกี่ยวข้อง	←-----→		←-----→		
3. ติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมด	←-----→		←-----→		
4. ทดสอบหาค่าพิสัยของ อินเตอร์เฟซโรบิเตอร์	←-----→		←-----→		
5. จัดทำรายงาน	←-----→		←-----→		

←-----→ แผนงานวิจัยทั้งโครงการที่วางไว้

←-----→ ผลงานวิจัยที่ดำเนินจนถึงปัจจุบัน

ตารางที่ 7.2 เป้าหมายผลงานในแต่ละช่วงเวลา

ปีที่	เดือนที่	รายละเอียดของ แผนงาน	ผลงานที่คาดว่าจะ ได้รับ	ตอบ วัตถุประสงค์ ข้อใด	ผลจากการปฏิบัติงาน จริง	ความสำเร็จ (%)
1	1-6	การออกแบบและ สร้างอินเตอร์เฟซโร บิเตอร์ ฐานติดตั้ง อุปกรณ์ทดลอง ตัว จับยึดอุปกรณ์เชิง ทัศนศาสตร์ และ ออกแบบและ สร้างวงจรและส่วน อิเล็กทรอนิกส์ที่ เกี่ยวข้อง	เกิดอินเตอร์เฟซโร บิเตอร์แบบเพรี- เพโรต์ พร้อม อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับควบคุมการ ทำงานอินเตอร์เฟซ โรบิเตอร์ เลเซอร์ และอุปกรณ์ ตรวจวัดความเข้ม แสง	ข้อ 1	1. เกิดความล่าช้าจาก การสั่งซื้ออุปกรณ์เชิง ทัศนศาสตร์ (กระจก เลนส์ เลเซอร์-ไดโอด โฟโตไดโอด) จาก ต่างประเทศ 2. ดำเนินการสร้างฐาน ทดลอง ตัวจับยึด อุปกรณ์เชิงทัศน ศาสตร์ และอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ บางส่วน	40%
	7-12	ดำเนินการสร้าง อุปกรณ์ วงจร อิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ เหลือ ติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมด ทดสอบหาค่าพิสัย เขียนรายงานฉบับ สมบูรณ์		ข้อ 2-3	1. ดำเนินการสร้างฐาน ทดลอง ตัวจับยึด อุปกรณ์เชิงทัศน ศาสตร์ และอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ เหลือ 2. ประกอบและทดสอบ การทำงานของ เลเซอร์	60%

ปีที่	เดือนที่	รายละเอียดของแผนงาน	ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ	ตอบวัตถุประสงค์ข้อใด	ผลจากการปฏิบัติงานจริง	ความสำเร็จ (%)
					3. ประกอบและทดสอบการทำงานอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง 4. ติดตั้งอุปกรณ์บนฐานการทดลอง	
2	1-6	-	-		1. ประกอบและทดสอบวงจรขับตัวแปลงเพียโซ 2. ติดตั้งอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ ลงบนฐานการทดลองทั้งหมด 3. ทดสอบการทำงาน	80%
	7-12	-	-		1. ออกแบบและสร้างอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพรี-เพโรต์รุ่นที่ 2 เพื่อแก้ไขข้อบกพร่อง 2. ติดตั้งและทดสอบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพรี-เพโรต์รุ่นที่ 2 3. ติดตั้งและทดสอบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคิลสันเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการใช้งาน 4. เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์	100%

ความสำเร็จของงานตามเป้าหมาย

ได้อุปกรณ์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพรี-เพโรต์พร้อมทั้งส่วนอิเล็กทรอนิกส์เพื่อขับตัวแปลงเพียโซสำหรับการสแกนโพรงเชิงทัศนศาสตร์ (optical cavity) ของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ แบบเพรี-เพโรต์ โดยใช้การออกแบบวัสดุอุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่สามารถดำเนินการและจัดหาได้ในประเทศ และเกิดแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาเครื่องมือให้ดียิ่งขึ้นในอนาคต

ได้ชุดอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์อื่นๆ ได้แก่ เลเซอร์ ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตรพร้อมชุดควบคุมการทำงาน และอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง ซึ่งเกิดจากการออกแบบ พัฒนา และประกอบขึ้นโดยใช้อุปกรณ์ส่วนใหญ่ภายในประเทศ

หาค่าพิสัย (characteristics) ของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพรี-เพโรต์ เกิดปัญหาเชิงเทคนิคและไม่สามารถดำเนินการหาค่าได้

แนวทางประยุกต์การใช้งานอุปกรณ์ดังกล่าวในเบื้องต้น ได้แก่ การเป็นสื่อการเรียนการสอน โดยสามารถปรับเปลี่ยนไปมาระหว่างอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพรี-เพโรต์และอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคิลสันได้

อุปสรรคหรือปัญหา

เกิดปัญหาเชิงเทคนิคในการหาค่าพิกัดของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ ซึ่งอาจเกิดจากการติดตั้งและปรับแต่งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในทางเดินแสง เพื่อให้แสงที่ผ่านจากอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์มีความเข้มมากขึ้นกว่า 6.3 เปอร์เซ็นต์ หรืออาจเกิดจากอุปกรณ์วัดความเข้มแสงทำงานที่ได้พัฒนาสามารถทำงานได้แต่ยังทำงานไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ เช่น มีความเร็วต่ำต่อการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ เป็นต้น

แนวทางในการแก้ไขปัญหาและอุปสรรค

ปัญหาเชิงเทคนิคจำเป็นต้องมีการหาสาเหตุและมีการออกแบบอุปกรณ์ใหม่ ได้แก่ การออกแบบส่วนจับยึดเลนส์ และกระจกเงาใหม่ เพื่อให้สามารถปรับแต่งได้อย่างละเอียดและแม่นยำมากขึ้น หรือจะต้องออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงใหม่เพื่อให้ตอบสนองได้ไวต่อความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลง

8. รายละเอียดงบประมาณ

งบประมาณปีที่ 1 (2560)

จำนวนเงิน 102,500.00 บาท

งบประมาณงวดที่ได้รับไปแล้ว 2 งวด

จำนวนเงิน 112,500.00 บาท

ตารางที่ 8.1 รายละเอียดงบประมาณ

รายละเอียดงบประมาณ	งบประมาณที่ได้รับ (บาท)	ใช้จ่าย (บาท)	ยอดคงเหลือ (บาท)
รับเงินอุดหนุนงวดที่ 1 (50%)	75,000.00	-	75,000.00
ค่าวัสดุ	-	11,186.70	63,813.30
รับเงินอุดหนุนงวดที่ 2 (25%)	37,500.00	-	101,313.30
ค่าวัสดุ	-	98,351.52	2,961.78
ค่าจ้างเหมาขึ้นรูปชิ้นงานโลหะ	-	12,000.00	-9,038.22
รวม	112,500.00	110,360.24	-9,038.22
(ประมาณการค่าใช้จ่ายส่วนที่เหลือ, ค่าเดินทาง, ค่าวัสดุเพื่อซ่อมแซม, การจัดทำรายงาน)		30,000.00	-39,038.22

จะขอเบิกงบประมาณงวดต่อไป (งวดที่ 3) จำนวน 37,500.00 บาท

9. ผลงานวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม
ที่ได้ทำไปแล้วคิดเป็นร้อยละ 100 ของงานวิจัย ตลอดโครงการ

.....
(ดร.บัญญัติ เล็กประเสริฐ)
หัวหน้าโครงการ

วันที่

10. ความเห็นของนักวิจัยพี่เลี้ยง (mentor) / ผู้บังคับบัญชา
โปรดให้ความเห็นในประเด็นต่อไปนี้

- ความใหม่ขององค์ความรู้ที่สร้างจากโครงการนี้
- การพัฒนาความสามารถในการวิจัยของหัวหน้าโครงการ
- โอกาสในการนำองค์ความรู้ที่ได้ไปเป็นหัวข้อในการวิจัยและพัฒนาต่อ
- งานวิจัยนี้จัดอยู่ใน strategic research theme ไตของมหาวิทยาลัย

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

.....
(.....)
นักวิจัยพี่เลี้ยง / ผู้บังคับบัญชา

วันที่

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับความช่วยเหลือจากหลายฝ่ายจนดำเนินการได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) ผศ.ดร.ดวงรักษ์ นันทิสารกุล ผู้ที่เป็นนักวิจัยพี่เลี้ยงและให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ยิ่งสำหรับการดำเนินการโครงการ ดร.แสงกฤษ กลั่นบุศย์ สำหรับคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ยิ่งสำหรับการสร้างและการทดสอบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ และอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ต่างๆ ตลอดจนการให้พื้นที่ห้องทดลองเพื่อทดสอบอุปกรณ์ดังกล่าว และการให้ยืมอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ เช่น เลนส์สำหรับการทดสอบกระบวนการทำงานของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่ได้พัฒนา ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร. กมล จิรเสรีอมรกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มจธ. สำหรับคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ยิ่งในการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานโครงการ ขอขอบคุณ ผศ.ชยันต์ คุ้มภัย อาจารย์พิเศษ มจธ. ราชบุรี สำหรับเครื่องกำเนิดสัญญาณและออสซิลโลสโคปเพื่อใช้สร้างและวัดสัญญาณในการทดสอบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ และขอขอบคุณ คุณทองใส ช่วยชู นายช่างเทคนิคที่ช่วยจัดซื้อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และดำเนินการสร้างอุปกรณ์ส่วนอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดที่ใช้ในโครงการ

ดร.บัญญัติ เล็กประเสริฐ

มิถุนายน 2562

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพปรี-เพโรต์ที่มีราคาต่ำ พร้อมทั้งชุดอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงาน ได้แก่ ชุดควบคุมเลเซอร์ ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร และอุปกรณ์วัดความเข้มแสง นอกเหนือไปจากอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศแล้ว ส่วนประกอบหลักและส่วนอิเล็กทรอนิกส์ของชุดทดลองถูกออกแบบโดยใช้ชิ้นส่วนที่หาได้ภายในประเทศ อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพปรี-เพโรต์ในโครงการนี้ ประกอบขึ้นจากกระจกเงาสองชิ้นที่มีค่าการสะท้อนโดยเฉลี่ยประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะมีความพิสัยตามทฤษฎีเท่ากับ 312.58 กระจกทั้งสองบานสามารถปรับให้เกิดโพรงเชิงทัศนศาสตร์ให้มีระยะได้สูงสุด 50 มิลลิเมตร โดยมีระบบควบคุมตัวแปลงเฟียโซสำหรับการสแกนโพรงเชิงทัศนศาสตร์นี้ ผลการทดสอบเบื้องต้น คือ เกิดรูปแบบการแทรกสอดในลักษณะวงแหวนมืด-สว่างบนฉาก แต่ยังไม่สามารถประเมินหาค่าพิสัยของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์นี้ได้เนื่องจากยังมีปัญหาเชิงเทคนิคที่จะต้องได้รับการแก้ไข การทดสอบสามารถวัดค่าความเข้มแสงที่ผ่านออกได้ประมาณร้อยละ 6.8 ของแสงที่เข้าสู่อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ ซึ่งยังจะต้องมีการปรับปรุงต่อไปเพื่อให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ในโครงการนี้ สามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพปรี-เพโรต์หรือแบบไมเคลสันได้ การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ชุดนี้จึงสามารถใช้เป็นชุดสาธิตการเรียนรู้ในวิชาฟิสิกส์พื้นฐานได้

Abstract

This research aims to develop a low-cost Fabry-Pérot interferometer, together with an optical system comprised of a 532 nm laser and a photodetector. Main major components together with their electronics controls of this optical system were designed and fabricated by applying components that can be obtained in Thailand with only some crucial optics were imported. The Fabry-Pérot interferometer composed of two flat mirrors of about 99 percent of reflectivity providing theoretical Finesse of 312.58. Optical cavity of this interferometer can be formed by these two mirrors up to 50 millimeters of separation. The optical cavity can be scanned by the piezoelectric system. The preliminary results showed bright-dark fringes of interference pattern on screen. The characteristics of this interferometer, however, cannot be evaluated due to some technical issues. Approximately 6.8 percent of the intensity of incoming light was detected and further development is required to improve its efficiency. The current designed allows being interchangeable between Fabry-Pérot and Michelson interferometer. The potential application at this step is, therefore, to use this interferometer as a demonstration tool for learning and teaching in fundamental Physics class.

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	7
บทคัดย่อ	8
Abstract.....	9
สารบัญ.....	10
บทที่ 1 บทนำ.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	13
ความคมชัดของแถบแทรกสอด	14
การสแกนอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์.....	15
บทที่ 3 การออกแบบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพปรี-เพโรต์.....	17
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	20
การติดตั้งอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์.....	20
การทดสอบและการหาค่าวิสัย	21
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ.....	25
สรุปผลการดำเนินงาน	25
แนวทางการใช้งานอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในอนาคต.....	25
เอกสารอ้างอิง	27
ภาคผนวก	28
ภาคผนวก ก. วงจรอิเล็กทรอนิกส์	28
วงจรขับเลเซอร์ (Laser driver).....	28
วงจรสำหรับการตรวจวัดความเข้มแสง (Photodetector).....	28
วงจรขับตัวแปลงเพียโซ (Piezodriver).....	29
ภาคผนวก ข. การดำเนินงานที่ผ่านมา	31
ผลการดำเนินงานในช่วง 6 เดือน.....	31
ผลการดำเนินงานในช่วง 12 เดือน.....	33
ผลการดำเนินงานในช่วง 18 เดือน.....	35

บทที่ 1

บทนำ

เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงที่จำเป็นสำหรับการทำงานวิจัยในหลายสาขา เช่น เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมรามาน (Raman spectrometer) เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/Vis spectrophotometer) หรืออินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Infrared spectrometer) เป็นเครื่องมือที่มีหลักการการทำงานที่เหมือนกัน คือ การวัดสเปกตรัมของแสงที่สะท้อนหรือถูกดูดกลืนจากตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ณ ความยาวคลื่นต่างๆ โดยความแตกต่างของสเปกตรัมแสงเปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างที่ศึกษา เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีเหล่านั้นตอบสนองต่อการสะท้อนหรือการดูดกลืนคลื่นแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน ทำให้สเปกตรัมแสงที่วัดได้จากเครื่องมือเหล่านี้ สามารถบ่งบอกถึงความจำเพาะขององค์ประกอบทางเคมี รวมถึงปริมาณที่พบในตัวอย่างที่ศึกษาได้ ทำให้เครื่องมือเหล่านี้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการทำวิจัยในหลากหลายสาขา ซึ่ง มจร. ราชบุรี เป็นพื้นที่ตั้งที่มีศักยภาพต่อการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์ชีวภาพ เพื่อศึกษาเชิงลึกในด้านการเกษตร สิ่งแวดล้อม การมีเครื่องมือวิจัยระดับสูงที่พัฒนาขึ้นเองจะช่วยต่อยอดงานวิจัย และพัฒนาการเกษตร พื้นที่ชุมชนได้

กระบวนการการวิเคราะห์สเปกตรัมของแสงในเครื่องมือเหล่านี้โดยส่วนใหญ่จะมีหลักการพื้นฐานเหมือนกัน คือ การใช้ปริซึม (Prism) หรือเกรตติง (Grating) ทำหน้าที่การกระจายแสง (Dispersion) ให้ตกลงบนเซนเซอร์ รับแสงทั้งแบบโฟโตไดโอด (Photodiode) ที่ทำงานร่วมกับระบบสแกนความยาวคลื่นแสงหรือเซนเซอร์รับแสงแบบซีซีดี (Charge Coupled Device, CCD) ซึ่งเป็นระบบที่ช่วยให้สามารถจำแนกสเปกตรัมของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม เนื่องจากส่วนประกอบเหล่านี้มีราคาแพง จึงส่งผลให้เครื่องมือเหล่านี้มีราคาแพง รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในงานภาคสนามทำได้ยาก

หนึ่งในวิธีการที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของแสงคือ การใช้มาตรแทรกสอดหรืออินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (interferometer) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่อาศัยการแทรกสอดของคลื่นแสงตั้งแต่สองขบวนขึ้นไป แล้วเกิดเป็นรูปแบบการแทรกสอด (interference pattern) ที่มีลักษณะเป็นแถบมืด - สว่าง (Fringes) บนฉากหรืออุปกรณ์ตรวจวัดแสง ซึ่งรูปแบบการแทรกสอดดังกล่าวจะอยู่ขึ้นกับความยาวของคลื่นแสงที่เกิดการแทรกสอด และหากมีการปรับเปลี่ยนเส้นทางเดินแสง (Optical path) ในเครื่องมือ จะส่งผลให้เงื่อนไขที่ทำให้เกิดการแทรกสอดเปลี่ยนไป และนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการแทรกสอดบนฉากหรืออุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งเมื่อวิเคราะห์รูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแต่ละความยาวคลื่น ก็จะทำให้ทราบสเปกตรัมของแสงที่ผ่านเข้าสู่เครื่องมือได้ เพบริ-เพโรต์เป็นหนึ่งในอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่มีอยู่หลายแบบ จุดเด่นของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ คือ มีการเกิดรูปแบบการแทรกสอดที่คมชัดกว่ารูปแบบที่ได้จากอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบอื่นๆ จึงถูกนำไปใช้เป็นเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมที่มีอำนาจจำแนก (Resolution) สูงในระบบทัศนอุปกรณ์ (Optical system) ต่างๆ และเนื่องจากอุปกรณ์ทางแสงต่างๆ รวมถึง เซนเซอร์รับแสงที่ประกอบขึ้นเป็นอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ มีราคาโดยรวมที่ต่ำกว่าระบบทัศนอุปกรณ์ที่ใช้เกรตติงและซีซีดีตลอด จนการออกแบบ การสร้างและการประกอบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์นี้ สามารถใช้เทคโนโลยีส่วนใหญ่ในประเทศ จึงทำให้อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์เป็นทัศนอุปกรณ์ที่มีศักยภาพสำหรับการนำไปใช้พัฒนาต่อยอดสู่การพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงแสงขั้นสูงต่อไป

ในโครงการนี้มีวัตถุประสงค์ คือ

1. เพื่อออกแบบและสร้างอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ ที่ใช้งานได้ในช่วงความยาวคลื่นแสง 532 นาโนเมตร รวมถึงระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการทำงานและการแสดงผลสัญญาณของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่สร้างขึ้น

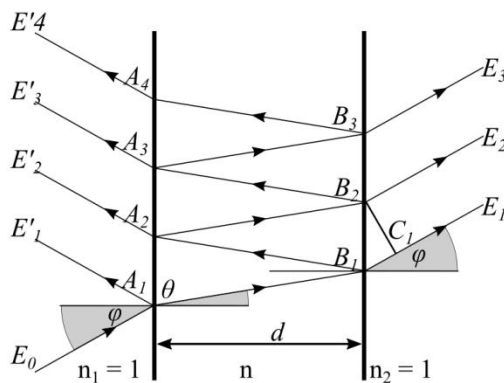
2. เพื่อหาค่าวิสัย (Characteristics) ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าพีแนสส์ ค่าอำนาจจำแนก และความไม่แน่นอนของอินเตอร์ เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ที่สร้างขึ้น
3. เพื่อประเมินลักษณะงานประยุกต์ต่อยอดที่เหมาะสมกับคุณสมบัติของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

ซึ่งขอบเขตของโครงการ คือ การพัฒนาออกแบบและสร้างอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ที่ทำงานได้ในช่วงความยาวคลื่นแสง 532 นาโนเมตร รวมทั้งพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของอุปกรณ์ รวมทั้งหาค่าวิสัย คือ ความละเอียด (ค่าพีแนสส์และอำนาจจำแนก) ของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ที่สร้างขึ้น โดยความรู้ที่ได้จากการศึกษาและออกแบบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ จะเป็นความรู้ที่มีค่าสำหรับการพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงแสงขั้นสูงต่อไป

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ หรือมาตรแทรกสอด เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของแสงโดยอาศัยการแทรกสอดของคลื่นแสงตั้งแต่สองขบวนขึ้นไป แล้วเกิดเป็นรูปแบบ การแทรกสอด (interference pattern) ที่มีลักษณะเป็นแถบมืด – สว่าง (Fringes) บนอุปกรณ์รับแสง หากมีการปรับเปลี่ยนทางเดินแสง (Optical path) ในเครื่องมือก็จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการแทรกสอดนั้น ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ รูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นก็จะทราบสเปกตรัมของแสงที่ผ่านเข้าสู่เครื่องมือได้ ซึ่งตัวอย่างของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่เป็นที่รู้จัก ได้แก่ Michelson, Fizeau, Mach-Zehnder, Fabry-Pérot และ Twyman-Green เป็นต้น

อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเฟบริ-เพโรต์ (Fabry-Pérot interferometer) เป็นอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่มีจุดเด่น คือ มีการเกิดรูปแบบการแทรกสอดที่คมชัดกว่ารูปแบบที่ได้จากอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบอื่นๆ จึงถูกนำไปใช้เป็นเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมที่มี อำนาจจำแนก (Resolution) สูงในระบบทัศนอุปกรณ์ (Optical system) ต่างๆ ส่วนประกอบหลักของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเฟบริ-เพโรต์ คือ กระจกเงาสองแผ่น วางขนาน หันหน้าเข้าหากันด้วยระยะห่าง d และดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างกระจกทั้งสองคือ n เมื่อแสงตกกระทบตั้งฉากกระจกแผ่นที่ 1 แสงบางส่วนจะผ่านกระจกไปและตกกระทบกับกระจกแผ่นที่ 2 เกิดการสะท้อนกลับไปในโพรงแสง เมื่อระยะห่างระหว่างกระจกเป็นจำนวนเท่าของครึ่งหนึ่งของความยาวแสง จะเกิดการเรโซแนนซ์เชิงทัศนศาสตร์ (optical resonance) ที่ทำให้แสงที่มีความยาวคลื่นนั้น ผ่านออกมาด้วยความเข้มสูงสุด



รูปที่ 1 แสดงทางเดินของแสงระหว่างกระจกเงาภายในอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเฟบริ-เพโรต์ ความเข้มแสงที่ผ่านออกจากกระจกแผ่นที่ 2 สามารถอธิบายได้ด้วยไอริฟังก์ชัน (Airy function) คือ

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \quad (1)$$

โดยที่ I คือ ความเข้มแสงส่องผ่าน

I_0 คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบ

F คือ สัมประสิทธิ์ฟิเนสส์ ซึ่งหาได้จาก $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$

เมื่อ R คือ ค่าการสะท้อน (Reflectivity, intensity reflectivity) ของกระจก

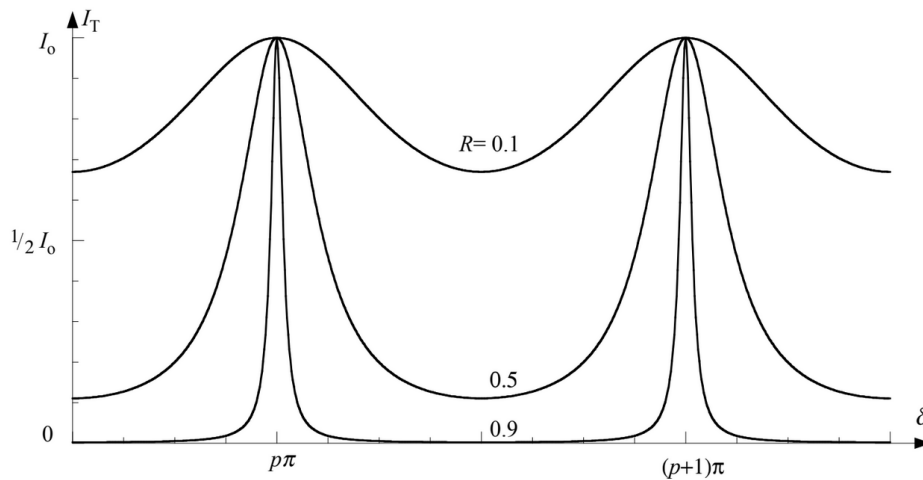
δ คือ ความต่างเฟสของแสงที่ส่องผ่านและที่สะท้อนไปกลับในโพรงเชิงทัศนศาสตร์

อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่ใช้กระจกเงาราบสองบานขนานกัน δ หาได้จาก

$$\delta = \frac{2\pi nd \cos \theta}{\lambda} = \pi p \quad (2)$$

เมื่อ p คือ เลขจำนวนเต็ม

กราฟระหว่างความเข้มส่องผ่าน (I) ของแสงที่ผ่านอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์และความต่างเฟส (δ) เมื่อกระจกเงาทั้งสองที่เป็นส่วนประกอบของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ มีค่าการสะท้อน 0.1, 0.5, และ 0.9 ตามลำดับ จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นจากกระจกที่มีค่าการสะท้อนสูงจะมีแถบการแทรกสอดที่แคบ ซึ่งจะส่งผลต่อความคมชัดของแถบแทรกสอดของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพรี-เพโรต์



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มแสงที่ส่องผ่านอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพรี-เพโรต์ กับความต่างเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดการเรโซแนนซ์ในโพรงแสง ความกว้างของแถบแทรกสอดขึ้นอยู่กับค่าการสะท้อน (R) ของกระจกเงาที่ใช้ในอุปกรณ์

ความคมชัดของแถบแทรกสอด

ความคมชัดของแถบแทรกสอดที่ผ่านอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ สามารถระบุด้วยค่า ฟิเนสส์ (Finesse, F) ซึ่งมีนิยามคือ อัตราส่วนระหว่าง ระยะห่างระหว่างยอดแถบการแทรกสอดที่ติดกัน ต่อความกว้างของแถบแทรกสอดที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด (full width at half maximum, FWHM) ของแถบแทรกสอดในรูปที่ 2 ค่าฟิเนสส์สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$F = \frac{2\pi}{FWHM} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} = \frac{\pi\sqrt{F}}{2} \quad (3)$$

เมื่อ FWHM คือ ความกว้างของแถบแทรกสอดที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด และ FWHM สัมพันธ์กับค่า F ดังนี้

$$FWHM = \frac{4}{\sqrt{F}} \quad (4)$$

สำหรับอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่ได้ออกแบบในโครงการนี้ สร้างจากกระจกเงาราบที่มีค่าการสะท้อน $R = 0.9$ วางอยู่ห่างกัน 50 มิลลิเมตร ตัวกลางระหว่างกระจกคืออากาศ มีค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง $n = 1$ เมื่อใช้กับแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่น $\lambda = 532$ นาโนเมตร ตกกระทบทำมุม 0 องศา กับกระจกของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ แลพบแทรกสอดของแสงที่ผ่านอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์นี้ จะส่งผ่านแถบสว่างสูงสุดภายใต้เงื่อนไข $\delta = 187,970 \pi$

การสแกนอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกระจก เงื่อนไขของการเกิดเรโซแนนซ์ของโพรงแสงก็จะเปลี่ยนไป ส่งผลให้แสงที่มีความยาวคลื่นต่างออกไป ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขการเกิดเรโซแนนซ์ สามารถผ่านอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ ปรากฏเป็นแถบสว่างที่มีความเข้มสูงสุด เมื่อพิจารณาอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่มีระยะห่างระหว่างกระจก d มีแสงที่ตกกระทบทำมุม $\theta = 0$ องศา ความยาวคลื่น λ ซึ่งมีความเข้มสูงสุด ที่ผ่านอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์นี้ จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไข คือ

$$\delta \equiv \frac{2\pi d}{\lambda} = \pi p \rightarrow \lambda = \frac{2d}{p} \quad (5)$$

ถ้าระยะห่างระหว่างกระจกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเป็นระยะ δd ความยาวคลื่นซึ่งมีความเข้มสูงสุดที่ผ่านอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์นี้ (เมื่อ p คงที่) จะสอดคล้องกับเงื่อนไข

$$\lambda + \delta\lambda = \frac{2(d + \delta d)}{p} \quad (6)$$

หากการเปลี่ยนระยะของกระจกเกิดขึ้นต่อเนื่อง จนถึงจุดหนึ่งที่มีการเลื่อนตำแหน่งมีค่า Δd แสงที่มีความยาวคลื่น λ เดิมก็จะผ่านอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์นี้อีกครั้ง ซึ่งครั้งนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไขคือ

$$\lambda = \frac{2(d + \Delta d)}{p + 1} \quad (7)$$

ซึ่งสมการนี้ เป็นจริงกับความยาวคลื่นอื่นๆ เช่นเดียวกัน

$$\lambda' \equiv \lambda + \Delta\lambda = \frac{2(d + \Delta d)}{p + 1} \quad (8)$$

จากสมการที่ 5 และ 8 จะได้ว่าระยะที่อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์สามารถสแกนได้จนกว่าความยาวคลื่นเดิมจะปรากฏเป็นความเข้มสูงสุดอีกครั้ง คือ

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2} \quad (9)$$

และจะสามารถหาค่าความยาวคลื่นที่สามารถสแกนโดยไม่เกิดการซ้อนทับกัน หรือพิสัยสเปกตรัมอิสระ (Free spectral range, FSR) ได้คือ

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d} \quad (10)$$

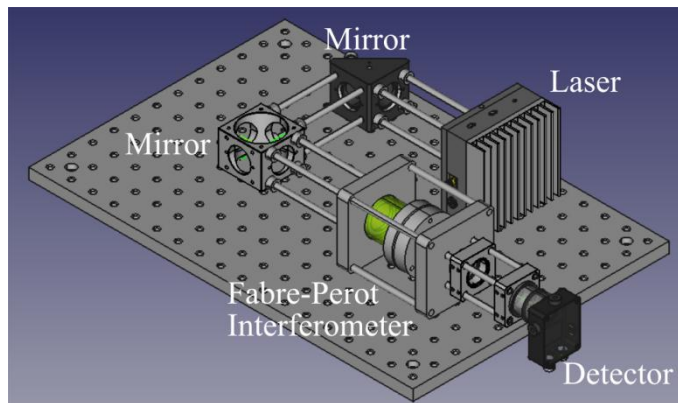
หรือเมื่อ c คือความเร็วแสง และ f คือความถี่ จะได้

$$\text{FSR} = \Delta f = \frac{c}{2d} \quad (11)$$

บทที่ 3

การออกแบบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์

ระบบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ในงานวิจัยนี้ มีส่วนประกอบหลักต่างๆ ได้แก่ เลเซอร์ (laser) และระบบเลนส์ปรับขนาดลำแสง (beam expander) กระจกปรับทิศทางลำแสง (steering mirror) กระจก (mirror) อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ ระบบเลนส์สำหรับโฟกัสลำแสง และอุปกรณ์ตรวจจับแสง (photo detector) โดยส่วนประกอบทั้งหมด ได้รับการออกแบบให้ติดตั้งบนโครงสร้างแข็งเกร็ง (Rigid structure) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ที่ถูกออกแบบในโครงการวิจัยนี้

อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ ที่มีการออกแบบในโครงการนี้ จะมีคุณลักษณะหรือมีพิสัยที่สามารถคำนวณได้ โดยค่าพิสัยที่สำคัญ ได้แก่ ค่าฟิแนสส์ (F) ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ (FSR) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าอำนาจจำแนก ค่าความกว้างของแถบแทรกสอดที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด (FWHM) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

ค่าฟิแนสส์ (F) เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับค่าการสะท้อนของกระจกเงาที่ประกอบขึ้นเป็นอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 โดยค่านี้จะเป็นค่าเฉพาะสำหรับเครื่องมือหนึ่งๆ ในโครงการวิจัยนี้ กระจกเงาที่ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือ มีค่าการสะท้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.99 หรือ 99 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่าฟิแนสส์ได้เท่ากับ

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} = \frac{\pi\sqrt{0.99}}{1-0.99} = 312.58$$

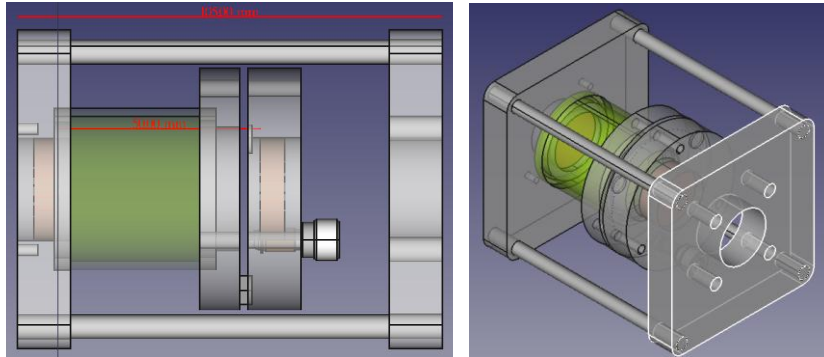
ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ (FSR) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าอำนาจจำแนก จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างกระจกเงาทั้งสอง หากตัวอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ถูกออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างกระจก 50 มิลลิเมตร เมื่อใช้กับแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร จะมีอำนาจจำแนกตามทฤษฎี ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 10

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d} = \frac{(532 \times 10^{-9})^2}{2 \times 50 \times 10^{-3}} = 0.0028 \times 10^{-9}$$

หรือ

$$FSR = \frac{c}{2d} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 50 \times 10^{-3}} = 3 \times 10^9$$

เท่ากับ 532.000 ± 0.003 นาโนเมตร หรือประมาณ 3 กิกะเฮิร์ต ซึ่งจากค่าอำนาจจำแนกตามที่สามารถคำนวณได้ เมื่อนำเครื่องมือนี้ มาใช้เป็นอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์สำหรับวิเคราะห์สเปกตรัมแสง จะมีอำนาจจำแนกเลขคลื่นที่มีความละเอียด 0.1 cm^{-1} ซึ่งเป็น อำนาจจำแนกที่เพียงพอสำหรับงานประยุกต์ทางสเปกโตรสโกปีทั่วไป



รูปที่ 4 ส่วนประกอบของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพริ-เฟโรต์ที่ถูกสร้างในโครงการ

และหากตัวอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ถูกออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างกระจก 10 มิลลิเมตร เมื่อใช้กับแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร จะมีอำนาจจำแนกตามทฤษฎี คือ

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d} = \frac{(532 \times 10^{-9})^2}{2 \times 10 \times 10^{-3}} = 0.01415 \times 10^{-9}$$

หรือ

$$FSR = \frac{c}{2d} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 10 \times 10^{-3}} = 1.5 \times 10^{10} \text{ Hz}$$

และหากตัวอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ถูกออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างกระจก 1 มิลลิเมตร เมื่อใช้กับแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร จะมีอำนาจจำแนกตามทฤษฎี คือ

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d} = \frac{(532 \times 10^{-9})^2}{2 \times 1 \times 10^{-3}} = 0.1415 \times 10^{-9}$$

หรือ

$$FSR = \frac{c}{2d} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1 \times 10^{-3}} = 1.5 \times 10^{11} \text{ Hz}$$

และค่าพิสัยสุดท้าย คือ ค่าความกว้างของแถบแทรกสอดที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด (FWHM) จะสามารถหาได้จากสมการที่ 3 หรือ 4 คือ

$$FWHM = \frac{4}{\sqrt{F}} = \frac{2\pi}{F} = 0.02$$

ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ (FSR) และค่า FWHM จะเป็นค่าที่มีผลต่ออำนาจจำแนกสเปกตรัมของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพริ-เฟโรต์ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการซ้อนทับกันของสเปกตรัมจากต่างลำดับกัน สเปกตรัมจะต้องถูกจำกัดอยู่ในช่วงแคบระหว่างยอดซึ่งกำหนดโดยค่า FSR ดังรูปที่ 2 ค่า FSR ของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์จะกว้างขึ้นหากกระจกเงาทั้งสองถูกวางให้มีระยะห่างลดลง (หรือใกล้กันมากขึ้น) ดังแสดงในการคำนวณ แต่เมื่อวางกระจก

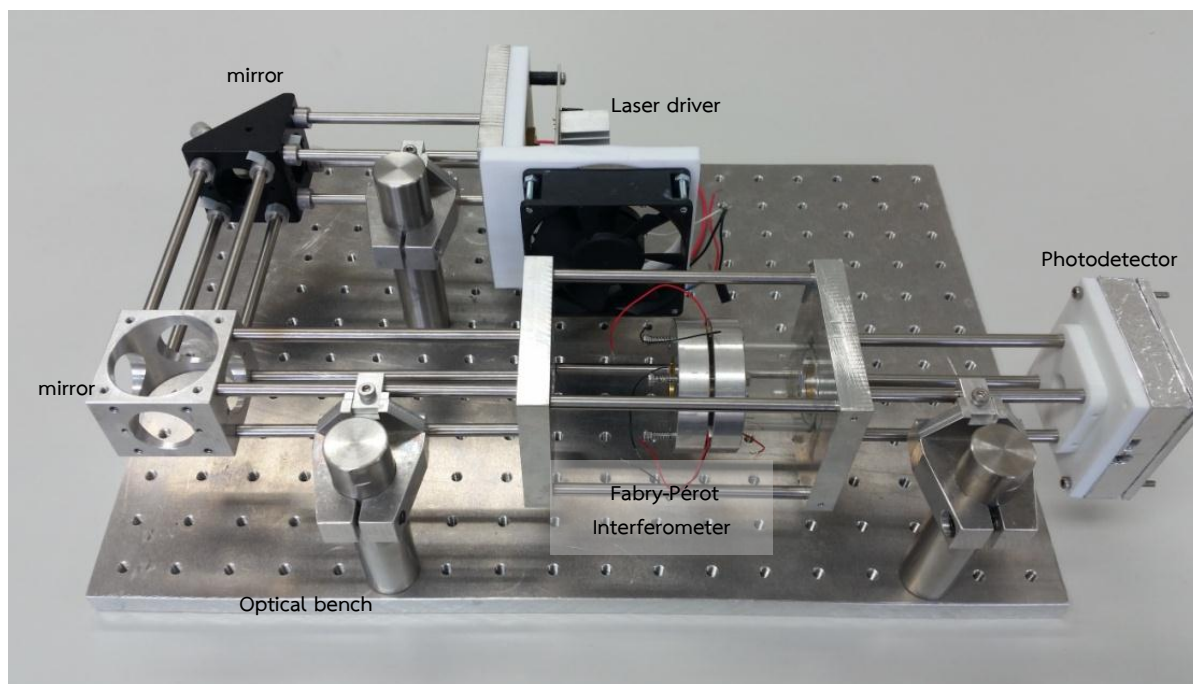
เงาทั้งสองให้ใกล้กัน จะส่งผลให้ค่า FWHM กว้างเพิ่มขึ้น ทำให้จำนวนของเส้นสเปกตรัมที่สามารถจำแนกได้มีค่าเท่าเดิม และอำนาจจำแนกสเปกตรัมลดลง

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

การติดตั้งอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์

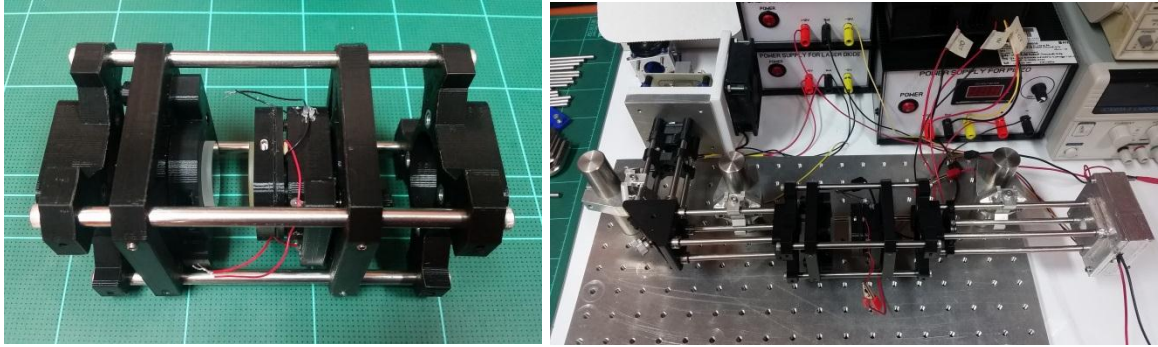
การดำเนินงานในโครงการ ได้มีการออกแบบอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์หลายชิ้น ได้แก่ ฐานอุปกรณ์ทดลองเชิงทัศนศาสตร์ (optical bed) และตัวจับยึดต่างๆ โครงสำหรับตัวจับยึดกระจก ชุดควบคุมและวงจรถับเลเซอร์ (Laser driver) อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเฟบริ-เพโรต์ (Fabry-Pérot Interferometer) ชุดควบคุมและขับตัวแปลงเพียโซ (Piezoelectric driver) และวงจรถดตรวจวัดความเข้มแสง (Photodetector) ซึ่งรายละเอียดของวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ทั้งหมด มีการอธิบายเพิ่มเติมไว้ในส่วนของภาคผนวก และเมื่อนำอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ที่ได้ ออกแบบและสร้างขึ้น เข้ามาประกอบรวมกัน จะได้ระบบสำหรับการทดสอบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ที่ได้รับการติดตั้งบนฐานอุปกรณ์ทดลอง โดยอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเฟบริ-เพโรต์ที่แสดงในรูปเป็นอุปกรณ์ในรุ่นที่ 1

การติดตั้งและทดสอบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์รุ่นที่ 1 พบปัญหาที่สำคัญ เนื่องจากกระจกเงาทั้งสองบานได้ถูกยึดตรึงแน่นไว้ ทำให้ไม่สามารถปรับระนาบของกระจกเงาทั้งสองได้อย่างละเอียดจนขนานกันได้ ผลที่เกิดขึ้นคือ อุปกรณ์ในรุ่นนี้จะไม่สามารถสร้างรูปแบบการแทรกสอดได้ ยิ่งไปกว่านี้ กระจกเงาทั้งสองยังถูกยึดตรึงไว้ด้วยระยะห่างที่คงที่ จึงไม่สามารถปรับระยะห่างระหว่างกระจกเงาราบ สำหรับการทดสอบการทำงานของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ด้วยเงื่อนไขของระยะห่างระหว่างกระจกที่ต่างออกไปจากที่มีการออกแบบไว้ได้ อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในรุ่นที่ 1 จึงมีข้อจำกัดสำหรับการทดสอบและการปรับแต่งให้เหมาะกับการใช้งานพอสมควร

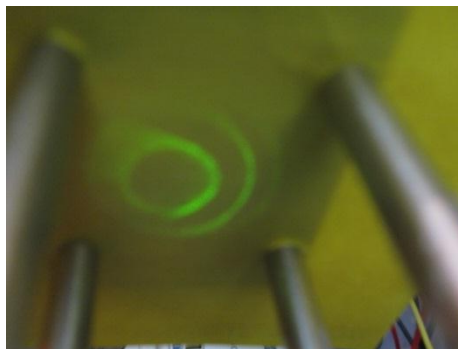
เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในรุ่นก่อนหน้า ในโครงการจึงได้มีการออกแบบและสร้างอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเฟบริ-เพโรต์ รุ่นที่ 2 ขึ้นมา ซึ่งอุปกรณ์ในรุ่นที่ 2 สามารถปรับระยะห่างระหว่างกระจกเงาราบทั้งสองได้ และยังสามารถปรับระนาบกระจกเงาแต่ละบานได้อย่างอิสระ อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในรุ่นที่ 2 ที่ได้รับการปรับปรุงและสร้างขึ้นใหม่นี้ ใช้เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ ในการขึ้นรูปตัวอุปกรณ์ต้นแบบ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าว แสดงไว้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ รุ่นที่ 2 (ซ้าย)
และการติดตั้งเครื่องมือบนฐานอุปกรณ์ทดลอง เพื่อทดสอบการทำงาน (ขวา)

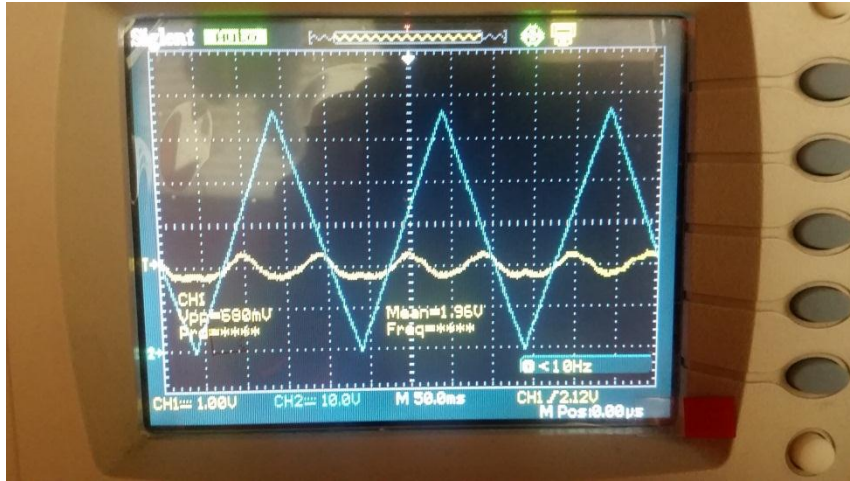
การทดสอบและการหาค่าวิสัย

ในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ เมื่อปรับให้ระยะห่างระหว่างกระจกเงาทั้งสองเหมาะสมและปรับระนาบของกระจกเงาทั้งสองให้ขนานกัน จะปรากฏรูปแบบการแทรกสอดขึ้นมา มองเห็นเป็นวงแหวนที่มีด-สว่างปรากฏบนฉาก โดยเมื่อระยะห่างระหว่างกระจกเงาทั้งสองเท่ากับ 1 มิลลิเมตร รูปแบบการแทรกสอดซึ่งสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าปรากฏบนฉาก ดังรูปที่ 7 ซึ่งวงแหวนมีด-สว่างนี้ เกิดจากการแทรกสอดของแสงที่ผ่านจากอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ โดยระยะห่างระหว่างแถบสว่าง (หรือแถบมืด) ของวงแหวนนี้จะแคบลงหากระยะห่างระหว่างกระจกเงาทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อป้อนสัญญาณรูปสามเหลี่ยมผ่านวงจรขับตัวแปลงเพียโซ สำหรับการสแกนอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ โดยทำให้ระยะห่างระหว่างกระจกเงาทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลง วงแหวนมีด-สว่างจะขยับเข้า-ออกจากจุดศูนย์กลางของฉาก ซึ่งเป็นจุดที่แกนเชิงทัศนศาสตร์ (optical axis) หรือเส้นสมมติของลำแสงในระบบอุปกรณ์นี้ลากผ่าน โดย ณ จุดศูนย์กลางของวงแหวนนี้ ความเข้มแสงจะปรากฏเป็นมีด-สว่างสลับกันไป



รูปที่ 7 แถบมีด-สว่างบนฉากรับภาพ ซึ่งเกิดจากการแทรกสอด
เมื่อแสงเดินทางผ่านอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ รุ่นที่ 2

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงแทนฉากรับภาพ และวัดความเข้มแสงซึ่งตกกระทบบนโฟโตไดโอดของวงจรตรวจวัดความเข้มแสง สัญญาณทางไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ด้วยออสซิลโลสโคปจะมีแรงดันที่เปลี่ยนไปตามความเข้มแสงที่ตกกระทบบ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 สัญญาณความเข้มแสงจากอุปกรณ์ตรวจวัดแสง ซึ่งแปรเปลี่ยนตามสัญญาณรูปสามเหลี่ยมซึ่งป้อนให้กับตัวแปลงเพียโซ

รูปที่ 8 เป็นภาพจากออสซิลโลสโคป แสดงสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรตรวจวัดความเข้มแสง เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ป้อนให้กับตัวแปลงเพียโซ ซึ่งขนาดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมดังที่แสดงในรูป มีค่าประมาณ 60 โวลต์ ที่ความถี่ 5 เฮิร์ต หรือมีคาบการสั่นเท่ากับ 200 มิลลิวินาที ตัวแปลงเพียโซนี้จะเกิดการขยายตัวและหดตัวเชิงเส้นตามขนาดของสัญญาณและความถี่ของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ป้อนเข้าไป การขยายตัว-หดตัวเชิงเส้นของตัวแปลงเพียโซ จะทำให้ระยะห่างระหว่างกระจกเงาทั้งสองเปลี่ยนไป นำไปสู่การสแกนโพรงเชิงทัศนศาสตร์ในอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ ส่งผลให้เกิดรูปแบบการแทรกสอดลักษณะเป็นวงแหวนมืด-สว่างบนโฟโตไดโอดของวงจรตรวจวัดความเข้มแสง ซึ่งจะถูกละเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและแสดงได้บนออสซิลโลสโคป สัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ดังกล่าว มีขนาดประมาณ 680 มิลลิโวลต์ ดังที่แสดงในรูปที่ 8

การทวิสัยของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ ในทางทฤษฎี จะหาได้จากรูปร่างของสัญญาณที่ปรากฏบนออสซิลโลสโคป ในการทดสอบพบว่า สัญญาณความเข้มแสงที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด มีรูปร่างที่ต่างไปจากทางทฤษฎี ซึ่งยิ่งกระจกเงามีค่าการสะท้อนแสงสูง รูปร่างของกราฟความเข้มแสงก็จะยิ่งมียอดที่แหลมขึ้นและมีค่าความกว้างที่จุดกึ่งกลาง (full width-half maximum, FWHM) แคบลงดังแสดงในรูปที่ 2 แต่กราฟสัญญาณที่แสดงในรูปที่ 8 ลักษณะของสัญญาณที่ต่างไปจากผลที่คาดหวังทางทฤษฎี ความแตกต่างของสัญญาณอธิบายได้ตามตาราง 1

ตาราง 1 เปรียบเทียบสัญญาณความเข้มแสงที่วัดได้จากการทดสอบกับค่าทางทฤษฎี

ลักษณะ	ผลที่คาดหวังตามทฤษฎี	ผลจากการทดลอง
ความเข้มแสงสูงสุดที่ผ่านอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์	เมื่อเงื่อนไขเหมาะสม แสงที่ผ่านจะมีความเข้มเท่ากับแสงที่เข้าสู่อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์	วงจรวัดความเข้มแสงจะสร้างสัญญาณที่ขาออกเท่ากับ 10 โวลต์ เมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบโฟโตไดโอดโดยตรง แต่สัญญาณที่วัดได้เมื่อแสงผ่านอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์มีขนาดเพียง 0.68 โวลต์ ซึ่งคิดเป็น 6.8 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มแสงที่ผ่านออกมา หรือมีการสูญเสีย 93.2 เปอร์เซ็นต์จากการกระเจิงในอุปกรณ์
รูปร่างของสัญญาณ เมื่อค่าการสะท้อนของกระจกเงาโดยเฉลี่ย	มียอดแหลมและมีค่าความกว้างที่จุดกึ่งกลาง (FWHM) แคบ	มียอดโค้งมน และมีค่า FWHM กว้าง

ลักษณะ	ผลที่คาดหวังตามทฤษฎี	ผลจากการทดลอง
เท่ากับ 0.9		
ฟิล์มสเปกตรัมอิสระ	ยอดของสัญญาณจะมีจำนวนมาก ใน 1 คาบของสัญญาณรูป สามเหลี่ยมที่ป้อนให้กับตัวแปลง เฟียโซ	สัญญาณปรากฏเพียง 1 ยอด ใน 1 คาบสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ป้อน ให้กับตัวแปลงเฟียโซ

ผลที่แสดงไว้ในตาราง 1 เปรียบเทียบสัญญาณความเข้มแสงที่วัดได้จากการทดสอบกับค่าทางทฤษฎี บ่งชี้ว่าสัญญาณความเข้มแสงที่วัดได้ ยังไม่มีคุณภาพดีพอที่จะใช้ในการหาค่าฟิล์มสเปกตรัมอิสระของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ โดยปัญหาด้านคุณภาพสัญญาณที่เกิดขึ้น อาจเกิดจากสาเหตุได้จากหลายประการดังแสดงไว้ในตาราง 2

ตาราง 2 สมมติฐานของปัญหาที่พบในการทดสอบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ แนวทางการแก้ไขและข้อจำกัดในการดำเนินงาน

สมมติฐาน	แนวทางการแก้ไข	ปัญหาและอุปสรรค
วงจรและระบบวัดความเข้มแสงทำงานไม่สมบูรณ์ และมีความเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแสงช้า	ออกแบบวงจรและทดสอบระบบตรวจวัดความเข้มแสงใหม่	จำเป็นจะต้องมีการสั่งซื้อโพโตไดโอดใหม่ที่ทำงานได้ไวขึ้น ใช้ระยะเวลาในการออกแบบและทดสอบเกินกว่าระยะเวลาการดำเนินงานของโครงการ
	จัดซื้อระบบตรวจวัดความเข้มแสงมาตรฐานมาใช้งานแทน	อุปกรณ์มีราคาแพง ซึ่งจะทำให้งบประมาณรวมทั้งโครงการ เกินไปจากที่มีการประมาณการไว้
ความคลาดเคลื่อนของการจัดวางอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ในทางเดินแสง ทำให้อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ทำงานต่างไปจากที่ควรจะเป็นตามทฤษฎี	พยายามจัดวางอุปกรณ์ในระบบทางเดินแสง เช่น เลนส์และกระจกใหม่	ตัวจับยึดอุปกรณ์เดิมได้รับการออกแบบไว้ให้ยึดตรึงอุปกรณ์อย่างแน่นหนา ทำให้การปรับตำแหน่งต่างๆ ทำได้ค่อนข้างยาก
	ออกแบบและสร้างตัวจับยึดอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์พร้อมทั้งติดตั้งและจัดวางอุปกรณ์ใหม่	มีข้อจำกัดด้านเวลาของการดำเนินงานวิจัย
	จัดซื้อชุดจับยึดอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ พร้อมทั้งติดตั้งและจัดวางอุปกรณ์ใหม่	มีข้อจำกัดด้านเวลาและงบประมาณของการดำเนินงานวิจัย
	การออกแบบใหม่โดยเลือกใช้กระจกเงาโค้งแทนกระจกเงาราบ ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพรี-เฟโรตีโนเชิงพาณิชย์	การใช้กระจกเงาโค้ง ทำให้การจัดวางตำแหน่งของกระจกทำได้ง่ายกว่าการใช้กระจกเงาราบ แต่กระจกเงาโค้งซึ่งหาได้ทั่วไปจะมีผิวด้านหลังกระจกที่ขรุขระ ทำให้แสงที่เดินทางผ่านเกิดการกระเจิงและสูญเสียความเข้มแสงที่จะออกมา การใช้กระจกเงาโค้ง จึงจำเป็นต้องสั่งทำพิเศษ ซึ่งจะมีราคาแพงและใช้

สมมติฐาน	แนวทางการแก้ไข	ปัญหาและอุปสรรค
		เวลานาน
การสั่นสะเทือนเพียงเล็กน้อยส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการแทรกสอดที่ปรากฏบนฉากหรือบนอุปกรณ์วัดแสง	การใช้โต๊ะทดลองทางทัศนศาสตร์ (optical bench) ซึ่งจะลดการสั่นสะเทือนที่มาจากสิ่งแวดล้อม	โต๊ะการทดลองเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพง

จากตาราง 2 ได้กล่าวถึงปัญหาที่พบในการพัฒนาอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรตินโครงการ ซึ่งอุปกรณ์ยังมีการทำงานไม่เป็นไปตามที่คาดไว้ในทางทฤษฎี โดยในตารางได้ตั้งสมมติฐานของปัญหา แนวทางการแก้ไข ปัญหา รวมถึงข้อจำกัดและอุปสรรคในระหว่างการทำเนินโครงการ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงอุปกรณ์ในอนาคตต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินงานที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนา ออกแบบและสร้างอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ชั้น 2 รุ่นในโครงการวิจัย ซึ่งอุปกรณ์รุ่นที่ 2 ได้แก้ไขปัญหาที่พบในอุปกรณ์รุ่นแรก โดยสามารถปรับระยะห่างระหว่างกระจกเงาทั้งสองขึ้นตามโพรงเชิงทัศนศาสตร์ที่ต้องการ กระจกเงาทั้งสองสามารถถูกปรับให้มีระยะห่างกันได้ที่มากที่สุด 50 มิลลิเมตร นอกจากนี้กระจกเงาแต่ละชิ้นจะถูกปรับมุมเอียงได้อย่างอิสระเพื่อให้ระนาบของกระจกเงาทั้งสองขนานกันเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ลงบนฐานทดลอง

การทดสอบอุปกรณ์ พบว่าเกิดรูปแบบการแทรกสอดในลักษณะเป็นวงแหวนมืด-สว่างบนฉากรับภาพ โดย ณ จุดศูนย์กลางของวงแหวนมืด-สว่างดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนความเข้มแสงมืด-สว่างสลับกันและสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าในขณะที่มีการสแกนโพรงเชิงทัศนศาสตร์ อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงเพื่อวัดออกมาในรูปสัญญาณทางไฟฟ้าเทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ป้อนให้กับตัวแปลงเพียโซเพื่อการสแกนโพรงเชิงทัศนศาสตร์ พบว่าสัญญาณจากความเข้มแสงที่ได้ยังไม่สามารถนำไปหาค่าพิสัยของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่สร้างขึ้นมาได้ ซึ่งสมมุติฐานของปัญหาและแนวทางการแก้ไขรวมทั้งข้อจำกัดต่างๆ ได้สรุปไว้ในบทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

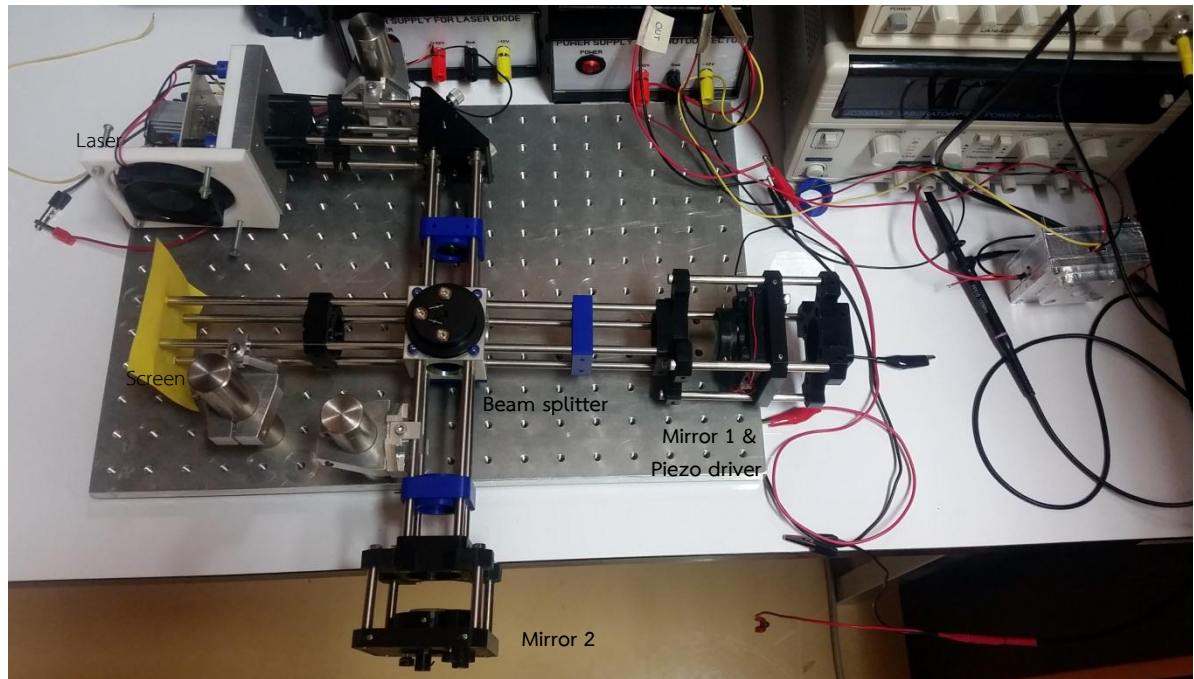
แนวทางการใช้งานอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในอนาคต

อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์เป็นอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ที่ไวต่อการสั่นสะเทือนหรือการเปลี่ยนแปลงของโพรงเชิงทัศนศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของระยะห่างระหว่างกระจกเพียงครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ก็จะไปสู่การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการแทรกสอดที่ปรากฏบนฉากหรืออุปกรณ์วัดแสง เช่น หากนำอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์มาวิเคราะห์แสงที่มีความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างกระจกเพียง 250 นาโนเมตร จะส่งผลให้เกิดรูปแบบการแทรกสอดที่ตรงข้ามกัน คือ เปลี่ยนสลับจากแถบสว่างเป็นแถบมืด เป็นต้น ดังนั้นการใช้งานอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์โดยทั่วไป อุปกรณ์จะถูกติดตั้งในพื้นที่ที่มีการควบคุมอย่างเข้มงวด เช่น ในห้องปฏิบัติการ บนโต๊ะทดลองทางทัศนศาสตร์ (Optical bench) และมีการป้องกันการสั่นสะเทือนจากแหล่งต่างๆ เป็นอย่างดี

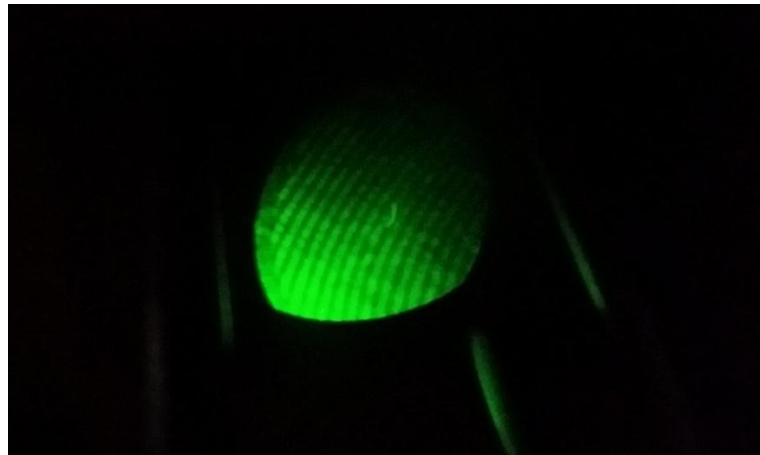
ในโครงการวิจัยนี้ ได้มีความพยายามที่จะพัฒนาอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ขึ้นมาเพื่อเป็นฐานต่อยอดสำหรับการสร้างเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมขั้นสูง แต่ด้วยข้อจำกัดทั้งในเรื่องการหาพิสัยของอุปกรณ์ และความต้องการระบบการติดตั้งที่มีการควบคุมอย่างเข้มงวดในใช้งาน ทำให้อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์นี้ ยังจะต้องมีการพัฒนาต่อไปการใช้งานเพื่อให้ใช้งานตามวัตถุประสงค์ได้จริง อย่างไรก็ตามการทดสอบในเบื้องต้นพบว่าอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์เชิงทัศนศาสตร์ได้เพียงพอสำหรับงานด้านการเรียนการสอน โดยข้อเด่นของอุปกรณ์ชุดนี้ คือ นอกจากการจัดชุดอุปกรณ์ให้เป็นอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์ตามที่ได้อธิบายในบทก่อนหน้าแล้ว ยังสามารถจัดให้เป็นอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ตามแบบของไมเคิลสัน ดังรูปที่ 9 โดยใช้อุปกรณ์ชุดเดิม ผลการทดสอบรูปแบบการแทรกสอดของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคิลสันในเบื้องต้นเป็นดังรูปที่ 10 รูปแบบการแทรกสอดดังกล่าวไม่มีลักษณะเป็นวงแหวนมืด-สว่าง เนื่องจากเส้นทางเดินแสงยังไม่อยู่ที่แนวแกนกลางเชิงทัศนศาสตร์ของระบบ ซึ่งหากมีการวางจัดอุปกรณ์ได้ดี ก็จะได้รูปแบบการแทรกสอดที่เป็นวงแหวนตามที่ต้องการจะเป็น

การใช้งานอุปกรณ์นี้ในเชิงของชุดสาธิตการเรียนรู้อุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ของแสง สามารถนำไปใช้ในรายวิชา เช่น ฟิสิกส์ในชั้นปีที่ 1 ซึ่งคาดว่าจะช่วยให้นักศึกษาได้เห็นรูปแบบการแทรกสอดที่เกิดขึ้น ทำให้มี

ประสบการณ์โดยตรงต่อปรากฏการณ์เชิงทัศนศาสตร์ที่เกิดขึ้นนอกเหนือไปจากการเห็นเพียงในตำรา อันจะนำไปสู่ความเข้าใจที่ดีขึ้นของนักศึกษาต่อไป



รูปที่ 9 การจัดอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ให้เป็นอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคิลสัน



รูปที่ 10 แถบมืด-สว่างบนฉากรับภาพ ซึ่งเกิดจากการแทรกสอดเมื่อแสงเดินทางผ่านอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคิลสัน

เอกสารอ้างอิง

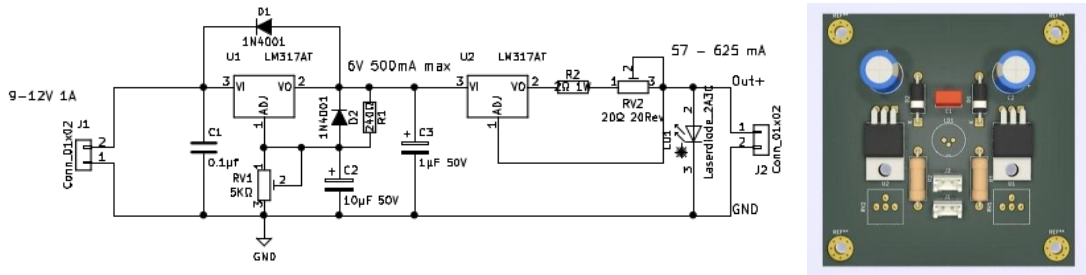
1. J. Hodgkinson, R. Smith, W. O. Ho, J. R. Saffell, and R. P. Tatam, “Non-dispersive infrared (NDIR) measurement of carbon dioxide at 4.2 μm in a compact and optically efficient sensor”, *Sens. Actu. B* 186, 580-588 (2013).
2. A. Gall, A. A. Pascal, B. Robert, “Vibrational techniques applied to photosynthesis: Resonance Raman and fluorescence line-narrowing”, *Biochimica et Biophysica Acta*. 1847, 12–18 (2015).
3. L. G. A. van de Water, G. L. Bezemer, J. A. Bergwerff, M. Versluijs-Helder, B. M. Weckhuysen, K. P. de Jong, “Spatially resolved UV–vis microspectroscopy on the preparation of alumina-supported Co Fischer–Tropsch catalysts: Linking activity to Co distribution and speciation”, *J. Catalysis* 242, 287–298 (2006).
4. G. Rozas, B. Jusserand, and A. Fainstein, “Fabry-Pérot-multichannel spectrometer tandem for ultra-high resolution Raman spectroscopy”, *Rev. Sci. Instrum.* 85, 013103 (2014).
5. B. K. Nowakowski, D. T. Smith, and S. T. Smith, “Highly compact fiber Fabry-Perot interferometer: A new instrument design”, *Rev. Sci. Instrum.* 87, 115102 (2016)
6. J. Thorstensen, K. H. Haugholt, A. Ferber, K. A. H. Bakke, J. Tschudi, “Low-cost resonant cavity Raman gas probe for multi-gas detection”, *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public.* 9, 14054 (2014).
7. R. Keiner, T. Frosch, T. Massad, S. Trumbore, and J. Popp, “Enhanced Raman multigas sensing – a novel tool for control and analysis of ^{13}C labeling experiments in environmental research”, *Analyst*. 139, 3879 (2014)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. วงจรอิเล็กทรอนิกส์

วงจรถับเลเซอร์ (Laser driver)

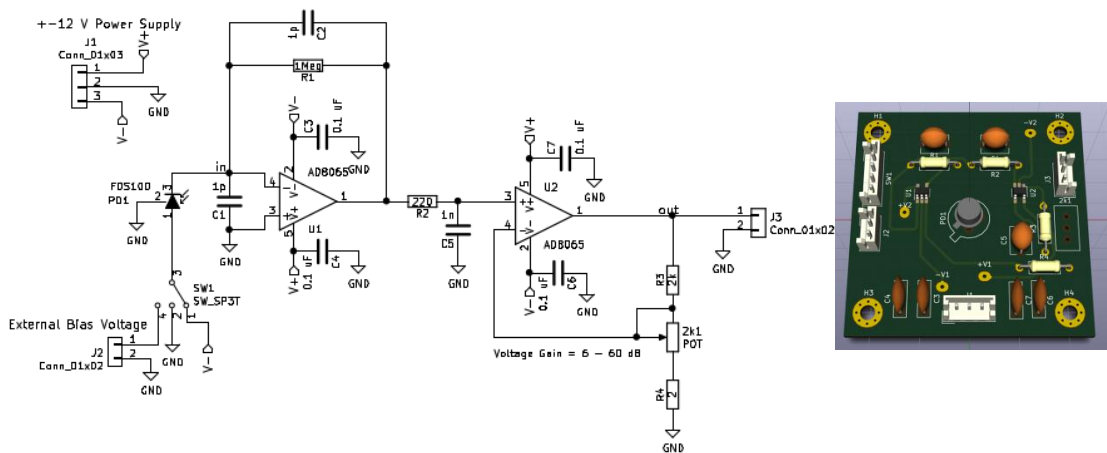
วงจรถับเลเซอร์ในโครงการนี้ ถูกออกแบบโดยใช้ไอซีหรือวงจรรวมสำหรับรักษาแรงดัน (IC regulator) เบอร์ LM317 จำนวน 2 ตัว โดยไอซีตัวแรก ถูกออกแบบให้เป็นแหล่งจ่ายไฟตรงรักษาแรงดันซึ่งสามารถปรับค่าได้ 6 – 12 โวลต์ ส่วนไอซีตัวที่สองถูกจัดวงจรให้เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ 60 – 600 มิลลิแอมป์ สำหรับขับเลเซอร์ไดโอด ผังและอุปกรณ์ของวงจรถับเลเซอร์ต้นแบบ แสดงไว้ในรูป ก1



รูปที่ ก1 แสดงแผนผังวงจรต้นแบบ (ซ้าย) และการวางอุปกรณ์ในวงจรถับเลเซอร์ (ขวา)

วงจรถ้าสำหรับการตรวจวัดความเข้มแสง (Photodetector)

วงจรถ้าสำหรับการตรวจวัดความเข้มแสงในโครงการนี้ ถูกออกแบบโดยใช้ไอซีออปแอมป์ (Op-Amp) เบอร์ AD8065 จำนวน 2 ตัว ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่วัดได้จากโฟโตไดโอด ไอซีตัวแรกทำหน้าที่เป็นวงจรถ้า transimpedance ที่จะเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กที่เกิดเมื่อแสงตกกระทบกับโฟโตไดโอด ให้เปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้า และจะถูกขยายสัญญาณเพิ่มเติมในวงจรส่วนที่สอง

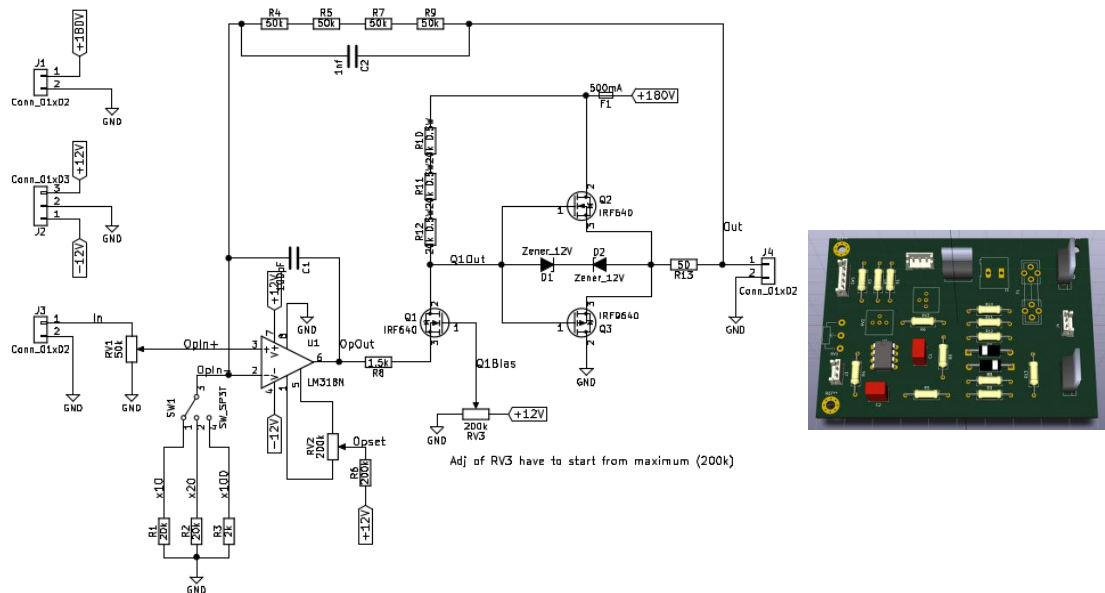


รูปที่ ก2 แสดงแผนผังวงจรต้นแบบ (ซ้าย) และการวางอุปกรณ์ในวงจรถ้าตรวจวัดความเข้มแสง (ขวา)

โดยวงจรในส่วนแรกนี้จะมีสวิทช์สำหรับเลือกการไบอัสโพโตไดโอดได้ แรงดันที่เกิดจากวงจรส่วนแรก จะถูกขยายสัญญาณให้มีขนาดเพิ่มขึ้นโดยวงจรที่สอง ที่ถูกออกแบบให้สามารถปรับกำลังขยายได้ สัญญาณที่ได้จะปรากฏเป็นสัญญาณขาออกเพื่อนำไปแสดงผลด้วยออสซิลโลสโคปหรือใช้งานอื่นๆ ต่อไป ผังและส่วนประกอบของวงจรตรวจวัดความเข้มแสงต้นแบบ แสดงไว้ในรูป ก2

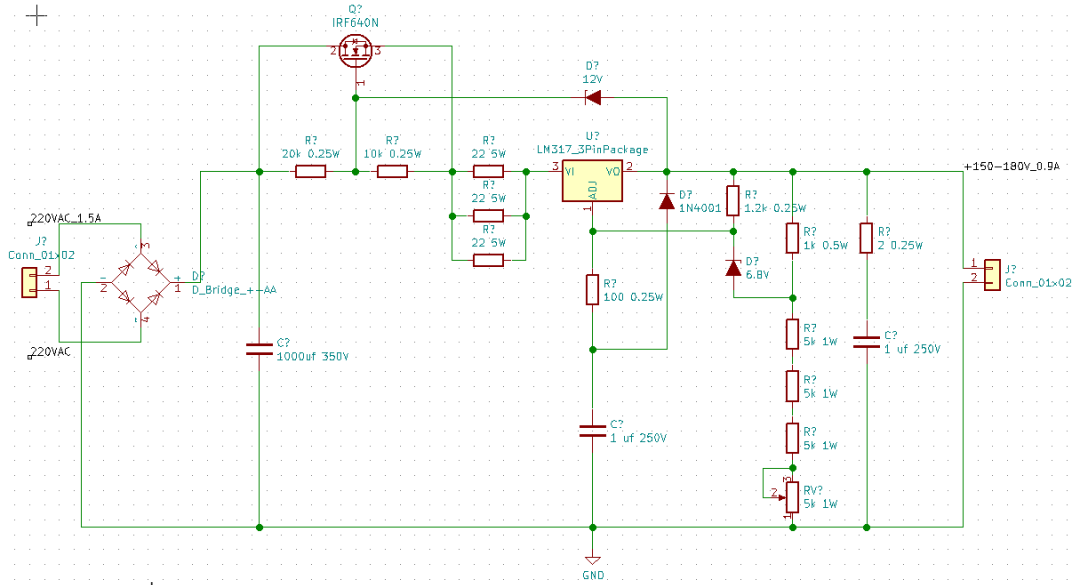
วงจรขับตัวแปลงเพียโซ (Piezodriver)

วงจรขับตัวแปลงเพียโซ เป็นวงจรขยายสัญญาณรูปสามเหลี่ยม จากสัญญาณที่ป้อนขนาด 1 – 10 โวลต์ ให้เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีแรงดันขนาดสูงสุด 150 โวลต์ ซึ่งผังและอุปกรณ์ประกอบของวงจรต้นแบบ แสดงไว้ในรูปที่ ก3 ตัววงจรมีสวิทช์เลือกอัตราการขยายสัญญาณได้ 3 ระดับ คือ $\times 10$, $\times 20$ และ $\times 100$ เท่า ส่วนต้นของวงจรจะมีไอซีเบอร์ 741 ควบคุมอัตราการขยายและเสถียรภาพของการขยายแรงดัน ซึ่งสัญญาณจากไอซีจะถูกขยายทั้งแรงดันและกระแสโดยชุดมอสเฟต IRF640 และ IRF9640 ให้มีรูปร่าง (waveform) เหมือนกับสัญญาณที่ป้อนเข้าไป สัญญาณที่ได้จะถูกนำไปใช้ขับตัวแปลงเพียโซสำหรับการสแกนอินเตอร์เพียโรมิเตอร์



รูปที่ ก3 แสดงแผนผังวงจรต้นแบบ (ซ้าย) และการวางอุปกรณ์ในวงจรขับตัวแปลงเพียโซ (ขวา)

เพื่อให้วงจรขับตัวแปลงเพียโซ สามารถจ่ายสัญญาณขนาด 150 โวลต์ได้ ในวงจรจะต้องมีแหล่งจ่ายไฟตรงขนาด 180 โวลต์ เป็นส่วนประกอบ ซึ่งในโครงการได้มีการออกแบบวงจรรักษาแรงดันปรับค่าได้ขนาด 150 – 180 โวลต์ 1 แอมป์เพื่อป้อนให้กับวงจรขับตัวแปลงเพียโซ วงจรต้นแบบนี้ถูกออกแบบโดยใช้ไอซีรักษาแรงดันปรับค่าได้ เบอร์ LM317 เป็นพื้นฐาน โดยผังและอุปกรณ์ประกอบของวงจรรักษาแรงดันปรับค่าได้ต้นแบบ แสดงไว้ในรูป ก4



รูปที่ ก4 แสดงแผนผังวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรขับตัวแปลงเพียโซ

ภาคผนวก ข. การดำเนินงานที่ผ่านมา

ผลการดำเนินงานในช่วง 6 เดือน

รายการส่วนประกอบที่อยู่ระหว่างการสร้าง

รายการ	ภาพอุปกรณ์	หมายเหตุ/ข้อมูลเพิ่มเติม
ฐานอุปกรณ์ทดลอง (optical bed)		แล้วเสร็จประมาณ 90%
ตัวจับยึดกระฉาก		แล้วเสร็จประมาณ 80% รอตัวจับยึดกระฉากที่ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ
เพปรี-เพอร์ต์		แล้วเสร็จ 60% รอเพียโซอิเล็กทริกที่ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ
รายการอุปกรณ์ ที่อยู่ระหว่างการ จัดซื้อจาก ต่างประเทศ		อยู่ระหว่างการจัดซื้อ ซึ่งใช้เวลามากกว่า แผนที่วางไว้ ทำให้เกิดความล่าช้าของ โครงการ 2-3 เดือน

แผนดำเนินงานในช่วง 6 เดือนหลัง

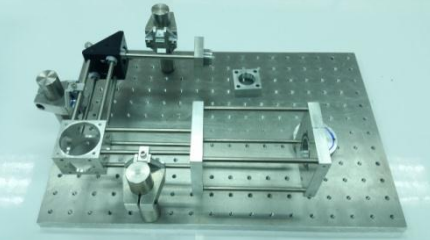
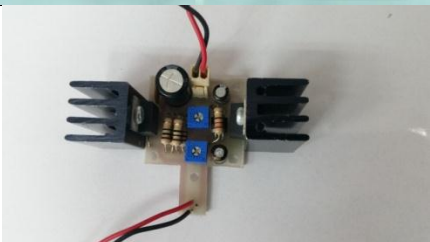
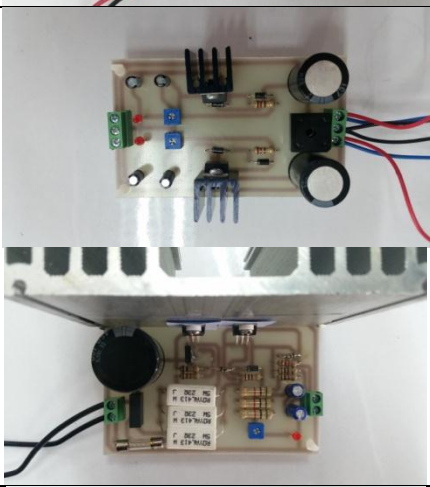
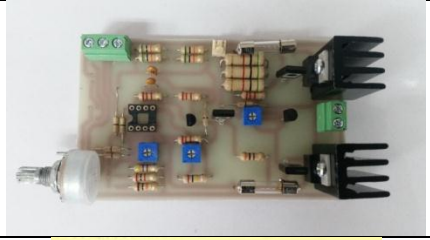
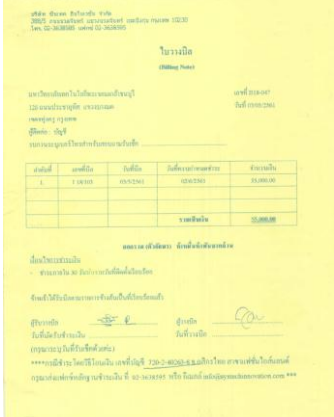
1. การประกอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับขับเลเซอร์ สำหรับขับตัวแปลงเพียโซ และสำหรับขยายสัญญาณจากโฟโตไดโอด โดยวงจรทั้งหมดได้รับการออกแบบ ซึ่งในขั้นต่อไป คือ การนำแบบมาสร้างเป็นอุปกรณ์และทดสอบอุปกรณ์เหล่านั้น
2. การประกอบมาตรวัดแสงเพรี-เปโรต์
3. การออกแบบและสร้างส่วนตัวจับยึดเลเซอร์
4. การออกแบบและสร้างส่วนตัวจับยึดโฟโตไดโอด
5. การติดตั้งส่วนประกอบทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นระบบทดลองดังภาพที่ 3
6. การทดลองหาค่าวิสัยของเครื่องมือ

ปัญหาและอุปสรรคการดำเนินงาน

การดำเนินงานในช่วง 6 เดือนแรกมีปัญหาความล่าช้าจากการสั่งอุปกรณ์จากต่างประเทศ ทำให้การประกอบอุปกรณ์ไม่เป็นไปตามแผน นอกจากนี้เนื่องด้วย มจร. ราชบุรีมีการเรียนการสอนเฉพาะระดับชั้นปีที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นชั้นปีพื้นฐาน การหานักศึกษาที่มีทักษะและความสามารถเพียงพอเพื่อร่วมดำเนินงานในโครงการวิจัยนี้ จึงทำได้ค่อนข้างยาก นักวิจัยจึงต้องทำงานทั้งหมดของโครงการด้วยตนเอง ส่งผลให้เกิดความล่าช้าของแผนงานทั้งหมดไปประมาณ 2 เดือนจากแผนเดิม

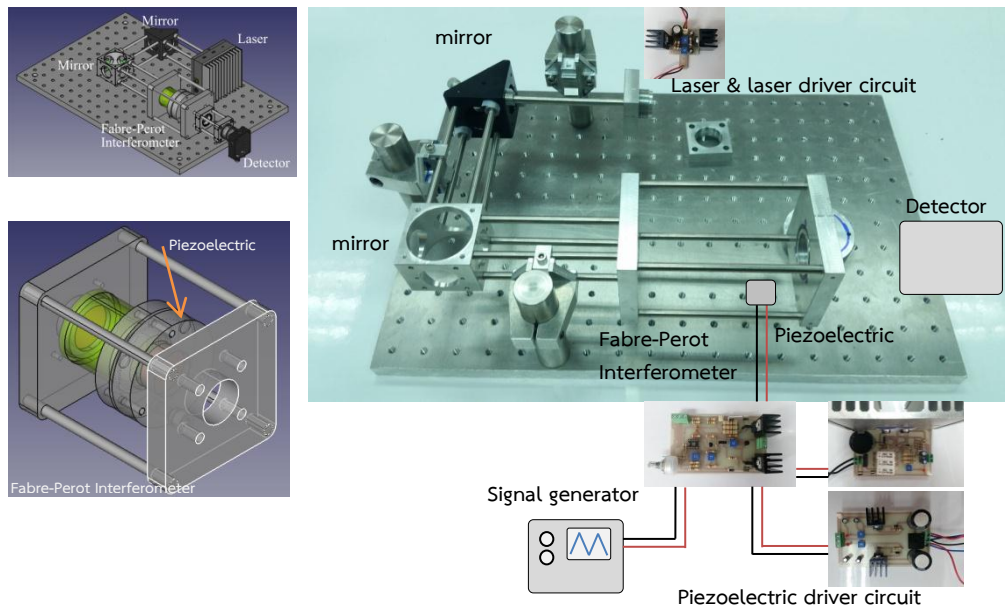
ผลการดำเนินงานในช่วง 12 เดือน

รายการส่วนประกอบที่อยู่ระหว่างการสร้างและทดสอบ

รายการ	ภาพอุปกรณ์	หมายเหตุ/ข้อมูลเพิ่มเติม
ระบบทางเดินแสง		แล้วเสร็จประมาณ 80%
วงจรควบคุมการทำงานของเลเซอร์		แล้วเสร็จประมาณ 90% รอการทดสอบกับชุดเลเซอร์ ซึ่งนำเข้ามาจากต่างประเทศ และ ประกอบเข้ากับระบบทางเดินแสง
ชุดแหล่งจ่ายไฟ (power supply) สำหรับวงจรขับเพียโซ (±12 โวลต์ และ +180 โวลต์)		แล้วเสร็จ 95% วงจรผ่านการทดสอบและสามารถ ใช้งานได้จริง รอการประกอบเพื่อเป็น วงจรขับเพียโซอิเล็กทรอนิกส์
วงจรขยายสัญญาณและขับเพียโซอิเล็กทรอนิกส์		แล้วเสร็จ 90% รอการทดสอบและประกอบเป็นวงจร ขับเพียโซอิเล็กทรอนิกส์
มีการส่งมอบอุปกรณ์ที่สั่งซื้อจากต่างประเทศเมื่อวันที่ 3 พ.ค. 2561		มีความล่าช้าจากกำหนดการเดิมถึง 6 เดือน

แผนดำเนินงานในช่วงขยายเวลา 6 เดือนหลัง

1. ประกอบและทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
 - a. วงจรเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์
 - b. วงจรขับตัวแปลงเพียโซ
2. สร้างและทดสอบวงจรถยายสัญญาณโฟโตไดโอด
3. การออกแบบและสร้างส่วนตัวจับยึดโฟโตไดโอด
4. การประกอบมาตรวัดแสงเพรี-เปโรต์
5. การติดตั้งส่วนประกอบทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นระบบทดลองดังรูปที่ ข1



รูปที่ ข1 แสดงส่วนประกอบทั้งหมดของระบบทดลอง

6. การทดลองหาค่าวิสัยของเครื่องมือ

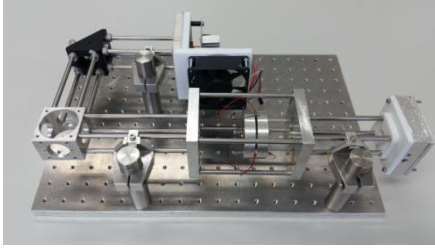
ปัญหาและอุปสรรคการดำเนินงาน

การดำเนินงานในช่วง 12 เดือน มีปัญหาความล่าช้าจากการสั่งอุปกรณ์จากต่างประเทศ ทำให้การประกอบอุปกรณ์ไม่เป็นไปตามแผน โดยการส่งมอบอุปกรณ์ที่สั่งซื้อและต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ล่าช้าไปจากกำหนดการเดิมถึง 6 เดือน และเนื่องจากไม่ทราบขนาดจริงของตัวอุปกรณ์ที่จะต้องติดตั้งในระบบทางเดินแสง การสร้างชิ้นส่วนในระบบทางเดินแสง เช่น ตัวจับยึดอุปกรณ์ต่างๆ จึงต้องหยุดดำเนินการ และจะสามารถดำเนินการต่อได้เมื่อได้วัดขนาดของอุปกรณ์ต่างๆ เรียบร้อยแล้ว

นอกจากนี้เนื่องด้วย มจธ. ราชบุรีมีการเรียนการสอนเฉพาะระดับชั้นปีที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นชั้นปีพื้นฐาน การหา นักศึกษาที่มีทักษะและความสามารถเพียงพอเพื่อร่วมดำเนินงานในโครงการวิจัยนี้ จึงทำได้ค่อนข้างยาก นักวิจัย จึงต้องทำงานทั้งหมดของโครงการด้วยตนเอง ส่งผลให้เกิดความล่าช้าของแผนงานทั้งหมดไปอีกประมาณ 6 เดือนจากแผนเดิม

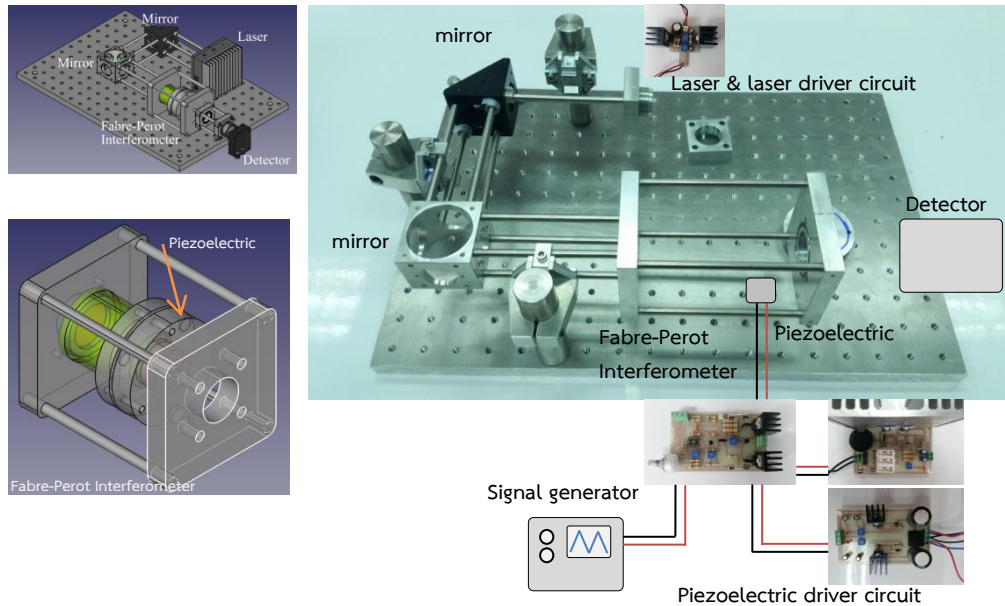
ผลการดำเนินงานในช่วง 18 เดือน

รายการส่วนประกอบที่อยู่ระหว่างการสร้างและทดสอบ

รายการ	ภาพอุปกรณ์	หมายเหตุ/ข้อมูลเพิ่มเติม
ระบบทางเดินแสงและอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเพบริ-เพโรต์		แล้วเสร็จประมาณ 90% โดยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดได้รับการประกอบทดสอบและพร้อมใช้งาน ขั้นตอนต่อไปคือการจัดวาง (alignment) อุปกรณ์แสงให้ถูกต้อง และดำเนินการหาพิสัยของเครื่องมือต่อไป

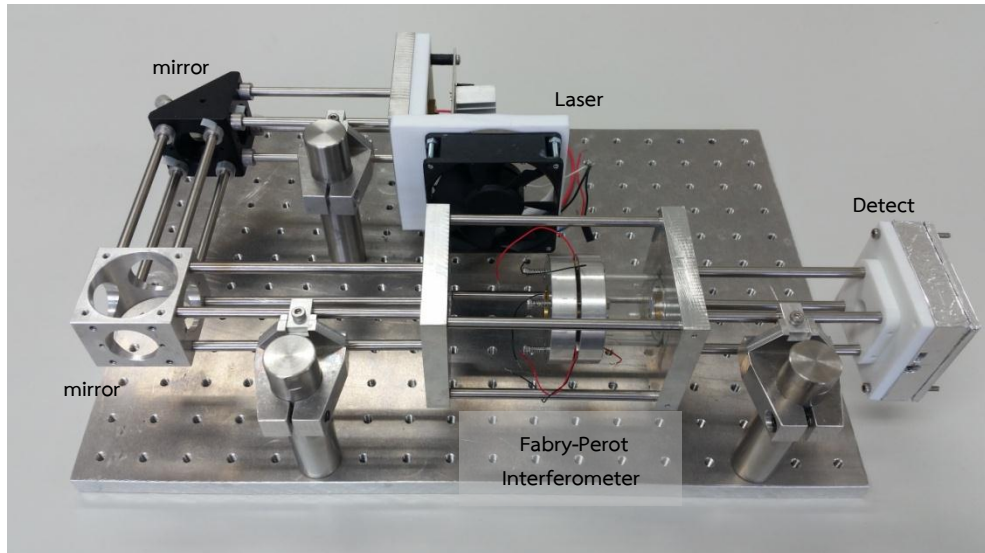
แผนดำเนินงานในช่วงขยายเวลา 6 เดือน

- เป้าหมายของแผนการดำเนินงานในช่วง 6 เดือนที่ผ่านมา คือ การประกอบมาตรวัดแสงเพบริ-เพโรต์ และติดตั้งส่วนประกอบทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นระบบทดลองดังรูปที่ ข2



รูปที่ 5 แสดงส่วนประกอบทั้งหมดของระบบทดลองตามแผนงาน

- การประกอบและติดตั้งชุดทดลองมาตรวัดแสงที่ได้ดำเนินการในช่วง 6 เดือนที่ผ่านมา มีผลเป็นไปตาม รูปที่ ข2 โดยจะต้องมีการจัดวางตำแหน่ง (alignment) ของอุปกรณ์ทั้งหมดให้ถูกต้องเพื่อให้ลำแสงเลเซอร์เดินทางเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจวัด



รูปที่ ข3 แสดงส่วนประกอบของระบบทดลองที่แล้วเสร็จในช่วงขยายเวลา 6 เดือน

- เมื่อชุดทดลองได้รับการจัดวางถูกต้องแล้ว จะเป็นการทดลองหาค่าวิสัยของมาตรวัดแสง

ปัญหาและอุปสรรคการดำเนินงาน

การดำเนินงานในช่วง 18 เดือน มีการปรับชุดเครื่องมือเพื่อให้เข้ากันได้กับอุปกรณ์ที่ได้มีการนำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งผลจากปัญหาความล่าช้าจากการนำเข้าอุปกรณ์ จึงส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการประกอบชุดเครื่องมือตามมา

นอกจากนี้เนื่องด้วย มจร. ราชบุรีมีการเรียนการสอนเฉพาะระดับชั้นปีที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นชั้นปีพื้นฐาน การหานักศึกษาที่มีทักษะและความสามารถเพียงพอเพื่อร่วมดำเนินงานในโครงการวิจัยนี้ จึงทำได้ค่อนข้างยาก นักวิจัยจึงต้องทำงานทั้งหมดของโครงการด้วยตนเอง ส่งผลให้เกิดความล่าช้าของแผนงานทั้งหมดไปอีกประมาณ 6 เดือนจากแผนเดิม