



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ชุดทดลองสเปกโตรมิเตอร์ขนาดเล็กที่มีความแม่นยำสูงด้วยวิธีการการแทรกสอดใน  
พิสัยสนามใกล้

(A compact spectrometer with high precision based on the near-field  
interference techniques)

รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ เดชะปัญญา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้

(เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๑

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ: ๖๗๙๑๓๙

สัญญาเลขที่ ๒๒๔/๒๕๖๑

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ชุดทดลองสเปกโตรมิเตอร์ขนาดเล็กที่มีความแม่นยำสูงด้วยวิธีการการแทรกสอดใน  
พิสัยสนามใกล้

(A compact spectrometer with high precision based on the near-field  
interference techniques)

รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ เดชะปัญญา

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)  
ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๑ มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ  
เลขที่สัญญา ๒๒๔/๒๕๖๑

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา และสร้างเครื่องสเปกโตรมิเตอร์บนพื้นฐานอินเตอร์เฟียร์อเมเตอร์สนามใกล้ของทาลบอท ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แบบสนามใกล้ จึงทำให้ขนาดของสเปกโตรมิเตอร์มีขนาดเล็กได้ และมีความแม่นยำที่สูง โดยแผนในปีที่ 1 จะศึกษาองค์ความรู้ของการทดสอบปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์ในพิสัยใกล้คืออินเตอร์เฟียร์อเมเตอร์ของทาลบอท และได้ความรู้พื้นฐานในการสร้างสเปกโตรมิเตอร์นี้ ในส่วนงานของปีที่ 2 จะสร้างชุดต้นแบบเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ในระดับห้องปฏิบัติการ และระดับภาคสนามต่อไป

## Abstract

This research is the study and construction of spectrometer based on the Talbot near-field Interferometry which is one of the near-field optics. Therefore, this spectrometer can be comparatively small and also reasonably high accuracy. In the first year of research, we will study the base knowledge of optical near-field effect, i.e. Talbot interferometry. In the second year, we will construct the lab prototype of this spectrometer as well as the field prototype.

สารบัญเรื่อง

| หัวข้อ  | หน้า |
|---|------|
| บทนำ  | 8    |
| ความสำคัญและสรุปความเป็นมาของโครงการฯ                   | 8    |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย                                 | 8    |
| ขอบเขตของการวิจัย                                       | 9    |
| การสำรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง                             | 9    |
| ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง                                      | 13   |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                               | 14   |
| แผนดำเนินการวิจัย                                       | 15   |
| วิธีการดำเนินการวิจัย                                   | 17   |
| ผลการวิจัย และอภิปรายผลการวิจัย                         | 17   |
| การศึกษาองค์ประกอบต่างๆที่ใช้สร้างสเปกโตรมิเตอร์        | 17   |
| การสร้างและการวิเคราะห์เกรตติง                          | 18   |
| การวัดคาบของเกรตติงที่มีความแม่นยำสูง                   | 19   |
| การศึกษาวอร์เท็กซ์ของแสงสำหรับเพิ่มความละเอียดของการวัด | 21   |
| สรุปและเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยในขั้นตอนต่อไป           | 22   |
| ผลผลิต  | 22   |
| รายงานการเงิน   | 23   |
| เอกสารอ้างอิง   | 25   |
| ประวัตินักวิจัยและคณะ พร้อมหน่วยงานสังกัด               | 29   |

สารบัญตาราง

| ตารางที่                         | หน้า |
|----------------------------------|------|
| ตารางที่ 1 รายละเอียดแผนงานวิจัย | 15   |
| ตารางที่ 2 รายงานการเงิน         | 23   |

สารบัญภาพ

| ภาพที่   | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 1 ปรากฏการณ์ของทาร์บอท  | 10   |
| รูปที่ 2 a) ปรากฏการณ์ทาร์บอท โดยใช้คลื่นระนาบเป็นแหล่งกำเนิดแสง b) ชุดทดลองปรากฏการณ์ทาร์บอท ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร เกรตติง และกล้อง CCD ซึ่งสามารถเลื่อนตำแหน่งได้ c) แบบจำลองลดทอนของแสง d) ผลการทดลองลดทอนของแสงที่ได้จากชุดทดลองในข้อ b) โดยแกน แสดงคาบของริ้วรอยการแทรกสอด และแกน แสดงระยะจากเกรตติงถึงกล้อง CCD (Case et al., 2009) | 11   |
| รูปที่ 3 แสดงกราฟที่มีลักษณะเป็นหน้าคลื่นทรงกลมแผ่มาในแนวแกน z ตกกระทบเกรตติงที่ตำแหน่ง $z=0$ และเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงไปตกกระทบบนฉากที่ระยะ $z$ ใดๆ เกิดริ้วการแทรกสอดตามแนวแกน x   | 13   |
| รูปที่ 4 กราฟการคำนวณความเข้มแสงกับความยาวคลื่นสามค่าคือ 370 nm 532 nm และ 700 nm ซึ่งเป็นตัวอย่างการคำนวณจากการใช้เกรตติงที่มีคาบ $d = 100 \mu m$ อัตราส่วนระหว่างช่องเปิดของเกรตติงต่อคาบ $f = 0.1$ และสลิตเดี่ยวด้านหน้าตัวตรวจจับแสงมีขนาด $a = 25 \mu m$  | 18   |
| รูปที่ 5 ริ้วรอยการแทรกสอดของปรากฏการณ์ทาลบอทจากเกรตติงที่สร้างขึ้นจะได้ว่าขนาดของช่องเปิด (a) จะสอดคล้องกับขนาดของแถบสว่างที่ได้ซึ่งเท่ากับ $23 \mu m$ และขนาดของระยะระหว่างช่องเปิด (d) จะสอดคล้องกับระยะระหว่างแถบสว่างซึ่งมีค่าเท่ากับ $100 \mu m$   | 19   |
| รูปที่ 6 ชุดทดลองการวัดคาบของเกรตติง   | 20   |
| รูปที่ 7 ความเข้มแสงที่สแกนตามขวางของเกรตติง G1 ซึ่งแสดงการหาคาบ (d) และขนาดของช่องเปิดของเกรตติงได้ (a)   | 21   |

## บทนำ (Introduction)

### ความสำคัญและสรุปความเป็นมาของโครงการฯ

ปรากฏการณ์การแทรกสอดแบบพิสัยใกล้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นและวัดได้ที่ระยะระหว่างอุปกรณ์เลี้ยวเบนแสงเช่น เกรตติง และฉากรับภาพมีระยะสั้น โดยปกติอยู่ระหว่าง มิลลิเมตรจนถึงเซนติเมตร การเลี้ยวเบนหรือการแทรกสอดของคลื่นในพิสัยสนามใกล้นี้จะอธิบายด้วยทฤษฎีของเฟรสเนล (Fresnel diffraction) ตัวอย่างเช่นปรากฏการณ์ทาร์บอท (Talbot) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่รื้อรอยการแทรกสอดที่เหมือนเกรตติง (self-imaging) จะเกิดขึ้นที่ระยะหลังเกรตติงเท่ากับระยะเฉพาะที่เรียกว่าระยะทาร์บอท (Talbot length,  $L_T$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $L_T = \frac{d^2}{\lambda}$  โดยที่  $d$  คือคาบของเกรตติง (grating period) และ  $\lambda$  คือความยาวคลื่นแสงที่ใช้ การศึกษาที่สำคัญของปรากฏการณ์การแทรกสอดแบบพิสัยสนามใกล้นี้ เช่นการสร้างลวดลายที่เรียกว่า Quantum Carpets ลวดลายนี้สามารถสร้างได้จากปรากฏการณ์เศษส่วนทาร์บอท (Fractional Talbot effect) (Case, 2009) เนื่องจากปรากฏการณ์แทรกสอดแบบสนามใกล้มีความไวต่อสิ่งรบกวนภายนอกสูง ซึ่งคณะผู้วิจัยมีความเชี่ยวชาญและทำวิจัยโดยใช้ปรากฏการณ์นี้มามากกว่าสิบปี ได้มีแนวความคิดที่จะใช้ปรากฏการณ์นี้ในการสร้างเครื่องแยกสเปกตรัมของแสง หรือสเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer) ในพิสัยที่มีความแม่นยำสูงมาก ซึ่งเครื่องมือที่สร้างขึ้นจะมีขนาดเล็กเนื่องจากเป็นปรากฏการณ์สนามใกล้ และจะใช้อุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน จึงสามารถพกพาไปใช้ทดสอบนอกห้องปฏิบัติการได้ โดยปกติสเปกโตรมิเตอร์ที่มีขายทั่วไปโดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการของอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์แบบสนามไกลซึ่งทำให้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์มีขนาดใหญ่ แต่วิธีการที่ใช้สร้างสเปกโตรมิเตอร์ในโครงการวิจัยจะทำให้สเปกโตรมิเตอร์มีขนาดเล็กกว่า จึงสามารถนำไปวัดกับต้นกำเนิดแสงที่มีความเข้มน้อยมากได้ และรวมถึงสามารถวัดได้ละเอียดสูงกว่ามากด้วย โดยเป้าหมายที่จะสร้างจะมีความแม่นยำถึง 0.1 นาโนเมตร แผนการดำเนินงานของคณะผู้วิจัยจะนำสเปกโตรมิเตอร์ที่สร้างขึ้นในการทดสอบทั้งจากสารตัวอย่างทั้งจากสาขาฟิสิกส์ และสาขาเคมี รวมถึงสาขาที่เกี่ยวข้อง นอกจากนั้นคณะผู้วิจัยมีแผนที่จะสร้างสเปกโตรมิเตอร์ที่สามารถพกพา (portable spectrometer) ได้ต่อไป

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐาน และคำนวณจำลองการแทรกสอดสนามใกล้ของทาร์บอทเพื่อนำมาสร้างสเปกโตรมิเตอร์
2. เพื่อสร้างชุดทดลองสเปกโตรมิเตอร์โดยวิธีการ Near-field Talbot effect ให้มีขนาดเล็ก มีความแม่นยำ และความละเอียดถึง 0.1 นาโนเมตร ด้วยวิธีการที่ไม่ซับซ้อน



3. พัฒนาโปรแกรมใช้งานกับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อผู้ใช้งานง่าย
4. พัฒนาชุดทดลองสเปกโตรมิเตอร์โดยวิธีการ Near-field Talbot effect นี้ในเชิงพาณิชย์

### ขอบเขตของการวิจัย

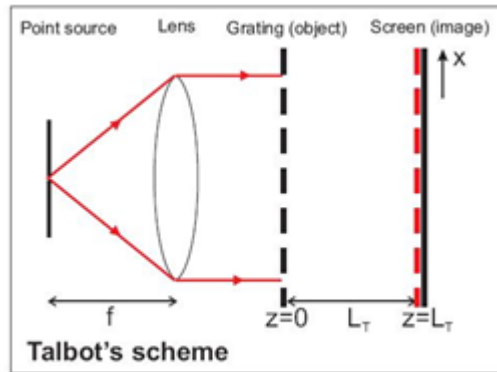
งานวิจัยนี้จะทำการศึกษแบ่งเป็นสองเฟส โดยในเฟสแรกเป็นการศึกษาเชิงทฤษฎีที่จำเป็นของปรากฏการณ์สนามใกล้ของทาร์บอทเพื่อนำไปใช้ในการสร้างสเปกโตรมิเตอร์ที่มีความแม่นยำสูง โดยในเฟสที่สองจะทำการสร้างสเปกโตรมิเตอร์ตามที่คำนวณได้ในเฟสที่หนึ่ง และจะต้องสร้างเกรตติงที่จะใช้ในงานขึ้นมาตามที่ได้คำนวณในเบื้องต้น ซึ่งสเปกโตรมิเตอร์ที่สร้างขึ้นจะทำการสอบเทียบจากเลเซอร์ที่มีความแม่นยำสูงในห้องปฏิบัติการ และจะทำการทดสอบวัดจากสารตัวอย่างจริงในขั้นต่อไป

### การสำรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง (literatures review)

การเลี้ยวเบนของแสงเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางผ่านสิ่งกีดขวาง ตัวอย่างเช่น สลิตเดี่ยว (single slit) หรือ สลิตคู่ (double slit) หลังจากแสงเลี้ยวเบนผ่านสิ่งกีดขวางแล้วคลื่นแสงจะแทรกสอดกันทำให้ปรากฏีรัวรอยแทรกสอดขึ้น สำหรับการเลี้ยวเบนของแสงนั้นสามารถแบ่งได้เป็นหลักๆ สองประเภท คือ การเลี้ยวเบนแบบสนามใกล้ (near-field) และสนามไกล (far-field)

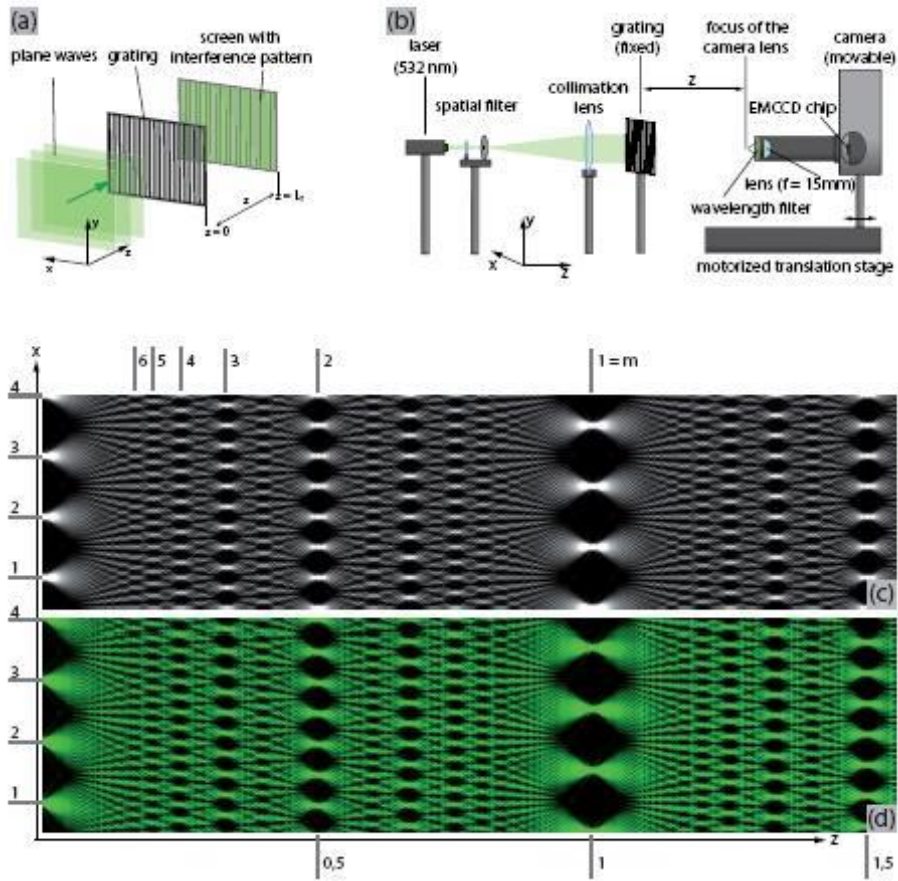
การเลี้ยวเบนแบบสนามไกล สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer theory) ตัวอย่างที่สำคัญคือ การทดลองสลิตคู่ของยัง (Young double-slit experiment) ซึ่งมีการใช้ในสาขาวิชาทัศนศาสตร์ ทั้งแบบแผนเดิม (Classical optics) และทัศนศาสตร์ควอนตัม (Quantum optics) ตัวอย่างของการเลี้ยวเบนแบบสนามไกลที่ซับซ้อนขึ้น เช่นอินเตอร์เฟียร์อเมเตอร์ของมัค-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder interferometer) เป็นต้น

ปรากฏการณ์ของทาร์บอท (Talbot effect) ซึ่งค้นพบโดยทาร์บอท ในปี 1836 (Talbot, 1836) เป็นตัวอย่างของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนแบบสนามใกล้ ซึ่งมีการอธิบายด้วยการเลี้ยวเบนแบบเฟรสเนล (Fresnel diffraction) ปรากฏการณ์ของทาร์บอทจะเกิดขึ้นเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ เช่นเลเซอร์เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงและไปแทรกสอดกันที่ระยะทาร์บอท  $L_T$  ภาพรัวรอยแทรกสอดที่เกิดขึ้น (รูปที่ 1) จะมีขนาดเท่ากับเกรตติงทุกประการ (self-imaging) ในกรณีทั่วไปยังสามารถสังเกตภาพรัวรอยการแทรกสอดที่ระยะอัตราส่วนของระยะทาร์บอท (fractional Talbot effect) ได้เช่นกัน แต่รัวรอยแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กกว่าเกรตติงและซับซ้อนกว่าด้วย



รูปที่ 1 ปรากฏการณ์ของทาร์บอท

การทดลองการเลี้ยวเบนแบบสนามใกล้เคียงนี้ มีการทำวิจัยอย่างแพร่หลายทั้งในส่วนของทฤษฎี และการทดลอง ฟิสิกส์มูลฐาน และการประยุกต์ใช้ จากทั้งหมดมีการทดลองที่น่าสนใจ และสำคัญอันหนึ่งคือ การสร้างลวดลายที่เรียกว่า ลวดลายพรมควอนตัม (quantum carpets) หรือ ลวดลายพรมของแสง (carpets of light) (Berry *et al.*, 2001) (รูปที่ 2) ปรากฏการณ์ของทาร์บอท และทาร์บอท-เลา ยังถูกใช้ในการทดลองกับอะตอมในโดเมนของพิกัด (Berman, 1997; Chapman *et al.*, 1995; Clauser *et al.*, 1994; Nowak *et al.*, 1997) โดเมนของเวลา (Ryu *et al.*, 2006) และกับโมเลกุล (Brezger *et al.*, 2002; Gerlich *et al.*, 2007)



รูปที่ 2 a) ปราบกฎการรบกวนทาร์บอท โดยใช้คลื่นระนาบเป็นแหล่งกำเนิดแสง b) ชุดทดลองปราบกฎการรบกวนทาร์บอท ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร เกรตติง และกล้อง CCD ซึ่งสามารถเลื่อนตำแหน่งได้ c) แบบจำลองลดทลายพรมของแสง d) ผลการทดลองลดทลายพรมของแสงที่ได้จากชุดทดลองในข้อ b) โดยแกน  $x$  แสดงคาบของรีวรอยการแทรกสอด และแกน  $z$  แสดงระยะจากเกรตติงถึงกล้อง CCD (Case *et al.*, 2009)

ปราบกฎการรบกวนการเลี้ยวเบนแบบสนามไกล่ได้ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยหลากหลายสาขา ตัวอย่างเช่น ในทางการแพทย์มีการนำไปใช้กับการถ่ายภาพร่วมกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอ็กซ์ (Pfeiffer *et al.*, 2006) ทำให้ได้ภาพมีความคมชัดขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเฟสที่แตกต่างกัน นอกจากการประยุกต์ใช้ดังที่กล่าวไปข้างต้นนี้จนถึงปัจจุบันยังมีการนำไปใช้อีกมากมาย ตัวอย่างเช่น การวัดระยะทางที่แม่นยำ (Spagnolo *et al.*, 2002) การวัดดัชนีหักเหของสสารที่มีความแม่นยำสูง (Bhattacharya, 1989) การทำสเปกโตรสโคปี (Nicola, *et al.*,

2004) การวัดการสั่นสะเทือนของวัตถุใดๆ (Quan *et al.*, 2006) การวัดความยาวโฟกัสของเลนส์ (Nakano, *et al.*, 1984) เป็นต้น

การพิสูจน์ และการทดลองทฤษฎีทวิภาพของอนุภาคตามแนวความคิดของเดอบรอยล์ (Louis de Broglie) นี้ได้มีการพิสูจน์โดยใช้การแทรกสอดสนามใกล้ทำตามลำดับจากโฟตอนเดี่ยว (Deachapunya, 2016) อิเล็กตรอน (Davisson & Germer, 1927) นิวตรอน (Summhammer *et al.*, 1983) และ อะตอม (Estermann & Stern, 1930; Chapman *et al.*, 1995; Clauser *et al.*, 1994) การทดลองกับอนุภาคที่มีมวลมากขึ้นได้ถูกทดลองอย่างต่อเนื่อง ไฮลิ่งเงอร์ (Anton Zeilinger) และ อานท์ (Markus Arndt) ได้ทำการทดลองการเลี้ยวเบนของคลื่นสสารโดยใช้โมเลกุลของ  $C_{70}$  กับชุดทดลองอินเตอร์เฟียรอมิเตอร์ของทาร์บอท-เลา (Brezger *et al.*, 2002) หลังจากนั้น อานท์ และคณะได้ทำการทดลองอย่างต่อเนื่องโดยเพิ่มมวล และความซับซ้อนของโมเลกุลจนถึงโมเลกุลในกลุ่ม azobenzenes (Gerlich *et al.*, 2007) ซึ่งเป็นโมเลกุล หรืออนุภาคที่ซับซ้อนมาก นอกจากการใช้ในงานวิจัยพื้นฐานดังที่กล่าวไปแล้วนั้น ยังมีการนำมาใช้วัดค่าความสามารถในการแยกขั้ว (Polarizability) ของโมเลกุล เช่น  $C_{60}$   $C_{70}$  (Berninger *et al.*, 2007) TPP และ FeCl(TPP) (Deachapunya *et al.*, 2007) เป็นต้น

ในส่วนงานของคณะผู้วิจัยได้มีการใช้ปรากฏการณ์ของทาร์บอทในงานวิจัยทั้งทัศนศาสตร์ประยุกต์ และ ทัศนศาสตร์ควอนตัมตัวอย่างเช่น การวัดเชิงทัศนศาสตร์ (Deachapunya, 2014a) การศึกษา optical vortex (Panthong, 2016) การสร้างแลตทิซทางแสง (Deachapunya, 2014b) การวิจัยกับโฟตอนเดี่ยว (Deachapunya, 2016) และโมเลกุล (Juffmann, 2009) เป็นต้น

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจะเห็นว่า การแทรกสอดสนามใกล้มีการใช้ประโยชน์มากมายในงานวิจัยดังนี้ คณะผู้วิจัยซึ่งมีความเชี่ยวชาญในสาขานี้เป็นอย่างมาก ได้มีแนวความคิดที่จะใช้ในการประยุกต์สร้างเครื่องมือคือ เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ขนาดเล็กที่มีความแม่นยำสูง และสามารถพกพาได้ดังที่กล่าวไปแล้ว ซึ่งคณะผู้วิจัยจะพัฒนาเครื่องสเปกโตรมิเตอร์โดยแนววิธีแบบใหม่ที่ไม่มียกก่อนจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำชุดต้นแบบไปพัฒนาเชิงพาณิชย์ต่อไปได้ โดยจะเน้นไปที่สร้างเครื่องมือที่ใช้ได้จริงและทดสอบในงานวิจัยที่ต้องการใช้จริง โดยมีคู่มือการใช้งานเครื่องอย่างสมบูรณ์

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปรากฏการณ์ทาร์บอทเป็นปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงแบบพิสัยใกล้ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีของเฟรสเนล ตัวอย่างเช่น ในกรณีแสงเลี้ยวเบนผ่านเกรตติง สมมติให้แสงลำขนานความยาวคลื่น  $\lambda$  แผ่ในแนวแกน  $z$  โดยตกกระทบเกรตติงที่  $z = 0$  ถ้าระนาบของเกรตติงอยู่ในแนวแกน  $x$  พังชั้นคลื่นแสงในส่วนที่ไม่ขึ้นกับเวลาหรือเฉพาะในส่วนของตำแหน่ง ที่ลอดผ่านสู่อีกด้านของเกรตติง จะสามารถถูกแทนให้อยู่ของอนุกรมได้เป็น

$$\psi(x_0, z=0) = \sum_n A_n \exp\{ik_d x_0\} \quad (1)$$

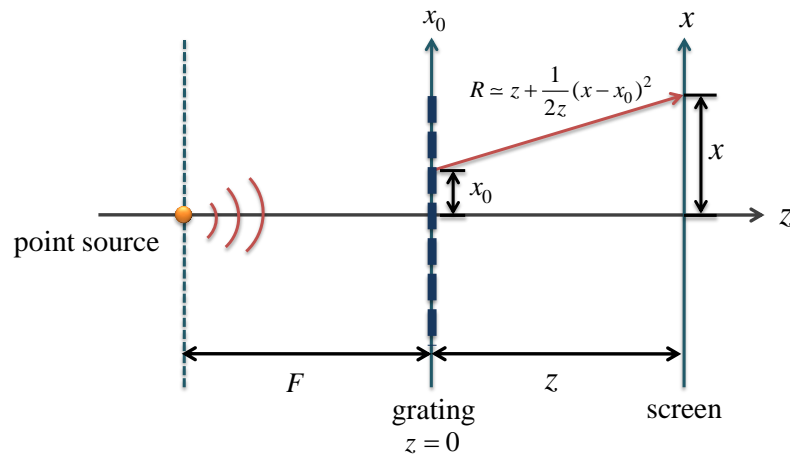
เมื่อ  $k_d = 2\pi/d$  โดย  $d$  คือคาบของเกรตติง และ  $A_n$  แสดงถึงค่าองค์ประกอบย่อยฟูเรียร์อันเนื่องมาจากลักษณะความเป็นคาบของเกรตติงซึ่งมีค่าเป็น

$$A_0 = f \text{ และ } A_n = \frac{\sin(n\pi f)}{n\pi} \text{ สำหรับที่ } n \neq 0 \quad (2)$$

เมื่อ  $f$  เป็นค่าอัตราส่วนช่องเปิดต่อคาบของเกรตติง (Case et al., 2009) แต่ในกรณีที่แสงตกกระทบมีลักษณะเป็นหน้าคลื่นทรงกลม และความเข้มแสงมีการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน จะได้พังชั้นคลื่นในสมการที่ (1) อยู่ในรูป (Deachapunya, 2016)

$$\psi'(x_0, z=0) = \sum_n A_n \exp\{ik_d x_0\} \exp\{-i x_0^2 / 2F\} \quad (3)$$

เมื่อ  $F$  ในที่นี้คือระยะห่างตามรัศมีจากจุดต้นกำเนิดแสงถึงเกรตติงซึ่งสอดคล้องกับการกระจายของแสงลำขนานที่หักเหผ่านเลนส์เว้าทางยาวโฟกัส  $F$  ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสงตกกระทบมีลักษณะเป็นหน้าคลื่นทรงกลมแผ่มาในแนวแกน  $z$

ตกกระทบเกรตติงที่ตำแหน่ง  $z=0$  และเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงไปตก

กระทบบนฉากที่ระยะ  $z$  ใดๆ เกิดรบกวนการแทรกสอดตามแนวแกน  $x$

เมื่อแสงเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงที่ตำแหน่ง  $z$  ใดๆ หรือหลังเกรตติง จะสามารถหาฟังก์ชันคลื่นจากระนาบตามแนวแกน  $x_0$  ไปสู่ระนาบ  $x$  บนฉากรับแสง (รูปที่ 3) ได้ด้วยการใช้ปริพันธ์ของฮอยเกนส์-เฟรสเนล (Huygens-Fresnel integral)

$$\Psi(x, z) = \sqrt{\frac{i}{\lambda z}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda} \left(z + \frac{1}{2z}(x-x_0)^2\right)\right\} \psi'(x_0, z=0) dx_0 \quad (4)$$

จากฟังก์ชันคลื่น  $\psi'(x_0, z=0)$  ตามสมการที่ (3) จะสามารถคำนวณปริพันธ์ในสมการที่ (4) ได้อย่างแม่นยำ และได้รัวรอยของแสงบนฉากรับของความเข้มแสงจากค่าสัมบูรณ์ของฟังก์ชันคลื่นเป็น

$$\Psi^* \Psi = C \sum_{n,m} A_n A_m \exp\left\{\frac{2\pi i(n-m)x}{d(1+z/F)} + \frac{i\pi(n^2-m^2)z}{L_T(1+z/F)}\right\} \quad (5)$$

เมื่อ  $C$  เป็นค่าคงที่ซึ่งสามารถละทิ้งได้เนื่องจากไม่ส่งผลต่อรูปแบบการกระจายตัวของความเข้มแสง และระยะทาร์บอท  $L_T = d^2/\lambda$  ในกรณีของปรากฏการณ์ทาร์บอทของแสงลำขนาน หรือ  $F \rightarrow \infty$  จะพบว่าเมื่อระยะ  $z$  มีค่าเท่ากับเลขจำนวนเต็มของ  $L_T$  หรือได้สมการที่ (5) เป็น

$$\lim_{F \rightarrow \infty} \Psi^* \Psi \Big|_{z=NL_T} = C \sum_{n,m} A_n A_m \exp\left\{\frac{2\pi i(n-m)x}{d} + i\pi(n^2-m^2)N\right\} \quad (6)$$

จะได้ภาพรัวรอยแทรกสอดที่มีรูปแบบหรือขนาดเท่ากับเกรตติงทุกประการ (self-imaging) ซึ่งสังเกตได้จากพจน์  $2\pi x/d$

จากสมการที่ (5) จะเห็นได้ว่า หน้าคลื่นแบบทรงกลมหรือตัวแปรระยะ  $F$  และความยาวคลื่นรวมไปถึงคาบของเกรตติง จะส่งผลกระทบต่อรัวรอยการแทรกสอด กล่าวคือ ประการที่หนึ่ง คาบของรัวรอยที่ระยะทาร์บอทจะเปลี่ยนแปลงตามระยะแนวแกน  $z$  ตามพจน์  $2\pi x/d(1+z/F)$  ประการที่สอง ระยะทาร์บอทเดิมหรือ  $L_T$  จะถูกเปลี่ยนแปลงด้วยแฟคเตอร์  $(1+z/F)$  ด้วยเหตุนี้ ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว แสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันก็จะให้รัวรอยการแทรกสอดที่มีรูปแบบแตกต่างกันบนฉากรับ โดยจะเกิดภาพขยายของเกรตติงที่ระยะ  $z$  ที่แตกต่างกัน

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ต้องการความรู้ใหม่ในการตรวจสอบ และอธิบายปรากฏการณ์ของทาร์บอท การศึกษาที่ได้จะเป็นพื้นฐานเพื่อนำไปสร้างเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่มีความไว ความแม่นยำและละเอียดสูง รวมถึงชุดทดลองมีขนาดเล็กกะทัดรัดพกพาได้ นอกจากนั้นผลที่ได้หลังจากเสร็จสิ้นงานวิจัยคือชุดต้นแบบ การตีพิมพ์ผลงานวิจัย และบุคลากรในระดับปริญญาโท และปริญญาเอก การนำผลงานวิจัยที่ได้ไปใช้ประโยชน์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้ง







### วิธีการดำเนินการวิจัยในปีที่ 1 (research methodology)

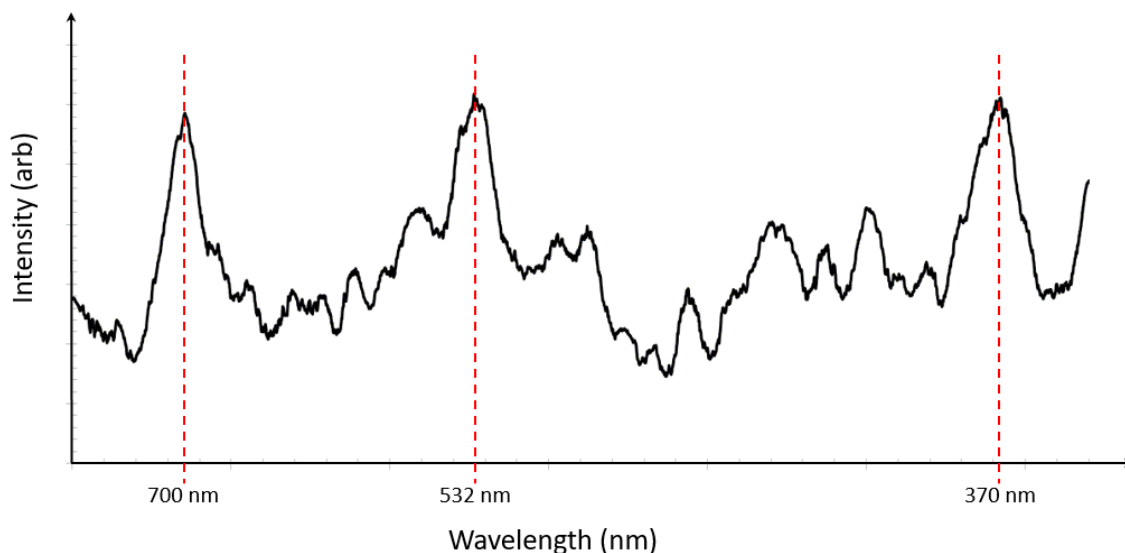
1. วางแผนเตรียมงาน ออกแบบ และสืบค้นข้อมูล
2. ศึกษาทฤษฎี และคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างชุดทดลอง
3. ออกแบบ และสร้างเกรตติงเฉพาะที่มีค่าอัตราส่วนช่องเปิดต่อคาบที่เหมาะสม (ความร่วมมือกับภาควิชาฟิสิกส์ และดาราศาสตร์ โรงเรียนกำเนิดวิทย์)
4. วัดค่าคาบของเกรตติงให้ได้ความละเอียดสูง
5. สรุปรายงานวิจัยของปีที่ 1

### ผลการวิจัย และอภิปรายผลการวิจัย

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้เป็นรายงานของแผนการวิจัยของปีที่ 1 ซึ่งแบ่งผลงานวิจัยเป็นส่วนต่างๆตามแผนงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้ คือการศึกษาปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์สนามใกล้ของทาลบอทพร้อมทั้งคำนวณตัวแปรและองค์ประกอบต่างๆที่จะใช้สร้างสเปกโตรมิเตอร์ การสร้างและการวิเคราะห์เกรตติงที่จะใช้ การวัดค่าคาบของเกรตติง นอกจากนี้ผู้วิจัยได้มีการศึกษาเพิ่มเติมจากโครงการวิจัย คือการศึกษาวอร์เท็กซ์ของแสงสำหรับเพิ่มความละเอียดของการวัดในอนาคต

#### 1. การศึกษาองค์ประกอบต่างๆที่จะใช้สร้างสเปกโตรมิเตอร์

ในส่วนงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยการคำนวณจากทฤษฎีของปรากฏการณ์สนามใกล้ของทาลบอทจากสมการที่ (6) ในหัวข้อทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะให้ความเข้มแสงซึ่งสามารถนำไปคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสเปกโตรมิเตอร์ โดยทางผู้วิจัยได้ศึกษาหลายเงื่อนไขจนได้ผลสรุปเงื่อนไขที่ดีและเหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้างสเปกโตรมิเตอร์ในรุ่นที่ 1 ดังเช่นแสดงดังรูปที่ 4

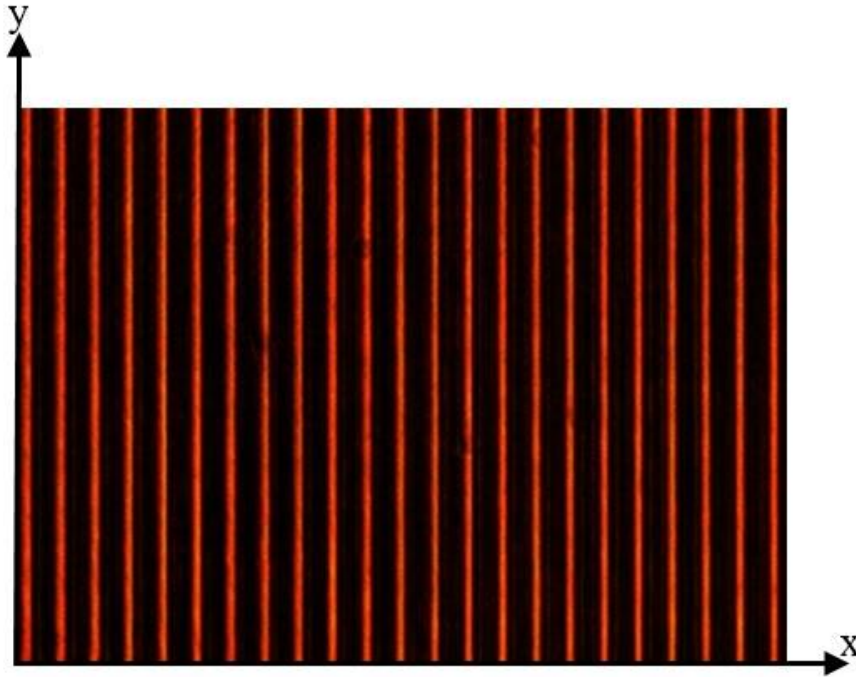


**รูปที่ 4** กราฟการคำนวณความเข้มแสงกับความยาวคลื่นสามค่าคือ 370 nm 532 nm และ 700 nm ซึ่งเป็นตัวอย่างการคำนวณจากการใช้เกรตติงที่มีคาบ  $d = 100 \mu\text{m}$  อัตราส่วนระหว่างช่องเปิดของเกรตติงต่อคาบ  $f = 0.1$  และสลิตเดี่ยวด้านหน้าตัวตรวจจับแสงมีขนาด  $a = 25 \mu\text{m}$

จากผลการคำนวณดังรูปที่ 4 จะเห็นว่าชุดสเปกโตรมิเตอร์ที่ออกแบบสามารถแยกแสงที่เข้ามาซึ่งมีความยาวคลื่นต่างกันสามค่าคือ 370 nm 532 nm และ 700 nm อย่างชัดเจน โดยการคำนวณใช้เกรตติงที่มีคาบ  $d = 100 \mu\text{m}$  อัตราส่วนระหว่างช่องเปิดของเกรตติงต่อคาบ  $f = 0.1$  และสลิตเดี่ยวที่ติดตั้งด้านหน้าตัวตรวจจับแสงที่มีขนาดช่องเปิด  $a = 25 \mu\text{m}$  เพื่อจำกัดความเข้มแสงที่เข้าตัวตรวจจับแสง ขั้นตอนต่อไปของงานวิจัยคือการสร้างสเปกโตรมิเตอร์ตามเงื่อนไขดังกล่าวนี้

## 2. การสร้างและการวิเคราะห์เกรตติง

ในหัวข้อนี้ได้ทำการสร้างเกรตติงที่จะนำมาใช้ในการสร้างสเปกโตรมิเตอร์ด้วยวิธีอินเตอร์เฟียรอมิเตอร์สนามใกล้ของทาลบอทโดยการสร้างเกรตติงจะทำโดยใช้หัวเจาะของเครื่อง CNC (HAAS TM1P CNC milling machine) ในการกรีดรอยเกรตติงตามขนาดช่องเปิด และระยะระหว่างช่องเปิดที่ต้องการตามข้อกำหนดของเครื่อง CNC ดังกล่าว (ในส่วนของงานนี้ได้รับความร่วมมือจาก ดร. มิญช์ เมธิ์สุวกุล จากโรงเรียนกำเนิดวิทย์) และหลังจากได้เกรตติงแล้วจะทำการวิเคราะห์ขนาดช่องเปิด (a) และระยะระหว่างช่องเปิด (d) ของเกรตติงด้วยปรากฏการณ์ของทาลบอทเช่นกันโดยได้ผลการทดลองวีร่อยการแทรกสอดของเกรตติงที่สร้างขึ้นดังรูปที่ (5)



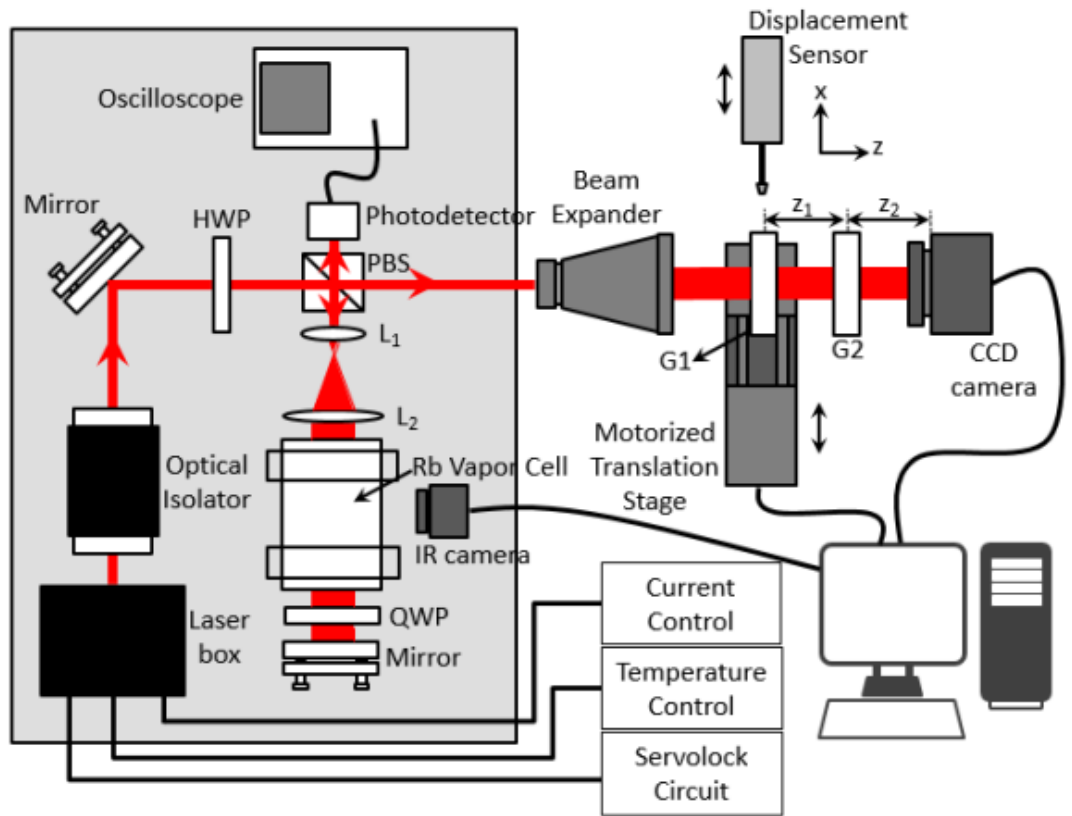
รูปที่ 5 ร้อยการแทรกสอดของปรากฏการณ์ทาลบอทจากเกรตติงที่สร้างขึ้นจะได้ว่าขนาดของช่องเปิด (a) จะสอดคล้องกับขนาดของแถบสว่างที่ได้ซึ่งเท่ากับ  $23 \mu\text{m}$  และขนาดของระยะระหว่างช่องเปิด (d) จะสอดคล้องกับระยะระหว่างแถบสว่างซึ่งมีค่าเท่ากับ  $100 \mu\text{m}$

จากผลการสร้างเกรตติงที่ได้จะเห็นว่าได้เกรตติงที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างช่องเปิดต่อระยะระหว่างช่องเปิด ( $f=a/d$ ) เท่ากับ 0.23 ซึ่งถ้านำเกรตติงชนิดนี้จะไม่สมมาตรนี้จะได้ความละเอียดของเครื่องมือวัดได้ดีขึ้นกว่าเกรตติงแบบสมมาตร ( $f=0.5$ ) ซึ่งในงานวิจัยในส่วนนี้จะต้องดำเนินการต่อไปในการทำให้  $f = 0.1$  และจะใช้เกรตติงชนิดที่ไม่สมมาตรในงานขั้นต่อไป (งานวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์ที่ Thanarwut Photia, Min Medhisuwakul, Wipawee Temnuch, Sorakrai Srisuphaphon, and Sarayut Deachapunya\*, Journal of Physics: Conference Series, Accepted (Q3, H index 59))

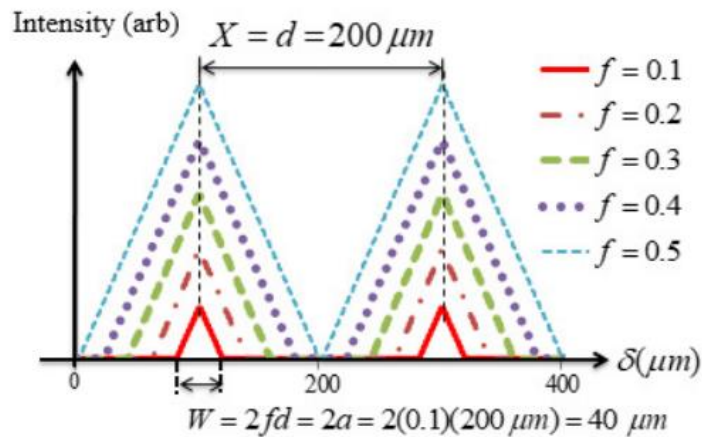
### 3. การวัดคาบของเกรตติงที่มีความแม่นยำสูง

การใช้งานเกรตติงในงานวิจัยจำเป็นที่จะต้องรู้ค่าที่แม่นยำของคาบของเกรตติง (d) รวมถึงอัตราส่วนระหว่างช่องเปิดและคาบของเกรตติง (f) ผลการทดลองส่วนนี้เป็นการออกแบบชุดทดลองเพื่อวัดเกรตติงดังกล่าว ดังรูปที่ 6 โดยชุดทดลองประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่รู้ค่าที่แม่นยำจากการล็อกความถี่กับเซลล์

รูปีเดียม (Rb vapor cell) หลังจากล็อกความถี่แล้วแสงที่ออกมาจะถูกขยายลำแสงด้วยตัวขยายลำแสง (Beam expander) เพื่อให้แสงครอบคลุมเกรตติงที่จะวัดคาบของเกรตติง (G1) โดยเกรตติงอยู่บนมอเตอร์ที่เลื่อนตามขวางได้เพื่อใช้ในการเลื่อนให้ได้การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงตามขวาง เกรตติงที่สอง (G2) ใช้เป็นหน้าฉากเพื่อบังแสงในการเลื่อนมอเตอร์ตามขวางดังกล่าว เครื่องมือวัดระยะทาง (Displacement sensor) ใช้ในการวัดตำแหน่งที่แม่นยำของเกรตติง G1 จากวิธีการนี้สามารถหาค่าคาบของเกรตติงได้จากระยะระหว่างค่าความเข้มสูงสุดที่ใกล้กันที่สุด และขนาดของช่องเปิดของเกรตติงหาได้จากครึ่งหนึ่งของระยะระหว่างจุดต่ำสุดของความเข้ม แสงแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ชุดทดลองการวัดคาบของเกรตติง



รูปที่ 7 ความเข้มแสงที่สแกนตามขวางของเกรตติง G1 ซึ่งแสดงการหาคาบ (d) และขนาดของช่องเปิดของเกรตติงได้ (a)

ผลการทดลองการวัดคาบของเกรตติงนี้อยู่ระหว่างส่งตีพิมพ์ Thanarwut Photia, Wipawee Temnuch, Sorakrai Srisuphaphon, Nuttanan Tanasanchai, Waranont Anukool, Kunaree Wongrach, Pachara Manit, Surasak Chiangga, **Sarayut Deachapunya\***, High-precision grating period measurement, Applied Optics submitted (2018).

#### 4. การศึกษาวอร์เท็กซ์ของแสงสำหรับเพิ่มความละเอียดของการวัด

การวิจัยในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาการสร้างวอร์เท็กซ์ของแสง และรวมถึงการวัดวอร์เท็กซ์ของแสงโดยใช้ปรากฏการณ์การแทรกสอดสนามใกล้ของทาลบอทเช่นกัน โดยรายละเอียดแสดงอยู่ในงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ Pituk Panthong, Sorakrai Srisuphaphon, Surasak Chiangga, **Sarayut Deachapunya\***, High-contrast optical vortex detection using the Talbot effect, Applied Optics 57(7), 1657-1661 (2018) (impact factor: 1.791, Q2, H index 170).

ซึ่งงานนี้จะป็นงานในอนาคตซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าสเปกโตรมิเตอร์ที่สร้างขึ้นจะมีความละเอียดแม่นยำขึ้นถ้าใช้แสงที่เป็นวอร์เท็กซ์แทนที่แสงเลเซอร์ตามปกติทั่วไป ซึ่งคณะผู้วิจัยจะทำวิจัยต่อไปในอนาคต

## สรุปและเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยในขั้นต่อไป

หลังจากเสร็จสิ้นงานวิจัยในแผนงานวิจัยในปีที่ 1 ในส่วนงานของปีที่ 2 ผู้วิจัยจะทำการสร้างสเปกโตรมิเตอร์ด้วยวิธีการทัศนศาสตร์สนามใกล้ของทาลบอทนี้ให้แล้วเสร็จพร้อมทั้งให้ผู้ใช้งานได้ทดสอบใช้ต่อไป

### ผลผลิต (Output)

1. นักศึกษาที่มีความเชี่ยวชาญในการวัดสร้างและใช้สเปกโตรมิเตอร์
2. ตีพิมพ์ผลงานวิจัย ในวารสาร
  - 2.1 Pituk Panthong, Sorakrai Srisuphaphon, Surasak Chiangga, **Sarayut Deachapunya\***, High-contrast optical vortex detection using the Talbot effect, Applied Optics 57(7), 1657-1661 (2018) (impact factor: 1.791, Q2, H index 170).
  - 2.2 Thanarwut Photia, Min Medhisuwakul, Wipawee Temnuch, Sorakrai Srisuphaphon, and **Sarayut Deachapunya\***, Journal of Physics: Conference Series, Accepted (Q3, H index 59)
  - 2.3 Thanarwut Photia, Wipawee Temnuch, Sorakrai Srisuphaphon, Nuttanan Tanasanchai, Waranont Anukool, Kunaree Wongrach, Pachara Manit, Surasak Chiangga, **Sarayut Deachapunya\***, High-precision grating period measurement, Applied Optics submitted (2018).
3. สามารถนำความรู้เพิ่มเติมที่ได้ไปใช้สอนเพิ่มเติมในวิชา 30831159 Optics, และ 308413 Introduction to laser physics

รายงานการเงิน  
สัญญาเลขที่ ๒๒๔/๒๕๖๑

ทุนวิจัยเงินประเภทเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ชื่อโครงการ ชุดทดลองสเปกโตรมิเตอร์ขนาดเล็กที่มีความแม่นยำสูงด้วยวิธีการการแทรกสอดในฟิล์มสนามใกล้

รายงานตั้งแต่วันที่ 1 ต.ค. 2560 ถึง 30 ก.ย. 2561

ระยะเวลาดำเนินการ : 12 เดือน

ตารางที่ 2 รายงานการเงิน

| หมวดงบประมาณ  | ค่าใช้จ่าย                                  | งบประมาณที่ตั้งไว้ | งบประมาณคงเหลือ |
|---|---|--------------------|-----------------|
| 1. หมวดค่าตอบแทน  |   |                    |                 |
| - ค่าตอบแทนนิสิตช่วยงานวิจัย  | -   | -                  | -               |
| - ค่าตอบแทนผู้วิจัย1<br>(รองศาสตราจารย์ ดร. สราวุธ<br>เดชะปัญญา)  | 0   | 40,000             | 40,000          |
| - ค่าตอบแทนผู้วิจัย2<br>(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สรไกร<br>ศรีสุภผล)  | 0   | 20,000             | 20,000          |
| 2. หมวดค่าใช้จ่าย   |   |                    |                 |
| ค่าใช้จ่ายในการเดินทางไปราชการ<br>(ค่าเบี้ยเลี้ยง ค่าเช่าที่พัก ค่าพาหนะ)   | 0   | 10,000             | 10,000          |
| 3. หมวดค่าวัสดุ   |   |                    |                 |
| - เลเซอร์ และระบบควบคุม (สร้าง<br>ขึ้นเอง) ประกอบด้วย Optical<br>elements เช่นกระจก เลนส์<br>อุปกรณ์ยึดจับต่างๆ             | 485,949.76*<br>(รวมงบเลเซอร์<br>และเกรตติง) | 470,000.00         | -15,949.76      |
| - เกรตติง (สร้างขึ้นโดย ภาควิชา<br>ฟิสิกส์ และดาราศาสตร์ โรงเรียน<br>กำเนิดวิทย์ ด้วยความร่วมมือของ<br>ดร.มิญช์ เมธีสุวกุล) |   |                    |                 |

|  |            |         |           |
|--|------------|---------|-----------|
| 4. งบดำเนินการ : ค่าธรรมเนียมอุดหนุน<br>สถาบัน | 54,000     | 60,000  | 6,000     |
| รวมทั้งโครงการ                                 | 539,949.76 | 600,000 | 60,050.24 |

จำนวนเงินคงเหลือ (ตัวอักษร) = .....หกหมื่นห้าสิบบาทยี่สิบสี่สตางค์.....บาท  
พร้อมกันนี้ได้แนบสำเนาใบเสร็จรับเงินค่าใช้จ่ายมาด้วย (ให้ผู้รับทุนเก็บใบเสร็จรับเงินตัวจริงไว้เพื่อรอการ  
ตรวจสอบ)

\_\_\_\_\_  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ เดชะปัญญา)  
หัวหน้าโครงการ

\* มีค่าใช้จ่ายที่นอกเหนือจากใบเสร็จรับเงินคือค่าโอนธนาคารจากการจ่ายเงิน 230 บาท



## เอกสารอ้างอิง

- Case, W. B., Tomand, M., **Deachapunya, S.**, and Arndt, M. (2009). Realization of Optical Carpets in the Talbot and Talbot-Lau Configurations. *Optics Express*, 24(18), 20029.
- Talbot, H. F. (1836). Facts relating to optical science. *Philos. Mag.*, 9, 401–407.
- Berry, M., Marzoli, I., and Schleich, W. (2001). Quantum carpets, carpets of light. *Phys. World*, 14, 1078–1083.
- Berman, Hrsg., P. R. Atom Interferometry (Acad. Press, New York, 1997).
- Chapman, M. S., Ekstrom, C. R., Hammond, T. D., Schmiedmayer, J., Tannian, B. E., Wehinger, S., and Pritchard, D. E. (1995). Near-field imaging of atom diffraction gratings: The atomic Talbot effect. *Phys. Rev. A*, 51, R14–R17.
- Clauser, J. F., and Li, S. (1994). Talbot-vonLau atom interferometry with cold slow potassium. *Phys. Rev. A*, 49, R2213–R2216.
- Nowak, S., Kurtsiefer, Ch., and Pfau, T. (1997). High-order Talbot fringes for atomic matter waves. *Opt. Lett.*, 22, 1430-1432.
- Ryu, C., Andersen, M. F., Vaziri, A., d’Arcy, M. B., Grossman, J. M., Helmerson, K., and Phillips, W.D. (2006). High order quantum resonances observed in a periodically kicked bose-einstein condensate. *Phys. Rev. Lett.*, 96, 160403.1–160403.4.

- Brezger, B., Hackermueller, L., Uttenthaler, S., Petschinka, J., Arndt M., and Zeilinger, A. (2002). Matter-wave interferometer for large molecules. *Phys. Rev. Lett.*, *88*, 100404–100407.
- Gerlich, S., Hackermueller, L., Hornberger, K., Stibor, A., Ulbricht, H., Goldfarb, F., Savas, T., Moeri, M., Mayor, M., and Arndt, M. (2007). A Kapitza-Dirac-Talbot-Lau interferometer for highly polarizable molecules. *Nat. Phys.*, *3*, 711–715.
- Pfeiffer, F., Weitkamp, T., Bunk, O., and David, C. (2006). Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance X-ray sources. *Nat. Phys.*, *2*, 258-261.
- Spagnolo, G. S., Ambrosini, D., and Paoletti, D. (2002). Displacement measurement using the Talbot effect with a Ronchi grating. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, *4*, S376–S380.
- Bhattacharya, J. C. (1989). Measurement of the refractive index using the Talbot effect and a moire technique. *Appl. Opt.*, *28*, 2600-2604.
- Nicola, S. D., Ferraro, P., Coppola, G., Finizio, A., Pierattini, G., and Grilli, S. (2004). Talbot self-image effect in digital holography and its application to spectrometry. *Opt. Lett.*, *29*, 104-106.
- Quan, C., Thakur, M., and Tay, C. J. (2006). Lau phase interferometry with a vibrating object. *Optik*, *117*, 9–14.
- Nakano, Y., and Murata, K. (1984). Measurements of phase objects using the Talbot effect and moire techniques. *Appl. Opt.*, *23*, 2296-2299.
- Davisson, D., and Germer, L. (1927). The scattering of electrons by a single crystal of nickel. *Nature*, *119*, 558.

- Summhammer, J., Badurek, G., Rauch, H., Kischko, U., and Zeilinger, A. (1983). Direct observation of fermion spin superposition by neutron interferometry. *Phys. Rev. A*, 27, 2523.
- Estermann, I., and Stern, O. (1930). Beugung von Molekularstrahlen. *Z. Phys.*, 61, 95–125.
- Berninger, M., Stefanov, A., **Deachapunya, S.**, and Arndt, M. (2007). Polarizability measurements of a molecule via a near-field mater-wave interferometer, *Phys. Rev. A*, 76, 013607-1-013607-4.
- Deachapunya, D.**, Stefanov, A., Berninger, M., Ulbricht, H., Reiger, E., Doltsinis N. L., and Arndt, M. (2007). Thermal and electrical properties of porphyrin derivatives and their relavance for molecule interferometry. *J. Chem. Phys.*, 126, 164304-1-164304-7.
- Deachapunya, S.**, and **Srisuphaphon, S.** (2014a). Sensitivity of transverse shift inside a double-grating Talbot interferometer, *Measurement* 58, 1.
- Panthong, P., **Srisuphaphon, S.**, Pattanaporkratana, A., Chiangga, S., and **Deachapunya, S.** (2016). A study of optical vortices with the Talbot effect, *Journal of Optics* 18(3), 035602.
- Deachapunya, S.**, and **Srisuphaphon, S.** (2014b) *Accordion lattice based on the Talbot effect*, *Chin. Opt. Lett.* 12(3), 031101.
- Deachapunya, S.**, **Srisuphaphon, S.**, Panthong, P., Photia, T., Boonkham, K., and Chiangga, S. (2016). Realization of the single photon Talbot effect with a spatial light modulator. **Optics Express**, 24(18), 20029-20035.

- ୧୪ -

Juffmann, T., Truppe, S., Geyer, P., Major, A. G., **Deachapunya, S.**, Ulbricht, H., and Arndt, M.  
(2009). Wave and particle in molecular interference lithography, *Phys. Rev. Lett.* 103,  
263601.